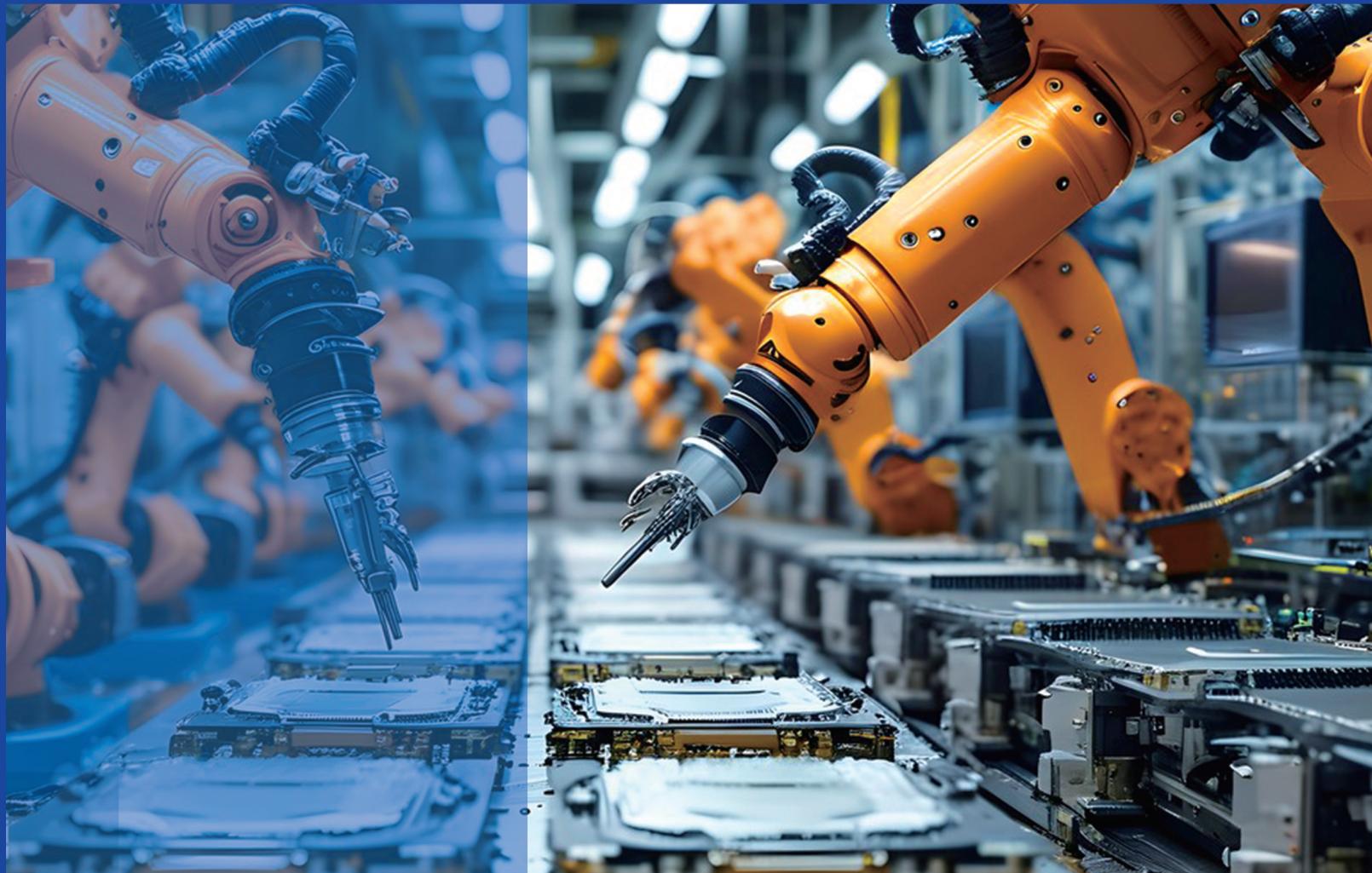


现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2 • Issue 5 • May 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(Online)



Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.

Tel.: +65 62233839

E-mail: 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 5 • May 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
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 5· May 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 | 纳米橡胶改性环氧树脂的制备及性能研究
/ 李海霞 | 1 | Study on the Preparation and Properties of Epoxy Resin Modified with Nano-Rubber
/ Haixia Li |
| 6 | 新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用及力学性能分析
/ 苏益军 | 6 | The synergistic application and mechanical property analysis of new wall materials and cement-based composite materials
/ Yijun Su |
| 9 | 建筑钢结构施工技术与质量控制的措施探讨
/ 张旭阳 吴丽丽 | 9 | Discussion on construction technology and quality control measures of building steel structure
/ Xuyang Zhang Lili Wu |
| 12 | 掺烧新疆煤对 W 火焰锅炉运行特性影响的探索
/ 张云松 杨红喜 赵玉军 | 12 | Study on the influence of blending Xinjiang coal on the operation characteristics of W flame boiler
/ Yunsong Zhang Hongxi Yang Yujun Zhao |
| 15 | 超低能耗建筑外墙保温系统施工工艺优化及质量控制研究
/ 曹琨 范雅婷 | 15 | Study on construction technology optimization and quality control of exterior wall insulation system in ultra-low energy consumption buildings
/ Kun Cao Yating Fan |
| 18 | 基于 2-4 模型与 “5831 班组安全屋” 模型的事故隐患治理研究
/ 杨祎 | 18 | Research on Hidden Danger Management Based on 2-4 Model and “5831 Team Safety House” Model
/ Yi Yang |
| 21 | 粮食仓储企业双重预防机制的应用浅析
/ 刘国梁 王帅 王海涛 | 21 | A Brief Analysis of the Application of the Dual Prevention Mechanism in Grain Storage Enterprises
/ Guoliang Liu Shuai Wang Haitao Wang |
| 24 | 液体流量计量检定过程中的误差分析及控制策略
/ 徐创福 | 24 | Error analysis and control strategy in liquid flow measurement verification
/ Chuangfu Xu |
| 37 | 石油化工机电设备安装试运行异常现象分析与应对方
法分析
/ 李东宸 刘永东 | 37 | Analysis of abnormal phenomena and countermeasures for installation and trial operation of petrochemical mechanical and electrical equipment
/ Dongchen Li Yongdong Liu |

Study on the Preparation and Properties of Epoxy Resin Modified with Nano-Rubber

Haixia Li

Motic (Xiamen) Intelligent Electric Co., Ltd., Xiamen, Fujian, 361101, China

Abstract

Fully vulcanized nano-carboxylated nitrile rubber latex (VP501) was blended with epoxy resin E51 at specific ratios, followed by removal of water through vacuum distillation to prepare nano-carboxylated nitrile rubber-toughened epoxy resin. The particle size distribution and FTIR spectrum of VP501 were characterized, while the processability, thermal properties, and mechanical performance of the modified epoxy composites were investigated. Results demonstrate that the highly cross-linked rubber latex can be uniformly dispersed in epoxy resin via vacuum distillation. The VP501-modified epoxy composites exhibit excellent flowability, meeting the processing requirements for Automated Pressure Gelation (APG) technology. The impact strength of cured specimens increases with higher VP501 content. At 9 phr loading, the impact strength improves from 15.48 kJ/m² to 20.92 kJ/m². The glass transition temperature (T_g) also shows enhancement, rising from 113.43°C to 115.75°C.

Keywords

epoxy resin; full vulcanized nano-carboxylatednitrile rubber (VP501); Blending-evaporation modification; toughening; glass transition temperature

纳米橡胶改性环氧树脂的制备及性能研究

李海霞

麦克奥迪（厦门）智能电气有限公司，中国·福建厦门 361101

摘要

将全硫化纳米羧基丁腈橡胶乳液（VP501）与环氧树脂E51按一定比例混合，然后减压蒸馏出乳液中的水分，可制备得到纳米羧基丁腈橡胶增韧改性环氧树脂。对VP501进行了粒径分布和红外光谱测试，同时对改性环氧树脂复合材料的工艺性能、热性能和力学性能等进行了研究。结果表明：高交联的橡胶乳液可以通过减压蒸馏的方法均匀分散于环氧树脂中。VP501改性环氧树脂复合材料流动性良好，符合自动压力凝胶（APG）生产工艺需求。固化物的冲击强度随着VP501添加量的增加而增大。当添加量为9份时，冲击强度从15.48kJ/cm²提高提升至20.92kJ/cm²。玻璃化转变温度同时也有提升，从113.43°C提升到115.75°C。

关键词

环氧树脂；全硫化纳米羧基丁腈橡胶（VP501）；共混蒸发改性；增韧；玻璃转变温度

1 引言

环氧树脂具有优良的耐热性和电气性能，被广泛用于电气绝缘材料，然而环氧树脂存在质脆、耐冲击和耐应力开裂性差等问题。许多报道已经研究了全硫化纳米羧基丁腈橡胶（VP501）对环氧树脂的增韧改性现象^[1-5]。董玲等人比较了添加VP501前后环氧浇注体的力学性能以及拉伸断面微观形貌的不同。结果表明VP501的加入使得环氧树脂浇注体拉伸弯曲性能在不明显降低的情况下冲击性能大幅提高。玻璃化转变温度同时得到提高，拉伸断裂面形貌由光滑变粗糙，达到了增韧效果^[1]。刘全中等人设计制备了由氧

化石墨烯（GO）和VP501构成的具有插层核壳结构的石墨烯橡胶复合材料GO-VP501，将GO-VP501通过机械共混工艺加入到环氧树脂（EP）中，制备了GO-VP501/EP复合材料。结果表明，复合材料的拉伸强度和耐热性能均有一定程度的提高^[2]。黄帆等用三辊研磨机在室温下混合环氧树脂与VP501，制成增韧母料。弹性纳米粒子改性环氧树脂具有极好的冲击韧性，且可使环氧树脂相的T_g升高，从而使改性环氧树脂的冲击韧性和耐热温度同时得到提高。文献研究了90nm的羧基丁腈弹性纳米粒子改性热固性环氧树脂，均比用传统的液体端羧基丁腈橡胶具有更好的增韧效果，并且，改性后环氧树脂的耐热温度和玻璃化温度不但不降低，反而有所提高^[4]。

以上提到的VP501是以橡胶乳液为原料，通过高能辐射源辐照交联将橡胶粒径固定，然后经沉淀或喷雾干燥得到

【作者简介】李海霞（1978-），女，中国河南焦作人，硕士，工程师，从事环氧树脂绝缘材料改性研究。

全硫化粉末橡胶^[6,7]。因此在进行环氧树脂改性时，还需要与环氧树脂进行三辊研磨分散或高速剪切分散，制备过程复杂耗能高，且团聚的橡胶粒子也无法完全分散均匀。

纳米粒子由于具有高的比表面积，容易团聚从而影响纳米增韧效果，纳米粒子的分散一直是环氧树脂增韧改性的关键因素。为了使 VP501 能均匀地分散于环氧树脂中，本文采用 VP-501 乳液与环氧树脂直接混合，通过旋转蒸发器将乳液中的水分从混合物中提取出来，最终得到分散性良好的橡胶增韧改性环氧树脂。该方法得到的改性环氧树脂流动性好，固化后样品性能良好，起到对环氧树脂的增韧效果。此方法避免了 VP501 乳液干燥过程的团聚及与环氧树脂分散的三辊研磨或高速剪切步骤。

2 实验部分

2.1 原材料

环氧树脂（E51）：双酚 A 二缩水甘油醚型环氧树脂，巴陵石化。

甲基四氢苯酐（MeTHPA）：濮阳惠成电子材料股份有限公司

全硫化纳米丁腈橡胶（VP501）乳液：丙烯腈含量为 26%。交联度分别为 90% 和 95%，北京化工研究院所属北京市北化研新技术公司。

二甲基苄胺：麦克林试剂。

二氧化硅填料：粒径 20-30um，江苏联瑞新材料股份有限公司

2.2 试样制备

2.2.1 纳米橡胶改性环氧树脂的制备

将不同交联度 VP501 橡胶乳液按一定比例添加进环氧树脂 E51 中，调整一定的温度和真空度，抽真空旋转蒸发出其中的水分，直至物料恒重，完全去除复合物中的水分。最终得到流动性良好的橡胶改性环氧树脂。

