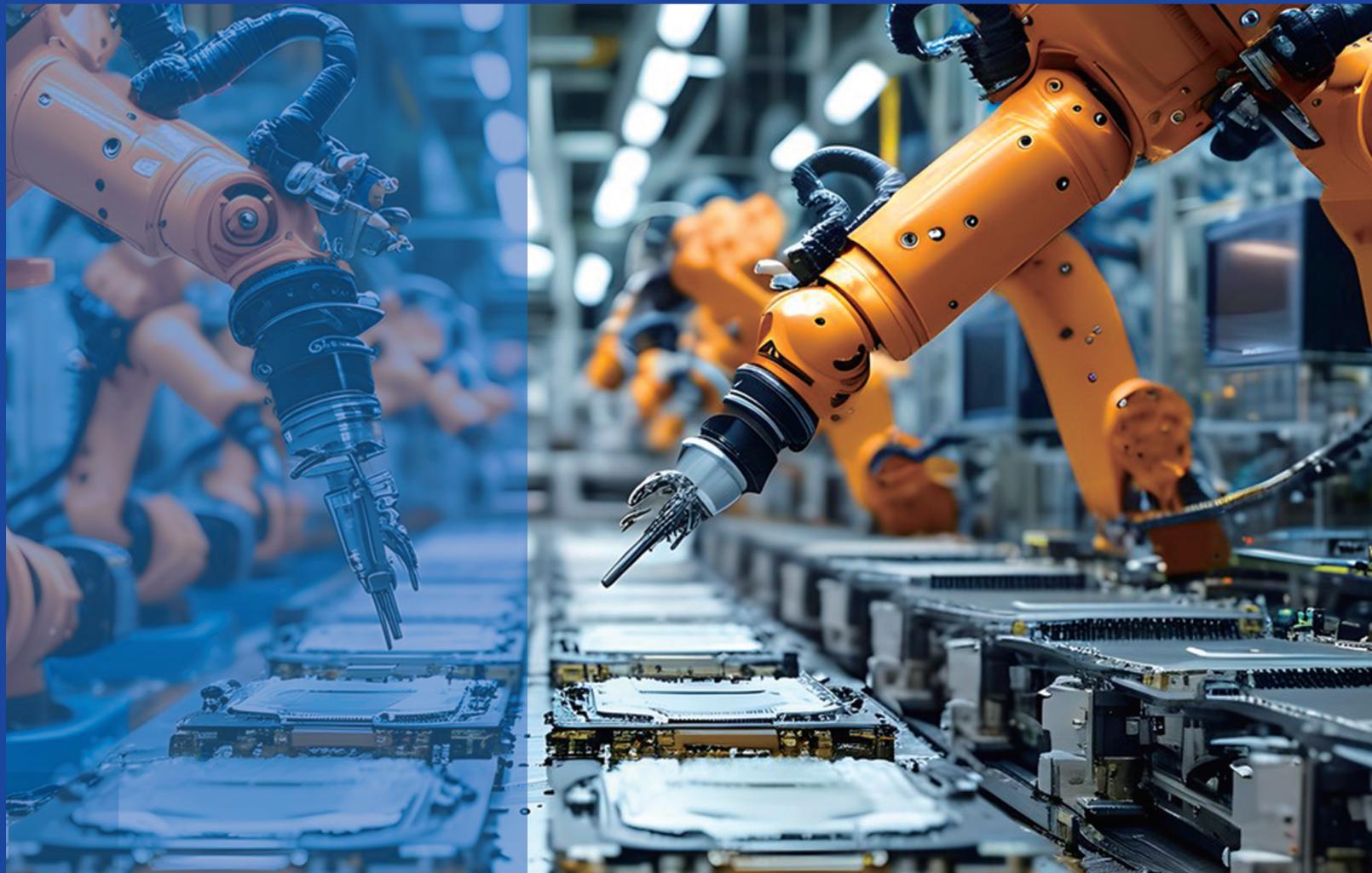


# 现代工业与技术

**Modern Industry and Technology**

Volume 2 • Issue 6 • June 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(Online)



Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.

Tel.: +65 62233839

E-mail: [contact@nassg.org](mailto:contact@nassg.org)

Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



现代工业与技术 Modern Industry and Technology

Volume 2 • issue 6 • June 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(Online)



中文刊名：现代工业与技术  
ISSN：3060-9240（纸质）3060-9259（网络）  
出版语言：华文  
期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>  
出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Modern Industry and Technology  
ISSN: 3060-9240 (Print) 3060-9259 (Online)  
Language: Chinese  
URL: <http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>  
Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

## 《现代工业与技术》征稿函

### 期刊概况：

中文刊名：现代工业与技术  
ISSN: 3060-9240 (Print) 3060-9259 (Online)  
出版语言：华文刊  
期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>  
出版社名称：新加坡南洋科学院

## Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

### 出版格式要求：

- 稿件格式：Microsoft Word
- 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位：国际单位
- 论文出版格式：Adobe PDF
- 参考文献：温哥华体例

### 版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.  
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819  
Email: [info@nassg.org](mailto:info@nassg.org)  
Tel: +65-65881289  
Website: <http://www.nassg.org>



### 出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

### 作者权益：

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

### 评审过程：

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

# 现代工业与技术

Modern Industry and Technology

---

Volume 2·Issue 6· June 2025·ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(online)

## 编委会

### 主 编

蒋 晶 郑州大学

### 编 委

李伟峰	华东理工大学
李 硕	重庆理工大学
李益国	东南大学
高学金	北京工业大学
郭乃信	通力电梯有限公司

- 1 智能制造技术在药食同源产品生产中的应用：以药膳汤品类预制菜为例  
/ 严学迎
- 5 Cr-Ni 复合靶材 PVD 沉积薄膜的颜色多样性及耐腐蚀性协同提升研究  
/ 陈文博
- 9 高效分离技术在化工工艺中的运用思考  
/ 王志栋
- 12 水泥混凝土配合比设计优化  
/ 胡恒轩
- 16 甜叶菊多酚的抗氧化特性及其在油脂类食品保鲜中的应用研究  
/ 徐家显
- 19 石油钻井安全影响因素与防范对策  
/ 郎超
- 22 天然气压气站阀门密封性能提升处理研究  
/ 张明深
- 25 M8 设备改版软长嘴后故障分析和应对措施  
/ 陈卿 仇超 杨淼 王静
- 28 锅炉受热面高温腐蚀机理及防护技术研究  
/ 廉波
- 31 叉车驱动轮安装螺母松动原因及对策  
/ 刘浩
- 34 国内首台 Ansaldo GT36-S5 重型燃气轮机联合循环机组一键启停技术优化与应用  
/ 王超 郑隆云 刘文华 汪可训
- 1 Application of intelligent manufacturing technology in the production of food and medicine homology products: taking pre-prepared dishes of medicinal soup as an example  
/ Xueying Yan
- 5 Study on Synergistic Enhancement of Color Diversity and Corrosion Resistance in Cr-Ni Composite Target PVD Coated Films  
/ Wenbo Chen
- 9 Thoughts on the application of high efficiency separation technology in chemical process  
/ Zhidong Wang
- 12 Optimization of Cement Concrete Mix Proportion Design  
/ Hengxuan Hu
- 16 Antioxidant properties of stevia polyphenols and their application in the preservation of oil foods  
/ Jiaxian Xu
- 19 Factors affecting oil drilling safety and countermeasures  
/ Chao Lang
- 22 Research on the Improvement Treatment of Valve Sealing Performance in Natural Gas Compressor Stations  
/ MingShen Zhang
- 25 Troubleshooting and solutions for M8 device after soft nozzle upgrade  
/ Qing Chen Chao Qiu Miao Yang Jing Wang
- 28 Research on the Mechanism of High-Temperature Corrosion of Boiler Heat Absorbing Surfaces and Protection Technologies  
/ Bo Lian
- 31 Reasons and countermeasures for loose nuts of forklift drive wheels  
/ Hao Liu
- 34 Research and Application of One-Button Start-Stop Technology for the First Ansaldo GT36-S5 Heavy-Duty Gas Turbine Combined Cycle Unit in China  
/ Chao Wang Longyun Zheng Wenhua Liu  
Kexun Wang

# Application of intelligent manufacturing technology in the production of food and medicine homology products: taking pre-prepared dishes of medicinal soup as an example

Xueying Yan

Guangxi City Vocational University, Chongzuo, Guangxi, 532100, China

## Abstract

With the growing health consciousness among people, the concept of "food-medicine compatibility" has become deeply ingrained in public awareness, leading to a rising market demand for pre-packaged medicinal soup dishes. The application of intelligent manufacturing technology in this field presents new opportunities for industrial development. Focusing on pre-packaged medicinal soup dishes as a starting point, this paper provides an in-depth analysis of how intelligent manufacturing technology is applied in producing food-medicine compatible products. It covers aspects such as automated production processes, precise quality control, personalized customization, and supply chain optimization, aiming to provide theoretical support and practical references for promoting high-quality development in the food-medicine compatibility industry.

## Keywords

Intelligent manufacturing technology; Food-medicine compatibility; Medicinal soup dishes; Pre-packaged dishes

# 智能制造技术在药食同源产品生产中的应用：以药膳汤品类预制菜为例

严学迎

广西城市职业大学，中国·广西崇左 532100

## 摘要

随着人们健康意识的提升，药食同源理念深入人心，药膳汤品类预制菜市场需求日益增长。智能制造技术在该领域的应用，为产业发展带来新契机。本文以药膳汤品类预制菜为切入点，深入剖析智能制造技术在药食同源产品生产中的应用，涵盖生产流程自动化、质量精准控制、个性化定制以及供应链优化等方面，旨在为推动药食同源产品产业高质量发展提供理论支撑与实践参考。

## 关键词

智能制造技术；药食同源；药膳汤品；预制菜

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

在大健康时代，消费者对食品的需求从单纯的饱腹转向追求营养、健康与便捷的多元融合。药食同源理念源远流长，众多食材兼具食用价值与药用功效，将其融入现代食品生产，契合当下健康饮食潮流。药膳汤品类预制菜作为药食同源产品的创新形式，既传承了传统药膳养生文化，又借助预制菜的便捷特性，满足了快节奏生活下消费者对健康美食的需求。

智能制造技术作为制造业转型升级的核心驱动力，正

深刻改变着食品行业格局。在药食同源产品生产中引入智能制造技术，对推动产业标准化、规模化、现代化发展意义重大。通过研究智能制造技术在药膳汤品类预制菜生产中的应用，能为行业提供可借鉴的技术路径与管理模式，促进药食同源产品产业可持续发展。

### 1.2 国内外研究现状

国外在食品工业智能制造应用方面起步早，自动化生产线、智能仓储物流系统广泛应用，提升了生产效率与质量一致性。例如，欧美企业利用工业互联网实现设备互联与数据驱动生产调控。但在药食同源产品领域，国外研究多聚焦于单一功能性成分提取，对融合传统理念的产品研发较少。

国内药食同源研究历史悠久，随预制菜产业兴起，药膳预制菜研究增多。学者们在配方优化、工艺改进等方面取得成果。在智能制造应用上，部分中药企业引入自动化设备

【作者简介】严学迎（1977-），男，中国广西崇左人，硕士，工程师，从事食品工程、大健康促进、药膳与食疗研究。

提升效率，但在药膳汤品全产业链智能集成应用研究方面，仍存在理论与实践结合不足的问题，有待进一步深入探索。

### 1.3 研究方法与创新点

本文综合运用文献研究法，梳理国内外智能制造技术与药食同源产品生产相关文献，了解研究现状与发展趋势；案例分析法，选取典型药膳汤品预制菜生产企业，深入剖析其智能制造技术应用实践；调查研究法，通过问卷、访谈等形式，收集企业与消费者对智能制造技术应用反馈。

创新点在于将智能制造技术全方位融入药膳汤品类预制菜生产研究，从原料采购、生产加工、质量检测到仓储物流配送，构建全产业链智能制造应用体系；并结合消费者健康需求与市场反馈，探索基于智能制造的个性化定制与产品创新模式，为药食同源产品产业发展提供新思路。

## 2 智能制造技术概述

### 2.1 智能制造技术的内涵与特点

智能制造技术是一种融合了先进制造技术、信息技术、自动化技术、人工智能技术等多学科技术的综合性技术体系。它以实现生产过程的智能化、自动化、柔性化为目标，通过对生产系统的全面感知、实时分析、自主决策和精准执行，提升生产效率、质量和灵活性。

智能制造技术具有以下显著特点：高度自动化，减少人工干预；数据驱动，优化生产决策；智能化决策，应对复杂情况；柔性生产，满足个性化定制需求。

### 2.2 主要智能制造技术介绍

#### 2.2.1 工业互联网

工业互联网通过将设备、生产线、工厂、供应商、产品和客户紧密连接融合，实现人、机、物的全面互联。在药膳汤品类预制菜生产中，工业互联网可将生产设备、仓储设备、物流设备等连接成一个有机整体，实时采集设备运行数据、生产进度数据、库存数据等，为生产管理提供全面、准确的数据支持。

#### 2.2.2 人工智能与机器学习

人工智能在智能制造中发挥着核心作用。机器学习作为人工智能的重要分支，能够让计算机通过数据学习模式和规律，并据此进行预测和决策。在药膳汤品生产中，可利用机器学习算法对大量生产数据进行分析，优化生产工艺参数，如熬制时间、温度、食材配比等，以提升汤品的口感和品质稳定性。同时，人工智能图像识别技术可应用于原料筛选和质量检测环节，快速准确识别食材的品质优劣和异物，保障产品质量。

#### 2.2.3 自动化生产线与机器人技术

自动化生产线是实现智能制造的基础。在药膳汤品类预制菜生产中，自动化生产线可完成食材清洗、切割、配料、炖煮、包装等一系列工序。例如，采用自动化清洗设备，能高效去除食材表面杂质，确保食材清洁卫生；自动化切割

设备可根据设定规格精准切割食材，提高切割效率和精度。机器人技术则可进一步提升生产的自动化程度，如在包装环节，机器人能够快速、准确地完成汤品的装盒、封口等操作，降低人工成本，提高包装质量和效率。

#### 2.2.4 物联网技术

物联网技术通过在设备、产品、原材料等物体上安装传感器、射频识别等设备，实现物体之间的信息交互和智能化管理。在药膳汤品生产中，物联网技术可用于实时监测生产环境的温度、湿度等参数，确保生产环境符合要求；对原材料和成品进行实时定位和追踪，实现从原料采购到产品销售的全程可追溯。

## 3 药食同源产品及药膳汤品类预制菜发展现状

### 3.1 药食同源产品的概念与分类

药食同源产品是指那些既可以作为食物食用，又具有一定药用价值，能够调节人体机能、预防疾病、促进健康的产品。这类产品的应用历史悠久，其理论基础源于传统中医药学中“医食同源”的理念，即食物和药物都来源于大自然，许多食物本身就具有药用功效，合理食用可以达到养生保健的目的。

药食同源产品种类丰富，根据其来源和用途可大致分为以下几类：一是谷类，如小米、薏米等，小米具有健脾和胃的功效，薏米则有利水渗湿、健脾止泻等作用；二是蔬菜类，像山药、百合等，山药能补脾养胃、生津益肺，百合可润肺止咳、清心安神；三是果品类，例如红枣、枸杞，红枣有补中益气、养血安神之效，枸杞能滋补肝肾、益精明；四是菌藻类，如香菇、银耳，香菇可扶正补虚、健脾开胃，银耳能滋阴润肺、养胃生津；五是畜禽类，如乌鸡，乌鸡具有滋阴清热、补肝益肾等功效，常被用于制作药膳。

### 3.2 药膳汤品类预制菜的市场需求分析

随着生活节奏的加快和人们健康意识的不断提高，消费者对于便捷、健康食品的需求日益增长，药膳汤品类预制菜应运而生，并逐渐受到市场青睐。从消费者群体来看，上班族由于工作繁忙，缺乏时间烹饪，但又关注自身健康，希望能在短时间内享受到营养丰富的美食，药膳汤品类预制菜正好满足了他们对便捷与健康的双重需求。老年人注重养生保健，对传统药膳有较高的认可度，预制的药膳汤品简化了制作过程，也适合他们食用。此外，年轻一代消费者在追求时尚生活的同时，也开始关注养生，药膳汤品类预制菜以其独特的养生理念和便捷特性，吸引了不少年轻消费者的目光。

从市场数据来看，近年来药膳汤品类预制菜市场呈现出快速增长的趋势。根据相关市场调研机构的数据，2023年全国保健品市场，包括药食同源产品产值已达5000亿元以上。以抖音电商为例，2023年1-9月药膳类预制菜销售额同比增长605%。而在2022年，中国药膳行业市场规模

仅为约 1699 亿元。这些数据充分表明，药膳汤品类预制菜市场需求旺盛，具有广阔的发展前景。

### 3.3 传统生产方式存在的问题

在传统的药膳汤品类预制菜生产中，存在诸多问题制约着产业的发展。首先是生产效率低下，许多工序依赖人工操作，如食材的清洗、切割、配料等，人工操作速度慢且易受疲劳等因素影响，导致生产效率难以提升。例如，人工清洗食材可能需要花费大量时间，且难以保证清洗效果的一致性。其次，产品质量不稳定，由于人工操作的差异性，在食材配比、炖煮时间和温度控制等关键环节，难以确保每一批次产品的质量完全一致。比如，不同厨师在炖煮药膳汤品时，对火候和时间的把握可能存在差异，从而导致汤品的口感、药效等方面出现波动。

再者，传统生产方式难以实现个性化定制，由于生产过程的灵活性不足，企业很难根据消费者的不同需求快速调整产品配方和生产工艺。最后，人力成本较高，大量人工操作环节使得企业需要雇佣较多员工，增加了人力成本支出，在一定程度上压缩了企业的利润空间。综上所述，传统生产方式已难以满足市场对药膳汤品类预制菜日益增长的需求，引入智能制造技术成为产业发展的必然选择。

## 4 智能制造技术在药膳汤品类预制菜生产中的应用

### 4.1 原料采购与溯源的智能化管理

#### 4.1.1 基于物联网的原料信息采集

在药膳汤品类预制菜生产中，原料的质量直接关系到产品的品质和功效。利用物联网技术，可在原料种植、养殖环节就实现信息采集。例如，在中药材种植基地，通过在土壤中埋设传感器，实时采集土壤的酸碱度、肥力、湿度等信息，以及在种植区域安装气象站，收集温度、光照、降水等气象数据。这些数据可实时传输至企业管理系统，企业能据此了解原料生长环境是否适宜，确保原料的道地性。在食材养殖环节，如禽类养殖，可在养殖设备上安装传感器，监测禽类的生长状况，包括体重变化、进食量、活动量等信息，以便及时调整养殖策略，保障禽类健康生长，为药膳汤品提供优质原料。

同时，在原料运输过程中，借助物联网的冷链监测设备，实时跟踪运输车辆内的温度、湿度等环境参数，确保易腐坏的原料在适宜条件下运输，防止原料变质，保证原料品质的稳定性。

#### 4.1.2 区块链技术实现原料溯源

区块链技术具有去中心化、不可篡改、可追溯等特性，为原料溯源提供了可靠的解决方案。在原料采购环节，企业为每一批次的原料生成唯一的区块链溯源码，记录原料的产地、种植或养殖者信息、采摘或屠宰时间、检验检疫报告等

详细信息，并将这些信息上传至区块链平台。消费者在购买药膳汤品类预制菜产品后，只需通过手机扫描产品包装上的溯源码，即可获取原料从源头到终端的全流程信息，实现从农田到餐桌的全程追溯。区块链溯源系统有助于快速定位原料质量问题的源头，及时采取措施解决问题，降低质量风险，提升企业品牌形象。

### 4.2 生产流程的自动化与智能化

#### 4.2.1 自动化生产线的构建与运行

构建自动化生产线是实现药膳汤品类预制菜生产智能化的关键。一条完整的自动化生产线涵盖食材清洗、切割、配料、炖煮、包装等多个环节。在清洗环节，采用自动化清洗设备，如高压喷淋清洗机，可根据不同食材的特点，自动调整清洗压力和时间，高效去除食材表面的泥沙、杂质和农药残留，确保食材清洁卫生。例如，对于根茎类食材山药，通过特定的清洗程序，能在不损伤山药表皮的前提下，彻底清洗干净。

在切割环节，利用数控切割设备，可根据预设的规格和形状，精准切割食材，提高切割效率和精度。如将鸡肉切成均匀的块状，保证每一份汤品中的鸡肉大小一致，提升产品外观的一致性。配料环节采用自动化配料系统，根据产品配方，通过电子秤和输送管道，精确称取各种食材和调味料，避免人工配料的误差，确保每一批次产品的口味和营养成分稳定。

炖煮环节采用智能炖煮设备，可精确控制炖煮的温度、时间和火候。设备内置多种炖煮模式，能根据不同药膳汤品的要求，自动调整炖煮参数，如对于需要慢火细炖的滋补汤品，设备可保持稳定的低温炖煮状态，充分释放食材的营养成分，提升汤品的口感和药效。包装环节运用自动化包装设备，实现汤品的快速装盒、封口和贴标，提高包装效率和质量，同时确保包装的密封性，延长产品保质期。

#### 4.2.2 生产过程的实时监控与智能调控

借助工业互联网技术，将自动化生产线上的各类设备连接成一个有机整体，实现生产过程的实时监控与智能调控。在生产车间设置监控中心，通过大屏幕实时显示各生产设备的运行状态、生产进度、产品质量数据等信息。生产管理人员可通过监控系统，随时了解生产情况，及时发现设备故障、生产瓶颈等问题。

例如，当某台清洗设备出现故障时，监控系统会立即发出警报，并显示故障原因和位置，维修人员可迅速前往维修，减少设备停机时间，保障生产的连续性。同时，利用人工智能和机器学习算法，对生产过程中的实时数据进行分析，根据产品质量反馈和生产目标，自动调整生产参数。如根据炖煮过程中汤品的浓度、色泽等实时数据，智能调控炖煮设备的温度和时间，确保汤品质量始终符合标准。通过实时监控与智能调控，实现生产过程的优化，提高生产效率和

产品质量，降低生产成本。

### 4.3 质量控制的智能化升级

#### 4.3.1 智能检测技术在质量检测中的应用

在药膳汤品类预制菜质量控制中，智能检测技术发挥着重要作用。利用机器视觉技术，可对原料和成品进行外观检测。例如，在原料筛选阶段，通过机器视觉系统，快速识别食材的形状、颜色、大小等特征，筛选出不符合标准的食材，如剔除外观有损伤、变质的蔬菜和肉类。在成品检测环节，机器视觉可检测汤品的包装完整性、汤汁色泽、食材分布均匀度等，确保产品外观符合质量要求。

近红外光谱分析技术可用于检测汤品中的营养成分和药效成分含量。通过对汤品进行近红外光谱扫描，结合建立的光谱数据库和化学计量学模型，快速准确地分析出汤品中蛋白质、多糖、维生素以及各类中药材有效成分的含量，判断产品的营养和药效是否达标。微生物快速检测技术利用生物传感器等设备可在短时间内检测出微生物数量，避免因微生物超标导致的食品安全问题。

#### 4.3.2 基于大数据的质量分析与预警

在生产过程中，利用物联网和自动化检测设备，实时采集大量的质量数据，包括原料质量数据、生产过程参数数据、成品检测数据等。通过大数据分析技术，对这些数据进行深度挖掘和分析，建立质量模型，找出影响产品质量的关键因素和质量波动规律。

例如，通过分析不同批次产品的生产数据和质量检测结果，发现炖煮时间和温度的微小波动与汤品的口感和药效之间存在一定关联。基于此，企业可优化生产工艺参数，加强对关键环节的控制，提高产品质量稳定性。同时，利用大数据分析进行质量预警，当生产过程中的某些参数或质量指标偏离正常范围时，系统自动发出预警信号，提醒生产管理人员及时采取措施进行调整，避免出现批量质量问题，降低质量风险，保障产品质量持续稳定提升。

### 4.4 个性化定制生产的实现

#### 4.4.1 消费者需求采集与分析

借助互联网平台和大数据技术，企业可广泛采集消费者对药膳汤品类预制菜的需求信息。在企业官方网站、电商平台以及社交媒体等渠道设置消费者反馈入口，收集消费者的口味偏好、健康需求、食材禁忌、包装喜好等信息。例如，消费者可在购买产品时，通过在线问卷的形式，选择自己喜欢的汤品口味，如清淡、浓郁、酸甜等，填写自身的健康状况，如是否有高血压、糖尿病等慢性疾病，以便企业根据其健康需求推荐合适的药膳汤品；还可注明对某些食材过敏或不喜欢的食材，企业在生产定制产品时予以避开。

利用大数据分析工具，对收集到的海量消费者需求数据进行整理、分类和分析，挖掘消费者需求的共性和个性特征，为个性化定制生产提供数据支持。通过分析发现，年轻消费者更注重汤品的口味创新和便捷包装，而老年消费者则更关注汤品的养生功效和传统口味。企业可根据这些分析结果，制定针对性的产品开发和营销策略，满足不同消费者群体的个性化需求。

#### 4.4.2 基于智能制造的定制化生产模式

基于智能制造技术，企业构建个性化定制生产模式。在生产系统中，引入模块化设计理念，将药膳汤品的生产过程划分为多个模块，如原料模块、配方模块、炖煮模块、包装模块等。每个模块都具备一定的灵活性和可调整性，可根据消费者的个性化需求进行，更好地为消费者提供特定的服务，提高消费满意度和美誉度。

### 参考文献

- [1] 王静,李明.《药膳文化的传承与现代发展路径研究》[J].中华中医药学刊,2022,40(3):45-49.
- [2] 张伟,刘洋,陈晨.《智能制造技术在餐饮工业化中的应用研究》[J].食品与机械,2021,37(5):120-125.
- [3] 赵琳,黄建国.《智能制造系统在传统烹饪工艺现代化改造中的应用探索》[J].食品工业科技,2020,41(12):288-293.