2.2.2 纳米橡胶改性环氧树脂固化物的制备

将环氧树脂、固化剂、填料和促进剂以 100: 80: 350: 1 的配比称量，VP501 的添加量分别为 0, 3, 6 和 9 份（环氧树脂按 100 份计算）。按此比例混合后，搅拌物料 0.5h，

放入 80℃烘箱固化脱模，然后放入 145℃升温固化 9h。

2.3 性能表征

VP501 的粒度由欧美克 NS-90 plus 纳米粒度分析仪测出。VP501 的固含量由 DZF-6210 真空干燥箱烘干恒重测定。采用 NICOLET IS50 测试样品的红外光谱图。扫描范围 500-4000cm⁻¹，分辨率 4cm⁻¹，扫描 32 次。采用 BROOKFIELD 博勒飞 DV2T 粘度计测试环氧树脂混合物的粘度随时间的变化曲线，采用 4 号转子。采用梅特勒差示扫描量热仪 RY DSC25 测试试样的玻璃转化温度 T_g，按 IEC1006 测试方法测试。采用 LEGEND 2367 Instron 万能试验机测试固化样条的拉伸强度、弯曲强度等参数，弯曲强度按 ISO178 测试方法，拉伸强度按 ISO527 方法测试。冲击强度采用 XJJ-5 冲击试验机，按 ISO-179 方法测试。

3 结果与讨论

3.1 VP501 乳液固含量和粒径分布测试

本文使用的商品弹性纳米粒子“纳普 VP-501”按专利^[8]方法制备：在羧基丁腈乳液中，按干胶重量的 5% 加入交联助剂 TMPTA（三丙烯酸丙烷三甲醇酯）后，进行辐照交联，辐照剂量为 2.5Mrad，经喷雾干燥后得到羧基丁腈纳米粒子，其凝胶含量为 90-96.1%。使用这样的制备方法，交联助剂主要集中在橡胶粒子表面，加之辐照时在水相产生大量的激发分子和离子，使纳米粒子的表面比中心更容易交联，因此，弹性纳米粒子的微观结构应为特殊的“梯度交联结构”，其特点是：粒子最外交联度最高，分子运动最困难；从外至里交联度逐渐降低，中心部分交联度明显低于外部。这样的特殊梯度交联结构既保持了橡胶的弹性，又避免了橡胶粒子的凝并，使之非常容易以纳米尺度分散在环氧基体中^[4]。

从厂家获得交联度分别为 90% 和 95% 的两款乳液。测得两款乳液的固含量分别为 44.85% 和 45.70%，以此确定添加进环氧树脂中橡胶粒子的数量。同时也测定了两款乳液中橡胶粒子的粒径分布曲线，如图 1 所示。从粒径分布图中看出 D₅₀ 均在 112nm 左右，呈现正态分布。橡胶的交联程度基本不影响颗粒的粒径分布。表明交联后的乳液中橡胶粒子仍呈现纳米级分布状态。

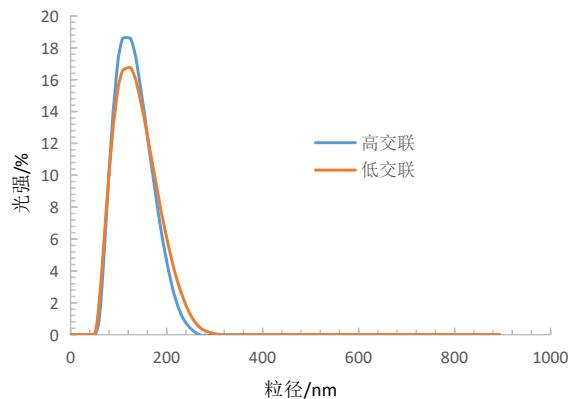


图 1 VP501 乳液的粒径分布

3.2 VP501的红外光谱

将两款橡胶乳液在50℃条件下烘干,形成薄膜,进行红外光谱检测。图2为两款样品的红外光谱图。

从图中可以看到,3400cm⁻¹出宽的吸收带是由羟基-OH的伸缩振动引起的。2937cm⁻¹处吸收峰是由亚甲基-CH₂-的伸缩振动引起的,2235cm⁻¹为腈基-CN特征峰,1738cm⁻¹处为羰基C=O的特征吸收峰,1455cm⁻¹为-CH₂-的变形振

动峰,970cm⁻¹和953cm⁻¹对应于-CH=CH₂和反式-CH=CH-乙烯基吸收峰。上述两种原料的特征吸收峰的位置并未发生显著的变化。只是在1738cm⁻¹处属于羧基的伸缩振动特征峰的位置以及峰强度有小幅变化。该强度的变化是由于两款橡胶粒径的交联程度不同引起的。这是因为高交联度的试样会形成更多的交联键,因此对应于该处峰强度的改变。

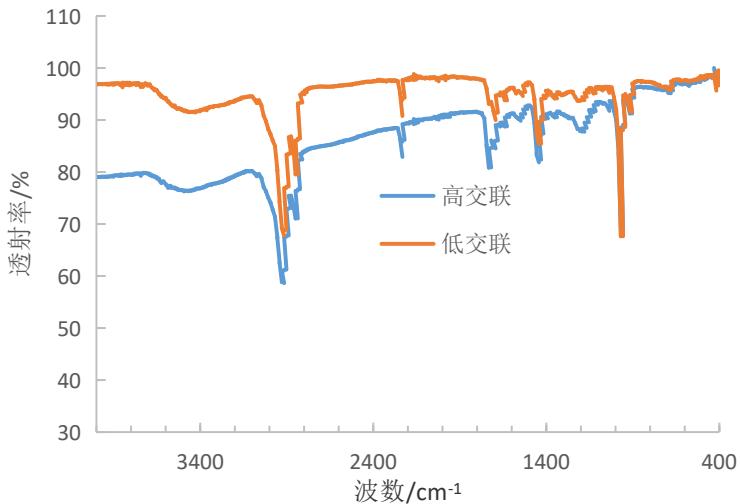


图2 两种交联度橡胶的红外光谱

3.3 改性环氧树脂复合材料的粘度曲线

两种交联度橡胶乳液在制备改性环氧树脂时呈现不同的粘度行为。在高温旋转蒸发过程中,随着水分的减小,低交联橡胶与环氧树脂混合物的粘度急剧升高最终不具备流动性。而高交联橡胶表面具有较高的交联度,因此在保持橡胶原有粒径的同时与环氧树脂具有更高的相容性和流动性。

本研究的复合材料配方会采用APG浇注工艺,因此对

配方体系的粘度有一定要求。粘度过高可能导致注料困难。橡胶粒子的添加一定程度上也会对配方体系的粘度产生影响,进而影响浇注工艺操作性,因此配方体系的粘度增长是需要考核的指标之一。本文用粘度仪对橡胶粒子改性环氧树脂复合材料45℃下的体系粘度做了测试。环氧树脂复合材料包括环氧树脂,固化剂,填料和促进剂,以及不同含量的橡胶增韧剂。图3为不同配方条件下的粘度曲线。

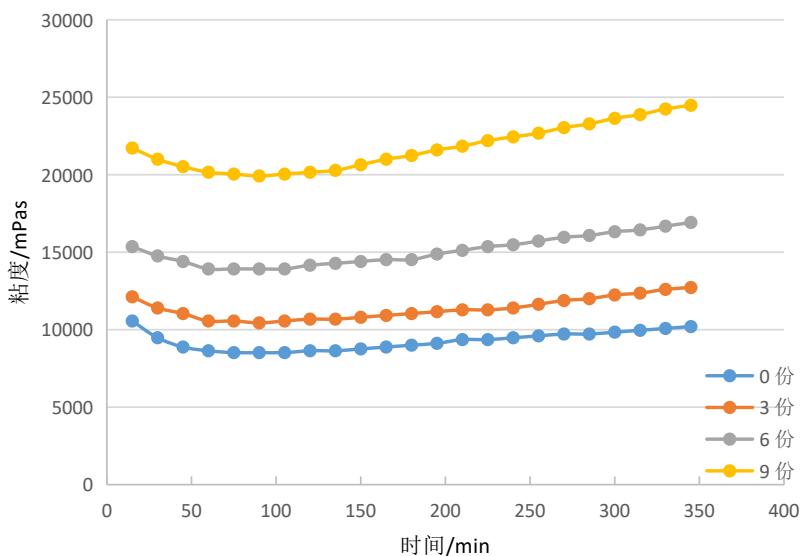


图3 橡胶粒子改性环氧树脂复合物的粘度曲线

通过图3的结果可知,未添加橡胶的体系初始粘度为10000mPa·s左右,随着时间的增长,345min后体系粘度基本无增长。在添加橡胶粒子的体系中,随着橡胶粒子含量的增加体系粘度从12000mPa·s增长至20000mPa·s。从粘度随时间的增长情况来看,添加份数为3份的体系从12000mPa·s增加至12700mPa·s。6份的从15360mPa·s增加至17040mPa·s,9份的从21720mPa·s增长至24720mPa·s。添加橡胶粒子的体系虽然粘度比未添加的要大,但从整体粘度及增长趋势来看,复合材料流动性良好,总体在工艺操作接受范围内。

3.4 改性环氧树脂复合材料的玻璃化转变温度

从图4中可以看出,随着VP501添加份数增大,T_g略有提升。与黄帆等人的实验结果一致^[4]。根据两聚合物相容性的不同,其共混物的玻璃化转变温度一般介于二聚合物玻璃化转变温度之间,形成单一或内移的两个玻璃化转变温度。但当二聚合物间存在强相互作用时,玻璃化温度的变化可不遵循此规律^[9-11]。例如,Percec等和Kwei等均发现当两聚合物间相互作用较强时,完全相容共混物体系的T_g可以高于两聚合物中任一聚合物的玻璃化温度。本实验的结果也表明橡胶粒子与环氧树脂存在强烈的相互作用。

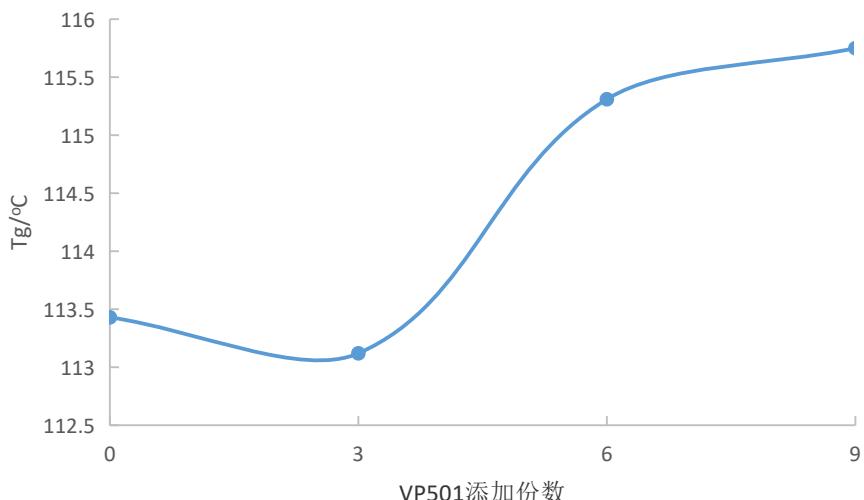


图4 改性环氧树脂复合材料的玻璃化转变温度

3.5 改性环氧树脂复合材料力学性能

将浇注样板加工成相应标准样条,分别在LEGEND 2367 Instron万能试验机和XJJD-5冲击试验机进行拉伸、弯曲和冲击实验。最终力学性能结果是将5个有效样本的实验值在合理误差范围内进行均值处理。为确认增韧环氧酸酐体系的力学性能,用同一配方浇注了未添加及添加不同核壳粒子环氧-酸酐体系固化。