# Study on Synergistic Enhancement of Color Diversity and Corrosion Resistance in Cr-Ni Composite Target PVD Coated Films

Wenbo Chen

BYD Technology, Chengdu, Sichuan, 610000, China

## Abstract

The development of chromium-nickel (Cr-Ni) thin films through physical vapor deposition (PVD) technology for decorative protection applications remains challenging, particularly in achieving simultaneous enhancement of color diversity and corrosion resistance. This study investigates the synergistic mechanism between optical performance and corrosion resistance by optimizing magnetron sputtering parameters of Cr-Ni composite targets. Through systematic adjustments of sputtering power and working gas pressure, a series of thin film samples with varying Cr/Ni ratios were fabricated. Their color coordinates and corrosion resistance were characterized using spectrophotometers and electrochemical workstations, with scanning electron microscopy (SEM) analyzing the microstructures. Results demonstrate that films under optimized conditions exhibit both rich chromaticity and exceptional corrosion resistance. This synergistic improvement is attributed to dense microstructures and optimized elemental distribution, providing effective strategies for developing high-performance decorative protective films.

## Keywords

Cr-Ni composite target; physical vapor deposition; color diversity; corrosion resistance; synergistic enhancement

# Cr-Ni 复合靶材 PVD 沉积薄膜的颜色多样性及耐腐蚀性协同提升研究

陈文博

比亚迪科技，中国·四川成都 610000

## 摘要

在装饰防护领域应用广泛的由物理气相沉积技术制备的铬镍薄膜，实现颜色多样性与耐腐蚀性的协同提升仍是挑战。本研究旨在通过优化Cr-Ni复合靶材的磁控溅射工艺参数，探究薄膜光学性能与耐腐蚀性能的协同增强机制，采用不同Cr/Ni比例的复合靶材，通过系统调控溅射功率与工作气压制备系列薄膜样品，利用分光光度计和电化学工作站分别表征其颜色坐标与耐腐蚀性能，并结合扫描电子显微镜分析薄膜微观结构。结果表明，在特定工艺条件下获得的薄膜兼具丰富的色彩表现和优异的耐腐蚀性，其协同提升机制归因于致密的微观结构和优化的元素分布，为高性能装饰防护薄膜的开发提供了有效策略。

## 关键词

Cr-Ni复合靶材；物理气相沉积；颜色多样性；耐腐蚀性；协同提升

## 1 引言

作为先进表面处理手段的物理气相沉积技术在工具、饰品及精密零部件装饰防护涂层领域有重要应用，因良好机械性能和耐腐蚀特性受广泛关注的铬镍基薄膜，当前研究多侧重单一性能优化（或追求色彩多样性，或强化耐腐蚀能力）而难以满足高端应用场景对美学与长效防护一体化的综

合需求，实现薄膜颜色表现与耐久性协同提升这一提升产品附加值的关键科学问题，本研究聚焦于 Cr - Ni 复合靶材，旨在通过系统调控 PVD 沉积工艺探索薄膜微观结构、光学性能与耐腐蚀性能之间的内在关联机制，为开发新一代高性能装饰防护涂层提供理论依据。

## 2 Cr-Ni 复合靶材 PVD 沉积薄膜的制备与表征

### 2.1 复合靶材制备与 PVD 沉积工艺

本研究采用高真空热压烧结技术制备 Cr-Ni 复合靶材，选用平均粒径为  $15 \mu\text{m}$  的高纯度铬粉 99.9% 和镍粉 99.95% 作为原料。按照设计的铬、镍原子百分比配比 20%Ni、

**【作者简介】**陈文博（1981-），男，中国甘肃天水人，硕士，工程师，从事3c产品表面处理，PVD镀膜和阳极染色研究。

50%Ni 和 80%Ni 进行精确称量，在氩气保护的行星式球磨机中进行 12 小时干混，球料比控制在 5:1，转速 200rpm 确保元素均匀混合。混合粉末装入特制石墨模具，在热压烧结炉中进行成型，烧结工艺采用阶梯升温程序，先以 10°C /min 速率升温至 800°C 排除粘结剂，再以 5°C /min 升温至 1350°C 的烧结温度，在 30MPa 压力下保温保压 60min，随后以控制冷却速率 5°C /min 降至 200°C 以下出炉，获得直径 60mm、厚度 5mm、相对密度达到 98.5% 以上的致密靶材，Cr-Ni 复合靶材成分及 PVD 沉积工艺参数如表 1 所示。

表 1 Cr-Ni 复合靶材成分及 PVD 沉积工艺参数

样品编号	靶材成分 (at.%)	溅射功率 (W)	工作气压 (Pa)	沉积时间 (min)
CN-1	Cr-20Ni	80	0.3	60
CN-2	Cr-50Ni	100	0.5	60
CN-3	Cr-50Ni	120	0.5	60
CN-4	Cr-50Ni	100	0.8	60
CN-5	Cr-80Ni	150	1.0	60

## 2.2 薄膜结构与基本性能表征

利用 FEI Nova NanoSEM 450 场发射扫描电子显微镜对薄膜表面形貌进行观测，加速电压 15kV，工作距离 10mm。观察发现所有薄膜均呈现典型的柱状晶生长特征，表面由均匀致密的纳米颗粒组成。Cr-20Ni 样品在 80W 低功率下形成的颗粒尺寸较为细小，平均粒径约 45nm，表面光滑致密。随着功率增加至 150W，Cr-80Ni 样品表面颗粒明显粗化，平均粒径增大至约 120nm，且晶界清晰可见。从薄膜断面 SEM 图像测量厚度显示，在固定沉积时间内，薄膜厚度随溅射功率增加而显著增加，CN-1 样品厚度约 520nm，而 CN-5 样品厚度达到约 810nm<sup>[1]</sup>。工作气压升高则导致沉积速率下降，CN-4 样品在 0.8Pa 气压下厚度约为 580nm，较相同功率下 0.5Pa 气压的 CN-2 样品 630nm 有所减少，薄膜样品微观结构特征如表 2 所示。

表 2 薄膜样品微观结构特征

样品 编号	靶材成分 (at.%)	平均颗粒尺寸 (nm)	薄膜厚度 (nm)	表面形貌特征
CN-1	Cr-20Ni	~45	~520	细小、致密、光滑
CN-2	Cr-50Ni	~65	~630	均匀柱状晶
CN-3	Cr-50Ni	~85	~720	柱状晶略有粗化
CN-4	Cr-50Ni	~70	~580	较致密
CN-5	Cr-80Ni	~120	~810	颗粒粗大，晶界 清晰

## 2.3 颜色与耐腐蚀性初步测试方法

颜色测量使用 HunterLab UltraScan VIS 分光光度计，配备 D65 标准光源，观测角 10°，测量波长范围 360nm 至 750nm，积分球直径 150mm。每个样品在表面不同位置测量 9 次取平均值，获得 CIE 1976 Lab 均匀颜色空间的完整数据。L 值代表明度，范围从 0 黑色到 100 白色。a 值代表

红绿轴，正值为红色，负值为绿色。b 值代表黄蓝轴，正值为黄色，负值为蓝色。通过色差公式如下，

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (1)$$

式 (1) 用来计算样品与标准白板的色差值，客观量化颜色差异，耐腐蚀性测试采用 Gamry Reference 600+ 电化学工作站，标准三电极体系，工作电极为待测薄膜样品，暴露面积 1cm<sup>2</sup>。对电极为铂片。参比电极为饱和甘汞电极。电解液为 3.5wt.% NaCl 溶液，温度恒定控制于 25 ± 0.5°C。

## 3 薄膜颜色多样性研究

### 3.1 颜色测量与多样性分析

系统的颜色测量结果表明，通过调控 Cr-Ni 复合靶材的 PVD 沉积工艺参数，可以获得颜色表现极为丰富的薄膜系列。CIE Lab 颜色空间的量化数据显示，薄膜的明度 L 值分布在 25.8 至 68.5 的宽范围内，其中低功率 80W 下沉积的 Cr-20Ni 样品 CN-1 呈现深灰色调 L=25.8，而高功率 150W 下沉积的 Cr-80Ni 样品 CN-5 则显示出明亮的银白色特征 L=68.5。a 值的变化范围从 -5.3 到 8.9，负值代表不同程度的绿色调，正值则指示红色调增强，例如样品 CN-2 在 100W 功率下 a 值为 -2.1 略带绿相，而样品 CN-4 在较高工作气压 0.8Pa 下 a 值转变为 3.5 呈现浅红色。b 值的变化更为显著，从 -12.7 到 15.3，涵盖了从明显蓝色调至鲜艳黄色调的广阔区间<sup>[2]</sup>，不同样品的颜色特征如表 3 所示。

表 3 不同样品的颜色特征

样品 编号	靶材成分 (at.%)	L* 值	a* 值	b* 值	主色调描述
CN-1	Cr-20Ni	25.8	-1.5	-5.2	深灰略带蓝
CN-2	Cr-50Ni	45.3	-1.8	5.3	浅灰略带黄绿
CN-3	Cr-50Ni	52.1	0.5	8.7	灰白偏黄
CN-4	Cr-50Ni	48.9	3.5	2.1	浅灰偏红
CN-5	Cr-80Ni	68.5	2.8	12.5	亮银白偏黄

这种颜色的多样性直接归因于关键工艺参数的协同作用，Cr/Ni 原子比是决定颜色基调的主要因素，高 Cr 含量倾向于产生偏灰蓝的色调，而高 Ni 含量则导向偏黄白的色调。溅射功率主要通过影响薄膜厚度和晶粒尺寸来改变颜色的饱和度和明度，功率升高导致膜厚增加和晶粒粗化，引起干涉光路变化从而使明度 L\* 值显著提高。

### 3.2 颜色形成机制探讨

Cr-Ni 薄膜颜色的多样性主要源于薄膜干涉效应与材料本身光学常数的共同作用，当入射光到达薄膜表面时，一部分在空气 - 薄膜界面发生反射，另一部分透射进入薄膜并在薄膜 - 基底界面发生第二次反射。这两束反射光因传播路径不同而产生光程差，当它们再次在表面相遇时会发生干涉现象，相长干涉增强特定波长的光，相消干涉削弱特定波长的光，从而使人眼感知到丰富的色彩。这种干涉效应可由以下基本公式定量描述：

$$2n_f d \cos\theta = m\lambda \quad (2)$$

式(2)中,  $n_f$  代表薄膜的折射率, 是一个与薄膜成分和微观结构相关的复数, 实部决定光速变化, 虚部与吸收相关。d 为薄膜的物理厚度, 单位通常为纳米 nm, 本研究中薄膜厚度在 500nm 至 810nm 范围内变化。θ 是光在薄膜内的折射角。m 是干涉级数, 取整数 0, 1, 2,...。λ 是发生相长干涉的光的波长, 单位纳米 nm, 直接决定观察到的颜色。对于本研究中的 Cr-Ni 薄膜, 其折射率  $n_f$  随 Cr/Ni 比例变化, Cr 含量增加会导致折射率实部略有增大且吸收增强。薄膜厚度 d 受溅射功率和工作气压显著影响, 如 CN-1 样品  $d \approx 520\text{nm}$ , CN-5 样品  $d \approx 810\text{nm}$ 。当一束白光入射时, 只有满足上述公式的特定波长 λ 才会被强烈反射, 从而显现出相应的颜色。例如, 对于一级干涉  $m=1$ , 若  $n_f d$  乘积对应于约 480nm 的蓝光波长, 则薄膜呈现蓝色调<sup>[3]</sup>。若  $n_f d$  乘积对应于 580nm 的黄光波长, 则呈现黄色。

## 4 薄膜耐腐蚀性及协同提升机制分析

### 4.1 耐腐蚀性能测试结果

在 3.5wt.% NaCl 溶液中进行电化学测试的结果清晰地揭示了不同成分与工艺的 Cr-Ni 薄膜的腐蚀行为差异, Tafel 极化曲线的拟合数据显示, 自腐蚀电流密度  $I_{corr}$  的变化范围跨越了一个数量级, 从防护性能最优的样品 CN-2 的  $6.7 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$  到 CN-5 的  $3.2 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。自腐蚀电位  $E_{corr}$  的数值同样呈现出规律性分布, CN-2 表现出最正的腐蚀电位 -0.18V vs. SCE, 表明其热力学稳定性最高, 腐蚀倾向最小。阳极分支的斜率分析显示, 所有薄膜样品均表现出钝化特征, 但钝化区的宽度和稳定性差异显著, Tafel 极化曲线拟合与电化学阻抗谱分析结果见表 4。

表 4 Tafel 极化曲线拟合与电化学阻抗谱分析

样品 编号	靶材 成分 (at.%)	自腐蚀电位 (E <sub>corr</sub> /V <sub>SCE</sub> )	自腐蚀电流密度 (I <sub>corr</sub> /A · cm <sup>-2</sup> )	电荷转移电阻 (R <sub>ct</sub> /Ω · cm <sup>2</sup> )
CN-1	Cr-20Ni	-0.25	$5.1 \times 10^{-7}$	$6.4 \times 10^4$
CN-2	Cr-50Ni	-0.18	$6.7 \times 10^{-8}$	$1.85 \times 10^5$
CN-3	Cr-50Ni	-0.22	$2.8 \times 10^{-7}$	$9.2 \times 10^4$
CN-4	Cr-50Ni	-0.28	$8.9 \times 10^{-7}$	$4.1 \times 10^4$
CN-5	Cr-80Ni	-0.35	$3.2 \times 10^{-7}$	$7.8 \times 10^4$

CN-2 样品具有最宽的钝化区, 跨度超过 0.4V, 且钝化电流密度稳定在  $1.2 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$  左右, 说明其表面形成的钝化膜致密且具有优异的保护性。电化学阻抗谱通过等效电路 R(QR)(QR) 拟合后获得的参数进一步量化了界面反应过程, 其中电荷转移电阻  $R_{ct}$  的值与薄膜的防护性能呈正相关<sup>[4]</sup>。CN-2 的  $R_{ct}$  值高达  $1.85 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 而双电层电容  $C_{dl}$  值较低, 约为  $2.3 \times 10^{-5} \text{ F/cm}^2$ , 这反映了界面处具有较高的反应阻力且钝化膜介电特性良好。

### 4.2 颜色多样性与耐腐蚀性关联分析

深入分析颜色参数与腐蚀电化学参数之间的内在联系,

发现二者之间存在非偶然的统计相关性。明度指数 L 与自腐蚀电流密度  $I_{corr}$  之间存在明显的正相关性, 相关系数 r 达到 0.71, 表明颜色越明亮鲜艳的薄膜, 其腐蚀倾向性往往越大。这种关联的物理本质在于, 高 L 值通常对应于高 Ni 含量和较大的晶粒尺寸, 而富 Ni 的显微组织不利于形成具有最佳保护性的连续  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  钝化膜。更为关键的发现是, 色品坐标 a 和 b 值的特定组合与耐腐蚀性存在优化区间。样品 CN-2 正是位于这个最优区间的典型代表, 其  $a=-1.8$ ,  $b=5.3$ , 同时具备最低的  $I_{corr}$  和最高的  $R_{ct}$ <sup>[5]</sup>。多元线性回归分析建立了耐腐蚀性能指标与颜色参数之间的定量关系模型, 该模型显示色相角  $h^\circ$  是预测薄膜耐腐蚀性的关键参数, 当其值位于 100° 至 120° 区间时, 薄膜的防护性能最佳。

### 4.3 协同提升机制研究

协同提升的微观机制源于 PVD 工艺参数对薄膜生长过程与最终微观结构的精确控制。在最优工艺窗口下沉积的薄膜, 如 CN-2, 其截面 TEM 分析显示具有独特的细密柱状晶结构, 柱状晶宽度控制在 50nm 左右, 且晶粒间结合致密, 几乎观察不到纵向的孔隙通道。这种结构特征一方面使光在薄膜内发生特定波长的干涉, 产生目标颜色。另一方面极大地延长了腐蚀介质从表面渗透到基底的路径, 提高了防护效能。高角环形暗场像结合 EDS 面扫描分析证实, 在该工艺下 Cr 和 Ni 元素实现了原子尺度的均匀混合, 避免了高功率导致的 Ni 元素偏聚或低 Cr 含量区域的形成。在腐蚀初期, 均匀分布的 Cr 元素能够快速在表面选择性溶解并再沉积, 形成一层厚度约 3-5nm 的非晶态  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  为主、内含少量 NiO 的复合钝化膜。该钝化膜的成长动力学研究表明, 其抛物线速率常数比非优化工艺下形成的钝化膜低一个数量级, 显示出极低的离子传输速率, 能有效阻挡  $\text{Cl}^-$  等侵蚀性离子的内扩散。

## 5 结语

本文通过系统调控 Cr-Ni 复合靶材的 PVD 沉积工艺, 成功实现薄膜颜色多样性与耐腐蚀性协同提升, 揭示特定工艺窗口下薄膜微观结构演变、光学干涉效应与钝化膜生长动力学内在联系, 明确 Cr/Ni 比例约 1:1、溅射功率 100W、工作气压 0.5Pa 为最优工艺参数组合, 使在此条件下获得的薄膜具有均匀致密纳米柱状晶结构, 其独特黄绿色调与优异耐腐蚀性能源于成分与结构协同优化, 不仅阐明颜色与性能关联机制, 更为高性能装饰防护一体化涂层开发提供具体工艺路线与理论依据, 有效解决传统技术中美学与功能难以兼顾瓶颈问题, 对高端消费品、电子产品外壳等表面处理领域具有明确实际应用价值的本研究。

## 参考文献

- [1] 张亚龙,夏艳飞,吴鲁纪,等.喷丸-超声滚压复合强化Cr-Ni-Mo系强钢摩擦磨损性能研究[J].表面技术,2025,54(19):173-185.
- [2] 徐艺飞,贾均红,卫润泽,等.微纳米Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>填充NiCrAlY-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mo-Ag@Ni复合涂层的宽温域摩擦磨损行为[J/OL].表面技术,1-

- 13[2025-11-06].
- [3] 石枝巧,丁嘉雯,吴丽雯,等.Cr(VI)及Ni(II)在偏碱性土壤中的共迁移及稳定化[J].农业环境科学学报,2025,44(02):376-386.
- [4] 卢家锋,张凤林,陈晓昀.Cu-Sn、Ni-Cr、Co烧结助剂对Ni3Al基金刚石复合材料性能的影响[J].热加工工艺,2024,53(15):44-48.
- [5] 田勤,赵振新,李慧君,等.新型锂离子电池循环稳定负极材料尖晶石型高熵氧化物(Cr0.2Fe0.2Mn0.2Ni0.2Co0.2)3O4/rGO[J].微纳电子技术,2023,60(10):1578-1585.
- [6] 黄威,刘文俊,余海洲,等.Cr、Ni复合含量对Mo2FeB2基金属陶瓷组织和性能的影响[J].硬质合金,2022,39(06):461-467.

# Thoughts on the application of high efficiency separation technology in chemical process

Zhidong Wang

Yunnan Yuntianhua Co., Ltd., Polyformaldehyde product Division, Shuifu, Yunnan, 657800, China

## Abstract

The application of efficient separation technologies in chemical processes provides technical support for improving product quality, reducing consumption, and minimizing emissions in chemical production. By precisely regulating material transfer processes, these technologies can effectively address the challenge of selective extraction of target components in mixed systems. Currently, the green and refined transformation of the chemical industry has become an inevitable trend in its development. The implementation of efficient separation technologies lays a solid foundation for achieving this goal, with enhanced application effectiveness achieved through techniques such as distillation, membrane separation, and extraction. Furthermore, technological innovation, cost control, and engineering integration can further improve the application outcomes of efficient separation technologies, thereby establishing a robust foundation for sustainable development in the chemical industry.

## Keywords

efficient separation technology; chemical process; green development

# 高效分离技术在化工工艺中的运用思考

王志栋

云南云天化股份有限公司聚甲醛产品事业部，中国·云南 水富 657800

## 摘要

高效分离技术在化工工艺中运用可以为化工生产的提质、降耗、减排提供技术支撑，可通过精准调控物质传递过程解决混合物体系中目标组分的选择性提取难题，就现阶段来看化工行业绿色化、精细化转型俨然已经成为了化工行业发展的必然趋势，而高效分离技术的应用则可以为达成这一目标打下坚实基础，可借助精馏技术、膜分离技术、萃取技术等相应高效分离技术提高应用成效。在此基础之上还可通过技术创新、成本控制、工程集成等多种方法为高效分离技术应用效果的提升及化工产业的可持续发展打下坚实基础。

## 关键词

高效分离技术；化工工艺；绿色发展

## 1 引言

化工工艺是通过物理化学技术的有效应用使原料转化为产品，进而获得相应的经济效益。而在化工工艺中混合物分离是十分重要的一环，这对于化工生产效率、质量以及成本都会起到至关重要的影响，高效分离技术的应用则可以为化混合物分离提供更多的助力，明确现阶段化工工艺中常用的高效分离技术并结合生产需求合理应用技术十分必要。

## 2 化工工艺中常见的高效分离技术

现阶段化工工艺中常见的高效分离技术主要有精馏技术、膜分离技术和萃取技术，如图 1 所示。

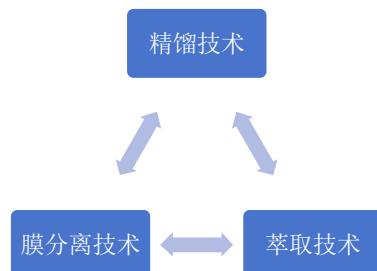


图 1 化工工艺中的常用高效分离技术

### 2.1 精馏技术

精馏技术是现阶段化工领域应用频率相对较高的分离技术，但是传统精馏技术回流比大、塔板效率低、能耗较高，可通过操作参数和设备结构的调整来提高分离效率。这其中典型代表主要包括热泵精馏、隔板精馏塔和反应精馏。热泵精馏是借助热泵系统来完成塔顶蒸汽的冷凝热回收，将其作为塔底再沸器的能量量供应源泉。相较于传统精馏技术，热

**【作者简介】**王志栋（1982—），男，中国云南红河人，本科，工程师，从事废水处理、精细化工研究。

泵精馏可以降低 30%~50% 的能耗，尤其是在近沸混合物或低沸点组分分离中应用效果更佳。

隔板精馏塔是在精馏塔内设置垂直隔板，将单塔划分为预分离段和主分离段完成混合物的分离，相较于传统的双塔流程，隔板精馏塔的设备投资大幅降低，同时可分离三组分混合物，其分离能耗也大幅降低。在石油炼制中轻烃分离可以采用隔板精馏塔提高分离效果。

反应精馏则是通过化学反应与精馏分离耦合的方式在同一设备内完成反应分离，减少分离步骤，同时也可以更好地打破反应平衡限制。相较于传统技术方法，反应精馏可更好的提高原料转化率，达到 99% 以上。同时并不需要设置其他分离设备，大幅降低设备购买成本。例如，在甲基叔丁基醚合成工艺中就可以采用反应精馏技术<sup>[1]</sup>。

## 2.2 膜分离技术

推动化工行业绿色低碳发展俨然已经成为了化工行业发展的必然趋势，而膜分离技术的应用则可通过筛分效应或溶解扩散效应在实现组分分离的同时降低能耗，可通过反渗透膜、超滤膜、渗透汽化膜等相应分离介质的选择为化工绿色转型提供必要支持。反渗透膜可以有效截留水中的离子和有机物，操作压力可以控制在 1-10MPa，大多应用于海水淡化领域和工业废水处理领域。例如在化工园区可使用反渗透膜来对含盐废水进行处理，使水回收率达 75% 以上，完成废水资源化利用。

超滤膜的孔径范围在 1~100nm 之间可以有效截留大分子有机物和胶体，大多应用于化工生产催化剂回收当中。例如，在丙烯腈生产的过程中则可借助超滤膜回收 95% 以上的催化剂颗粒，降低化工生产的原料损耗，并有效减少废弃物排放。

渗透汽化膜更适用于近沸、共沸混合物的分离。例如在乙醇脱水中就可借助渗透汽化膜来完成分离，相较于传统技术其分离效率提升了三倍以上，且分离能耗降低了 40% 以上<sup>[2]</sup>。

## 2.3 萃取技术

萃取技术可以利用不同物质在不同溶剂中的溶解度差异来进行组分分离，在低浓度组分提取、高沸点、热敏性混合物分离上采用萃取技术可以达到较好的分离效果。而在萃取的过程中还可通过萃取溶剂的调整和设备结构的优化提高分离选择性和分离效率。较为常见的萃取技术主要包含溶剂萃取、超临界萃取和液膜萃取，如图 2 所示。

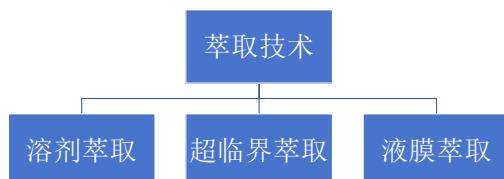


图 2 常见的高效萃取技术

溶剂萃取中萃取剂的选择是十分重要的一环，这对于

萃取效率和质量会起到至关重要的影响。例如在湿法冶金中可借助磷酸三丁酯来完成铀元素的萃取，使萃取率提升至 99% 以上。而在精细化工中可借助 N- 甲基吡咯烷酮来完成芳烃和非芳烃的分离。

超临界萃取是将超临界二氧化碳作为萃取剂，将临界温度与压力分别控制在 31.1℃ 和 7.38MPa，应用于天然物提取中，具有萃取效率高、萃取剂可回收、无残留等相应的优势。例如在咖啡豆中提取咖啡因就可以采用超临界萃取方法，使用后产品纯度可以达到 99.5% 以上，且并不会出现化学残留<sup>[3]</sup>。

液膜萃取是将萃取与反萃取耦合在液膜两侧实现一步分离。例如在含酚废水处理中，液膜萃取可以有效降低废水中的含酚量，且研磨萃取中萃取剂的消耗是相对较低的。

## 3 高效分离技术在典型化工领域中的应用实践

### 3.1 石油化工领域

石油化工领域中高效分离技术的应用可以完成轻烃、汽油、柴油等相应组分的有效切割，有助于提高原油利用率。例如在原油常减压蒸馏工艺中可借助波纹填料、丝网填料等相应高效填料替代塔板，提升塔板效率和汽油馏分的收率，总能耗也会降低 10%~15% 左右。此外，在乙烯生产中裂解气分离也是十分重要的一环，可借助膜分离配合深冷分离耦合工艺来提高裂解气分离的效率。首先，可借助膜分离来对裂解器进行预处理，去除其中的氢气和甲烷，在此基础上借助深冷分离系统进行分离，其总能耗可以降低 25%~30%。同时采用该种技术方法的设备购买成本也会大幅降低，其降低幅度在 20% 左右<sup>[4]</sup>。

### 3.2 精细化工领域

医药中间体、食物添加剂等相应的精细化工产品对于产品纯度的要求是相对较高的，传统的分离技术方法无法满足分离要求，为此则需要引入高效分离技术，保证产品质量。例如在医药中间体对硝基苯胺生产的过程中，为了更好的分离邻硝基苯胺等相应杂质，则可以借助结晶 - 精馏耦合工艺。先通过结晶技术来去除杂质，并通过高效精馏完成提纯，这样产品浓度纯度将会从 95% 提升至 99.95%，收率提升 10% 左右，有效避免传统工艺溶剂消耗大、产品损失高等相应问题。再例如在食品添加剂柠檬酸提取的过程中，可以通过超滤 - 纳滤膜耦合工艺的应用先去除发酵液中的菌丝体和大分子杂质，然后完成柠檬酸的浓缩。相较于传统钙盐法，其步骤更少且废水排放量更低，能耗也可以降低 40% 左右，而产品纯度也可以达到 99.9%，符合于要求标准。

### 3.3 环保化工领域

在化工行业发展的过程中三废处理是十分重要的一环，这将会直接影响化工行业能否实现可持续发展，而高效分离技术则可以为三废处理提供更多的助力，在降低对环境的影响和破坏的同时还可以回收其有用组分变废为宝。例如在含重金属废水处理的过程中传统方法以化学沉淀法为主，这种

方法应用的过程中很有可能会出现大量污泥且资源无法整合利用，这时则可通过螯合树脂吸附配合膜分离工艺来去除重金属离子，并且实现树脂的再生与重金属回收。再例如含挥发性有机化合物废气处理中传统方法为燃烧法，能耗较高，且很容易会出现资源浪费问题。这时则可通过活性炭吸附配合膜分离工艺先完成挥发性有机化合物的吸附，然后将其从活性炭上脱附并提纯<sup>[5]</sup>。

## 4 高效分离技术在化工工艺中应用措施

### 4.1 技术创新

为了更好的提高高效分离技术的应用成效，做好技术创新是十分必要的，而保障核心介质性能则是突破技术瓶颈的关键所在，可通过新型膜材料、萃取剂和高效填料的研发与应用提高高效分离技术的应用成效，保证分离效率。在膜材料研发中可通过纳米复合改性更好的保障膜的耐腐蚀性和选择性。例如可以将石墨烯掺入到高分子膜中，同时也可通仿生膜、智能响应膜等相应新型膜材料的开发来保证分离过程的精准性。例如温度响应膜可以通过温度调节膜的孔径，为多组分混合物分离提供更多的帮助。在此基础之上，可通过精馏和膜分离工艺、萃取和结晶工艺等相应的技术搭配来提高分离效率和分离质量，相较于单一技术，其分离能耗会大幅降低，设备投资也会大幅减少。

### 4.2 成本控制

高效分离技术对于化工行业的可持续发展、企业运营的经济效益的提升都会起到至关重要的影响，降低高效分离技术的技术成本实现大范围推广是十分必要的，只有这样化工行业才可以有更大的利润空间，为战略发展目标的实现提供更多的助力。而想要达成这一目标就需要通过规模化生产降低核心设备和介质的价格，并通过关键技术国产化来降低对进口技术设备的依赖。例如，在膜产业领域可通过加强膜生产设备的研发投入，提高膜生产的自动化水平，降低膜生产成本。也可以通过模组件标准化设计的方式，统一膜的尺寸与接口，降低膜更换与维护成本。在超临界萃取技术上可

通过高压设备的低成本开发使用新型合金材料，降低设备建构成本，并通过超临界二氧化碳循环利用系统的有效应用降低设备运行能耗。在高效分离设备研发中可通过高效精馏塔填料研发和应用来降低初期投资成本。

### 4.3 工程集成

为更好地保障高效分离技术与化工工艺之间的适配性及应用的适切性，引入智能化技术进行技术融合是十分必要的，在工程设计方面可通过模块化设计理念将高效分离技术集成于标准化模块中，接入生产线，减少改造周期与成本，在此基础之上将传感器、物联网、大数据技术和高效分离设备融合，实时监测高效分离设备的运行状态，提前对设施设备进行维修和处理，延长设备使用寿命并避免保障设备功能的有效发挥<sup>[6]</sup>。

## 5 结语

高效分离技术在化工工艺中有效应用可更好地提高产品质量，降低生产能耗，减少环境污染，应引起关注和重视，可通过工业集成、成本控制和技术创新更好的应用萃取技术、膜分离技术、精馏技术等相应高效分离技术，提高应用成效。

### 参考文献

- [1] 刘江嵩,高婷婷,马腾. 石油化工中的高效分离技术及其应用 [J]. 山东化工, 2025, 54 (18): 136-138.
- [2] 徐剑峰. 高效化工分离设备的研发与应用技术提升策略 [J]. 化工设计通讯, 2025, 51 (07): 118-120.
- [3] 肖子强,郑国栋,李超,等. 高效分离技术在化工工艺中的研究与应用 [J]. 辽宁化工, 2025, 54 (05): 880-882.
- [4] 郭鹏,马传振,徐彤彤. 膜分离技术在高效净水中的应用与发展 [J]. 石化技术, 2024, 31 (08): 169-170.
- [5] 王启任. 基于萃取分离的锰资源高效清洁利用技术研究[D]. 中南大学, 2024.
- [6] 沈鹏飞. 老化污油高效分离净化技术工业应用 [J]. 石油化工应用, 2023, 42 (07): 117-121.

# Optimization of Cement Concrete Mix Proportion Design

Hengxuan Hu

Third Engineering Branch Company China Railway First Bureau Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 713700, China

## Abstract

Since British craftsman Joseph Aspdin invented ‘Portland’ cement in 1824, it has been widely used in various construction industries because the concrete made with it possesses the strength and durability required for engineering projects, with readily available raw materials, low cost, and particularly low energy consumption. With the continuous development of concrete technology, it has evolved from a structural material with a single performance to a building material with multiple performances. To date, concrete has many advantages such as strong plasticity, good flowability, good water resistance, wide sources of raw materials, high cost-performance ratio, and suitability for industrial production.

## Keywords

High fluidity; high viscosity; self-compaction

# 水泥混凝土配合比设计优化

胡恒轩

中铁一局集团有限公司第三工程分公司，中国·陕西 西安 713700

## 摘要

自 1824 年英国工匠亚斯普丁发明了“波特兰”水泥后，由于用它配制而成的混凝土具有工程所需要的强度和耐久性，而且原料易得，造价较低，特别是能耗较低，因而被广泛应用于各种建筑行业。随着混凝土技术的不断发展，其由一种单一性能的结构材料发展到多性能的建筑材料。发展至今，混凝土具有可塑性强、流动性好、防水性好、原材料来源广泛、性价比高、以及适合工业化生产等诸多优点。

## 关键词

高流动性；高粘聚性；自密实性

## 1 课题来源及目标

项目整体效益由诸多因素影响，其中混凝土成本所占比例巨大，在保证混凝土工作性能，工程整体质量的情况下，优化混凝土配合比设计，减少混凝土成本消耗，可以很大程度上提高项目整体效益。为了积极响应股份公司“降本增效”和集团公司“强基增效”的总体要求，公司根据项目规模、综合能力等因素，决定在合新铁路项目进行混凝土配合比优化这一重要课题。公司合新铁路项目水泥混凝土设计量为 23 万 m<sup>3</sup>。

研究流程如下：依据设计标准、规范及规程，根据施工工艺、施工技术、原材料（水泥、粉煤灰、矿粉、砂、石、外加剂等）质量等综合因素进行配合比设计及优化，以提高混凝土性能、降低成本、节约材料、降低能耗、创建绿色环保工程为目标。

## 2 原材料准备及筛选

### 2.1 骨料的选择

#### 2.1.1 细骨料

细骨料的颗粒粒径介于胶凝材料和粗骨料之间，填充粗骨料之间的大部分空隙，并与水泥浆均匀混合形成水泥砂浆，使水泥浆在混凝土中分布更加均匀，也使粗骨料均匀悬浮于砂浆中，提高混凝土的均匀性，同时，细骨料将水泥浆分割阻断，使水泥浆的收缩应力分散，缓解混凝土因水泥浆的收缩而形成的开裂。良好的颗粒级配是保证混凝土工作性能的重要因素，但细骨料中的有害物质（泥、泥块、有机物、轻物质、云母等）会使混凝土本体遭受破坏，严重影响混凝土的服役寿命，甚至是结构安全，因此，在选择细骨料时，必须考虑到这些因素。经过筛选，本课题采用湖南益阳洞庭湖砂场生产的细骨料。如表 1 所示：

【作者简介】胡恒轩（1995-），男，中国陕西泾阳人，从事建筑工程研究。

表1 细骨料性能检测结果

生产厂家		颗粒级配	细度模数	含泥量 /%	泥块含量 /%	云母含量 /%	有害物质含量
规定值	C35-C45	/	3.0-2.3	≤ 2.5	≤ 0.5	≤ 0.5	/
	≥ C50			≤ 2.0			
湖南益阳洞庭湖砂场	合格		2.8	0.9	0.1	0.1	合格

### 2.1.2 粗骨料

粗骨料是构成混凝土结构的主要材料，是混凝土的骨架。在混凝土的水化反应中，粗骨料的体积在混凝土中不发生变化，最大程度保证了混凝土的体积稳定性，制约了胶凝材料凝结过程中的体积收缩。当混凝土硬化后，骨料是混凝土塑形的关键材料，是强度的主要来源，因此，需要骨料的强度高于水泥浆强度，防止在承受荷载时，骨料被率先破坏，使混凝土强度降低。同时，良好的骨料级配可以有效提高混凝土质量，增加混凝土流动性，降低浆体用量。如表2所示：

### 2.2 水泥

水泥的组成及各项性能对于混凝土有着极大的影响。

水泥的矿物组成不同，对于混凝土的强度的增长、耐久性、抗渗性有着非常巨大的影响。

水泥的细度越小，比表面积越大，其水化速率越大，混凝土的早期强度相对较高。

大量的研究表明低碱水泥的抗裂性能明显高于高碱水泥。

除此之外，水泥的初终凝时间、需水量、与外加剂的适应性等都对混凝土的性能有一定的作用。

经过对比几种不同品牌的水泥，最终本课题组决定采用凤阳中都水泥厂生产的P·O 42.5水泥以及蚌埠海螺水泥有限公司生产的P·O 42.5水泥和P·II 52.5水泥。性能检测结果如下：如表3所示：

### 2.3 粉煤灰

优质的粉煤灰及合理的掺量可以很好地提高混凝土的各项性能，粉煤灰颗粒形状为球形，在混凝土的搅拌中，可以有效地降低粗细骨料颗粒相互间的摩擦力，从而使混凝土拌合物的流动性有所提高。粉煤灰颗粒填充在水泥颗粒的间隙与絮凝的结构内，占据充水的空间，能有效释放出絮凝结构内的水分，进而在单位的用水量逐渐增加的要求下，增大水泥浆体流动性。因此，选择合适的粉煤灰可以很大程度地满足现场施工对于混凝土性能的要求。对选用的粉煤灰进行试验检测。

### 2.4 矿粉

在混凝土中掺加矿粉和粉煤灰，可以使混凝土强度互补，从而兼顾混凝土早期和后期强度，同时，矿粉的加入可以使混凝土的粘聚性增加，与粉煤灰的作用形成互补，使混凝土的坍落度增加，和易性好，粘聚性好，泌水得到改善。同时，矿粉和粉煤灰复配，可以发挥掺合料的微骨料效应和二次水化反应，使混凝土孔径细化，连通孔减少，混凝土密实性提高，从而大幅提高混凝土的抗渗性能。因此，选择与粉煤灰形成良好复配关系的矿粉对于所生产的混凝土有重要的意义。如表4所示：

通过试验检测，本课题决定采用江苏淮龙新型建材有限公司生产的S95型矿粉。

表2 粗骨料性能检测结果

生产厂家	含泥量 /%	泥块含量 /%	压碎值 /%	针片状含量 /%	表观密度 Kg/m <sup>3</sup>
规定值	≤ 1.0	≤ 0.2	≤ 10	≤ 8	≥ 2600
枣庄沃丰矿业	0.3	0.1	9.1	2	2690

表3 水泥性能检测结果

生产厂家	规格型号	比表面积 m <sup>2</sup> /kg	初凝时间 /min	终凝时间 /min	安定性	3d 抗折强度 / MPa	28d 抗折强度 / MPa	3d 抗压强度 / MPa	28d 抗压强度 / MPa
规定值	P·O 42.5	300-350	≥ 45	≤ 600	/	≥ 3.5	≥ 6.5	≥ 17.0	≥ 42.5
凤阳中都		329	254	328	合格	5.2	7.3	29.3	48.0
蚌埠海螺		322	256	328	合格	5.3	7.5	32.9	52.4
规定值	P·II 52.5	300-350	≥ 45	≤ 600	/	≥ 4.0	≥ 7.0	≥ 23.0	≥ 52.5
蚌埠海螺		347	191	248	合格	6.0	9.0	29.4	60.2

表4 矿粉性能检测结果

生产厂家	规格型号	流动度比 /%	比表面积 m <sup>2</sup> /kg	密度 g/cm <sup>3</sup>	烧失量 /%
规定值	S95	≥ 95	≥ 400	≥ 2.8	≤ 1.0
江苏淮龙新型建材有限公司		105	439	2.90	0.12

## 2.5 外加剂

外加剂的使用可以提高混凝土的和易性，使得新拌混凝土能够更好地满足现场施工要求。本课题决定采用中铁一局集团工业贸易有限公司所产的聚羧酸高性能减水剂，其试验检测结果如表5所示：

经过试验检测，选择原材料结果如表6所示：

表5 外加剂性能检测结果

生产厂家	型号	减水率 /%	含气量 /%	泌水率比 /%	压力泌水率比 /%	抗压强度比 /%		碱含量 /%	坍落度 1h 经时变化量 /mm
						7d	28d		
规定值	缓凝型	≥ 25	3.0-6.0	≤ 20	≤ 90	≥ 140	≥ 130	≤ 10	≤ 60
中铁一局集团工业贸易有限公司	缓凝型	28	3.3	3	40	147	139	2.11	25

表6 原材料选取结果

材料名称	水泥	水泥	粉煤灰	矿粉	细骨料	粗骨料	水	减水剂
生产厂家	凤阳中都水泥有限公司	蚌埠海螺水泥有限公司	淮南常华电力实业总公司	江苏淮龙新型建材有限公司	湖南益阳洞庭湖砂场	枣庄沃丰矿业	地下水	中铁一局集团工贸有限公司
规格	P·O42.5 P·II52.5	P·O42.5 P·II52.5	F类I级 F类II级	S95	中砂 (细度模数 2.8)	5-10mm/ 10-20mm/ 20-31.5mm	/	聚羧酸系高性能缓凝型

## 3 配合比设计及原则

配合比设计是混凝土生产过程中最重要的工作，科学合理的水泥混凝土配合比才能满足强度、工作性、耐久性要求，才能降本增效，且保证工程实体质量。根据合新铁路的设计、施工组织及施工方案要求，所设计混凝土配合比需坚持以下两个原则：