3.5.1 拉伸强度

从表1可以看出,复合材料的拉伸强度和断裂伸长率均随着橡胶添加量的增加呈现下降趋势。未加VP501的拉伸强度为92.9MPa,随着添加量的增大到9份,拉伸强度降低至82.3MPa。断裂伸长率则从1.5%提升至2.2%,拉伸模量从8815降至7479。以上变化趋势表明,当在环氧树脂中逐渐添加VP501,橡胶柔性分子链与环氧树脂刚性链段缠绕。导致材料拉伸强度降低。随之添加量的增加,断裂伸长率增加,从而增强抗断裂性能。强度和模量均有所下降,但下降程度不大,其强度和模量在材料可应用范围内。

表1 不同添加份数固化物的拉伸强度和断裂伸长率

试样	拉伸强度 /Mpa	断裂伸长率 /%	拉伸模量 /Mpa
0	92.9	1.5	8815
3	88.5	1.7	8120
6	86.1	1.9	7895
9	82.3	2.2	7479

3.5.2 弯曲强度

表2为不同添加份数复合材料的弯曲强度性能。实验结果表明,含量在0-9之间时,经过VP501改性后的环氧树脂弯曲强度随着橡胶添加份数增加呈现波动状态。在3份时,弯曲强度略有增加,随着添加量的加大,弯曲强度又有所下降。添加橡胶后,弯曲应变从1.6%增至2.0%,随着橡胶粒子含量的增加,应变维持在2.0%附近。弯曲模量有持续下降的趋势。体现出与拉伸强度稍有不同的变化趋势。整体弯曲强度与未添加橡胶粒子的体系变化不大,满足应用对材料强度的需求。

表2 不同添加份数固化物的弯曲性能

试样	弯曲强度 /Mpa	弯曲应变 /%	弯曲模量 /Mpa
0	153.9	1.6	11752
3	160.5	2.0	10977
6	158.4	2.1	10613
9	154.0	2.2	10163

3.5.3 冲击性能

图5为改性复合材料的冲击强度测试结果。随着添加

橡胶份数的增加冲击强度有个坡度上升的趋势。添加份数9份时的冲击强度为20.92kJ/m²，同未添加的15.48kJ/m²相比，冲击强度增加了35%。冲击强度提高的原因是VP501以分散相的形式存在与环氧树脂之中被称为“海岛结构”。在这种海岛结构中，作为海岛的橡胶可以起到吸收、分散外来破坏载荷，减缓断裂过程。从而实现整个体系宏观上体现出的韧性^[4]。



图5 不同VP501添加份数的冲击强度

4 结论

本文通过旋转蒸发法制备出了流动性良好的纳米橡胶粒子改性环氧树脂，并对复合材料的性能做了研究。通过研究得出以下结论：

不同交联程度的橡胶乳液的粒径分布和红外光谱结果表明辐照程度不同的橡胶粒子粒径分布大致相同，不同之点在于羧基吸收峰的峰形不同。

高交联度橡胶粒子改性环氧树脂流动性良好，添加至配方中不影响配方的工艺性，其粘度在工艺许可范围内。直接添加法避免了增韧粒子的干燥过程及与环氧树脂研磨或高速剪切分散过程，使纳米颗粒均匀分散进环氧树脂中。

性能测试表明拉伸强度和弯曲强度无显著下降，冲击强度随添加量的增大有明显提高，添加橡胶粒子的配方固化物冲击强度从15.48kJ/m²提升至20.92kJ/m²，冲击强度增加了35%。同时玻璃转变温度也有提升。

参考文献

- [1] 董玲, 李鹏, 杨小平, 等. 全硫化纳米羧基丁腈橡胶增韧环氧树脂性能的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013 (1) 20-24.
- [2] 刘全中, 郝春波, 王岩, 等. GO-VP501/EP复合材料的制备及性能研究[J]. 应用化工 2022, 51 (5) 1306-1313.
- [3] LI B H, ZHANG X H, QI G C, et al. A rubber-modified epoxy

composite with very high toughness and heat resistance. Polymers and Polymer Composites 2019,27(9)582-586.

- [4] 黄帆, 刘轶群, 张晓红, 等. 弹性纳米粒子改性环氧树脂的研究[J]. 中国科学 B辑 化学 2004 34 (5) 432-440.
- [5] 戚桂村, 乔金樑, 张晓红, 等. 一种高耐热性高韧性环氧树脂组合物及其制备方法. 中国. CN102268174B[P]. 2016-08-17.
- [6] 乔金梁, 魏根栓, 张晓红, 等. 全硫化可控粒径粉末橡胶及其制备方法和用途. 中国. CN1152082C[P]. 2004-06-02.
- [7] 刘轶群, 张晓红, 乔金梁, 等. 一种交联型粉末橡胶及其制备方法和用途. 中国. CN1145662C[P]. 2004-04-14.
- [8] QIAO J, WEI G, ZHANG X, et al. Fully vulcanized powdery rubber having a controllable particle size preparation and use thereof. USA. US6423760[P]. 2002-07-23.
- [9] JOSE M, PURADA R, PERCEC V. Interchain electron Donor-acceptor complexes:A model to study polymer-polymer miscibility. Macromolecules, 1986,19:55-64
- [10] PEARCE E M, KWEI T K, MIN B Y. Polymer compatibilization through hydrogen bonding. J Macromolecules Sci Chem, 1984, A21:1181-1216.
- [11] KWEI T K. The effect of hydrogen bonding on the glass transition temperatures of polymer mixtures. J Polym Sci, Polym Lett Ed, 1984,22:307-313

The synergistic application and mechanical property analysis of new wall materials and cement-based composite materials

Yijun Su

Dali Science and Technology Achievement Transformation Center, Dali, Yunnan, 671000, China

Abstract

With the increasing demand for green, environmentally friendly and energy-saving materials in the construction industry, the application of new wall materials and cement-based composite materials has gradually received attention. The main wall materials in Yunnan Province include autoclaved aerated concrete blocks, ordinary concrete small hollow blocks, sintered perforated bricks and solid concrete bricks. These materials play an important role in building energy conservation and structural safety. This paper explores the synergistic application of new wall materials and cement-based composite materials, and analyzes their mechanical properties and their impact on building structures. Research shows that through reasonable material ratios and optimized production processes, the combined application of the two can effectively enhance the compressive strength, sound insulation and thermal insulation of walls, and reduce carbon emissions, promoting the green development of the construction industry.

Keywords

New wall materials Cement-based composite material Collaborative application Mechanical properties; Yunnan Province

新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用及力学性能分析

苏益军

大理市科技成果转化中心，中国·云南大理 671000

摘要

随着建筑行业对绿色、环保和节能材料需求的增加，新型墙体材料与水泥基复合材料的应用逐渐受到重视。云南省的主要墙体材料包括蒸压加气混凝土砌块、普通混凝土小型空心砌块、烧结多孔砖和混凝土实心砖，这些材料在建筑节能和结构安全性方面具有重要作用。本文探讨了新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用，分析了其力学性能及对建筑结构的影响。研究表明，通过合理的材料配比和优化生产工艺，二者的协同应用能有效提高墙体的抗压强度、隔音性和保温性，并能减少碳排放，推动建筑行业的绿色发展。

关键词

新型墙体材料；水泥基复合材料；协同应用；力学性能；云南省

1 引言

随着全球建筑能效和环保要求的提升，绿色建筑材料的需求日益增长。墙体材料直接影响建筑物的结构稳定性、热隔离、声学性能及抗震性，尤其在不同气候条件下，对建筑的节能效果有着显著影响。云南省主要墙体材料包括蒸压加气混凝土砌块、普通混凝土小型空心砌块、烧结多孔砖和混凝土实心砖，各有其优劣。水泥基复合材料通过掺加矿物掺合料、增强纤维等改善传统水泥的性能，并可与新型墙体材料协同应用，进一步提升墙体性能，如抗压强度、抗裂性、保温性及隔音效果。本文结合云南省的实际情况，探讨二者

的协同应用及其力学性能，旨在推动绿色建筑材料的广泛应用，助力绿色建筑健康发展。

2 新型墙体材料的种类与特点

2.1 蒸压加气混凝土砌块

蒸压加气混凝土砌块 (AAC) 是一种以砂子为主要原料，经过高温蒸压养护而成的轻质墙体材料。该材料具有较低的密度，良好的保温、隔音性能，且具有较高的抗压强度和耐火性。蒸压加气混凝土砌块的主要优势在于其低热导率，使得建筑在夏季能够保持较低的温度，在冬季则保持温暖，从而具有显著的节能效果。此外，蒸压加气混凝土砌块的生产工艺相对环保，能够有效减少建筑能耗和温室气体排放。其轻质特性使得建筑整体重量较轻，减轻了建筑结构的负担，施工便捷。由于其良好的耐火性，蒸压加气混凝土砌

【作者简介】苏益军 (1968-)，男，白族，中国云南大理人，本科，工程师，从事经济，法律研究。

块能在火灾中提供安全保障，因此在多层建筑中得到广泛应用。除了作为墙体材料，蒸压加气混凝土砌块还可作为内外墙保温材料，应用于住宅、商业建筑以及公共设施等领域。其可回收性和低能耗的生产过程符合绿色建筑的标准，适应了节能环保的需求。

2.2 普通混凝土小型空心砌块

普通混凝土小型空心砌块由水泥、砂、石及水通过高压混合而成，砖体内部形成了大量气孔，从而降低了其密度，增强了热隔离和保温性。该类砖的力学性能较好，能够承受较大的压力，同时具备较强的隔音效果。普通混凝土小型空心砌块的优点在于其高强度、耐久性以及较强的抗压能力，能够满足建筑墙体和外立面在高负荷条件下的应用需求。其多孔结构不仅提升了保温性，还增加了空气流通性，对改善建筑的室内环境有一定的帮助。此外，普通混凝土小型空心砌块的生产工艺较为简单，原料成本低，生产周期短，因此在很多建筑工程中得到了广泛应用。虽然其隔热性较好，但相较于其他新型墙体材料，重量相对较大，可能会影响施工效率，尤其在大型建筑中，材料的运输和施工过程中可能会增加成本。因此，在应用过程中需要综合考虑其优缺点，根据具体情况做出选择。

2.3 烧结多孔砖

烧结多孔砖是一种通过高温烧结形成的多孔砖，具有较高的强度和良好的保温性能。该砖的生产工艺简单，材料来源广泛，成本较低，因此在云南省及全国范围内得到广泛应用。烧结多孔砖具有较好的力学性能，能够承受较大的负荷，同时其透气性和隔音效果也较为突出。烧结多孔砖的优点在于其生产过程相对环保，且采用了自然矿物质作为原料，减少了资源浪费。该材料广泛应用于住宅、商业建筑以及低层建筑项目中。然而，相较于蒸压加气混凝土砌块，烧结多孔砖的热隔离效果和保温性能稍逊色，尤其在高寒地区的应用可能不如蒸压加气混凝土砌块。因此，烧结多孔砖通常用于低层建筑、非承重墙体或临时性建筑结构，在云南省的建筑中主要应用于农村住宅或低层商业建筑，适用于对保温性要求不高的场合。

2.4 混凝土实心砖

混凝土实心砖以水泥和砂石为主要原料，具备高抗压强度与强结构稳定性，在建筑领域，尤其是承重墙体中应用广泛。它强度高、耐久性好，能有效承载建筑结构重量，是高层建筑及承重墙体的理想之选。同时，其生产成本低、工艺成熟，进一步推动了在建筑中的普遍应用。

然而，混凝土实心砖也存在明显缺点，热传导率高、保温性能差，在夏冬两季，建筑内部温度较难调控。为提升能源效率，常需搭配保温层、隔热涂层等隔热材料使用。另外，因其重量较大，施工时要充分考虑对建筑结构的压力影响，所以它更适用于需强结构支撑的建筑，并非所有建筑类型都适用。在高层建筑和大跨度结构中，它能提供更可靠的