坚持“工作性第一、耐久性第一”的原则。

坚持“提高性能、降本增效、节能降耗、绿色环保”的原则。

除此之外，还需满足以下要求：

最小水泥用量

最小砂率

水胶比不变

合理的容重

合新项目环境等级为L1(氯盐环境)、T2(室外环境)。

## 4 试验过程

### 4.1 拌合

按照理论配合比，称取所需各种原材料，按照碎石，胶凝材料，砂进行投料，在双卧轴搅拌机中搅拌30s左右，将称取的水及减水剂加入干料中，搅拌120s。将搅拌好的混凝土放置在拌板上，进行混凝土出机性能检测。

### 4.2 混凝土性能检测

通过对塌落度及含气量的检测，发现当粗骨料三级配比例为：5-10mm:10-20mm:16-31.5mm=4:3:3时，其含气量为1.7，不符合设计要求，因此舍弃该组比例，并将粗骨料三级配比例改为：5-10mm:10-20mm:16-31.5mm=3:5:2，再次进行试验，通过检测，混凝土具有较好的和易性和粘聚性，该组级配比例的混凝土出机性能符合设计要求。

将符合设计要求的混凝土装入150\*150\*150mm的工程

试模中，待24小时后，将试件脱模，放入标准养护室进行养护。

### 4.3 抗压强度检测

在试件养护龄期达到7d, 14d, 28d, 56d, 90d时，对试件进行抗压强度检测，并记录试验数据。

### 4.4 耐久性检测

在试件养护龄期达到56d时，对试件进行耐久性能检测，试验数据如表7所示：

表7 耐久性能检测结果

强度等级	C30	C40	C40水下	C45
规定值	< 1200C	< 1200C	< 1200C	< 1200C
电通量值 /C	900	873	814	857

通过试件电通量检测，所配制混凝土耐久性能满足规范要求。

## 5 结果分析

根据混凝土试件抗压强度结果制成折线图进行分析：

### 5.1 粉煤灰掺量为40%时不同强度等级混凝土抗压强度分

混凝土强度值与龄期成正比，前14天强度增长速率较大，后期强度增长速率开始下降。

制备不同强度等级混凝土，使用两种水泥混凝土强度均在不停增加，90天强度(梁，单掺)均满足配置强度要求。在同标号混凝土中，用海螺水泥制备的混凝土强度整体略高于凤阳中都水泥。

### 5.2 不同粉煤灰掺量时不同强度等级混凝土试件抗压强度

随着粉煤灰掺量的增大，相同龄期下混凝土的强度逐渐下降，混凝土抗压强度与粉煤灰掺量成反比。

对于不同标号混凝土，粉煤灰掺量为 50% 和 60% 的试件 28 天强度无法达到设计强度，但随着龄期增加，强度持续增长，90 天时强度均满足要求。

对于 C40 混凝土，当龄期达到 56 天时，40% 及以下掺量的混凝土强度均可达到配制强度，且随着龄期增加，其强度也在持续增加。

对于 C45 混凝土，当龄期达到 56 天时，只有 30% 及以下粉煤灰掺量的试件达到配制强度，随着龄期增加，其强度也在持续增加，达到 90 天龄期时，50% 及以下的粉煤灰掺量的试件均可达到配制强度。

### 5.3 高粉煤灰掺量时不同强度等级混凝土试件抗压强度

可以得出，用海螺 P·II 52.5 水泥所制备的混凝土，当粉煤灰掺量为 39%，在龄期为 7d 时，其强度已达到设计强度，当粉煤灰掺量为 49% 及以上掺量，在龄期为 14d 时，强度达到设计强度。

## 6 结语

随着混凝土中粉煤灰掺量的增加，混凝土强度会降低，

强度与粉煤灰掺量成反比。但强度随着龄期的增长也在持续增加。

在满足强度要求的前提下，就经济效益而言，选用凤阳中都 P·O 42.5 水泥。胶凝材料中粉煤灰掺量为 40% 时，混凝土经济效益最好，且强度值随龄期增长持续增加，可以满足强度要求。

## 参考文献

- [1] 刘森.碱激发再生微粉胶凝材料性能调控及微观机理研究[D].扬州大学,2025.DOI:10.27441/d.cnki.gyzdu.2025.000001.
- [2] 王根叶,宋照尚,邱中原,等.基于密实度原理的机场道面混凝土配合比设计及性能研究[J/OL].混凝土与水泥制品,1-5[2025-10-29].<https://link.cnki.net/urlid/32.1173.TU.20250819.1329.009>.
- [3] 王磊.高强度水泥配合比方案的管理与安全监管[J].水泥,2025,(08):145-147.DOI:10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.2025.08.045.
- [4] 孙克龙,袁文华,翟浩然.双层透水混凝土配合比设计与抗堵塞性能研究[J].建井技术,2025,46(04):93-99.DOI:10.19458/j.cnki.cn11-2456/td.2025.04.015.

# Antioxidant properties of stevia polyphenols and their application in the preservation of oil foods

Jiaxian Xu

Wuhan Food and Cosmetics Inspection Institute, Wuhan, Hubei, 430000, China

## Abstract

In today's era of rapid material advancement, China's food industry faces increasingly stringent preservation requirements, driving a growing demand for natural antioxidants. Among various natural antioxidants, the polyphenols in stevia leaves and stems demonstrate exceptional metal ion chelation efficacy and free radical scavenging capabilities. These properties make them particularly valuable in food preservation, especially for preventing oxidation in oil-based products. Building on China's stevia cultivation realities, this study first provides an overview of its polyphenols, then explores their antioxidant characteristics, and subsequently analyzes four key applications in oil preservation. The research aims to offer innovative approaches and theoretical foundations for food industry preservation, ultimately promoting sustainable and healthy development in the food sector.

## Keywords

stevia; polyphenols; antioxidant properties; preservation of oil foods; application; research

# 甜叶菊多酚的抗氧化特性及其在油脂类食品保鲜中的应用研究

徐家显

武汉食品化妆品检验所，中国·湖北武汉 430000

## 摘要

在物质水平飞速发展的今天，我国食品工业面临着日益严峻的保鲜要求，在这种情况下天然抗氧剂需求不断增长。在众多天然抗氧剂中，甜叶菊叶片及其茎秆部分所蕴含的多酚类物质具备极强的金属离子螯合效益和自由基清除能力，这使其在食品保鲜行业特别是针对油脂类食品氧化防控中发挥着重要价值。基于此，文章结合我国甜叶菊实际首先就其多酚概述着手，随后探究其所具有抗氧化特性，接着分析其在油脂类食品保鲜中的四项应用要点，以期为食品工业保鲜提供一些新思路与理论依据，从而促使食品行业实现健康可持续发展。

## 关键词

甜叶菊；多酚；抗氧化特性；油脂类食品保鲜；应用；研究

## 1 引言

甜叶菊多酚是以菊科甜菊属植物甜叶菊的叶为原料，经乙醇提取、过滤、纯化、浓缩、干燥等工艺制成。甜叶菊的叶在日本和韩国作为普通食品原料；在欧盟和美国作为膳食补充剂。而在我国随着科技迅猛发展，甜叶菊多酚所具有抗氧化特性逐渐被发掘，这使其在延缓食品腐烂、霉变方面有着明显的作用。有鉴于此，下文将结合相关研究以及实践针对甜叶菊多酚的抗氧化特性及其在油脂类食品保鲜中的应用展开研究，以供参考。

## 2 甜叶菊多酚概述

在我国，甜叶菊作为一种已广泛栽培的替代甜味原料作物，其叶片除富含甜菊糖苷外，同时存在一类约占干叶 2%–4% 的次级代谢产物——甜叶菊多酚。该类多酚主要包括绿原酸、咖啡酸、异构氯原酸、黄酮类（如槲皮素衍生物）等结构单元。随着 2025 年我国将甜叶菊多酚纳入新食品原料目录，这类功能成分在国内迎来了规范化的发展阶段。由于其天然来源、结构多样且存在于甜叶菊加工残渣中，为后续提取利用提供了较为经济的原料基础。进一步地，国内相关研究亦显示，通过合理的提取工艺（如 80% 水 / 乙醇体系）可显著提高总酚含量及抗氧化活性<sup>[1]</sup>。因此，在我国油脂类食品加工储存过程中，探讨甜叶菊多酚替代或辅助传统合成抗氧剂具有现实意义。

【作者简介】徐家显（1984—），男，中国湖北枣阳人，本科，从事食品安全、食品检验研究。

### 3 甜叶菊多酚的抗氧化特性分析

#### 3.1 自由基清除能力

甜叶菊多酚由于含有许多酚羟基及芳环共轭体系的分子结构,这意味着其可提供较多的氢原子或电子实现自由基清除,如此一来能有效阻断脂质过氧化链反应。由DPPH和ABTS自由基清除试验来看,甜叶菊多酚EC<sub>50</sub>值一般都在0.5mg/mL以下,这表明其具有极强自由基清除能力。结合相关研究可知,甜叶菊所蕴含的不同种类多酚含量和自由基活性清除能力成比例关系,尤其是高温区域所种植甜叶菊该特性更为显著。在油脂体系中,甜叶菊多酚通过迅速捕获初级自由基,阻断脂质氧化起始阶段,并形成较稳定的酚氧自由基,实现链式反应。与维生素E相比,其在高温条件下的活性衰减更慢,适合油脂长期储存与加热环境应用的情况。因此,甜叶菊多酚的自由基清除能力是其抗氧化性能的核心机制。

#### 3.2 金属离子螯合作用

甜叶菊多酚中的羟基与羧基基团能够与Fe<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>等过渡金属离子形成配位络合物,抑制金属离子引发的脂质过氧化反应。研究表明,甜叶菊多酚提取物在铁离子诱导的氧化体系中可显著延缓过氧化物生成。由于我国食用油精炼及贮藏过程中常残留微量金属离子,该螯合作用对于防止氧化初期的催化极为重要。甜叶菊多酚与金属形成络合后,金属氧化还原循环被阻断,体系中羟基自由基生成速率下降,从而延缓油脂劣变<sup>[2]</sup>。在实际应用中,通过控制pH6~7、调整多酚与金属摩尔比,可进一步增强螯合效果。该机制使甜叶菊多酚能在金属离子富集环境下维持油脂体系稳定。

#### 3.3 链反应抑制与脂质过氧化物还原能力

甜叶菊多酚能在脂质氧化传播阶段通过提供氢原子或电子还原脂质过氧自由基(ROO<sup>•</sup>),并将脂质过氧化物(ROOH)转化为相对稳定的产物,阻止链式氧化反应持续。模型油脂体系实验表明,添加甜叶菊多酚可显著降低过氧化值与羰基生成速率,其作用与绿原酸或茶多酚相当。在我国植物油氧化控制研究中,甜叶菊多酚表现出较高的还原力和持续抗氧时间,适合替代部分合成抗氧剂。其芳香环电子共轭结构可分散自由基能量,减少氧化扩散。该特性在高温油脂与复杂食品体系中尤为突出,可显著延缓产品氧化进程。

#### 3.4 热、光及pH稳定性

结合实践可知,在高温、强光与酸碱环境下甜叶菊多酚抗氧化仍较为稳定,比如紫外线照射或80℃加热一段时间后其抗氧化活性还有80%以上;当pH值处于4至7范围内,甜叶菊多酚具有最佳的稳定性,此时均适用于大部分食品类别保鲜需求。正是凭借于这一特性,甜叶菊多酚应用在炸、烘焙、调味油等油脂类食品保鲜时能有效地避免活性损失。同时甜叶菊多酚分子中芳香环与酚羟基的共轭结构借助于部分能力吸收及分子内电子转移方式可促使食品降解速度减缓。此外,与维生素C或E协同使用可进一步提高

抗氧化稳定性。综上,甜叶菊多酚的高热光稳定性确保了其在复杂油脂体系中的长期抗氧效果。

### 4 甜叶菊多酚在油脂类食品保鲜中应用

#### 4.1 油脂精炼及储存阶段的预处理添加

在食用油加工体系中,将甜叶菊多酚用于精炼后油脂及其储存初期阶段的预处理添加,可按以下专业流程实施。首先,于精炼除杂、脱胶、脱酸、脱色、脱臭完成后的纯化油或二级油中,精准计量甜叶菊多酚至0.01%~0.03%(w/w)水平,并在油液温度维持于30℃以下迅速搅拌均匀10min以上,以确保活性多酚分散均匀、与油相充分接触,从而增强其羟基自由基清除与金属离子螯合作用。其次,在该添加步骤同时应辅以惰性气体(如氮气)置换包装头空间,将空气中氧含量控制至<1%,并将储存容器置于避光不透紫外线、置于5℃以下的低温条件下,以抑制热氧化与光催化作用<sup>[3]</sup>。同时油脂入口并静置一段时间后(通常2h)进行硫代巴比妥酸反应值与初期过氧化值抽样检测,随后定期定时重复开展这两个检测,目的在于对油脂氧化链启动、传播状态予以监控。其次,为提升预处理效果,建议在添加前对金属离子如Fe<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>浓度进行检测,若测出超标,则在多酚添加前加入0.005%~0.01%(w/w)乙二胺四乙酸(EDTA)螯合预处理,再添加甜叶菊多酚,以减少催化氧化启动。与此同时,确保油品罐体或储存容器采用惰性内衬或不锈钢材质,并在充氮后立即封闭,避免二次氧接触。另外,油脂存储初期油温应保持在4℃至10℃范围内最佳,同时定期(一周)进行摇样观察其是否出现浑浊、沉淀或聚合等情况,如有异常则须降低存储温度或是更换容器。

#### 4.2 高温油炸与烘焙油脂体系的抗氧控制

在高温油炸及烘焙类食品加工过程中,油脂长时间暴露于高温、空气及微量水分环境下,极易发生氧化聚合和热裂解,生成过氧化物、醛酮类及聚合物,导致风味劣化及营养损失。甜叶菊多酚具备优异的高温抗氧稳定性与链反应抑制作用,可作为天然抗氧添加剂用于延缓热诱导氧化反应。实际操作中,可采用乙醇或丙二醇作为溶剂将甜叶菊多酚完全溶解后,再按0.05%~0.15%(w/w)比例均匀加入油脂体系,并于加工初期混合均匀,以保证抗氧化组分充分分散。其酚羟基可在高温下迅速清除烷氧自由基(RO<sup>•</sup>)及过氧自由基(ROO<sup>•</sup>),中断热氧化链式反应,同时通过螯合铁、铜等微量金属,减少金属催化氧化。结合相关油炸食品实验研究得知,经180℃油炸8h后添加甜叶菊多酚的油脂的过氧化值会比未添加的降低了近40%,这表明甜叶菊多酚能够在该过程中发挥明显的抗氧化与延缓劣变的作用;而在焙烤食品(曲奇、酥点等)配方设计中也可以加入甜叶菊多酚,其具有良好的耐热抗氧性能可以有效保持产品的酥脆感和色泽稳定性,比如甜叶菊多酚和维生素E或迷迭香提取物形成复合抗氧体系可以起到延长大豆油等高温加工油脂的

寿命的效果<sup>[4]</sup>。另外，甜叶菊多酚还可作为抗氧化剂应用于高温油炸及烘焙类食品加工时能凭借链反应抑制减缓油品的氧化速度，同时加工后会形成一层具有防护作用的酚类膜层把氧气挡在外界，起到延长保鲜作用。

#### 4.3 加工热处理后油脂体系的抗氧补救

在加工热处理后的油脂体系中，为抑制初级氧化物、游离脂肪酸及金属离子催化作用所导致的二次氧化反应，应于冷却阶段（约180℃降至60℃）加入甜叶菊多酚作为抗氧补救剂。工业操作中可按0.10–0.20%（w/w）浓度添加，先将甜叶菊多酚粉末或浓缩液溶于50–60℃的载体油中（占主油量约1%），再以500–1000rpm速度高速剪切2–3min形成预分散液，并在持续搅拌5–10min后均匀引入主油体系，确保体系澄清度>90%，避免沉降或絮状析出。随后监测熔点及悬浮物变化以评估分散稳定性。为强化抗氧化作用，可与亚硫酸氢钠（0.002–0.005%）及α-生育酚（0.02–0.05%）协同使用，三者在40–45℃包装前混合可有效阻断过氧化物链式反应，降低羰基化合物形成。储存包装前应在0、7、14、30d检测过氧化值（POV）、异构二烯、金属离子（Fe、Cu）含量及异味强度，若Fe或Cu>0.5mg/kg，应补加甜叶菊多酚至0.20%并延长搅拌10min，以增强其对金属离子的螯合作用。甜叶菊多酚中绿原酸、咖啡酸等酚酸组分可抑制金属催化氧化，有助于延缓脂质降解。在生产实践中，应同步记录添加前后熔点（变化<0.5℃）、透光率（差<2%）及悬浮物数量（<50particles/mL>10μm），若分散不良，可调整剪切温度或采用微胶囊化处理。该工艺在冷却至包装阶段完成抗氧补救，可有效控制油脂氧化进程、减少异味及色泽劣变，保障产品储存稳定性与感官品质。

#### 4.4 包装与储存条件中甜叶菊多酚辅助抗氧

针对油脂类食品包装和存储环节中氧、光、热三种影响保鲜的因素，可使用甜叶菊多酚形成综合抗氧化体系，具体为：首先，油脂类食品包材选择上应采用内层铝箔-高阻氧复合膜或外覆深色聚酯膜，确保透光率不超过1%，随后以高纯氮气开展置换确保内部留存氧气含量小于1%，接着再使用0.05%（w/w）甜叶菊多酚提取物喷涂至内壁，借助于

黄酮与多酚组分的自由基清除作用抑制脂质初期氧化<sup>[5]</sup>。其次，封装环节采取真空或是充氮封装，旨在促使氧含量减少到0.5%以下，随后封口前要放置浸渍0.05%甜叶菊多酚溶液的无纺插层，以让它和油脂界面接触形成抗氧膜层，随后通过不断的活性多酚释放对自由基、过氧化物予以清除。通过包材与封装的处理使得油脂类食品包装腔体形成稳定的低氧还原环境，从而有效地避免氧化链式反应发生延长保鲜效果。再次，储存阶段应将温度控制在4–20℃、相对湿度≤65%，并每两周监测过氧化值（POV）、游离脂肪酸（FFA）及二缩丙醛反应物（TBARS）指标。当POV超过20meqO<sub>2</sub>/kg或TBARS超过0.5mgMDA/kg时，应立即更换含甜叶菊多酚的抗氧涂层或采用再充氮密封处理，以恢复抗氧体系的效能。此种从包装结构、内置抗氧布局到储存条件控制的多层次体系，可有效延缓油脂氧化进程并保持风味稳定。

### 5 结语

综上所述，鉴于甜叶菊多酚所具有的抗氧化特性，上文针对其所具有的自由基清除、金属离子螯合、链反应抑制及复杂体系稳定性等抗氧化特性展开了系统性分析，随后再探讨了其在油脂类食品加工、高温油炸及烘焙类食品加工、存储包装等环节可操作的应用要点。今后随着甜叶菊多酚研究与提纯技术不断深入，其在食品工业保鲜领域的应用范围更为广阔。

### 参考文献

- [1] 张继慧,马洪燕.薄荷和甜叶菊中多酚含量及抗氧化活性的研究[J].养生保健指南,2019,000(028):385,394.
- [2] 鲍玉龙,柳春燕,邵太丽,等.甜叶菊化学成分和药理作用的研究进展及其质量标志物(Q-Marker)预测[J].中草药,2024,55(3):1014-1025.
- [3] 彭长凤,熊霞,刘红南,等.甜叶菊在畜牧生产中的应用研究进展[J].饲料研究,2023,46(24):123-128.
- [4] MyintKZ.甜菊多酚的体内外生物活性研究[D].江南大学,2022.
- [5] 班金,王高林.油料,油脂保鲜技术研究进展[J].粮食与食品工业,2025(4).

# Factors affecting oil drilling safety and countermeasures

Chao Lang

Liaohai Oilfield Safety and Environmental Protection Technology Supervision Center, Panjin, Liaoning, 124010, China

## Abstract

Oil drilling, as a critical component of oil and gas exploration and development, has long been recognized as a high-risk operation due to its unique working conditions, complex technical processes, and numerous hidden engineering challenges. In recent years, China's exploration efforts have expanded into deeper strata, ultra-deep formations, and unconventional geological environments, presenting increasingly complex formation conditions and heightened safety management pressures. Building on the latest research and drilling experience, this paper analyzes three key factors affecting drilling safety: geological uncertainties, equipment reliability, and human operational factors. Through case studies and practical drilling management insights, the study proposes three strategic dimensions for safety enhancement: establishing comprehensive safety systems, improving equipment safety standards, and strengthening operational capabilities. These measures aim to fundamentally reduce the likelihood of drilling accidents.