支撑与稳定性。

3 水泥基复合材料的特性与优化设计

3.1 水泥基复合材料的构成

水泥基复合材料是由水泥、矿物掺合料（如粉煤灰、矿渣、硅灰等）、增强纤维（如钢纤维、玻璃纤维、聚丙烯纤维等）以及其他辅助材料组成的建筑材料。矿物掺合料作为一种绿色环保材料，能够改善水泥的流动性和凝固性能，同时在生产过程中减少水泥的使用，降低碳排放。粉煤灰、矿渣等材料的加入，不仅能够提高水泥基复合材料的抗压强度，还能增强其耐久性和抗老化性能。增强纤维的加入，使得水泥基复合材料在抗拉强度、韧性和抗裂性方面得到了显著提升，尤其是在混凝土中加入钢纤维和玻璃纤维后，能有效提高材料的抗裂性和抗冲击能力。此外，聚丙烯纤维的加入可以改善水泥基复合材料的防裂性能和耐火性能，进一步增强其在极端条件下的稳定性。这些优化设计和复合材料的创新为建筑结构提供了更高的强度、更好的耐久性以及更广泛的适用性。

3.2 水泥基复合材料的性能优势

水泥基复合材料相较于传统水泥材料，具有显著的性能优势。首先，水泥基复合材料的抗压、抗拉和抗裂性能得到显著增强，这使得其能够承受更大的负载，特别适合于大跨度和高强度的建筑结构。通过矿物掺合料的优化应用，水泥基复合材料的抗渗性、耐高温性和耐腐蚀性得到了大幅提升，确保了在各种环境下的长期使用稳定性。此外，水泥基复合材料的耐久性较高，即使在长期使用过程中，材料的性能依旧保持稳定，不容易发生老化或破裂，从而大大延长了建筑的使用寿命。在防水和抗腐蚀性方面，水泥基复合材料在桥梁、隧道等结构中具有极高的优势，尤其在对抗湿气和化学侵蚀的环境中，表现出优异的耐久性能。通过进一步优化材料配比和生产工艺，水泥基复合材料的强度和韧性能够满足不同建筑项目的需求，尤其适用于对结构强度和耐久性要求较高的建筑项目。

3.3 水泥基复合材料的应用领域

水泥基复合材料在建筑、道路、桥梁等多个领域都有广泛的应用。随着建筑节能要求的提升，水泥基复合材料在墙体材料中的应用也日益增多，尤其是在高强度、抗裂性和保温隔热等方面需求较高的建筑项目中，水泥基复合材料成为了理想选择。在建筑墙体中，水泥基复合材料具有较好的抗裂性和强度，使得其在承重墙体和隔墙中的应用效果尤为突出。通过水泥基复合材料的应用，墙体不仅具备更好的抗压强度和稳定性，还能有效提高其抗震能力，确保建筑结构的安全性。随着低碳环保理念的推广，水泥基复合材料的绿色生产工艺逐渐得到应用，特别是采用工业废渣和可再生材料作为掺合料后，材料的环保性能得到显著提升。在桥梁和道路的建设中，水泥基复合材料通过提升其抗拉强度和耐

腐蚀性能，进一步延长了结构的使用寿命，并且在桥梁的耐久性和抗震性方面展现了较大的优势。此外，水泥基复合材料在预制构件、隧道以及海洋工程中也有着广泛的应用，通过优化设计和创新工艺，不仅提高了结构的承载能力，还提升了整体工程的安全性和稳定性。

4 新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用

4.1 协同应用的优势分析

新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用能够显著提升建筑的综合性能，满足不同建筑项目的多重需求。合理搭配这些材料，可以兼顾墙体的强度、保温、隔音、抗震等多方面的需求。例如，蒸压加气混凝土砌块与水泥基复合材料结合，可以有效提升墙体的保温隔热性能，同时保持较高的强度，而不牺牲结构的稳定性。这种结合不仅提高了墙体的热隔离效果，还能在低能耗建筑中起到至关重要的作用，帮助建筑达到节能标准。另一方面，普通混凝土小型空心砌块和烧结多孔砖与水泥基复合材料结合后，可以进一步增强墙体的抗压强度和耐久性。通过在这些传统材料中加入水泥基复合材料，墙体的抗裂性能得到了改善，能够有效防止因长期使用或外界环境变化带来的裂缝，满足建筑结构和外立面的多样化需求。这种协同应用方式既保证了材料性能的提升，又为建筑行业提供了更加环保、绿色的解决方案。

4.2 协同应用的力学性能提升

通过在新型墙体材料中添加水泥基复合材料，能够显著改善墙体的力学性能，特别是在抗压强度和耐久性方面。水泥基复合材料的增强纤维，如钢纤维、玻璃纤维等，能够有效提高墙体的抗拉强度和抗裂性，减少长期使用过程中裂缝的产生。这一效果在高层建筑和特殊结构中尤为明显，因为这些建筑对材料的抗压强度、抗拉强度和整体稳定性有较高的要求。水泥基复合材料的添加，增强了墙体的整体稳定性和抗震性，能够使墙体承受更大的外部负荷，特别是在地震多发地区或高风压环境下，展现出更好的力学性能。此外，复合材料的加入增强了材料的延展性和韧性，改善了墙体的抗冲击能力，提升了建筑的安全性。在实际应用中，这种协同效果不仅提升了建筑的力学性能，还降低了墙体的生产成本，使得新型墙体材料与水泥基复合材料的结合具有更高的

性价比。

4.3 协同应用的环境效益

新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用不仅有助于提高建筑性能，还能够在一定程度上降低环境影响，推动建筑行业的绿色转型。通过优化原材料的配比，合理选择绿色原料并采用低碳生产工艺，可以显著减少生产过程中的能源消耗和碳排放。例如，使用工业废渣（如粉煤灰、矿渣等）作为矿物掺合料，不仅能够减少水泥的使用量，还能有效降低碳排放。这些废弃物的回收利用不仅有助于减少资源浪费，还能减少生产过程中温室气体的排放，为建筑行业的低碳发展提供支持。此外，通过结合绿色生产工艺，如低能耗搅拌、优化烧结过程等，能够进一步降低生产过程中的能源消耗，并减少废弃物的产生，确保建筑材料在生产、使用和废弃过程中具有较小的环境影响。使用这些绿色墙体材料的建筑，不仅能够减少能耗，还能提供更舒适的居住环境，助力可持续发展目标的实现。

5 结语

新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用为建筑行业提供了一种绿色、可持续的材料选择。在提升墙体综合性能的同时，能够减少环境负担，推动建筑行业朝着低碳、环保方向发展。本文通过对云南省新型墙体材料和水泥基复合材料的分析，提出了两者协同应用的优化路径，并通过力学性能的提升、环境效益的减少等方面的探讨，为绿色建筑的发展提供了理论支持和实践指导。随着技术的进步和市场需求的变化，未来新型墙体材料与水泥基复合材料的协同应用将在建筑行业中发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 朱国涛.融入含菌建筑复合材料的建筑填充材料成型及性能研究[J].太原学院学报(自然科学版),2025,43(01):26-31.
- [2] 李秋利,赵光明,王艳芬,等.玻纤粉改性粉煤灰-水泥复合注浆材料水化产物与工程特性试验研究[J/OL].煤炭学报,1-16[2025-06-26].
- [3] 夏修建,于永金,齐奉忠,等.固井用纳米材料及纳米复合材料研究进展[J].油田化学,2024,41(04):725-737.
- [4] 杨晓庆,魏发云,阳知乾,等.不同工程参数下聚甲醛纤维/聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料的压缩性能[J].东华大学学报(自然科学版),2025,51(02):70-76.

Discussion on construction technology and quality control measures of building steel structure

Xuyang Zhang¹ Lili Wu²

1. Shanghai Heyun Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai, 200233, China

2. Rongcheng Tengjian Construction Engineering Co., Ltd., Rongcheng, Shandong, 264300, China

Abstract

In China's construction sector, steel structures have gained widespread application, primarily due to their advantages such as high load-bearing capacity, excellent seismic performance, and short construction periods. However, steel structure projects involve numerous technical aspects including foundation joints, welding, corrosion protection, and fireproofing during construction, with complex technical processes and extremely stringent quality requirements. Improper application of construction techniques and lack of effective control measures can directly adversely affect the overall stability and durability of building structures. Based on this context, this article explores construction techniques and quality control in China's steel structure projects, aiming to ensure scientific and standardized construction practices through detailed technical and quality management. This approach provides robust guarantees for the quality of engineering entities.

Keywords

building steel structure; construction technology; quality control; measures; discussion

建筑钢结构施工技术与质量控制的措施探讨

张旭阳¹ 吴丽丽²

1. 上海和运工程咨询有限公司, 中国 · 上海 200233

2. 荣成腾建建筑工程有限公司, 中国 · 山东 荣成 264300

摘要

在我国建筑领域中建筑钢结构获得广泛应用, 这主要是得益于其具备承载力高、抗震性能优良以及施工周期短等诸多优点, 然而钢结构工程在施工进程中涉及基础节点、焊接、防腐与防火等众多环节, 并且技术环节繁杂及质量要求极为严苛。在这种情况下施工技术应用不当与缺少有效的施工控制, 无疑会直接对建筑项目结构整体稳定性和耐久性产生不良影响。基于此, 文章结合我国建筑钢结构施工实际状况分别就其施工技术和质量控制这两个方面展开探讨, 以期借助对技术与质量开展细化管控确保钢结构施工的科学性、规范性, 为工程实体质量提供有力保障。

关键词

建筑钢结构; 施工技术; 质量控制; 措施; 探讨

1 引言

建筑钢结构在现代建筑中扮演着重要的角色, 它具有高强度、耐久性和灵活性等优点。然而, 在建筑钢结构实际施工过程中, 存在一系列的技术与质量控制挑战。为了提高建筑钢结构的质量和安全性, 需要采取有效的施工技术和质量控制措施。

【作者简介】张旭阳 (1989-), 男, 中国山东荣成人, 本科, 工程师, 从事核电核岛土建质量管理研究方向的工作。

【通讯作者】吴丽丽 (1988-), 女, 中国山东荣成人, 本科, 工程师, 从事建筑工程管理研究。

2 建筑钢结构施工技术

2.1 基础节点施工与柱脚锚固工艺

建筑钢结构工程中, 基础节点与柱脚锚固施工是把控精度以及承载性能的关键部分, 因而它们的施工工艺必须严格按照国家现行规范以及设计图纸予以执行。钢结构施工前以全站仪结合激光水平仪对已完成的混凝土基础上开展轴线与标高进行多点校核复测, 以保证基础顶面平整度偏差不大于 2mm 以及柱脚中心位置偏差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 范围内^[1]。在锚栓施工环节使用钢模板及固定框架对预埋锚栓予以定位, 同时运用十字轴线及测距法展开双向校核, 在混凝土浇筑进程中要设置防位移限位件, 借助分层对称振捣的方式来降低偏移情况。须待混凝土强度达到设计值百分百之后方可开展后置锚栓施工, 以金刚石钻机予以成孔, 孔径偏差不能超过 $\pm 0.5\text{mm}$, 植入化学锚栓之时必须采用定量注胶

装置以确保胶液无气泡且饱满，接着固化结束后开展逐根拉拔检测保证合格率要达到百分百。在柱脚安装阶段，以厚度差异要控制在 $\pm 1\text{mm}$ 的钢垫板或高强无收缩灌浆料对底板和混凝土基础之间的标高进行调整，同时灌浆施工应当采取自流灌浆和二次压浆相结合的方式，保证底板下方的浆体既饱满密实且不存在空鼓现象。螺栓紧固工序要分成初拧、终拧两个阶段。前者依照对角线顺序分级来开展，而后者须运用经检定合格的扭矩扳手，逐个复核终拧力矩控制在设计值 $\pm 5\%$ 范围里。另外，在安装截面尺寸较大的钢柱时需设置可调式临时支撑，让它与基础可靠连接，随后待上部框架形成稳定空间体系后才能够拆除该临时支撑。完工后需对柱脚的中心坐标，顶面标高底板水平度以及螺栓外露长度进行逐项复核，检测结果要与钢结构工程施工质量验收规范的限值相符，随后形成经监理及施工单位共同确认记录文件。

2.2 焊接工艺实施

焊接作为建筑钢结构施工中重要环节，其实施必须以历经实验室与现场双重验证的焊接工艺规程为依据，同时将焊工合格证书以及工艺评定记录作为质量把控的凭证。焊材选型环节要严格依照设计与国家规范开展，所选焊材具备合格的化学成分以及力学性能的检验报告，且对焊条烘干温度、药皮含水率与保护气体纯度开展全过程的管控。采取等厚分级坡口形式制备接头，且要根据图纸要求来确定装配间隙与倒角半径，焊缝尺寸以及焊道布置必须在焊接工艺规程里做出明确规定，同时制定焊道顺序、坡口余高及补强筋布置以保证焊缝几何尺寸以及缺陷控制符合设计与规范限值要求。施焊之前需使用机械打磨、除油、喷砂或者酸洗等方式将焊口边缘处理至 Sa2.5 级。在多层多道焊进程里对层间温度上限予以严格设定，针对裂纹敏感材料将其控制在 $\leq 250^\circ\text{C}$ ，采用接触式测温计对接头温度加以校核，详细记录下全过程温度曲线。在焊接实施阶段，专职质量检验员运用钳形表以及电参数记录器，对电流、电压和送丝速度展开实时监控，每完成一道焊缝便要进行外观检测，以保证焊缝成形饱满并且不存在咬边、气孔或者是夹渣现象^[2]。按 GB/T 或 ISO 相关标准，针对承重及关键焊缝开展超声波或射线检测并保存报告；对厚板拼接焊缝以及复杂节点焊缝实施焊后热处理，其保温温度、时间以及冷却速率要依据材质特性来制定并且要经过验证。所有焊缝完成后须马上开展打磨清理工作，同时以磁粉或渗透检测作为辅助手段进行缺陷补焊，随后依据编号构建具有可追溯性的焊缝档案，施工记录要涵盖焊材批号、焊工信息、工艺参数，无损检测结果以及热处理数据。

2.3 防腐与防火施工技术

建筑钢结构防腐施工要以表面处理作为前提条件，通常会运用高压喷砂或者高速抛丸技术，把表面的氧化皮锈蚀产物以及油污去除掉，同时处理等级必须满足设计要求，为保证涂层附着力经处理后表面粗糙度应当控制在 $40\sim75\mu\text{m}$

范围之内。清理结束之后，需在 4 小时之内喷涂底漆，常用的底漆为环氧富锌底漆且含锌量不得低于 75%。在喷涂过程中要运用湿膜测厚仪逐层开展检测工作，确保单道漆膜的厚度务必严格把控在规定值 $\pm 5\mu\text{m}$ 的范围之内，以此防止因堆积过厚而引发收缩龟裂的状况出现。出于增强屏蔽性能中间层防腐选择环氧云铁漆，面层选用氟碳或聚氨酯涂料，且须确保施工环境相对湿度不得超过 85% 以及基材温度应高在露点温度 3°C 。施工时需进行分区段作业，并做好搭接过渡以此保证漆膜连续性和耐候性，施工时需进行分区段作业且做好搭接过渡，从而确保漆膜连续性和耐候性。针对建筑钢结构防火施工中，依据钢结构防火涂料应用技术规范针对主要承重梁柱实施分区喷涂，先在基材表面喷涂界面剂接着再进行喷涂型防火涂料施工，从而增强粘结力。涂层厚度要借助针式测厚仪以及切片法随机抽检，每区检测点不能少在 3 处，以此保证和耐火极限设计值相符。室外钢结构构件由于会受湿度紫外线以及温差作用，因而喷涂之后必须增添密封性面漆，以此来防止出现粉化与脱落的情况。另外，应严格依照构件断面尺寸对采用的包覆型防火板材进行裁切，在拼缝处填充无机防火胶并加设不锈钢卡扣予以固定，以此防止受火后因热胀冷缩而出现脱落失效的情况。施工周期全程都须防止冲击荷载以及交叉作业情况出现，而在养护阶段要维持干燥通风的状态，从而保障钢结构防腐和防火体系能协同且稳定地发挥作用。

3 建筑钢结构施工质量控制措施

3.1 材料进场检验与复核

建筑钢结构施工质量控制中材料进场检验与复核是一项关键措施，为此须建立严格的入场控制机制。对进场钢结构与钢材要核查其出厂合格证、化学成分分析报告，借助抽样拉伸与冲击试验来验证它们力学性能是否符合设计等级要求。钢板厚度和型钢规格须以精密尺与激光测厚仪进行复核，一旦发现偏差超出允许公差则需要做退场处理^[3]。严格按厂家规定将焊材在 $350^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ 范围内烘干，且存放在恒温保温筒内。焊接前要通过烘干记录及氢含量检测确保低氢型焊条水分已降至规范要求，同时还需对焊丝和焊剂进行粒度和化学成分复检，以此保证焊接金属组织均匀。高强度螺栓需开展批次力学性能的复检工作，其中涵盖抗拉强度、屈服强度以及延伸率等方面测试，且要结合扭矩系数的抽检验证其拧紧性能，以此保证摩擦型接头在施工时能够达到设计所要求的预紧力。材料几何尺寸以及表面状态需运用经纬仪、直角尺还有探伤仪来予以复核，要严格把存在弯曲、扭曲、裂纹，或者有严重氧化缺陷的钢结构构件、钢板等排除在外。严格按国家标准进场的防腐和防火涂料材料开展粘结强度、干燥时间以及耐火性能等指标抽检，且还要通过拉伸和剥离试验来验证其附着力。针对全部进场材料复检结果建立电子及纸质档案并将批次检验项目以及执行标准编号予

以明确,一方面保证每批材料在入场阶段符合施工与设计技术要求,另一方面则给后续建筑钢结构施工及质量追溯提供重要依据。

3.2 焊接质量全过程控制

针对建筑钢结构焊接质量控制,核心在于覆盖焊前、焊中以及完成焊接之后的整个过程。在焊接筹备阶段需着重核实焊工职业资格证书和焊接工艺的相符情况,同时重点查验其诸如埋弧焊、手工电弧焊以及气体保护焊等焊接工艺的熟练程度。此外要全方位复核施工图纸里焊缝类型,焊缝标识与焊接顺序以保证焊接设计参数清晰明确。焊接阶段须实施工序交接机制,同时需把焊口清理、预热温度、焊层间温控,以及焊接姿态等环节的具体责任落实到相应焊接人员;以分段焊接方式开展厚度超过25mm的板材及关键受力构件焊接,且每段完成后马上开展外观检查与焊缝尺寸核对,待确认坡口熔合完整且焊缝表面不存在裂纹未熔合以及咬边现象才可以进行下一段焊接;焊接热输入量予以实时记录,同时对电流、电压以及焊接速度的波动范围进行严格把控,避免因热应力集中而引发钢结构出现微裂纹。施工单位在焊接结束后要先展开自检工作,主要涉及焊缝坡口检测、焊缝尺寸测量以及焊缝表面质量检查等;关键节点与重要受力焊缝应当由委托监理或者第三方机构开展无损检测,常用的检测方法包括磁粉探伤,射线透照以及超声波探伤,具体的选择要依据焊缝的位置厚度以及受力特性来确定。采用返修焊接或者局部磨除重焊的方式处理检测发现的缺陷,具体依据缺陷的类型与所在位置而定,并且完成处理后要再次开展无损检测确保钢结构检测达标^[4]。另外出于确保焊缝力学性能目的,针对关键构件焊缝可采取切割试样开展抗拉强度,冲击韧性以及硬度检测,随后把测试数据和设计要求作对比,从而保障焊缝承载能力符合施工图与规范要求。

3.3 安装定位与测量控制

建筑钢结构施工质量控制中,安装定位以及测量控制必须依照严苛的工艺及测量规范。施工之前,要构建高精度控制网以及水准点与基准点科学布设,运用水准仪和全站仪联合开展校核工作,以此保证平面以及高程基准数据具备稳定性。应针对控制点开展周期性复测工作,避免由地基沉降或者外界扰动等因素致使数据出现偏差。构件吊装之前要根据其重量、截面形式,以及受力特性制定起吊方案,比如针对大吨位或者形状不规则钢结构构件,需采取多机联合抬吊

的方式且吊点的位置要经过计算来确定,同时还要在构件的关键部位设置加劲肋或者临时钢索,从而防止在吊装过程中出现局部屈曲的情况。安装柱脚时要在基础与底板之间设置钢垫板实现分区调平,借助精密水准仪逐点检测底板水平度,并完成调整后以无收缩高强灌浆料开展二次灌浆以此确保柱底受力均匀。针对钢结构梁柱节点安装须采用高强螺栓,按照由下至上、由中向外的顺序依次开展连接,初拧借助电动扳手来控制,而终拧则使用经过校准的扭矩扳手逐件检测,从而确保力矩值符合规范区间^[5]。以分区分段推进开展大跨度或超高钢结构安装,同时须设置临时支撑体系和缆风绳,而支撑位置则经结构复核计算确定,且在每一施工层次完成后要进行轴线偏移、层高累计误差及整体垂直度等指标复测,一旦发现在超差部位则须以千斤顶顶升或拉索张拉方式开展纠偏处理。另外,针对超高钢结构构件安装时,需要在不同标高之处设置临时测点,随后借助经纬仪展开实时跟踪测量工作以保证其安装竖向度偏差被控制在允许范围之内,继而防止误差在整个上部结构里出现逐级累积以及放大的情况。

4 结语

综上所述,建筑钢结构施工技术与质量控制两方面环节是实现项目安全与耐久的关键所在,对此上文基于研究及实践情况下先针对施工技术展开系统阐述,涵盖基础节点与柱脚锚固、焊接工艺以及防腐与防火施工这三个方面。随后探讨材料进场检验、焊接质量把控、安装定位与测量三项具体的施工质量控制措施,从而切实保障建筑钢结构施工的质量达到设计要求与规范标准。

参考文献

- [1] 郝年璧.建筑钢结构施工技术与质量控制的措施分析[J].安家,2024(2):0166-0168.
- [2] 邹广庚,孟宗平,丁勇,等.建筑钢结构施工质量控制策略研究[J].中国建筑装饰装修,2025(3):172-174.
- [3] 温一丁.浅析建筑工程施工的质量控制及措施[J].中国科技期刊数据库 工业A, 2023(4):4.
- [4] 张树东.探讨建筑工程钢结构施工技术的有关问题[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2023(4):4.
- [5] 吴灏斌,张楠祥,孟珊,等.建筑钢结构的施工与质量控制措施分析[J].工程建设与设计, 2023(10):121-123.

Study on the influence of blending Xinjiang coal on the operation characteristics of W flame boiler

Yunsong Zhang Hongxi Yang Yujun Zhao

Huaneng Yunnan East Dian Energy Co., Ltd., Qujing, Yunnan, 655000, China

Abstract

This study investigates the effects of Xinjiang coal blending on a 4×600MW subcritical W-type flame boiler at a power plant. Through field tests and data analysis, we systematically examined variations in boiler wall temperatures, reheating water flow rates, steam temperatures, coking characteristics, and desulfurization system parameters across different blending ratios. Results indicate that Xinjiang coal's high moisture content, elevated sodium-potassium levels, and low ash fusion point intensify fouling in furnace chambers and high-temperature convective surfaces. These factors lead to reduced pulverizer system efficiency and significantly increased chloride ion concentrations in desulfurization absorbers. Based on experimental data, we propose a 15% safe blending limit and corresponding operational optimization measures, providing technical guidance for safe Xinjiang coal blending in W-type flame boilers.