## Keywords

drilling safety; risk prevention and control; safety management; equipment maintenance; personnel training

# 石油钻井安全影响因素与防范对策

郎超

辽河油田安全环保技术监督中心，中国·辽宁 盘锦 124010

## 摘要

石油钻井是油气勘探开发的核心环节之一，由于其工作环境特殊、工艺复杂、隐蔽工程多等特点，一直被视为高风险作业。近几年，随着我国油气勘探深入到深层、超深层以及非常规等地质环境，给钻井作业带来更加复杂的地层工况以及更大的安全风险管控压力。基于此，本文依据最新研究、钻井工作经验，对影响钻井安全的因素（地质环境不确定因素、设备设施可靠性因素以及人为操作因素）展开论述，通过实例剖析结合钻井管理实践，从安全体系建设、设备安全提升、能力建设三个维度为钻井安全防护提供支撑，从根本上减少钻井事故的发生概率。

## 关键词

钻井安全；风险防控；安全管理；设备维护；人员培训

## 1 引言

石油钻井是一个系统化工程，需要综合不同工种互相配合完成的技术工作，整个施工过程伴随风险性。一旦发生安全事故，直接危及人员生命安全，造成企业财产损失以及环境破坏。尤其是如今我国不断加大油气勘探开发力度，“两深一非”（深层、深水、非常规）作业普遍化，钻井平台与日俱增，意味着超深井、复杂结构井及特殊工艺井数量也在不断增加，而且各个方面的设备运行参数也日益复杂，这就需要井场人员严于律己，加强自己的安全意识，为钻井生产保驾护航<sup>[1]</sup>。但就现阶段来看，尽管油田在钻井环节不断强化信息化水平，由于钻井现场缺乏相关保障机制导致未严格按照规定操作，造成事故风险骤增，所以说针对诱因探索基层钻井岗位的各项安全管理措施十分必要。

**【作者简介】**郎超（1988—），男，中国河北定州人，本科，工程师，从事石油安全研究。

## 2 石油钻井安全主要影响因素分析

结合相关文献查阅以及工作实践来看，石油钻井安全中主要的影响因素包括以下三类：

### 2.1 地质环境因素

作为钻井对象的地质环境因素，由于存在一定的客观性，揭露了钻井施工中遇到各种复杂工况是不可避免的。研究表明，我国主力油气产区（塔里木盆地、四川盆地和准噶尔盆地）开展的超深层钻探大多面临高温、高压地层及复杂的压力系统等极端工况，随着井深超过万米以后，井下的温度达到200℃以上，在这种情况下就会出现钻井液性能衰减严重、测井仪器和套管柱损坏等问题。另外，深层破碎带、高陡构造、盐膏层容易造成井壁失稳，从而产生卡钻、井控风险。另一方面，基于海洋钻井平台的特殊性面临海上超深水环境条件，如LW22-1-1钻井平台作业水深达到2619米，当风浪流联合作用发生时，会造成隔水管系统疲劳损伤和井口失稳；如果地层压力预测失误也会产生严重后果。例如，

钻井液密度设计失误极易造成溢流或井漏事故，特别是一些狭窄的压力窗口就更易造成压差卡钻或压塌事故发生，因为采用常规控压钻井技术难以解决问题。

## 2.2 设备因素

设备设施的可靠性直接决定了钻井本质安全水平高低，钻机是钻井最关键设备之一，钻机设备好坏直接影响安全生产情况，虽然我国国产12000米钻机已投用，但是在经历长时间高温、高压条件下，顶驱、泥浆泵等部件并没有实现和国际接轨。井控装置充当最后一道防线，其失效来源于环形防喷器密封不足、闸板防喷器不能及时闭合以及控制系统响应慢，在快速变化的压力情况下可能导致严重的事故<sup>[2]</sup>。其次，钻井工具及管柱发生隐性损伤的情况较难发现，例如强度高的钻杆在含有腐蚀性介质的环境里容易产生应力腐蚀开裂；井下工具在井温高于175℃的环境下橡胶件会加速老化，进而造成测井仪器测量误差甚至井下卡钻的现象；另外钻井供电系统的稳定性不足也会造成风险，电网电压波动会导致变频驱动系统的保护停机，尤其是在沙漠、海上这些区域，当供用电故障发生以后，如果备用发电机组没有及时切换会导致钻井液循环中断而被卡住的风险大大增加。

## 2.3 人员操作与管理因素

人工操作和管理属于影响安全的主观变量。如在复杂工况下做出错误的决策或出现操作失误时会导致事故发生。体现在起钻过程中没有及时替浆，当液柱压力小于地层压力时发生溢流，倘若关井不及时就会演变为井喷；非常规作业中风险识别不足，例如设备搬迁安装、高压管汇试压等，均存在频繁临时的任务、交叉作业，从而未能严格执行相应安全措施；班组协同效率差，呈现于岗位之间的信息传递滞后，就拿司钻和井架工、泥浆工之间的信息传递来说，不到位会导致钻井工况判断失误，因没有及时对接收到的录井参数变化进行调整沟通，最终造成钻井参数出现较大偏差；此外，一些老员工凭着自己的经验去使用新兴设备，对自动化系统权限边界不清楚，也有可能会产生人机适配风险。

# 3 钻井安全优化措施与实践路径

## 3.1 完善现场安全管理与风险管控体系

系统化风险管理是防止事故发生的基本手段，要大力推行精细井控管理：首先，严格落实地层压力监测、井控装置试压规定和双冗余液面监测系统，在起下钻时执行实时液面标定，第一时间识别溢流信号及时关井；针对超深井高温高压特点，制定优化级并建立分级井控应急预案，准备足够数量的冷却系统避免节流管汇堵死、储备密度高的压井液防止压力突变引发井喷。其次，加强作业许可和过程监督，对危险作业进行双人签字确认；受限空间作业时，则提前气体检测合格后方可进入；高处作业必安装好防坠落系统后方可登高作业；带电作业须严格执行隔离上锁。值得一提的是，基于海上平台特殊性，成立气象预警和船舶避碰制系统

必不可少，一旦发现浪高高于平台规定值，马上停止钻作业。同时推行班组安全标准化建设，签订岗位安全责任状，将风险辨识作为交接班的内容之一，建立员工个人安全绩效档案，通过正向激励引导安全规范作业自觉性。完善现场安全督查机制，设置专职安全监督，开展经常性巡查，发现违章现象当场予以制止并详细记录在案，强调定期分析违章规律，对症下药强效管控<sup>[3]</sup>。

此外，加强隐患排查与应急响应能力要从实际情况出发。首要任务是建立起设备缺陷上报制度，让全体职工都能将自己的发现及时上报到数字端口，要求维修队伍必须在4小时内响应并限时消缺，对于存在重大隐患的点要挂牌督办；始终秉持预防性维修理念，根据设备运行期限和工况制定出相应维保计划，比如：顶驱系统运行500小时后更换润滑滤芯，防喷器组每周做一次全功能测试；最后就是优化应急演练方式，可以借助无脚本突击演练检验其真实反应力，如突发井涌、火灾或硫化氢泄露等，以总结和完善应急预案。另外，平时还要加强与专业救援队的协同合作，每个季度开展联演，熟悉协调联动的工作机制和工作程序，并且逐步完善现场应急资源分布图，明确责任人及处置流程，实现第一时间应急处置，增强钻井现场安全应急能力。

## 3.2 强化设备设施本质安全与维护保障

加强装备可靠性的措施包括从采购、维护到更新的全过程把关：一是严格执行设备入场验收标准，所有新购钻机必须经过72小时的负荷试运转；关键组件（比如钢丝绳、吊带等索具）强制做探伤检查，杜绝有问题产品下井使用；基于超深井钻探要求，优先选用耐温高压设备，比如在温度175℃以上选择使用金属密封钻杆接头，在220℃条件下选择特种绝缘电缆和电子元件等；二是完善预防性维修制度，须结合设备运行数据规划合理的维修周期，如钻井泵凡尔体要300小时更换、顶驱冲管密封要200小时检查等；为了更好地管控核心组件寿命，可以建立构件数据库，预警达到设计寿命强制更换，比如大钩轴承在运行了10000小时强制报废；积极推广状态监测技术，即在钻井泵、绞车等设备上安装振动传感器，经由频谱分析提前做好故障防范工作，最终达到事后维修变为主动维修的目的<sup>[4]</sup>。

其次，做好井控装置、钻井工具的管理能有效预防井下重大事故的发生。首当其冲是配齐全工况井控装置，且防喷器组压力等级要比地层压力高20%，遥控面板和司控台能够远程、同步显示压力参数，每个月要开展压力测试并在规定的测试时间内响应。为了更进一步提升切割的可靠性，建议将更多智能化安全工具引入到实际工作当中，例如：防喷器剪切闸板应用液压助力系统；将电加热装置嵌入到节流管汇应用防止水合物堵塞；另外还要重视管柱的安全工作，入井钻具必须进行探伤、试压工作，高扭矩工况下利用数字扭矩仪实施监视上扣，避免上扣后接头渗漏；钻井液处理系统中需配置有自动密度调节装置及液位报警，确保压井所需

材料足量并备放在合理位置；最后针对特殊环境（如海水等）强化设备防腐工作，建设综合采用特涂与阴极的保护方式来实现，以减小盐雾腐蚀影响。

### 3.3 提升人员安全素养与现场执行力

加强专培专练，降低人为失误是提升钻井安全的基石，具体而言，设置不同的岗位定制化培训模块：新员工进行 300 学时的理论学习和 6 个月师徒带教后实操训练，考核合格后方能独立顶岗。其次，根据不同风险设置针对性的专项培训项目，例如，针对高压井控训练，使用模拟井喷装置，由学员对节流管汇实施压井操作，以掌握该工况下如何使用节流管汇来控制井口压力；培训过程可推行案例教学，将典型事故案例通过三维动画还原出来，并组织班组讨论—分析根本原因—编制防范措施，最终形成指导性模块；另一方面，定期组织盲演式的应急演练和考核，随机设置故障场景测试人员的应变能力，演练结束后立即进行复盘整改。另外，对于海上平台或特殊环境下钻井需要专业技术性较强的工作岗位，应每季度组织一次专业机构认证培训，保证重要岗位的持证上岗，同时建立岗位技能矩阵，明确各岗位具备的安全技能，通过定期检测自身能力与目标之间的差距，实现有的放矢地补强。

良好的现场安全文化氛围有助于提高整体安全水平。建立全员的安全建议制度与提供便捷的建议提交通道，有助于激发职工参与度。同时将被采纳的建议予以相应的物质奖励，以激活职工主人翁意识。举个例子，泥浆工发现，使用加重大件更加有效防止扬灰，试验具备推广价值便可兑换奖励。最后，开展班组安全分享，涵盖每日班前会讲述常见危险事件、邀请现实“当事人”描述危险经历等，使大家深刻认识到事故带来的危害性，管理人员必须深入勘查现场，了解生产一线的实际状况，及时发现制度上的问题并加以改正

和完善<sup>[5]</sup>。同时做好考核激励，对安全情况进行绩效挂钩，连续安全生产记录较长且未出事的职工要给予表扬奖励；更进一步，关注职工心理状态，使用疲劳仪、测压枪等工具，对特殊时间段的职工进行疲劳度测量，做好疲劳管控，在特殊时期做好轮休、交接班等工作的有效部署。总之，通过以上多维、持续干预的方式有助于员工养成遵章守纪的好习惯，继而在钻井作业中内化于形，实现安全实践良性循环。

## 4 结语

综上所述，石油钻井安全是一项综合技术、管理和人工的系统性工程，其复杂性不言而喻，因此油藏层复杂程度、设备的可靠性和人为因素是其不可忽视的影响要素。针对这些安全影响因素的优化路径中，我们提出完善风险管控体系、提升设备本质安全水平、强化人员安全素质等对策，通过先进技术、科学管理和基层经验深度融合，构建“人—机—环”的全方位保护体系，只有这要，才能为深层、非常规油气田的钻井工作提供保障，实现钻井作业安全质量快速跃升，推动油气勘探开发向高质量发展。

## 参考文献

- [1] 何沙, 陈东升, 朱林, & 姬荣斌. (2012). 海上钻井平台安全风险预警模型应用研究. 《中国安全生产科学技术》(4), 7.
- [2] 陆广宋等. "高温高压井下防喷器组事故安全阀故障分析及对策." 《石化技术》24.3(2017):4.
- [3] 张兴江.试论油田井下作业安全防范及对策[J].城市建设理论研究(电子版), 2013(13).
- [4] 熊智.海上平台钻井物资采购风险分析及防范对策研究[J].石油石化物资采购, 2024(20):1-3.
- [5] 张旭光;王雪飞;王庆国;杨光;汪旭.石油钻井生产中的安全管理策略与改进措施研究[J].石油科学研究, 2025, 8(4). DOI:10.12721/ccn.2025.159447.

# Research on the Improvement Treatment of Valve Sealing Performance in Natural Gas Compressor Stations

MingShen Zhang

Sinopec Shengli Oilfield Engineering Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257000, China

## Abstract

As a core component of fluid control in natural gas compressor stations, the sealing performance of valves directly determines the operational safety and transportation efficiency of the station. Addressing common issues such as medium leakage, aging and failure of sealing components, and degradation of sealing performance under low-temperature conditions in compressor station valves, this paper conducts research from four dimensions: optimization of sealing structure, upgrading of material selection, improvement of installation process, and strengthening of operation and maintenance management, based on field operation and maintenance data and experimental analysis. By comparing the sealing performance of different sealing materials under high-pressure (10-12 MPa) and low-temperature (-30°C) conditions, the advantages of the modified polytetrafluoroethylene (PTFE) and nickel-based alloy composite sealing are verified. A ‘precise pre-compression amount control + micro-polishing of sealing surfaces’ installation process is proposed, combined with the application of online leakage monitoring systems, reducing the valve leakage rate from 0.15% to below 0.02%. The research results show that multi-technology collaborative treatment can significantly improve the sealing reliability of valves, providing technical support for the long-term stable operation of valves in natural gas compressor stations.

## Keywords

Natural Gas Compressor Station; Valve Sealing; Material Upgrade; Process Optimization; Leakage Control

# 天然气压气站阀门密封性能提升处理研究

张明深

中石化胜利油建工程有限公司，中国·山东东营 257000

## 摘要

阀门作为天然气压气站流体控制的核心部件，其密封性能直接决定站场运行安全性与输送效率。针对压气站阀门普遍存在的介质泄漏、密封件老化失效、低温工况下密封性能衰减等问题，本文结合现场运维数据与试验分析，从密封结构优化、材料选型升级、安装工艺改进及运维管控强化四个维度展开研究。通过对比不同密封材料在高压（10-12MPa）、低温（-30°C）工况下的密封性能，验证了改性聚四氟乙烯（PTFE）与镍基合金组合密封的优势；提出“预压缩量精准控制+密封面微观抛光”的安装工艺，结合在线泄漏监测系统的应用，将阀门泄漏率从0.15%降低至0.02%以下。研究结果表明，多技术协同处理可显著提升阀门密封可靠性，为天然气压气站阀门长周期稳定运行提供技术支撑。

## 关键词

天然气压气站；阀门密封；材料升级；工艺优化；泄漏控制

## 1 引言

天然气压气站是长输管道系统的“动力心脏”，承担着天然气增压输送的关键功能，而阀门作为站内介质通断、压力调节的核心设备，其密封性能直接关系到站场安全与能源输送效率。据《中国油气田设备运维报告（2024）》统计，压气站故障中约 28% 源于阀门密封失效，主要表现为阀杆填料泄漏、阀座内漏，不仅造成天然气资源浪费，还可能引发火灾、爆炸等重大安全事故。

当前压气站阀门运行面临多重挑战：一是站内阀门多

承受 10-12MPa 高压与 -30°C 至 50°C 的宽温域工况，密封件易因温度循环出现老化变形；二是天然气中含有的 H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub> 等腐蚀性介质，会加剧密封面腐蚀磨损；三是传统安装工艺中密封件预压缩量控制精度不足（误差 ± 0.5mm），导致密封比压不均，短期运行后即出现泄漏。因此，系统研究阀门密封性能提升处理技术，对保障压气站安全高效运行具有重要现实意义。

## 2 天然气压气站阀门密封失效原因分析

### 2.1 密封材料适配性不足

传统阀门密封材料存在明显性能短板：普通丁腈橡胶在温度超过 80°C 时会出现软化，无法承受高压工况；纯聚四氟乙烯（PTFE）密封件在低温（-20°C 以下）时弹性衰减，

【作者简介】张明深（1988-），男，中国山东东营人，本科，工程师，从事焊接研究。

密封比压下降 30% 以上；而石棉填料虽耐温性较好，但存在环保隐患且易因介质渗透出现硬化失效。现场调研显示，采用单一密封材料的阀门，平均密封寿命仅 1.5-2 年，远低于设计要求的 3-5 年。

## 2.2 密封结构设计缺陷

部分阀门采用单道 O 型圈密封结构，当阀杆存在微量偏摆 ( $> 0.1\text{mm}$ ) 时，密封面易出现间隙；此外，阀座密封面采用平面接触设计，在介质压力波动时，密封比压易随压力变化而衰减，导致内漏。<sup>[1]</sup> 某压气站检修数据显示，单道密封结构阀门的内漏率是双道密封结构的 4 倍。

## 2.3 安装与运维不当

安装过程中存在三大问题：一是密封件预压缩量控制不当，过大会导致密封件永久变形，过小则密封比压不足；二是密封面清洁不彻底，残留的金属碎屑、杂质会划伤密封面，形成泄漏通道；三是阀杆安装同轴度偏差 ( $> 0.2\text{mm}$ )，导致密封件局部磨损加剧。<sup>[1]</sup> 运维方面，未按周期进行密封件检查与润滑，会加速密封件老化，缩短使用寿命。

表 1 不同密封材料组合的性能对比

密封部位	密封材料组合	耐温范围 (°C)	耐压强度 (MPa)	密封寿命 (年)	泄漏率 (%)
阀杆填料	纯 PTFE	-20 至 200	18	1.5-2	0.12-0.15
阀杆填料	改性 PTFE+ 丁腈橡胶	-50 至 260	25	3-4	0.01-0.03
阀座	不锈钢 + 普通垫片	-30 至 180	15	2-2.5	0.10-0.13
阀座	镍基合金 + 柔性石墨	-60 至 300	30	4-5	0.008-0.02

## 3.2 密封结构创新设计

针对传统密封结构的缺陷，提出两项结构改进方案：

**阀杆双道组合密封结构：**在阀杆密封腔体内设置两道独立密封单元，第一道为改性 PTFE 填料，承担主要密封功能；第二道为膨胀石墨填料，作为备用密封，当第一道密封出现微量泄漏时，膨胀石墨在介质压力作用下会自动膨胀，封堵泄漏通道，形成“主备联动”的密封机制；

**阀座楔形密封结构：**将传统平面密封改为楔形密封面，密封面角度设计为  $30^\circ$ ，配合弹性阀座设计，当阀门关闭时，介质压力会推动阀座向楔形密封面挤压，形成“自紧式密封”，压力越高，密封比压越大，有效解决压力波动导致的密封失效问题。<sup>[2]</sup>

## 3.3 安装工艺精准化控制

制定“三步精准安装法”，确保密封性能达标：

**密封件预处理：**安装前将改性 PTFE 密封件在  $200^\circ\text{C}$  下预热 2 小时，消除内部应力；对柔性石墨垫片进行脱脂处理，避免油脂污染影响密封性能；

## 3 阀门密封性能提升处理技术措施

### 3.1 密封材料升级与组合优化

根据压气站阀门工况特点，采用“主密封 + 辅助密封”的组合结构，优化材料选型：

- 阀杆填料密封：**选用改性聚四氟乙烯（添加 15% 玻璃纤维）作为主密封材料，其耐温范围扩展至  $-50^\circ\text{C}$  至  $260^\circ\text{C}$ ，抗压强度提升至  $25\text{MPa}$ ，同时在外侧增加丁腈橡胶 O 型圈作为辅助密封，利用橡胶的弹性补偿改性 PTFE 的刚性不足，形成“刚性密封 + 弹性补偿”的双重保障；

- 阀座密封：**对于高压、腐蚀性工况，采用镍基合金（Inconel 625）作为密封面材料，其耐蚀性是普通不锈钢的 5 倍，同时在密封面贴合处镶嵌柔性石墨垫片，利用石墨的可塑性填补密封面微观缺陷，提升密封可靠性。

通过对比试验验证，升级后的密封材料组合在高压、低温工况下的密封性能显著优于传统材料，具体数据如表 1 所示。

**预压缩量精准调节：**使用扭矩扳手控制密封件压缩量，改性 PTFE 填料预压缩量控制在  $0.3\text{-}0.4\text{mm}$ （误差  $\pm 0.05\text{mm}$ ），丁腈橡胶 O 型圈压缩量控制在截面直径的 20%-25%，通过专用量具实时监测，确保密封比压均匀；

**密封面精细化处理：**采用超声波清洗机清洁密封面，去除杂质；使用 600 目砂纸对密封面进行微观抛光，使表面粗糙度  $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$ ，减少泄漏通道。<sup>[3]</sup>

### 3.4 运维管控与在线监测系统应用

**定期运维制度：**建立阀门密封件“季度检查 + 年度更换”制度，季度检查时采用便携式超声波泄漏检测仪（精度  $0.001\text{mL/min}$ ）检测密封性能，发现泄漏立即处理；年度更换时对密封腔体内壁进行无损检测，确保无腐蚀、划伤等缺陷；**在线泄漏监测系统：**在关键阀门的密封腔体内安装压力传感器与温度传感器，实时采集密封腔内压力变化（当出现泄漏时，腔内压力会上升），数据通过 4G 模块上传至站场 SCADA 系统，当泄漏量超过阈值（0.02%）时，自动触发声光报警，通知运维人员及时处理，系统架构如图 2 所示。

## 阀门密封在线泄漏监测系统



图 2 阀门密封在线泄漏监测系统架构

## 4 工程应用案例

以“西气东输某压气站”为例，该站共有高压阀门 86 台，此前因密封失效问题，年均泄漏率达 0.13%，每年造成天然气损失约 50 万立方米。应用本文提出的密封性能提升技术措施后：

阀门密封材料全部升级为“改性 PTFE+ 丁腈橡胶”（阀杆）与“镍基合金 + 柔性石墨”（阀座）组合；

对 28 台关键阀门的密封结构进行楔形改造，采用“三步精准安装法”重新安装；

部署在线泄漏监测系统，实时监控阀门密封状态。

改造完成后，经 6 个月运行监测，该站阀门平均泄漏率降至 0.015%，密封寿命预计延长至 4 年以上，每年可减少天然气损失约 42 万立方米，同时未发生一起因密封失效导致的故障，验证了技术措施的有效性与实用性。

## 5 结语

天然气压气站阀门密封性能提升是一项涉及材料、结构、工艺与运维的系统工程，需通过多维度协同优化实现密

封可靠性的全面提升。本文通过密封材料组合升级、结构创新设计、安装工艺精准控制及在线监测系统应用，形成了一套可落地的技术方案，将阀门泄漏率控制在 0.02% 以下，显著延长了密封寿命，为压气站安全高效运行提供了有力保障。

未来，随着天然气压气站向“智能化、无人化”方向发展，还需进一步研究密封性能预测技术，结合人工智能算法，通过分析密封件温度、压力、磨损量等数据，实现密封失效的提前预警；同时，探索新型环保密封材料（如可降解弹性体）的应用，在提升密封性能的同时降低对环境的影响，推动压气站阀门密封技术向更高效、更可靠、更环保的方向发展。

## 参考文献

- [1] 许家祥.球阀硬密封副泄漏率预测方法及密封性能改进研究[D].浙江大学,2024.
- [2] 商荣辉.膜式燃气表内部流动数值模拟及流量测量误差特性研究[D].中国计量学院,2015.
- [3] 喻可.基于声发射的气体管道泄漏信号降噪、特征识别与在线监测研究[D].浙江大学,2023.

# Troubleshooting and solutions for M8 device after soft nozzle upgrade

Qing Chen<sup>1</sup> Chao Qiu<sup>1</sup> Miao Yang<sup>1</sup> Jing Wang<sup>2</sup>

1. Hangzhou Cigarette Factory, Zhejiang China Tobacco Industry Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

2. Qingdao Weike Powder Metallurgy Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266000, China

## Abstract

This study examines the operational performance of Hangzhou Cigarette Factory's A2-type PROTOS-M8 ultra-high-speed cigarette machine after transitioning from soft red long nozzles to soft long nozzles. The analysis identifies three major operational issues during the adaptation to new auxiliary materials and structural modifications: delayed adhesive buildup in the rear cutting system's drum wheel, water-soluble paper seam breakage, and filter rod detection failures with subsequent rod blockage on the rubbing plate. Through systematic evaluation of the cutting drum wheel structure, blade thickness, water-soluble paper seam parameters, and filter rod conveying system, the study identifies key contributing factors including narrow cutting slot clearance, excessive blade thickness, mismatched seam speed and magnetic strip scraping force, filter rod groove resistance, and insufficient negative pressure suction. Four structural optimization measures and three operational adjustments were implemented, with field validation demonstrating significant improvements in equipment stability and production efficiency, effectively resolving adhesive buildup delays and paper seam breakage. The findings provide actionable technical pathways and maintenance standards for brand adaptation and efficient, stable cigarette machine production.