Keywords

W-type flame boiler; Xinjiang coal blending; coking characteristics; operational optimization; subcritical units

掺烧新疆煤对 W 火焰锅炉运行特性影响的探索

张云松 杨红喜 赵玉军

华能云南滇东能源有限责任公司, 中国·云南曲靖 655000

摘要

本文以某电厂 4×600MW 亚临界 W 火焰锅炉为研究对象, 系统分析了掺烧新疆煤对锅炉运行特性的影响。通过现场试验和数据分析, 研究了不同掺烧比例下锅炉受热面壁温、减温水流量、蒸汽温度、结焦特性及脱硫系统运行参数的变化规律。结果表明, 新疆煤的高水分、高钠钾含量及低灰熔点特性导致锅炉炉膛及高温对流受热面沾污结焦加剧, 制粉系统出力下降, 脱硫吸收塔氯离子含量显著升高。基于试验数据, 提出了 15% 的安全掺烧比例限值及相应的运行优化措施, 为 W 火焰锅炉安全掺烧新疆煤提供了技术指导。

关键词

W 火焰锅炉; 新疆煤掺烧; 结焦特性; 运行优化; 亚临界机组

1 引言

W 火焰锅炉作为专门设计用于燃用低挥发分无烟煤和贫煤的炉型, 其独特的燃烧组织方式和炉膛结构在燃用设计煤种时表现出良好的适应性。然而, 随着煤炭市场供需变化和环保要求提高, 燃煤电厂普遍面临燃煤掺配的经济性需求。新疆煤因其价格优势成为重要掺烧煤种, 但其高水分、高碱金属含量及强沾污结焦特性对 W 火焰锅炉运行带来显著挑战。

本研究依托某电厂实际运行数据, 通过系统的掺烧试验, 揭示了新疆煤对 W 火焰锅炉运行特性的影响机制, 提出了针对性的运行优化策略, 对同类型机组燃煤掺配具有重

要参考价值。

2 研究对象与方法

2.1 设备概况

某电厂 4×600MW 亚临界机组, 锅炉为北京巴威公司制造的亚临界、单炉膛、“W”火焰燃烧方式、中间一次再热、自然循环、平衡通风、固态排渣、露天布置的全钢架结构悬吊式燃煤汽包炉, 设计燃用无烟煤, 每台锅炉配备六台正压直吹式双进双出钢球磨煤机。

2.2 方法

在 360~450MW 之间负荷下, 逐步提高新疆煤掺烧比例, 在此负荷范围内开展新疆煤不同掺烧比例试验, 考察新疆煤不同的掺烧比例对锅炉受热面壁温、过热器减温水、主蒸汽温度、再热蒸汽温度、排烟温度、锅炉不同部位的结焦、脱硫吸收塔浆液品质等安全性、经济性及环保性的影响规律, 通过试验, 探索得出新疆煤掺烧最大比例。重点关注掺配新

【作者简介】张云松 (1981-), 男, 中国云南昆明人, 本科, 高级工程师, 从事火力发电厂锅炉检修、运行管理研究工作。

疆煤后锅炉受热面壁温、过热器减温水、主蒸汽温度、再热蒸汽温度、炉膛结渣和掉焦、脱硫吸收塔浆液品质情况。观察炉膛及大屏等受热面的结焦情况。

3 掺烧新疆煤对W火焰锅炉运行特性的影响

在近一个月内对各台锅炉逐步提高新疆煤掺烧比例，短时最高掺配比例至25%，出现过热器进出口烟气温度及过热器一、二级减温水流量上升，过、再热器蒸汽温度降低，锅炉炉膛及高温对流受热面沾污、结焦加剧等问题，各锅炉运行特性的影响如下。

3.1 对锅炉壁温的影响

开展试验期间，初期一级过热器及尾部烟气温度开始明显上升，屏过、一级过热器、末过、再热器中间区域管壁温度频繁超温，随着掺烧新疆煤比例增加及时间的推移，屏过、一级过热器、末过、再热器中间区域管壁温度开始下降，两侧管壁温度逐渐上升，反映出各受热面沾污、结焦加剧，且中间区域部分烟道形成烟气走廊问题。

3.2 对锅炉减温水的影响

新疆煤掺配比例增加后，过热器一、二级减温水流量呈现出上升趋势。见图1。

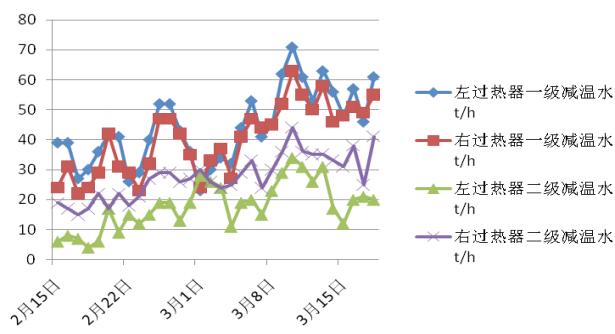


图1

3.3 对锅炉汽温的影响

随新疆煤掺配比例增加及试验时间推移，受各受热面管壁温度限制，过、再热蒸汽温度逐渐降低。

3.4 对锅炉烟气温度的影响

并通过查阅对比历史数据，烟道各受热面烟气温度以及排烟温度较未掺烧新疆煤均有上涨趋势，反映出炉膛及高温对流受热面吸热量减小，导致炉膛出口烟气温度升高。

3.5 对锅炉结焦的影响

掺烧新疆煤后锅炉结焦明显，焦块的特性呈现出疏松现象，较之前焦块硬度降低。

1号炉锅炉右侧8.8米水冷壁冷灰斗部位堆焦一次；锅炉20、25米前后墙均有不同程度的结焦。2号炉20、25、32米前后墙均有不同程度的结焦，较其它锅炉结焦严重，屏过区域有明显的挂焦，尤其屏过中间区域挂有明显的大焦。3、4号炉20、25、32米前后墙均有不同程度的结焦，屏过区域有明显的挂焦，尤其屏过中间区域挂有明显的大

焦。停运过程中对锅炉屏过区域的结焦检查，发现2号炉屏过中间区域由前屏至后屏，由下至上，结焦情况均非常严重，屏过区域两边及侧墙结焦均较少，从前期测量屏过区域烟气温度可反映出中间区域烟温较两侧温度较高100-200℃；拱下区域至分级风喷口及两侧墙均敷上一层灰、焦，沾污严重，部分燃烧器喷口被焦块改变气流方向，部分分级风喷口不同程度敷上焦块，改变气流的方向。

运行中通过变负荷、轮换停磨、增加吹灰、添加除焦剂等方式，对炉内进行扰动除焦，锅炉掉焦频次较未掺烧新疆煤期间明显增加，其中2号炉尤为严重，掉焦致使炉底多扇液压关断挡板脱落，导致炉底大量漏入冷风，提高火焰中心高度，加剧屏过区域的结焦。

3.6 对制粉系统的影响

干燥出力影响。自开展配煤掺烧试验以来，入炉煤水分较未掺烧前增加，在磨煤机旁路风挡板开启提高分离器出口温度条件下，分离器出口温度仅能达到70℃左右，相较于未掺烧前，在旁路风不开启时，分离器出口温度亦可达到90~105℃，由此可知，因原煤水分显著增加，导致制粉系统的干燥出力明显下降。试验期间，曾出现制粉系统出力严重不足，致使机组难以按调度负荷曲线带负荷。通过全面排查磨煤机电流、料位、出口温度等参数，就地听磨煤机声音沉闷，综合研判为磨煤机内衬板及钢球被煤粉粘结，致使钢球提升高度降低，同时，粘附水分较大煤粉的钢球对原煤的撞击和碾磨能力较差，导致磨煤机碾磨出力下降，后经降低磨煤机料位进行吹磨工作，制粉系统出力逐步恢复。

煤的可磨性。抽样检测各种燃煤哈氏可磨性系数，新疆煤HGI=45、本地原煤为HGI=87、本地工程煤为HGI=94。新疆煤可磨性系数均小于设计煤种(HGI=70)，属难磨煤种，影响磨煤机碾磨出力。

3.7 对脱硫系统的影响

随新疆煤掺烧比例的变化及试验时间的推移，各台炉各级吸收塔浆液品质中CL-含量大幅增加。自掺烧新疆煤以来，吸收塔石膏浆液氯离子含量逐渐升高，氯离子含量升高加速了金属部件的腐蚀，石膏品质下降，含水量大，废水不易沉淀，处理难度大，氯离子与钙离子结合生成氯化钙，浆液中钙离子含量增加，形成同离子效应，抑制了碳酸钙的溶解，从而影响了脱硫效率，致使效率下降，同时又产生虚假液位，运行人员难以判断和调整吸收塔液位，浆液循环泵易发生汽蚀现象。

4 运行优化调整与建议

4.1 磨煤机料位

由于煤的可磨性指数低，且原煤水分大，磨煤机筒体内部的煤粉易黏在提升条及钢球表面，致使钢球提升高度降低，导致磨煤机碾磨和干燥出力大幅降低。掺烧新疆煤后，为减少制粉系统干燥出力的影响，建议磨煤机料位控制在

200~300Pa 之间, 同时根据磨煤机出力, 降低磨煤机料位, 开展吹磨工作。

4.2 磨煤机分离器出口温度

由于新疆煤挥发分高, 注意监测给煤机内部、锁气器、磨煤机混料箱等部位温度, 配有蒸汽灭火的制粉系统, 应保证消防蒸汽系统有效备用。掺烧新疆煤后, 为了保证制粉系统安全运行, 磨煤机出口温度应控制在 70~75℃。启停制粉系统阶段, 应控制磨煤机入口风温小于 200℃, 分离器出口温度小于 75℃。

4.3 一次风量

结合分离器出口温度, 可适当开启旁路风挡板, 提高一次风速, 降低火焰中心高度。

4.4 乏气风挡板

掺烧烟煤及新疆煤后, 入炉煤挥发分含量高, 乏气风挡板易造成积粉, 有自燃的风险, 定期开启乏气风挡板消除积粉, 同时关小乏气风挡板使燃烧器喷口煤粉浓度降低, 影响锅炉燃烧的稳定性, 因此统筹考虑燃烧的稳定性及结焦之间平衡, 建议适当关小乏气风挡板开度。

4.5 燃尽风门开度

掺烧新疆煤后, SCR 入口 NO_x 浓度较掺烧前容易控制, 因此燃尽风门开度可适当降低, 提高主燃烧器区域风量比例和燃烧效率。燃尽风箱入口电动挡板开展建议控制在 20~50% 之间, 根据 SCR 入口 NO_x 浓度, 结合飞灰含碳量及结焦情况进行控制。

4.6 周界风风门开度

掺烧新疆煤后, 炉膛吸热减少, 炉膛出口烟气升高, 加剧屏过区域结焦风险, 因此增加一次风粉刚性, 同时补充燃烧器区域的氧量, 降低火焰中心高度, 建议保持全开。

4.7 分级风开度

为降低火焰中心高度, 减小屏过区域结焦风险。分级风箱入口挡板开度, 控制在 40~60% 之间, 中间燃烧器分级风挡板 (A2\A3\B2\B3\E1\E4\F1\F4), 推荐值 $\geq 60\%$ 。

4.8 氧量控制

负荷 360~420 MW, 控制锅炉氧量在 4% 运行; 当机组负荷 420MW 以上时, 应控制锅炉氧量在 3.0~3.5%。避免加剧还原性气氛生成, 导致灰熔点温度进一步降低。

4.9 吹灰方式

统筹考虑受热面吹损风险及吹灰器运行状况, 根据锅炉屏过区域结焦及各受热面壁温、烟气温度等情况, 动态调整水平烟道长吹灰方式。

4.10 过热器减温水运行方式

掺烧新疆煤后, 屏过、一过、末过管壁温度呈现出上

升趋势, 为防止超温爆管, 可降低减温水温度。过热器一、二级减温水来源于高加出口及入口, 当过热器减温水调门开度过大时, 应将过热器减温水由高加出口切换至高加入口。

4.11 再热器减温水运行方式

掺烧新疆煤后, 炉膛吸热减小, 炉膛出口烟气温度升高, 导致再热器管壁温度居高不下。再热器减温水正常运行时, 不建议投入, 但作为再热器管壁温度超温难以控制状态下备用。

4.12 脱硫吸收塔浆液品质

燃烧新疆高碱煤易造成吸收塔浆液氯离子超标, 存在浆液中毒及脱硫各设备腐蚀风险, 应根据脱硫吸收浆液中 Cl⁻ 含量变化趋势, 控制新疆煤掺配比例。加大废水系统设备出力, 定期化验脱硫吸收浆液品质, 控制脱硫吸收塔浆液 Cl⁻ 含量小于 20000mg/m³。

4.13 掺烧比例控制

根据掺烧后锅炉运行情况, 为保证机组长期安全稳定运行, 建议新疆煤掺配比例控制不大于 15%, 短时间内不超过 20%。

5 结语

综合来看, 在 W 火焰锅炉里掺烧新疆煤的应用, 是面对煤源结构调整以及燃料成本压力的实际选择, 也是提升煤炭资源利用效率的关键尝试。但新疆煤 Na 及 Cl⁻ 含量偏高, 具有难磨、水分大的特点, 灰渣具有结焦、沾污特性强的特点, 若掺烧比例控制不当将会对锅炉及炉后设备造成很大影响。本文通过掺烧新疆煤试验, 了解掌握掺烧后锅炉各设备运行变化情况, 对存在问题提出有针对性的应对措施, 对后续同类型锅炉掺烧新疆煤有较好的借鉴意义。未来还需要结合煤源波动规律、锅炉运行大数据以及智能化调控策略, 促使掺烧运行模式朝着高效、绿色、智能的方向转变, 为新疆煤在大型锅炉体系中的规模化、规范化使用给予更为坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 吕建平. 掺烧新疆煤的锅炉安全技术实证研究[J]. 电力设备管理, 2024(23):249~251.
- [2] 范多文. 高容积热负荷锅炉新疆准东煤掺烧探索与应用[J]. 电力设备管理, 2025(3):233~235.
- [3] 王国良. 燃煤机组大比例掺配烧新疆煤技术安全经济分析[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2024, 29(6):15~19.
- [4] 蒙玉仓, 李炎, 杨忠灿, 等. 某电厂不同类型锅炉掺烧新疆淖毛湖高碱煤适应性研究[J]. 热力发电, 2023, 52(7):142~149.
- [5] 郎宁, 郭玉鑫, 杨威, 等. 660 MW 机组高热值新疆煤分磨掺烧试验研究[J]. 能源工程, 2022, 42(5):35~39.

Study on construction technology optimization and quality control of exterior wall insulation system in ultra-low energy consumption buildings

Kun Cao Yating Fan

Shaanxi Coal Industry Chemical Construction (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

This study systematically investigates the construction process optimization and quality control of ultra-low energy consumption building exterior wall insulation systems. By analyzing core requirements for thermal insulation performance, thermal bridge elimination, and air tightness, it focuses on improving key techniques including substrate preparation, full adhesive method for insulation boards, and node sealing. Consequently, a comprehensive quality control system has been established, covering pre-construction material acceptance and design review, real-time monitoring of construction processes with on-site supervision at critical nodes, and post-construction physical inspection with performance evaluation. The research demonstrates that systematic optimization of construction techniques combined with rigorous quality control throughout the process serves as the critical pathway to ensure ultra-low energy consumption building exterior wall insulation systems achieve designed performance while enhancing overall energy efficiency and durability.

Keywords

building exterior wall; insulation system; construction technology

超低能耗建筑外墙保温系统施工工艺优化及质量控制研究

曹琨 范雅婷

陕西煤业化工建设（集团）有限公司，中国·陕西西安 710000

摘要

本文系统研究超低能耗建筑外墙保温系统的施工工艺优化与质量控制。通过分析其对保温性能、无热桥和气密性的核心要求，重点探讨了基层处理、保温板满粘法、节点密封等关键工艺的改进措施，进而，构建了一套涵盖事前材料验收与方案审查、事中工序实时监控与节点旁站、事后实体检验与性能测评的全过程质量控制体系。研究表明，通过施工工艺的系统性优化与全过程严格的质量控制，是保障超低能耗建筑外墙保温系统实现设计性能、提升建筑整体能效与耐久性的关键路径。

关键词

建筑外墙；保温系统；施工工艺

1 引言

随着我国“双碳”战略的深入推进，发展超低能耗建筑已成为建筑领域实现节能减排目标的重要方向。外墙保温系统的保温性能、气密性及无热桥构造是决定超低能耗建筑最终能耗水平的重要因素。但传统的施工工艺及质量控制方法很难满足超低能耗建筑的高要求，热桥控制不够严格、气密层不够连续、节点处理不够精细等，这势必会导致现场施工后的效果和原计划的设计存在出入。针对此现象，应该对外墙保温系统的施工工艺做出改进，并构建出更加完善、精准的过程质量控制体系，这也是推动超低能耗建筑规模化、

高质量发展的关键所在。本研究旨在系统探讨超低能耗外墙保温系统的施工工艺优化措施与质量控制方法，为提升工程实践水平提供理论依据与技术支撑。

2 超低能耗建筑外墙保温系统理论基础与核心要求

2.1 超低能耗建筑的基本原理与性能指标

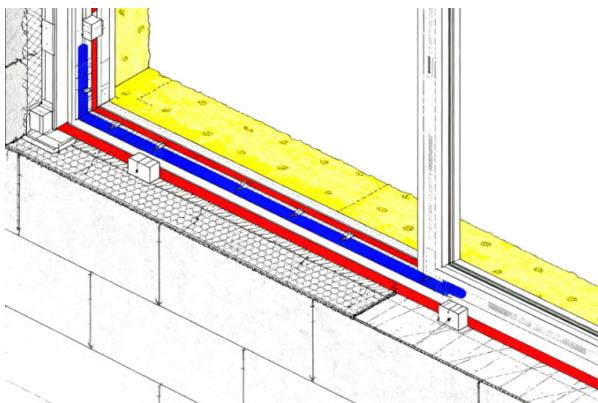
超低能耗建筑作为一种前沿的建筑理念，其基本原理在于通过被动式优先的设计策略，最大限度地降低建筑在供暖、制冷方面的能源需求，其核心并非依赖复杂的主动式能源系统，而是首先打造一个性能卓越的建筑本体。在这一框架下，超低能耗建筑具有明确的定义与量化性能指标，它并非一个定性概念，而是由严苛的能耗指标与室内环境参数共同界定，例如其年度供暖、制冷及一次能源消耗量需显著低

【作者简介】曹琨（1996-），男，中国陕西岐山人，本科，助理工程师，从事建筑工程研究。

于国家或国际现行节能标准的规定值，同时必须确保室内具有恒温、恒湿、高舒适度且空气清新的健康环境。为实现这一能耗目标，作为建筑外壳的围护结构必须具备极高的热工性能，其中外墙保温系统尤为关键，其性能直接由传热系数K值衡量，该数值必须达到极低水平，远低于常规节能建筑的要求，从而有效阻隔室内外热量传递，减少热损失，成为构筑超低能耗建筑的基石^[1]。

2.2 超低能耗外墙保温系统的核心性能要求

系统应具备高热工性能，即保温层要有极低的导热系数，足够的厚度使整个传热系数降到很低的程度，无热桥是保证其高性能的重要前提条件，必须采用精细的构造及施工方法，将门窗洞口、结构连接节点等部位的热流通道消除干净，避免出现局部能量的消耗以及可能出现的冷凝结露问题，如图一所示。除了需要与建筑本身形成高气密性的构造以外，在保温层外面还要有一层连续的气密层，并且所有的接口、穿孔处都是密封的，如此一来，就不会产生不受控制的空气渗透，造成多余能源的消耗、舒适度降低等问题。此外，系统的水密性、耐久性也是决定系统能否长时间有效工作的一个必要条件，要能够防雨、防水蒸气渗透进来，并要经得起温差变化和风荷载等长期的作用的影响，不能让其发生性能衰减和材料破坏。系统的结构安全性和防火性能都应当是有足够保障的，只有保温系统和基层墙体有足够的结合能力，才能抵御外来的冲击和压力，另外，所有材料特别是保温材料的燃烧性能等级应当满足国家规定的防火要求，才能够长期给人们提供安全保障。这四方面的要求缺一不可，共同组成了优秀超低能耗外墙保温系统的要求^[2]。



(图1：无热桥设计关键要点的图解)

3 超低能耗外墙保温系统关键施工工艺优化研究

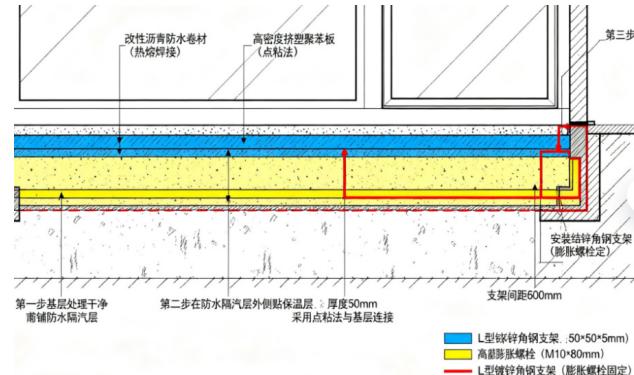
3.1 施工工艺优化方案设计

施工工艺的优化设计是确保超低能耗外墙保温系统从设计图纸转化为高质量实体的核心环节。优化的首要前提是精细化基层处理与验收标准，必须确保墙体基层达到极高的

平整度与垂直度，并具有足够的强度与清洁度，为此需制定远比常规建筑更严格的验收标准，为后续保温层的平整、密实粘贴奠定坚实基础。在此基础上，保温板粘贴工艺的优化选择至关重要：相较于易产生空腔的“点框法”或“条粘法”，超低能耗建筑更推崇采用“满粘法”甚至“双满粘法”，即在基层和保温板背面均满涂粘结砂浆，以最大化粘结面积，确保系统稳定性并有效减少板后空气层形成的热桥。同时，错缝粘贴与缝隙处理工艺必须强化，要求保温板严格错缝排版施工，并对产生的板缝使用发泡聚氨酯或专用保温填缝料等弹性密封材料进行严密填塞，从而将板缝处的热损失和开裂风险降至最低。此外，锚固工艺需进行精准化设计，依据建筑高度、部位及保温材料特性，科学计算并确定锚栓的类型、规格、数量、锚固深度及布设位置，确保其作为粘结的有效补充，既能提供足够的安全保障，又避免因锚栓盘过大或安装不当而引入额外的热桥点。这一系列环环相扣的工艺优化，共同构成了实现高性能保温系统的关键施工技术保障。

3.2 特殊与复杂节点的工艺优化

特殊与复杂节点的精细化处理是超低能耗外墙保温系统实现高性能目标的决定性环节。对于门窗洞口周边，需采用“防水隔汽 - 保温 - 结构性连接”一体化施工工艺，通过预粘贴防水隔汽膜、将保温板材精准切割包裹至窗框外侧并辅以专用密封材料，实现保温层、气密层与窗体的连续闭环，从根本上杜绝该部位的能量泄漏隐患，如图2所示。在阳台、勒脚、屋顶等热桥敏感部位，必须实施严格的断热桥处理工艺，例如采用结构性断桥连接件将悬挑构件与主体结构隔离，或在勒脚处确保保温层向下延伸至冻土线以下并做妥善保护，形成完整无间断的保温包裹。对于所有穿墙管线与支架，其安装工艺的核心在于无热桥与气密性双重保障，需预先规划路径，使用专用的密封套管或预制构件，并在安装后采用弹性密封胶对内外两侧进行严密封堵，确保围护结构的完整性不受破坏。这些关键节点的工艺优化，是将理论上的无热桥、高气密性设计转化为现实成效的核心技术措施^[3]。



(图2：门窗洞口周边一体化施工工艺的图解)

4 超低能耗外墙保温系统全过程质量控制体系构建

4.1 事前控制：材料与准备阶段的质量控制

事前控制作为超低能耗外墙保温系统质量管理的第一道防线，其成效直接决定了后续施工的质量上限与风险等级，因此必须建立在远超常规建筑的严格标准之上。首先，对保温系统所有组成材料的进场验收与性能复测是确保系统性能的物理基础，绝不能仅依赖于厂商提供的合格证明，而必须建立严格的抽样送检制度，重点对保温材料的导热系数、密度、尺寸稳定性，以及粘结砂浆、抹面胶浆的抗拉强度、压折比等关键指标进行实验室复验，从源头上杜绝性能不达标的材料流入施工现场，这是实现设计热工指标的根本前提。其次，施工方案与技术交底的深度与针对性审查是连接设计与施工的关键桥梁，审查工作必须确保施工方案并非流于形式的通用文本，而是深度融合了本项目具体结构形式、节点特点及超低能耗特殊要求的定制化指南，技术交底则需采用可视化、可操作的方式，将无热桥构造、气密性保障等抽象要求转化为每个工种、每道工序的具体操作指令，确保设计意图被一线人员准确理解。最后，施工人员的专业技能培训与考核是提升“人”这一核心要素可靠性的必要手段，应组织针对超低能耗建筑理念、特殊工艺要求（如满粘法、气密层处理）和常见质量通病的专项、实操性培训，并实施严格的考核上岗制度，确保每一位作业人员都具备实现精细化施工所需的知识与技能，从而为打造高质量的外墙保温系统提供最坚实的人力保障^[4]。