## Keywords

cigarette machine; soft long nozzle; cutting drum;

# M8 设备改版软长嘴后故障分析和应对措施

陈卿<sup>1</sup> 仇超<sup>1</sup> 杨森<sup>1</sup> 王静<sup>2</sup>

1. 浙江中烟工业有限责任公司杭州卷烟厂, 中国·浙江杭州 310000

2. 青岛维克粉末冶金有限责任公司, 中国·山东青岛 266000

## 摘要

本文围绕杭州卷烟厂A2型PROTOS-M8超高速卷烟机由软红长嘴改为软长嘴后的运行情况, 分析了改版后设备在适配新辅料和结构变化中出现的三类典型故障: 后一切二切割系统鼓轮积胶滞后、水松纸拼接断裂以及滤棒检测与缺棒堵搓板故障。通过对切割鼓轮结构、刀片厚度、水松纸拼接参数及滤棒输送系统进行系统分析, 找出了造成故障的关键因素, 包括切割槽间隙偏小、刀片厚度过大、拼接速度与磁条刮力度不匹配、滤棒沟槽阻力及负压吸风不足等。针对问题提出了四项结构优化与三项运行调整措施, 并通过现场验证, 显著提升了设备运行稳定性与生产效率, 基本消除了积胶滞后与断纸故障。研究结果为卷烟机换牌适配与高效稳定生产提供了可操作的技术路径与维护标准。

## 关键词

卷烟机; 软长嘴; 切割鼓轮

## 1 引言

随着高端卷烟市场需求的增长与品牌竞争的加剧, 卷烟企业在设备通用化、柔性换牌和稳定生产方面面临更高要求。杭州卷烟厂引进的A2型PROTOS-M8卷烟机是生产主力设备, 其高速、高自动化特征在提升产能的同时, 对辅料适配与结构调整提出了更严苛的技术挑战。为满足“利群”系列软长嘴烟支的生产需求, A2机型在更换辅料及滤棒结

构后出现多项新型故障, 严重影响了生产效率和成品质量。

本文以此次改版为契机, 对M8设备在软长嘴生产过程中的故障机理进行系统性研究, 从设备结构、辅料性能及运行参数三方面分析问题根源, 提出可行的技术改进与维护措施, 为卷烟企业实现品牌柔性切换与设备高效运行提供经验借鉴与实践依据。

## 2 项目背景

杭州卷烟厂为了迎合市场需求, 利群卷烟需求旺盛, 保持良好的发展势头, 市场竞争日益激烈, 卷烟生产适应市场竞争灵活更换牌号烟支尤为重要, 打造设备通用化, 品牌

**【作者简介】**陈卿(1984-), 男, 中国浙江绍兴人, 本科, 从事卷烟机械维修研究。

多样化，对现有的生产设备有较高的要求，为了提升企业的生产效率。烟草工业科技水平得到较快发展，杭州卷烟厂对于科技创新、技术改进大力支持，解决品牌发展产生的新的质量缺陷显得非常重要。

A2机型为PROTOS-M8超高速卷烟机，是从HAUNI公司引进的世界一流设备，其生产速度最高可达20000支/分，具有高度的自动化，是我厂生产卷烟的主力机型，A2机型此前一直生产软红长嘴烟支，对软红长嘴具有高度适应性，为迎合市场需求，完成产量目标，现对A2机型进行换牌，由软红长嘴换成软长嘴，由于辅料全部更换，设备需要针对适配调整，出现的故障有后一切二轮出现滞后故障，水松纸拼接断纸，滤棒检测故障；缺滤棒堵搓板故障，针对以下现象进行故障分析和应对措施。

### 3 故障现象

A2软红长嘴换牌软长嘴后，辅料水松纸更换，原水松纸正常生产、正常拼接剔除，换上软长嘴水松纸拼接断纸，换了软长嘴的水松纸，水松纸拼接后，如（图1）在瓷条的位置会出现断纸现象，平均一个班3-5次。停机进行排查，拼接断的水松纸为正常拼接位置，非内部拼接。进而进行手动穿纸，针对此现象，围绕减少水松纸拼接断开展。

当出现水松纸断故障后，一次需要5-6分钟穿纸，一个生产班需要15-30分钟去处理水松纸，严重耽误生产效率。



图1 拼接水松纸断裂

#### 3.1 原因分析

A2机型生产辅料由BD设备自动完成添加，BOB2采用全自动添加水松纸及拼接，无需人工干预，再换牌前后，水松纸的拼接方式相同，排除人为拼接导致水松纸断，且拼接速度一样，可能拼接速度过快导致水松纸断。

软红长嘴水松纸更换软长嘴水松纸后，纸质韧性会有变化，可能原有磁条刮的力度太大，导致水松纸断。

通过对水松纸拼接速度、磁条刮力度的改进，减少水松纸拼接断的频次。通过上述的统计结果，发现产生拼接断的因素，主要形式为两类：

水松纸拼接速度太快；水松纸磁条力度太大。

#### 3.2 改进措施

原先17000支/分钟的拼接速度，调整为16000支/分钟

的拼接速度后；磁条角度适当变化，在保证合格产品前提，刮的力度较小水松纸拼接正常。

### 3.3 技术效果

通过对水松纸拼接速度、磁条刮力度的调整，通过一星期的现场跟踪，减少水松纸拼接断的频次，目前没有再发生水松纸拼接断的现象，调整效果明显。

### 4 故障现象

A2软红长嘴改版软长嘴需要更换沟槽滤棒，更换后机器多次因为滤棒检测停机或缺滤棒堵搓板故障而停机，在生产过程中，观察发现滤棒切割轮处的滤棒，是运行过程中频繁出现打横现象。打横滤棒出现之后，立刻就会造成滤棒检测停机或者缺滤棒堵搓板的现象，一个班出现滤棒检测故障停机在20次左右，同时出现因缺滤棒堵搓板的故障也在20次左右，而且生产车速不到17000支/分钟，速度越快，两种停机故障次数越多。

当出现缺滤棒堵搓板故障后，可能会出现切割鼓轮塞进打横滤棒，造成堵塞，进行清理，清理一次需要15-20分钟，也可能出现缺滤棒堵搓板故障，造成堵塞，进行清理，清理一次需要3-5分钟，严重耽误生产效率。

#### 4.1 原因分析

滤棒带沟槽的位置，在滤棒切割鼓轮处运转时，是旋转运动。旋转运动就需要滤棒表面光滑，但是沟槽的位置会造成两根滤棒之间磕绊的现象，造成滤棒打横，通过减少库里滤棒数量改善挤压打横现象。

滤棒料库有机玻璃门，与滤棒切割导向件有一个明显的台阶。按照技术要求，有机玻璃门与导向件应该形成一个良好的过渡，滤棒从滤棒库可以顺利的进入切割导向件，出现台阶会直接影响滤棒的运行，调整有机玻璃门与滤棒墙板距离。

滤棒更换之后，滤棒本身的工艺参数出现了变化，沟槽滤棒要比长嘴滤棒重约40毫克，接近10%的重量，M8从左侧输送进入鼓轮槽，需要更大的横向作用力以及负压吸风的作用，滤棒落槽的难度是增大。

通过对滤棒库容量减少调整、有机门板与导向件平行调整、切割鼓轮吸风力加大调整来减少切割鼓轮滤棒打横频次。通过上述的统计结果，发现切割鼓轮滤棒打横的因素，主要形式为三类：

沟槽滤棒阻力大，滤棒库容量大挤压阻力；有机玻璃门与滤棒墙板距离大；切割鼓轮的负压吸风不足。

#### 4.2 改进措施

通过调整滤棒导向板到料库壁的A（图2）的距离调整滤棒流量，减少进入滤棒切割轮处的滤棒数量，通过减少数量，降低滤棒相互之间的挤压程度，减少磕绊的概率。

调整滤棒库（图3）有机玻璃门到滤棒库墙板的距离，使有机玻璃门与滤棒切割导向件连接过渡平整。

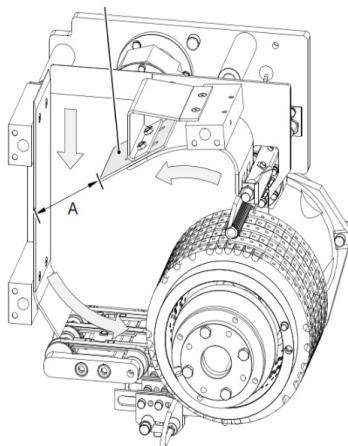


图2 滤棒导板距离A

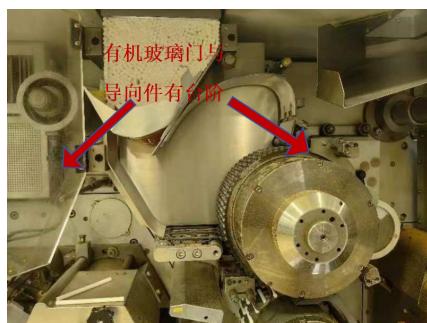


图3 有机玻璃板与导向件

增大滤棒切割鼓轮的负压吸风，通过调整（图4）鼓轮的配气风室的开度，增加负压吸风，加大鼓轮对滤棒的负压吸力。

图示：松开螺栓2，即可调整鼓轮的配气风室1，向鼓轮方向移动风室，即可加大负压吸风。

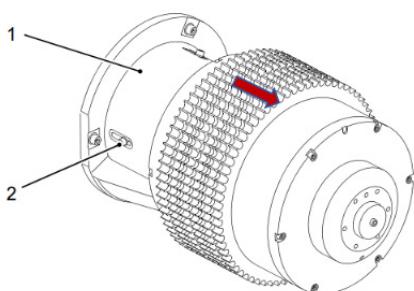


图4 切割鼓轮

### 4.3 技术效果

通过调整滤棒导向板到料库壁的A的距离调整滤棒流量，避免滤棒库容量大挤压，通过两班观察，效果不明显。

通过调整有机玻璃门与滤棒墙板距离至合适距离，通

过两班观察，效果不明显。

通过加大切割鼓轮的负压吸风，提高切割鼓轮对滤棒的吸附能力之后，没有出现滤棒检测以及缺滤嘴堵搓板的故障，通过两班观察，效果明显。

### 4.4 成果及巩固

通过本次改版软长嘴的技术分析和应对措施，解决了换牌后出现的后一切二鼓轮积胶滞后故障、水松纸拼接断故障、缺失滤棒检测以及缺滤嘴堵搓板等问题，提高了设备效率，避免了缺陷烟支的产生，同时提高了维修工的维护保养能力，对设备换牌高效机动性。

#### 4.4.1 后一切二鼓轮积胶滞后故障措施巩固

刀片为易损件，在更换刀片时，注意认准0.2mm厚度刀片；观察烟支上胶位置既切割无胶区，每隔三分钟对四支烟剥开水松纸，察看切割是否为无胶区处，并进行调节；每隔三天对切割鼓轮进行清洁。

#### 4.4.2 水松纸拼接断故障措施巩固

不要更改机器拼接速度，如若换牌后，更改回原拼接速度；每次更换磁条后，控制磁条角度，保持适当角度。

#### 4.4.3 缺失滤棒检测以及缺滤嘴堵搓板故障措施巩固

正常生产时，观察滤棒库滤棒的挤压情况，并做出适当调整；正常生产时，观察滤棒运行状况，有无打横滤棒，并调整；正常生产时，观察滤棒运行情况和MAX吸风压力，并调整。

## 5 结语

通过对M8设备改版软长嘴后的故障分析与针对性改进，杭州卷烟厂有效解决了切割鼓轮积胶滞后、水松纸拼接断裂及滤棒检测停机等关键问题。改进措施包括优化切割槽间隙与刀片厚度、调整拼接速度与磁条角度、增强负压吸风及规范清洁频次等，均取得显著成效。<sup>[1-3]</sup>实践表明，设备结构优化与维护管理制度的同步完善，是保障换牌生产稳定的关键。本文研究成果不仅提升了M8设备的适应性与可靠性，也为卷烟行业在品牌切换及高端烟支柔性生产中的设备调适提供了系统化参考，对推动烟草机械技术创新与质量管控具有积极意义。

## 参考文献

- [1] 田文武,吴小威,李华,段勇强.国产ZJ119型超高速卷烟机电气技术应用分析[J].机电产品开发与创新,2025,38(04):77-79.
- [2] 王家寿,李忠杰,杨传真,李淳.基于深度学习的卷烟机轴承故障诊断[J].包装工程,2025,46(S1):176-180.
- [3] 吴小威,田文武,李华,段勇强.新型技术在ZJ119型卷烟机中的应用[J].造纸装备及材料,2025,54(06):119-121.

# Research on the Mechanism of High-Temperature Corrosion of Boiler Heat Absorbing Surfaces and Protection Technologies

Bo Lian

Guoneng Hebei Dingshou Power Plant, Hebei, Dingzhou, 073000, China

## Abstract

The heating surfaces of boilers operate for long periods under high-temperature combustion environments and are easily affected by corrosive elements such as sulfur, chlorine, and sodium contained in fuel. This exposure leads to high-temperature corrosion, causing oxide scale spalling, wall thinning, and material failure, which severely threaten boiler safety and service life. The mechanisms of high-temperature corrosion mainly include oxidation, sulfidation, chlorination, and their interactions, all of which are closely related to fuel properties, combustion temperature, flue gas composition, and heating surface materials. This paper systematically analyzes the characteristics and mechanisms of high-temperature corrosion on boiler heating surfaces, explores the evolution of corrosion behavior and material resistance differences, and focuses on the application performance and improvement directions of protective technologies.

## Keywords

boiler heating surface; high-temperature corrosion; oxidation-sulfidation mechanism; protective technology; material modification

# 锅炉受热面高温腐蚀机理及防护技术研究

廉波

国能河北定州电厂，中国·河北定州 073000

## 摘要

锅炉受热面在高温燃烧环境中长期运行，易受到燃料中硫、氯、钠等腐蚀性元素的作用，产生高温腐蚀现象，导致金属表面氧化皮剥落、壁厚减薄和材料失效，严重影响锅炉安全与寿命。高温腐蚀机理主要包括氧化、硫化、氯化及其交互作用，其形成与燃料性质、燃烧温度、烟气组分及受热面材料密切相关。本文通过系统分析锅炉受热面高温腐蚀的机理特征，探讨腐蚀行为的演化规律及不同材料的耐蚀差异，重点研究防护技术的应用效果与改进方向。

## 关键词

锅炉受热面；高温腐蚀；氧化硫化机理；防护技术；材料改性

## 1 引言

锅炉受热面作为热能转换系统的关键部件，直接承受高温烟气冲刷与燃料燃烧产物侵蚀，其高温腐蚀问题已成为影响锅炉效率与安全运行的主要因素。近年来，随着燃料多样化与超超临界机组的推广，锅炉运行温度显著升高，腐蚀环境复杂化，使受热面高温腐蚀问题愈加突出。高温腐蚀不仅导致设备检修周期缩短、运行成本增加，还可能引发爆管等重大安全隐患。针对这一问题，国内外学者在腐蚀机理、材料行为及防护技术等方面开展了大量研究，提出了多种防护措施。然而，现有研究仍存在防护技术适应性不足、机理认知不完善、在线监测精度有限等问题。

## 2 锅炉受热面高温腐蚀的基本特征与影响因素

### 2.1 高温腐蚀的定义及分类

高温腐蚀是指金属材料在高温含腐蚀性介质环境中发生的化学或电化学反应过程，导致材料表面氧化、硫化、氯化等反应生成腐蚀产物并逐渐剥落。该过程不同于一般湿腐蚀，具有温度高、反应速率快、腐蚀形式复杂的特点。根据腐蚀介质及反应特征，可分为氧化腐蚀、硫化腐蚀、氯化腐蚀及熔盐腐蚀等类型。在锅炉受热面中，高温腐蚀通常由燃料中杂质元素与烟气成分相互作用引起，形成低熔点盐类覆盖物，破坏保护膜的完整性，促使金属持续被侵蚀，从而降低材料的使用寿命与结构强度。

### 2.2 受热面材料在高温环境下的腐蚀特征

锅炉受热面长期处于高温烟气冲刷和灰渣沉积环境中，腐蚀特征表现为表层氧化皮剥落、局部点蚀与晶间腐蚀并存。合金钢表面在氧化过程中形成  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  等氧化膜，但在高温硫、氯环境下易转化为低熔点的复合物，削弱保护

**【作者简介】**廉波（1985—），男，蒙古族，中国辽宁朝阳人，本科，工程师，从事空冷机组节能优化研究。

性能。腐蚀过程具有阶段性和累积性，早期表现为膜层生长，后期出现剥离与深层侵蚀。烟气温度超过500℃后，腐蚀速率呈指数增加，受热面结构处于长期应力作用下易产生裂纹扩展与疲劳失效。材料组织中的合金元素分布与稳定性直接影响抗腐蚀性能。

### 2.3 影响锅炉受热面高温腐蚀的主要因素分析

锅炉受热面高温腐蚀受燃料性质、运行温度、烟气成分及材料结构多重因素影响。燃料中硫、氯、钠、钾等杂质在燃烧后生成腐蚀性气体与熔融盐沉积于金属表面，引发化学反应。运行温度决定了反应速率与膜层稳定性，当温度超过600℃时，氧化膜保护性显著下降。烟气含氧量、湿度及流动速度对腐蚀速率具有放大作用。受热面设计参数、表面粗糙度和应力分布影响膜层结合力，维护工况与吹灰频率亦决定腐蚀发展趋势。

## 3 锅炉受热面高温腐蚀的形成机理研究

### 3.1 燃料成分及燃烧产物对腐蚀机理的影响

燃料中硫、氯、钠、钾等元素在高温燃烧后形成 $\text{SO}_2$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{KCl}$ 等物质，与金属表面反应生成低熔点腐蚀产物。燃用高硫煤时，硫化物在高温下易与金属形成 $\text{FeS}$ 或 $\text{FeO} \cdot \text{FeS}$ 等化合物，破坏氧化膜的致密结构。生物质燃料中氯含量高，生成的氯化物在金属表面沉积后与氧气反应生成金属氯化物和氧化物的循环反应，加剧腐蚀。燃料灰分成分和粒径分布影响沉积层导热性，改变受热面温度分布，促进腐蚀反应持续进行。

### 3.2 高温氧化、硫化及氯化反应机理

氧化腐蚀由金属与氧气直接反应形成氧化膜，膜层厚度与温度呈正相关，超过650℃后膜层结构疏松，易剥落。硫化反应主要发生在含硫烟气环境中，硫化物侵入氧化膜内部生成低熔点硫化铁，加速膜层失稳。氯化反应过程更为复杂，氯离子渗入金属表面后生成挥发性金属氯化物，在高温氧气作用下分解为氧化物并释放氯离子，形成腐蚀循环。多种反应并行使腐蚀产物层结构松散，氧扩散与金属迁移加剧，导致腐蚀加速。

### 3.3 受热面温度梯度与腐蚀加速作用分析

锅炉受热面存在显著温度梯度，高温区的热应力与物质扩散速率增加，使腐蚀反应更活跃。不同区域的温度差引起膜层热膨胀不均，导致膜层破裂与剥落，金属暴露后形成新的活性腐蚀点。灰渣堆积区域温度局部升高，使熔盐相生成量增加，加速硫化和氯化反应。温度梯度还影响金属离子迁移速率，促使 $\text{Fe}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 等元素向表层扩散并与腐蚀介质反应，导致合金元素贫化，降低材料耐蚀性。长期温度不均使腐蚀呈现周期性增强趋势。

## 4 锅炉受热面材料的高温腐蚀行为与失效特征

### 4.1 常用受热面材料的高温腐蚀敏感性对比

受热面常用材料包括20G、12Cr1MoV、T91、TP347H

等合金钢，耐蚀性能随合金元素含量提高而增强。含铬钢在氧化环境下能形成致密 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 膜层，具有较好保护作用，而低合金钢因Cr含量不足，膜层疏松易剥落。奥氏体不锈钢在氯化环境下存在点蚀风险，镍基合金在含硫环境中表现优异。材料的显微组织、晶粒大小及热处理工艺决定其抗腐蚀能力差异，运行数据表明T91在650℃以下腐蚀速率低于0.05 mm/年，而低合金钢超过0.12 mm/年。

### 4.2 腐蚀形貌及组织变化特征

受热面腐蚀表面形貌呈现多样性，主要包括氧化层剥落、点蚀坑及沿晶腐蚀沟。显微分析显示腐蚀层由外氧化层、内反应层及基体过渡层构成。外层 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 结构疏松易脱落，内层 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 较致密但易受氯化破坏。高温环境下，合金元素如Cr、Mo在晶界富集形成脆性相，导致局部裂纹扩展。长期运行后，腐蚀产物与基体界面处出现孔洞和脱碳区，金属晶粒粗化，组织由珠光体向铁素体转变，力学性能显著下降。

### 4.3 高温腐蚀导致的性能衰退与失效模式

锅炉受热面在高温腐蚀作用下表现出强度下降、塑性减弱和断裂韧性降低等特征。氧化层周期性脱落使金属壁厚持续减薄，引发承压能力下降。硫化腐蚀造成金属内部脆化，氯化腐蚀引起点蚀穿透，最终导致爆管或渗漏失效。受热应力与腐蚀共同作用产生热疲劳裂纹，裂纹沿晶界扩展形成断裂。长期运行数据表明，当腐蚀速率超过0.1 mm/年时，设备安全寿命缩短30%以上。腐蚀产物的堆积还会降低换热效率，造成燃料消耗增加与能效下降。

## 5 锅炉受热面高温腐蚀的防护技术与优化措施

### 5.1 防腐涂层与复合涂层技术的应用研究

防腐涂层是应对锅炉受热面高温腐蚀的关键措施之一，通过在金属表面形成致密隔离层，阻止腐蚀介质与基体反应。研究表明，采用 $\text{NiCrAlY}$ 、 $\text{FeCrAl}$ 等金属涂层后，在650℃下的氧化增重速率较裸材降低70%，腐蚀深度减少0.09 mm。陶瓷涂层如 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$ 具有高熔点与低热导率，可在700℃长期稳定工作，其耐氯化性能提升3倍。金属-陶瓷复合涂层通过多层界面结合形成梯度结构，兼具金属韧性与陶瓷耐蚀性，在热循环200次后结合强度仍保持在37 MPa以上。工业试验结果显示，经复合涂层处理的水冷壁管在含硫量1.5%的煤燃烧环境中运行4000小时，腐蚀速率控制在0.04 mm/年以下，换热效率提高5%，运行寿命延长至原设计值的2倍以上。

### 5.2 燃烧优化与烟气成分控制技术

燃烧优化从源头上抑制腐蚀性介质生成，是减少高温腐蚀的有效路径。通过空气分配控制、二次风调节及燃烧分级等手段，可有效降低烟气中 $\text{SO}_2$ 、 $\text{HCl}$ 浓度。实验数据显示，当炉膛过量空气系数保持在1.1至1.2之间时， $\text{HCl}$ 体积分数降低26%， $\text{SO}_2$ 减少19%。采用分级燃烧技术，可在火焰高温区形成局部还原性气氛，阻止氯化铁与硫化铁生成。投

加 CaO 和 MgO 基脱硫剂后，金属表面硫沉积厚度由  $12\mu\text{m}$  降至  $4\mu\text{m}$ 。烟气再循环技术通过控制  $\text{O}_2$  浓度与温度分布，使受热面温差小于  $35^\circ\text{C}$ ，减少熔盐生成与积灰附着。现场监测表明，采用综合优化措施后，锅炉运行时间提升 1500 小时，腐蚀速率下降约 45%，排烟温度降低  $12^\circ\text{C}$ ，系统能效显著提高。

### 5.3 材料表面改性与结构优化防护措施

材料表面改性技术通过改变材料的表层组织和化学组成，从根本上提升抗高温腐蚀能力。离子渗铬处理可在钢管表层形成厚度约  $65\mu\text{m}$  的 Cr 富集层，使腐蚀速率降低 68%。渗铝技术在  $700^\circ\text{C}$  条件下运行 3000 小时后，表层仍保持完整致密的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜。激光熔覆技术通过高速熔融 Ni 基粉末形成稀释率小于 4% 的复合层，其硬度提高 1.7 倍，氧化层结合力增强 40%。结构优化方面，通过调整受热面布置角度与管间距，可减少灰渣堆积厚度 20%，降低局部温度梯度。试验锅炉运行 6000 小时后，改性钢管腐蚀深度仅  $0.03\text{ mm}$ ，寿命延长 55%，热效率提升 3.2%。该类改性与结构优化的协同防护体系在  $600^\circ\text{C}$  至  $800^\circ\text{C}$  环境下表现出稳定性与经济性兼具的技术优势。

## 6 锅炉受热面高温腐蚀防护的检测与评估技术

### 6.1 高温腐蚀在线监测与诊断技术

高温腐蚀在线监测是实现锅炉安全运行的重要保障。常用监测手段包括电化学阻抗谱、高温电导率传感器及光学红外成像技术。通过在受热面布置电极阵列，可实时测定腐蚀电流密度，精度达到  $\pm 0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。红外热像仪在  $600^\circ\text{C}$  环境下能准确识别温差异常区，检测分辨率为  $0.1^\circ\text{C}$ 。在某  $600\text{ MW}$  机组运行中，部署 32 个传感节点后，系统能提前 72 小时预警局部腐蚀异常。信号通过数据采集模块传输至控制中心，结合算法模型实现腐蚀速率动态计算与趋势预测。在线监测的引入使设备检修周期延长 20%，紧急停炉次数减少 3 次，显著提升运维效率与安全性。

### 6.2 腐蚀速率与寿命预测模型研究

腐蚀速率预测模型为锅炉寿命评估提供定量依据。基于 Arrhenius 方程和多元线性回归法建立的经验模型表明，温度每升高  $50^\circ\text{C}$ ，腐蚀速率约增加 1.6 倍。采用耦合反应动力学与扩散模型，可准确模拟 Fe、Cr、Ni 元素在氧化层内的迁移规律，预测误差小于 8%。结合 Monte Carlo 随机

模拟方法建立的寿命预测模型可在运行初期预测材料剩余寿命，偏差不超过 5%。某电厂 T91 合金受热面运行数据分析显示，模型预测寿命为 8.7 年，与实测 8.4 年基本一致。该模型可为检修决策提供依据，实现基于数据驱动的寿命管理，提升设备安全性与经济性。

### 6.3 防护效果的综合评估与维护策略

防护效果评估是验证防腐技术有效性的重要环节。评估体系包括腐蚀速率、膜层结合力、表面粗糙度及化学稳定性四类指标。实验数据显示，经复合涂层处理后的受热面样管在  $700^\circ\text{C}$  下运行 5000 小时后，腐蚀速率低于  $0.05\text{ mm}/\text{年}$ ，膜层结合力保持在  $36\text{ MPa}$  以上。红外热成像与声发射技术可用于检测早期裂纹扩展位置，误差小于  $3\text{ mm}$ 。定期维护策略强调运行周期内每 2000 小时进行一次厚度检测与样管更换。通过建立设备防护档案与风险评估数据库，可实现寿命全过程管理。综合分析表明，防护体系实施后，锅炉年均维护费用下降 18%，设备可利用率提升 9%，为受热面长期稳定运行提供了可靠保障。

## 7 结语

锅炉受热面高温腐蚀是影响设备运行安全与使用寿命的关键问题，其机理复杂、影响因素多样。通过对腐蚀形成规律的深入研究与防护技术的系统分析，可以发现材料选择、燃烧优化、涂层防护及在线监测构成了高温防腐体系的核心。防腐涂层与表面改性技术显著提升了受热面的耐蚀性能，燃烧与烟气控制从源头抑制了腐蚀介质的生成，在线监测与寿命预测为防护措施的优化提供了数据支持。未来应在高温合金研发、智能监测系统及腐蚀机理建模方面持续创新，实现锅炉受热面防护的高效化、智能化与长期稳定运行，为能源装备的安全、高效与绿色发展提供坚实技术支撑。

### 参考文献

- [1] 王浩,刘成威,覃恩伟,吴树辉,陈国星,叶林. 生物质锅炉受热面高温腐蚀分析及对策[J].热喷涂技术,2022,14(04):63-70.
- [2] 龙吉生,高峰,刘亚成. 高参数垃圾焚烧余热锅炉受热面的防腐措施与实践[J].环境卫生工程,2022,30(04):48-54.
- [3] 郭灏,刘亚成,范卫东. 锅炉受热面高温腐蚀实验研究进展及防腐保护[J].锅炉技术,2022,53(04):1-8.
- [4] 程海松,刘岗,雷刚,谭俊,陈春彦,梁勇,苏岳亮,吴开颜,杜永斌. 燃煤锅炉受热面高温腐蚀防护涂层技术研究进展[J].材料导报,2020,34(S1):433-435+447.

# Reasons and countermeasures for loose nuts of forklift drive wheels

Hao Liu

Baoji Heli Forklift Co., Ltd., Baoji, Shaanxi, 721001, China

## Abstract

The drive wheel is the core component of forklifts for power transmission, load-bearing, and braking. During trial runs, feedback indicated that some vehicles experienced varying degrees of torque decay in drive wheel nuts during full-load trial operation. If the nuts detach, it could cause tire detachment, posing significant safety hazards to users. To address this issue, we conducted a comprehensive process analysis from the installation perspective, identified the root cause of torque decay, and proposed optimized process control measures. Subsequent follow-up verification confirmed the problem was fully resolved, ensuring product safety and quality stability during factory release.

## Keywords

forklift; drive wheel; loose installation nut; causes and countermeasures

# 叉车驱动轮安装螺母松动原因及对策

刘浩

宝鸡合力叉车有限公司，中国·陕西宝鸡 721001

## 摘要

叉车驱动轮是叉车传递动力、承受载荷并实现制动的核心部件。某型叉车驱动轮安装螺栓结构由原先的双头螺栓切换为单头矫制螺栓后，在试车环节反馈，部分车辆在满载试车跑合阶段，驱动轮安装螺母存在不同程度的力矩衰减，一旦螺母脱落造成轮胎脱落，将对用户使用带来极大的安全隐患。针对存在问题，从安装工艺角度进行全流程排查，找到了导致力矩衰减的原因，据此提出了完善的过程控制措施。后续跟踪验证结果显示，问题得到圆满解决，保障了产品的出厂安全与质量稳定。

## 关键词

叉车；驱动轮；安装螺母松动；原因及对策

## 1 引言

叉车驱动轮是叉车传递动力、承受载荷并实现制动的核心部件。叉车在高频短途搬运、满载搬运、急加速、急制动以及凹凸路面行驶时，车辆驱动轮承受持续冲击和高频振动。若驱动轮安装螺母发生松动，将增加作业风险，甚至引发连锁安全隐患，直接影响作业安全和搬运效率。

## 2 故障现象

该型叉车驱动轮安装螺栓结构由原先的双头螺栓切换为单头矫制螺栓后，在试车环节反馈，部分车辆在满载试车跑合阶段，驱动轮安装螺母存在不同程度的力矩衰减。通过对生产现场完成整车满载强化跑合的车辆进行取样调查，发现超过 30% 的车辆中个别驱动轮安装螺母紧固标识线已

发生位移，拧紧力矩已衰减：设计要求螺母拧紧力矩值为 480-560Nm，抽样的车辆螺母实测力矩值在 420-480Nm 之间，与初始设定力矩值相相比，力矩存在一定的衰减现象。

## 3 原因分析

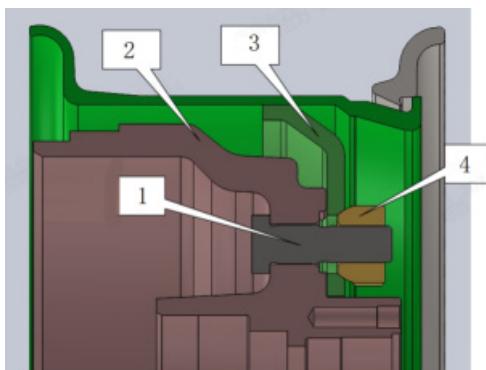
该型叉车驱动轮轮毂与制动鼓采用一体式铸造结构（简称制动鼓），6 个高强度矫制螺栓在制动鼓安装孔中过盈压装（设计过盈量 0.21-0.32mm），通过 6 个自定心球面螺母与矫制螺栓的螺纹连接将轮胎总成安装于制动鼓上，球面接触可有效提升螺栓的受力情况（结构原理见图 1）。

造成叉车驱动轮安装螺母松动有多方面的原因。尤其是叉车在试车环节，要经受复杂工况考验，满载高频行驶、进退、加速、制动动作以及路面颠簸试验，使得车辆驱动轮持续承受冲击和高频振动，驱动轮轮辋螺栓及螺母也在持续承受交变载荷。

考虑到轮辋螺母力矩衰减非普遍现象，加之车辆驱动轮辋螺栓设计结构经过严格技术论证，并经历多轮试验验

**【作者简介】**刘浩（1987-），男，中国陕西咸阳人，本科，工程师，从事机械设计制造及其自动化研究。

证,因此把排查重点放在生产安装环节,对产品结构因素及零件材料疲劳问题不做重点涉及。



1—轮辋螺栓 2—制动鼓 3—轮辋 4—安装螺母

图1 叉车驱动轮安装结构

### 3.1 轮胎安装环节

按照产品装配流程,首先对轮胎装配环节进行检查,确认轮胎安装螺母的拧紧力矩。该轮胎装配工序在流水线上采用3轴电动拧紧机分两组拧紧,拧紧机输出力矩值预先设定,力矩达到设定值后设备自动停止,安装完成后操作者用记号笔对螺母做紧固标识。进一步对拧紧机设备参数进行检查,发现拧紧力矩设定在520Nm,工艺文件中对螺母的力矩值要求范围为480-560Nm,实际设定值处于中间值,未设置在上限560Nm。由于各处配合间隙和金属自身的弹性变形等固有特性,在整机强化后螺母力矩会出现正常范围的衰减,如果初始值设定不合理,将会造成衰减后的力矩值不达标。(安装设备见图2)



图2 轮胎安装螺母拧紧设备

### 3.2 螺栓压装环节

对矫制螺栓压装情况进行检查,发现6个矫制螺栓在油压机上采用6个刚性连接的压柱一次压装,6根压柱的压装面处于同一平面。对压装后的螺栓进行检查,发现部分螺栓压装后与制动鼓接合面之间存在不同程度的间隙,最大的间隙达到0.5mm。该间隙会造成车辆跑合过程中轮辋带动螺母对螺栓产生轴向牵拉,直至接合面间隙消除,此过程会造成原施加的紧固力矩急剧衰减。进一步分析发现认为,矫制螺栓头部的高度尺寸为自由公差,压装设备设计时未充分考虑螺栓头部的高度误差,6根螺栓中头部高度尺寸小的在该工序没有被完全压装到位,从而产生间隙。(螺栓压装结

构见图3、压装装备见图4)

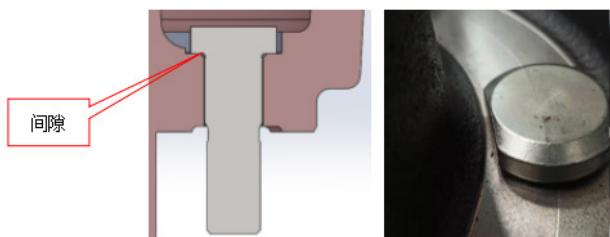


图3 压装结构



图4 螺栓压装工艺装备

从以上发现可知,生产安装环节确实存在影响安装螺母力矩稳定的因素,一是设备参数设定值偏小,二是螺栓根部与制动鼓接合面之间存在间隙。尤其是螺栓根部与制动鼓接合面之间间隙的存在,会使得车辆跑合过程中螺母对螺栓轴向牵拉形成位移,造成螺纹连接原施加的紧固力矩急剧衰减。

### 4 改进措施

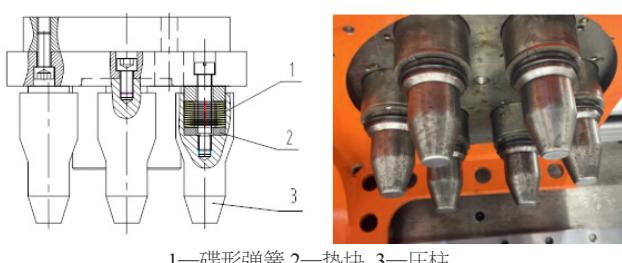
针对以上分析原因,实施针对性改进。

#### 4.1 对拧紧机设备进行参数优化

为消除设备因素带来的质量波动,首先对拧紧机力矩进行了再次校核,并适当上调了设备拧紧力矩设定值,由原设定的520Nm上调为560Nm。

#### 4.2 改进螺栓压装工装

为确保不同头部尺寸的螺栓压装后均能够与制动鼓完全贴合,对压装工装结构实施改进,增加高度补偿功能。在原工装结构不可伸缩的6根压柱底部各增加一个大弹力的碟形压簧,使6根压柱在轴向各自具备一定的浮动量,从而对螺栓的加工误差进行补偿(见图5)。经验证,改进后的压装效果良好,成功消除了结合面间隙。



1—碟形弹簧 2—垫块 3—压柱

图5 改进后的浮动独立压柱

### 4.3 调整压装压力机设备参数

轮辋螺栓滚花圆柱面与轮毂制动鼓安装孔过盈配合，设计过盈量 0.21-0.32mm，过盈量较大，为消除设备压装力不足的隐患，在设备能力允许范围内将油压机的压力进行了适当上调，确定出更合理的压力参数，既保证质量，又提高效率。

### 4.4 加强零部件细节控制

在此基础上举一反三，对相关配合部位的加工尺寸进行严格检查、控制。对发现的个别制动鼓螺栓压装孔孔周毛刺清理不彻底问题现场进行处理，同时对图纸进行优化：在孔口增加  $1\text{mm} \times 45^\circ$  的倒角，消除压装过程金属冗余造成孔口堆积的隐患，确保接合面完全贴合。

## 5 措施效果

经过上述努力，力矩衰减现象得到有效控制，复检发现问题的比例大幅降低，为彻底解决问题，查阅相关参考文献、拓宽思路继续改善。

根据查阅结果，有几篇文献同时提到，驱动轮轮辋螺母外凸面穿进轮辋总成球形凹面、自定心定位连接的这种结构，配合精度中等，轮辋螺栓和通孔间隙较大，容易出现轮辋上的球形凹面球心与轮辋螺栓轴线偏离、两者联接孔不同心的情况。在此情况下如果强行拧紧，轮辋球面局部会产生塑性变形或压溃，或对螺栓产生扭弯力，导致连接的防松性能变差。车辆带载运行工作一段时间后，螺母可能会产生松动，影响力矩值的稳定。

在对轮胎安装工位进行现场写实中，也确实发现操作工人将轮胎撬装到桥体上用手逐个旋入螺母后，没有找正调整，就直接采用电动拧紧机紧固，个别车辆螺栓与轮辋安装后孔轴不同心。（见图 6）



图 6 孔轴不同心

还有几篇文献通过有限元分析及理论计算，研究了轮辋螺栓拧紧次序对力矩保证及力矩保持的影响，提出在螺栓组联接中由于被连接件的弹性作用，螺母的预紧力会相互影响，从而最终影响到螺母组统一预紧力的可靠性和稳定性。

受此启发，从轮辋螺栓与轮辋安装孔的同心度保证以及对螺母拧紧后实施二次复紧进行进一步改善。

### 5.1 确保轮辋螺栓与轮辋安装孔同心度

为确保螺母外球面与轮辋过孔球凹面能够贴合紧密，要求操作人员在轮胎撬装后，要先对轮胎进行一次调整，目视观察轮辋过孔和螺栓轴线基本重合、接触球面能够顺利自动贴合后方可拧紧。（见图 7）。



图 7 调整轮胎位置，确保孔轴同心

### 5.2 增加螺母拧紧后的二次复紧操作

要求操作人员在依次将两组 6 个螺母全部拧紧后，增加对第一组 3 个螺母实施二次复紧的工序，以抵消被连接件的弹性作用、局部变形、预紧力相互影响造成的力矩衰减。

## 6 效果验证

通过以上合并措施的实施，附加车辆满载 400h 强化试验，以及 30 个工作日、近 3000 台试车车辆的力矩值持续复检，结果确认该型叉车驱动轮安装螺母力矩值已再无衰减，100% 合格且再无反复，已彻底消除质量隐患。

## 7 结语

通过对该型叉车驱动轮安装螺母松动问题实施细致现状调查，以及从设备参数、工艺装备、操作手法和零部件细节尺寸等多方面深入剖析问题产生原因，并参考文献，逐项采取针对性的改进和预防措施，有力保障了产品的出厂安全与质量稳定。跟踪验证结果显示，此次问题解决过程原因分析精准，改善措施有效。本研究成果已通过图纸、工艺文件、作业指导书和品质标准等形式固化，并推广应用于后续车型。

### 参考文献

- [1] 郝凯明.某装载机轮辋螺栓拧紧工艺参数优化[D].广西科技大学,2014
- [2] 王盟.轮式装载机轮辋总成与驱动桥连接结构的改进[J].工程机械,2003(06):15
- [3] 夏柳荫,许定锋.叉车车轮螺栓定位设计优化方案[J].设备管理与维修,2024(02):127-129
- [4] 卓纳麟.某叉车轮辋螺栓松动问题分析与改进[J].机械工程与自动化,2023(04):78-80
- [5] 王欣,杨敏,唐锋,杨苓.工程车辆车轮螺栓预紧力衰减研究[J].起重运输机械,2023(02):74-78
- [6] 武坤,杨帆,王秀健,李皓,郑喜平.某型号车轮螺栓拉长和断裂原因[J].机理化检验-物理分册,2022(11):65-68
- [7] 吴雪峰,宋方方.车轮螺栓螺母可靠性研究[J].汽车实用技术,2017(16):144-146
- [8] 李静,吴秋艳.车轮螺栓及车轮螺母设计优化[J].汽车实用技术,2012(04):91-93
- [9] 周长路,王耿.车轮螺栓压装模具的创新[J].第四届河南省汽车工程科技学术研讨会论文集,140-141
- [10] 侯明仁.防止车轮螺栓松动的措施[J].汽车技术,1986(03):63-64.

# Research and Application of One-Button Start-Stop Technology for the First Ansaldo GT36-S5 Heavy-Duty Gas Turbine Combined Cycle Unit in China

Chao Wang Longyun Zheng Wenhua Liu Kexun Wang

Shanghai Electric Power Co., Ltd. Minhang Power Plant, Shanghai, 200245, China

## Abstract

The traditional thermal power unit startup process faces issues such as long operation time, significant parameter fluctuations, and poor economic efficiency, making it difficult to meet the modern power grid's demand for rapid peak shaving response. Gas-steam combined cycle units play a crucial role in power grid peak shaving due to their rapid start-up, flexible regulation, cleanliness, and high efficiency. This paper systematically analyzes three key technical aspects of the combined cycle unit: gas turbine start-up sequence control optimization, steam turbine warm-up process improvement, and boiler transition control, focusing on the first GT36 gas turbine, the first high-pressure direct current waste heat boiler, and the first 250MW steam turbine. A comprehensive optimization scheme is proposed, providing theoretical basis and practical reference for improving the automation level of gas turbine power plants, shortening start-up time, and reducing energy consumption. It also offers a scalable technical path for intelligent control of gas-steam combined cycle units, which has significant engineering application value in enhancing the peak shaving capability of combined cycle power plants from daytime operation to nighttime shutdown.

## Keywords

GT36; DC waste heat boiler; One-click start-stop technology

# 国内首台 Ansaldo GT36-S5 重型燃气轮机联合循环机组 一键启停技术优化与应用

王超 郑隆云 刘文华 汪可训

上海电力股份有限公司闵行发电厂，中国·上海 200245

## 摘要

传统火电机组启动过程存在操作耗时长、参数波动大、经济性差等问题，难以满足现代电网对快速调峰响应的需求。燃气-蒸汽联合循环机组以其启动迅速、调节灵活、清洁高效的特点在电网调峰中扮演着至关重要的角色。本文针对首台GT36燃气轮机、首台高压直流的余热锅炉、首台250MW级蒸汽轮机汽机的联合循环机组，系统分析燃机启动顺控优化、汽机暖机过程改进和锅炉转态控制三大关键技术环节，提出一套全面优化方案，为提升燃机电厂自动化水平、缩短启动时间、降低能耗提供理论依据和实践参考，为燃气-蒸汽联合循环机组智能化控制提供了可推广的技术路径，对提升联合循环电厂日启夜停调峰能力具有显著工程应用价值。

## 关键词

GT36; 直流余热锅炉；一键启停技术

## 1 引言

随着自动化水平的提高，特别是在燃机电厂，一键启停技术应用越来越广泛。对于国内首台的 H 级燃机及配套的高压直流锅炉和汽轮机机联合循环机组还未有成熟的运用实例，进行一键启停控制功能的研究可以在提高机组自动化控制水平的同时，全面提高机组的运行水平和管理水平，

缩短机组启停时间，提高机组自动调节品质，对于调峰机组而言意义重大。

## 2 APS 框架及断点

### 2.1 APS 概念

APS 是机组自启停控制（Automatic Unit/Plant Start-up and Shut-down System）的缩写，用于实现燃煤机组或燃气轮机的全过程自动启动和停止控制，是机组顺序控制系统中最高一级的顺序控制。它根据机组工艺流程在启停过程中不同阶段的需要和对机组工况全面、准确、迅速的监测情况，

**【作者简介】**王超（1989—），男，中国湖南龙山人，本科，工程师，从事火力发电燃气-蒸汽轮机联合循环机组自动控制研究。

通过大量条件与时间等方面逻辑判断，向各功能组、功能子组或驱动级、发出控制指令，使机组能在冷态、温态、热态、极热态方式下进行启动。

## 2.2 启动顺控

### 2.2.1 启动顺控步序

机组启动顺控主要步序为：启动除盐水子组顺控→启动闭式水系统子组顺控→启动循环水系统子组顺控→启动

凝结水系统子组顺控→启动辅汽系统子组顺控→启动汽机辅助系统子组顺控（包含轴封、真空、油系统顺控）→启动低压给水加热系统子组顺控→启动低压系统子组顺控→启动高压给水系统子组顺控→启动高中压系统子组顺控→判断余热锅炉、旁路等允许燃机启动条件→启动燃机启动顺控→暖机冲转汽机并网→联合循环到 AGC 投入负荷。

如图 1 所示。

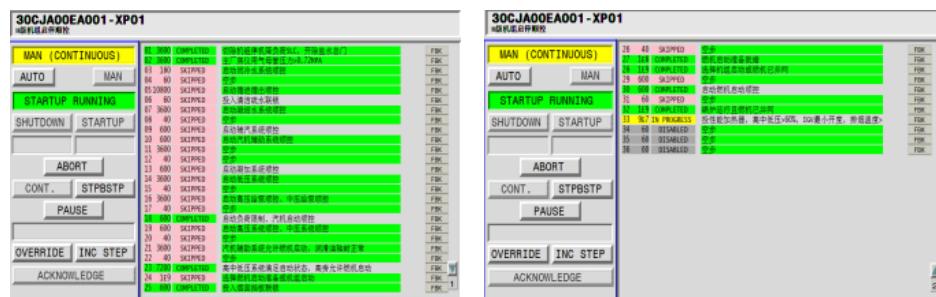


图 1 机组启动顺控

### 2.2.2 控制难点

如图 2 所示，F 级机组在燃机点火并网后，协调控制系统根据锅炉出口温度和 IGV 开度等生成一个由最低 370℃ 缓慢上升排烟温度设定值送至燃机控制系统，然后燃机根据排烟温度升负荷至暖汽机负荷，冲转压力和温度到设定后进行汽机的暖机和冲转，整个过程是没有断点。但 GT36 不接受排烟温度设定值，燃烧方式是二级顺序燃烧，仅点一级燃烧器时，排烟温度约为 500℃，对应负荷 10MW（夏季工况，冬季约工况 20MW），当二级投入，排烟温度快速上升至 600℃，对应负荷 70MW（夏季工况，冬季工况约 80MW），如何使燃机稳定在某个负荷是第一个难点。

250MW 的汽轮机也是首次设计，不能参照 F 级汽机无论冷态、温态或者热态均为同一冲转压力和温度，如何优化

冲转参数，让汽机快速并网这是第二个难点。

从图 2 不难看出，锅炉只要温度参数正常后基本不用管，但 GT36 配置的余热锅炉为高压直流，为国内首台，不同于常规汽包炉，也不同煤机的直流炉，设计的直流余热锅炉转态裕度小，如何快速安全转态成了第三个难点。

## 2.3 停止顺控

### 2.3.1 停止顺控步序

机组停止顺控主要步序为：投入机组最小负荷子环→投入高中低压系统疏水联锁→燃机降负荷至停机负荷→开高中低压旁路减温水隔绝阀→启动汽机停顺控→汽机解列燃机负荷到最小负荷启动燃机停顺控→停高中压系统顺控→停低压系统顺控→停汽机辅助系统顺控→停凝结水系统顺控→关烟囱挡板门。如图 3 所示。

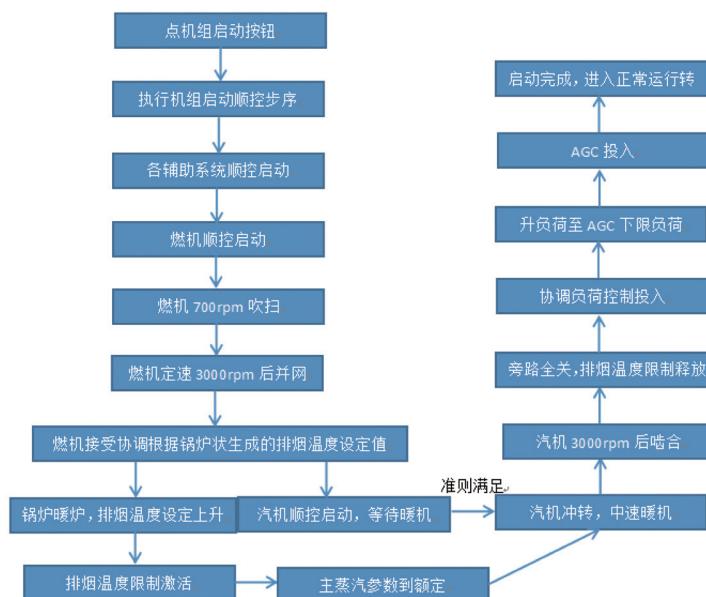


图 2 F 级燃机联合循环机组启动框图

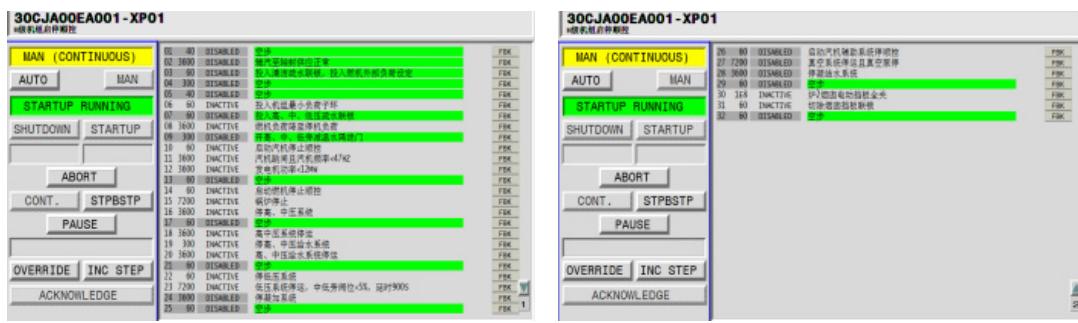


图 3 机组停顺控

### 2.3.2 控制难点

停机过程结构上不存在难点问题，但每次汽机走停顺控解列时仍有 30MW 负荷，是通过高排温度大于 450℃ 这一条件满足后直接 TRIP 的，如何实现汽机逆功率解列是 GT36 联合循环机组停机过程的难点。

## 3 APS 难点研究及优化应用

根据遇到的问题，明确整个启动过程的难点后，可以从以下几个方面入手：

### 3.1 构建计算模型

构建针对联合循环机组启停效益计算模型，将其作为启停过程优化前后判断依据。

$$F = |WQ - WH| \times C_{\text{机组}}$$

其中 F 为优化收益，WQ 为优化前的启动阶段到 AGC 下限的累计发电量，WH 为优化后的启动阶段到 AGC 下限的累计发电量，C 机组为利润。功率的累计可用一下公式计算：

$$W = \int_0^t w(t) dt$$

W 为启动阶段到 AGC 下限的累计发电量，是机组启动后时间的函数。所以缩短机组启动时间即可提高机组出力，带来更多经济效益。

### 3.2 Ansaldo GT36 燃气轮机

随着能源需求的增长，高效清洁的燃气轮机技术成为电力行业的重要发展方向。GT36 燃气轮机的透平进口燃气温度达到 1600℃ 级，其气动热力学设计和验证基本是从现有的 GT26 设计演变而来。该型燃机可在比较宽的工作范围内运行，并且还能够在折寿模式 (PO) 和延长寿命模式 (XL) 两种运行模式之间在线切换，折寿模式产生最大的性能和功率输出，而延寿模式允许更长的大修间隔期，两种模式选择可以平衡电力需求和节约成本，GT36 配备 15 级压气机和 4 级空气冷却透平，有 16 个火焰筒，燃料采用天然气为单一燃料，采用恒压顺序燃烧、低 NOx 燃烧技术。其主要参数如表 1 所示。

表 1 燃机参数简介

型号	GT36	转子结构型式	焊接转子
驱动方式	冷端驱动	燃烧器个数	16 个
点火转速	775 rpm	透平动叶进口初温	1390℃
自持转速	2700 rpm	进气系统	两级静态过滤系统
压气机	15 级轴流式，压比 25	排气压力（静压）	1.049 kpa
透平级数	4 级	排气温度	626.3℃
燃烧室型式	环管形燃烧室	排气流量	1028.3 t/h
每个燃烧室的燃料喷嘴数量	2 个		

### 3.3 缩短燃机启动到并网的时间

H 级机组启动，需在 775rpm 转速吹扫 5min 后才能点火，同时吹扫的同时会降低锅炉侧的温度 5℃，后续暖炉也会增加时间。燃机停机过程其实就是在进行吹扫，空气量大于开机时的 5 分钟定速吹扫量，若果能够减少启动时的吹扫时间，在相同时间里就能多发电。因此根据 H 级阀门情况在机组停运后增加 TSOV 的严密性测试（如图 4）。

停机后，一、二级的四个关断阀 (TSOV) 关闭，总放

散阀 51AA010 关闭，分别打开一 (51AA001)、二级放散阀 (55AA001)，打开压缩空气阀，TSOV1 (MBP40AA001) 和 TSOV2 (MBP45AA001) 的前后会有压差，在一定时间内压力大于 0.21bar，说明关断阀不存在泄漏，试验成功，下次启动机组无需吹扫。并网后按 20MW/h，缩短的 5min 可多发 1.7MW 左右电量，调峰机组，每日启停，每年按 100 次启停，多发电量为 170MW。

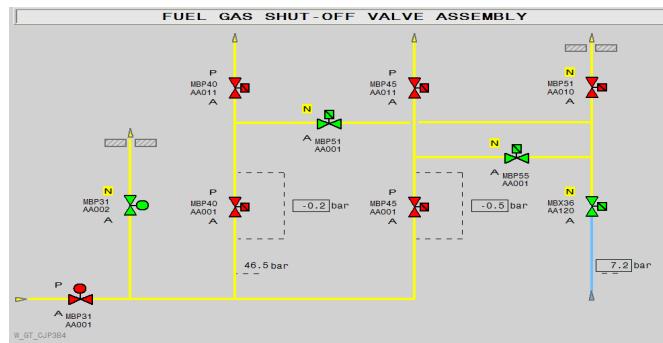


图 4 关断阀 TSOV 泄漏测试

### 3.4 汽机简介

蒸汽轮机采用上海电气三压、再热、三缸、向下排气，凝汽式汽轮机，主要参数如表 2 所示

表 2 蒸汽轮机主要参数

额定转速	3000 r/min
末级叶片的长度	1220 mm
末级叶片出口的环面面积	11.6 m <sup>2</sup>
高压蒸汽进汽压力	16.6 MPa(a)
高压蒸汽进汽温度	600°C
高压蒸汽进汽流量	46800 kg/h
高压缸排气压力	3.745 MPa(a)
高压缸排气温度	369.7°C
高压缸排气流量	127.81 kg/s
再热蒸汽进汽压力	3.4 MPa(a)
再热蒸汽进汽温度	600°C
再热蒸汽进汽流量	523764 kg/h

### 3.5 确定汽机状态

燃气 - 蒸汽联合循环机组在启动阶段汽机是个需求单元，启动阶段燃机的负荷是由汽机的状态来确定，所以首先要定义汽机的状态到底是冷态、温态还是热态。

上汽厂提供的高、中压缸推荐温度是根据高、中压转子温度裕度计算而来，所以将燃机点火瞬间汽轮机高压内缸中部 100% 处金属温度作为判断冷、热、温态判断依据

1) 冷态：高压内缸中部 100% 处金属温度小于 330°C，此时推荐温度基本为 390°C，

2) 温态：高压内缸中部 100% 处金属温度小于 380°C 且大于 330°C，汽机蒸汽推荐温度在 390°C ~ 490°C 之间

3) 热态：高压内缸中部 100% 处金属温度大于 380°C；推荐蒸汽温度至少在 490°C 以上。

### 3.6 确定对应燃机的负荷

汽机冷态时推荐蒸汽温度为 390°C，GT36 燃机仅点一级燃烧器排烟温度已接近 500°C，所以冷态时汽机的暖机对应的燃机负荷为二级未点时的最大负荷，若点火瞬间，汽机为冷态，发一个开关信号“Hold Point 2”至燃机，称为 HP2，限制燃机点二级燃烧器，待汽机并网允许燃机升负荷

后 HP2 释放，选定冲转压力为 5MPa。

由于 GT36 在低负荷段出力较大，HP2 对应的排烟温度还是能搞满足汽机所需的主蒸汽温度，所以温态也采用 HP2 点暖机，不过冲转压力会抬高至 6MPa。

汽机热态时，所需蒸汽温度较高，对应燃机负荷必须为点二级后的负荷才能有大于 500°C 的排烟温度，所以给到燃机一个“Hold Point 3”，称为 HP3，排烟温度在 600°C，冲转压力设为 7.2MPa。

### 3.7 优化缩短的暖机时间

汽机温态热态的中速暖机时间基本上根据上汽厂的准则来判断，现有的 F 级机组冷态暖机时间除了准则以外还有冷态启动倒计时，真空状态很好的情况下需要 6 小时，在破真空暖机后虽可缩短时长，但从燃机启动到汽机啮合需要 4 小时 10 分钟左右时间，H 机配置的这台汽轮机为新机型，准则很快能满足冲转条件，但仍受制冷态限制，强制测试后发现温度及振动均正常，未对汽机造成影响，所以经与厂家讨论确定汽机冲转时只看准则，准则满足即可冲转删除冷态暖机时真空函数的倒计时限制，缩短汽机暖机时间约半小时。

低压系统起压慢，温度要满足准则也相对较慢，所以将低压主汽门开启条件从顺控的反馈条件中剔出，先开高中压主汽门调门进行冲转并网，低压准则满足后再单独开低压主汽门和低压调门，此处节约时间半小时。

经过对顺控逻辑自主优化，与原汽轮机启动时间比较，缩短了低压系统带了的延时时间，整个联合循环机组从启动到汽机并网只需要 3 小时 8 分钟，缩短了将近一小时时间，也就是汽机并网后到锅炉转态的负荷点 330MW 提早了 40 分钟，多发 200MW，每年按照启停 100 次计算，多发 20000MW 电量。

## 4 高压直流转态过程控制优化

### 4.1 锅炉简介

余热锅炉采用上海电气三压、再热、无补燃、高压直流、中低压自然循环、卧式锅炉，室外布置，主要参数如表 3 所示：

表3 余热锅炉主要参数

高压蒸汽出口压力	16.99MPa (a)
高压蒸汽出口温度	602°C
高压蒸汽流量	468t/h
再热热段蒸汽出口压力	3.54MPa (a)
再热热段蒸汽出口温度	602°C
再热热段蒸汽流量	523.8t/h
中压蒸汽压力	3.69MPa(a)
中压蒸汽温度	310.4°C
中压蒸汽流量	63.6t/h

## 4.2 转态控制

燃机在不同环境温度情况下同样负荷对应的热量不同，转态时所需要的给水量也是变化的，再加上H级余热锅炉高压直流炉设计因锅炉的高压蒸发器受热面少，减少给水量强制转态容易汽化产生气泡导致分离器两侧温度偏差大，高压给水系统复杂等，基本无法按照设计的25%负荷来转态，也没有可参照的模型，如何解决这一问题是难点。

### 4.2.1 负荷变化

汽机并网前，协调负荷指令由燃机实际负荷加上固定10MW生成，冷态限制在30MW，温热态限制在90MW，燃机侧由HP2和HP3限制；当汽机并网后，旁路全关且高压转子温度大于250°C，协调将会释放燃机的HP2或HP3，燃机实际负荷上升，协调负荷指令开始上升，上限设置在190MW，由于燃机的排烟温度会迅速到650°C，设计汽机进汽温度为600°C，余热锅炉主蒸汽温度保护为607°C，所以燃机升温这一段限制燃机的升负荷速率为10MW/min，燃机负荷到190MW后，此时根据锅炉状态匹配的水量等待转态。转态完成到干态后协调闭环控制投入，协调负荷指令切至手动或AGC回路，汽机跟随模式，负荷响应慢，需要燃机快速调节，所以燃机指令由总的负荷指令减去汽机实际负荷生成。

### 4.2.2 给水流量控制

高压系统除了减温水和正常给水，还增加了给泵出口和高压省煤器各引一路冷却水去OTC系统，最终变成比锅炉出口压力略高的过热蒸气回到过热器；增加高压省煤器出口引一路给水至天然气二级性能加热器；增加不经省煤器的

高省旁路；整个系统比常规汽包炉复杂的多，如何在确保满足OTC冷却水、兼顾省煤器过冷度，同时还要满足燃机排烟温度随负荷变化的特性，最终保证锅炉分离器出口过热度在合理范围是个难题。

由于最初设计的负荷与转态时的给水量不匹配，根据手动控制下的负荷和对应流量拟合燃机250NW负荷以下对应的给水量的基础曲线，用环境温度作为其修正系数，经过三阶惯性环节后作为给水设定值。

但锅炉不同状态需要的水量也不一致。所以还需要根据锅炉状态确定转态时的水量，根据停机后观察高过出口温度冷却相对规律，将高过出口温度三选中的值为依据点，当高过出口温度小于210°C时，判断为冷态，转态时给水流量固定为150t/h，缓慢升燃机负荷至190MW（190MW为锚定的转态对应的燃机负荷），直到分离器出口过热度大于15°C；当高过出口温度大于210°C且小于400°C时判断为温态，转态时给水流量固定为165t/h，缓慢升燃机负荷至190MW，直到分离器出口过热度大于15°C；当高过出口温度大于400°C时为热态，转态时给水流量固定为180t/h，缓慢升燃机负荷至190MW，直到分离器出口过热度大于15°C。

最终组合成锅炉不同转态下三根不同的给水曲线。如均按照热态给水流量，需要40分钟才能完成，优化后转态时间缩短至10分钟，提早到450MW负荷时间缩短半小时，每年按照启停100次计算，多发6000MW电量。

## 5 APS 启停机实际应用

### 5.1 优化后冷态启动曲线

H级机组的冷态启动曲线（如图5），图中曲线1（红色）为H级联合循环机组总功率，曲线2（蓝色）为燃机转速，曲线3（绿色）为汽机转速，曲线7（紫色）为汽机负荷，从燃机启动到汽机并网需3小时8分。

### 5.2 热态启动曲线

热态启动曲线（如图6），图中曲线1（红色）为H级联合循环机组总功率，曲线2（淡蓝色）为燃机转速，曲线3（绿色）为汽机转速，曲线4（深蓝色）为汽机负荷，燃机顺控启动到燃机并网用时8min12秒，再到汽机并网用时48分钟，到联合循环总负荷450MW仅需1小时22分钟。

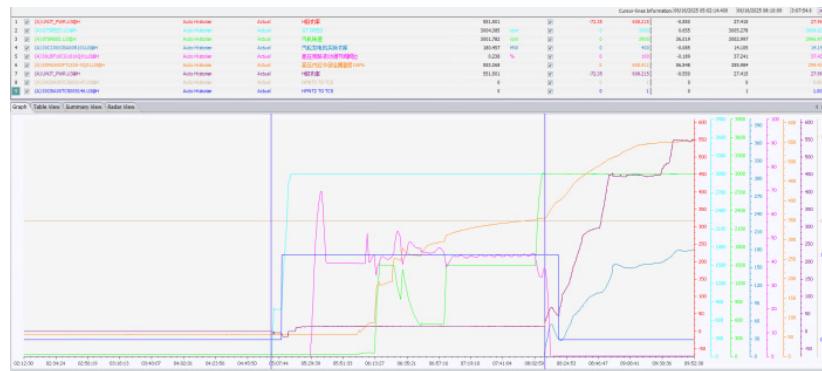


图5 H冷态启动至汽机并网时间

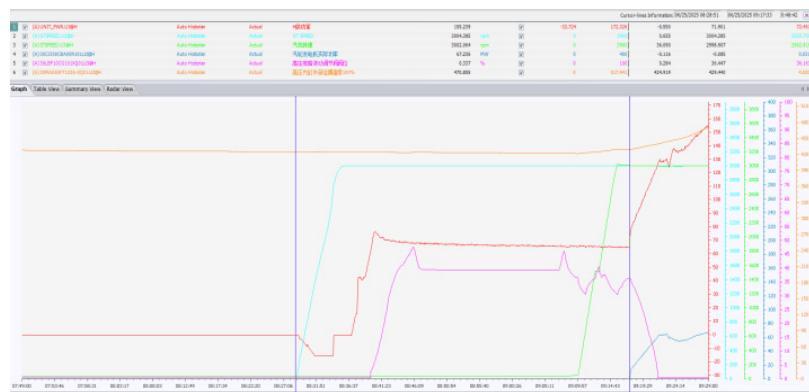


图 6 H 级机组热态启动曲线

## 6 结论

通过缩短燃机启动时间，减少汽机暖机时间，减少余热锅炉高压直流转态时间，一年可多发电量 26700MW，带入计算公式，一年可多盈利 80 万。从响应电网，能源保供能力方面来说也得到提升。尽管首台 H 级 GT36 燃气 - 蒸汽联合循环机组一键启停技术取得一些成效，但在汽机变参数暖机、锅炉转态等方面还有待深入研究。

## 参考文献

[1] 苏俊.燃气蒸汽联合循环电厂自启停控制系统APS的优化[J].电

子技术.2021,(4).176-177

- [2] 徐征.燃气蒸汽联合循环机组一键自启停技术[J].云南电力技术, 2012,40(06):76-78
- [3] 王力,王彬. 600MW 机组自启停控制方案介绍《电力设备》 2017年第19期
- [4] 北京能源投资（集团）有限公司，西门子电站自动化有限公司，艾默生过程控制有限公司：中国电力出版社：燃气—蒸汽联合循环发电机组自启停控制技术及应用.