4.2 事中控制：施工过程的关键质量控制点

第一项管控要点：基层处理质量的全面检查，在保温层施工前需要使用靠尺、激光仪进行全数或高比例抽检测量，通过观察、敲打的方式检查基层墙面平整度和垂直度、表面牢固度及洁净度，清理掉表面所有的浮灰、油渍等影响粘结效果的污染物，给保温系统的底层固定提供一个坚实稳固且规整的受力面；另外对保温层施工过程要全程进行跟踪监测，应用专业检查工具对保温层粘结砂浆的铺贴面积、分布均匀情况进行随机抽查检验是否达到了满粘或双面满粘的要求；检查保温板之间拼接缝是否有密实的错缝现象，并将缝隙用发泡密封材料填充严实；对已经粘贴好的板面，继续用靠尺对其进行检查平整度情况；按设计图检查锚栓类型、规格、深度、数量及设置是否满足断热桥要求，保证固定机械的安全可靠。紧随其后的抹面层与增强网铺设质量控制同样关键，必须严格控制抹面胶浆的批刮厚度，确保其均

匀一致，并将增强网完全压入胶浆之中，重点监督网布之间的搭接宽度是否足够且在门窗洞口等应力集中部位进行了加强处理，从而形成一层连续、完整、具有良好抗裂性能的保护层。对于门窗洞口周边、阴阳角、系统端头以及所有穿墙管线等关键节点的施工，必须实行严格的旁站监理，即质量管理人员在现场全程监督其细部构造施工，并辅以高清影像资料对每一处隐蔽工序进行记录存档，这不仅能够即时纠正偏差，更形成了可追溯的质量责任链条，确保所有优化工艺措施在最重要的部位得到不折不扣的执行，将质量隐患彻底消除在工序进行之中^[5]。

4.3 事后控制：成品检验与性能测评

事后控制阶段通过成品检验与性能测评，对完工的外墙保温系统进行最终验证。首先是外观与尺寸偏差检验，检查墙面是否平整、无裂缝空鼓等缺陷。进而进行现场实体检验，通过抽样进行粘结强度拉拔试验和锚栓锚固力试验，以量化数据验证系统与基层连接的牢固性与安全性。最终，建筑整体热工性能与气密性测评提供了最综合的评估，红外热像法可检测外墙隐蔽的热工缺陷，而建筑气密性测试结果则直接反映了保温系统在各类节点处的气密施工质量。对这些最终性能的分析，能够逆向印证施工工艺与全过程质量控制的成效，完成质量管理的闭环。

5 结语

综上所述，超低能耗建筑外墙保温系统的成功实施，是一项对施工工艺与质量管理均提出极致要求的系统工程。超低能耗建筑外墙保温系统的成功实施，依赖于精细化施工与全过程质量控制的紧密结合。本研究通过工艺优化和质量体系构建，证实这是实现系统高性能的关键。未来可进一步探索新型材料和智能监测技术在质量控制中的应用，为超低能耗建筑的推广提供更有效路径。

参考文献

- [1] 李莉.建筑施工过程中双层复合外墙保温技术应用[J].陶瓷,2025,(08):128-130.
- [2] 徐智坤,刘伦文.建筑外墙保温系统施工技术及其质量控制研究[J].陶瓷,2025,(08):198-199.
- [3] 张立鼎.住宅超低能耗建筑外墙保温系统质量问题与防治措施[J].居舍,2025,(22):77-79+85.
- [4] 杨小慧.绿色节能视角下新型保温隔热材料在房建工程中的应用[J].陶瓷,2025,(07):99-101.
- [5] 何诗军.自适应保温系统在绿色建筑外墙设计中的应用研究[J].建设科技,2025,(13):92-94.

Research on Hidden Danger Management Based on 2-4 Model and “5831 Team Safety House” Model

Yi Yang

Zhengda Qingchunbao Pharmaceutical Co., Ltd., Huzhou, Zhejiang, 313000, China

Abstract

Hidden dangers in production serve as the breeding ground for safety incidents, with their management effectiveness directly determining an enterprise's accident prevention capabilities. Addressing the current situation where most enterprises adopt fragmented hidden danger management and superficial root cause analysis that leads to “treating symptoms rather than causes” while recurring similar risks, this study integrates the structured control frameworks of the “2-4” model and the “5831 Team Safety House” model. We propose a dual-driven hidden danger governance model combining “root cause analysis and systematic management”, achieving precise, systematic, and long-term hazard control. This provides valuable theoretical and practical references for enhancing corporate hidden danger management and ensuring workplace safety.

Keywords

2-4 model; 5831 Team Safety House model; hidden danger governance

基于 2-4 模型与“5831 班组安全屋”模型的事故隐患治理研究

杨祎

正大青春宝药业有限公司, 中国 · 浙江湖州 313000

摘要

事故隐患是滋生生产安全事故的土壤, 其治理效能的强弱直接决定了企业事故防范能力。针对现有大多数企业事故隐患治理碎片化、根源分析浅表化而导致治理工作“治标不治本”, 同类隐患反复出现的现状。本文将“2-4”模型与“5831班组安全屋”模型的结构化管控框架进行有机融合, 构建一套“根源分析-系统治理”的双轮驱动隐患治理新模式。实现隐患治理的精准化、系统化和长效化, 为提升企业的事故隐患治理水平、保障安全生产提供有力的理论与实践参考。

关键词

“2-4”模型; “5831班组安全屋”模型; 事故隐患治理

1 引言

每一起重大安全事故的背后, 必然有 29 起轻微事故、300 起未遂先兆以及 1000 起事故隐患。“海恩法则”清晰地揭示, 事故并非偶然发生, 而是隐患不断积累并最终爆发的结果。正因如此, 事故隐患治理成为事故预防的“第一道防线”与“最根本手段”^[1]。

2021 年, 新修订的《中华人民共和国安全生产法》明确要求生产经营单位自主构建并落实安全风险分级管控与隐患排查治理双重预防机制; 2022 年, 党的二十大报告进一步强调要“坚持安全第一、预防为主”, 并提出“推动公共安全治理模式向事前预防转型”^[2]。这些重要决策和法律法规的出台, 从国家层面强化了事前防控在安全生产中的核

心地位。

当前, 国内外学者在事故隐患治理方面进行了广泛研究, 并在企业实践应用中取得了显著成效, 但仍面临诸多痛点与挑战。许多企业隐患治理局限于“检查 - 记录 - 整改”的线性循环, 并且在分析隐患成因时, 往往归咎于“员工违章操作”、“安全意识淡薄”等个人层面, 未能深入挖掘组织层面缺陷, 致使事故隐患根源分析浅表化, 治理难以触及本质, 隐患反复发生^[3]。

本文将“2-4”模型和“5831 班组安全屋”模型进行有机结合, 构建“根源分析 - 系统治理”双轮驱动事故隐患治理的新模式, 提升隐患治理的精准性、系统性与长效性。

2 模型理论

2.1 “2-4”模型理论

“2-4”模型由傅贵教授团队是在多米诺模型和瑞士奶

【作者简介】杨祎 (1993-), 女, 中国浙江温岭人, 硕士, 注册安全工程师, 从事安全管理研究。

酪模型的基本理论基础上提出的一个事故致因理论模型^[4]。它将事故原因划分为“个体”和“组织两个”层面，人和物的不安全动作（直接原因）、个体安全能力不足（间接原因）、安全管理体系缺失（根本原因）和安全文化缺失（根源原因）四个阶段，更加清晰表述事故隐患产生的非线性交互关系^[5]。

“2-4”模型结构内容如图1所示。

人和物的不安全动作是触发事故的直接动作和直接原因，如未佩戴劳动防护用品、误操作等。个体安全能力包括

安全知识不足、安全意识薄弱、安全习惯差、人的安全生理和心理状态不佳^[6]。安全管理体系既是组织的安全管理，也是事故预防工作方案，主要内容是安全方针、安全职责分工、安全程序文件、安全操作规程等^[7]。安全文化指的是企业的氛围、价值观和指导思想等。

该模型的优势在于其强大的追溯性，能够引导管理人员分析事故隐患像剥洋葱一样层层深入，直至揭示出隐患的根本性缺陷，为隐患治理提供了精准的“靶向”。

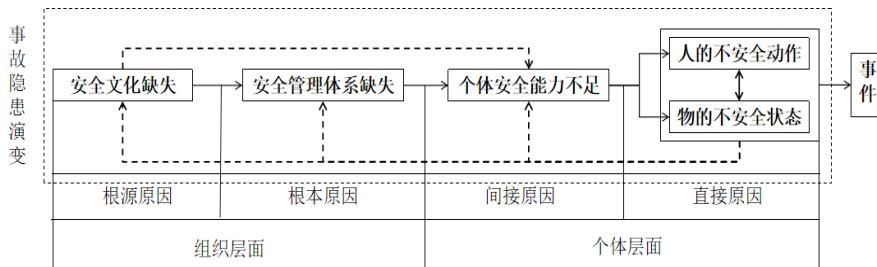


图1 “2-4”模型结构图

2.2 “5831班组安全屋”模型理论

“5831班组安全屋”模型是由中国安全生产协会班组安全建设工作委员会通过对大量工业安全管理实践的系统性总结与提炼而提出的一个创新型班组安全模型。

“5831班组安全屋”模型是一个形象化、结构化的安全管理体系构建框架，它通过将安全管理体系解构为17个核心要素，即以5项班组安全基础工作（责任制、制度规程、教育培训、设备设施）为地基，以涵盖“人、机、料、法、环”的8类现场管控要素（作业准备、班会、风险管控、隐患排查、作业行为、作业控制、现场管理、标准化作业）为支柱，再以3项关键支撑（安全文化、应急管理、持续管理）作为加固，共同支撑起“零事故”或“本质安全”这一终极目标。它在安全管理实践中体现出基础先行与过程管控并重，将抽象的安全目标转化为具体的、可操作的管理动作等优势，极大地提升了安全管理的可执行性和实效性，是实现

安全管理从事后应对到事前预防的有效路径。

因此，“5831班组安全屋”是一个能够为组织提供了一个结构清晰、逻辑严谨的管理模型，将零散的管理活动系统化，为基层安全管理提供了一个逻辑清晰、要素全面的“施工蓝图”。

3 “根源分析-系统治理”双轮驱动模式

在传统的事故隐患治理是“头痛医头，脚痛医脚”，停留在表象层面，并且整改措施是孤立的、点状的。本文所构建的“根源分析-系统治理”双轮驱动模式，正是为解决这一问题而提出的系统性解决方案。该模式通过将“2-4”模型与“5831班组安全屋”模型进行创造性融合，使二者优势互补，可以为企业的隐患排查治理提供一套从精准诊断到系统根治的标准化、可复制的应用有机整体。“根源分析-系统治理”双轮驱动模式运行如图2所示。

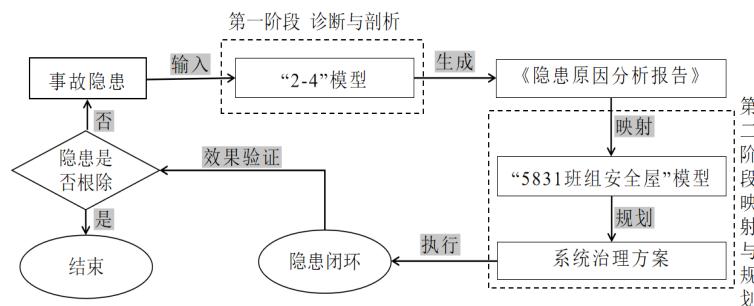


图2 “根源分析-系统治理”双轮驱动模式运行图

3.1 以“2-4”模型为显微镜，深度剖析隐患根源

当隐患被识别后，应立即组建分析小组，以“2-4”模型为显微镜进行层层深入的分析。首先，明确直接的不安全行为或状态；接着，探究个体的安全知识、意识和习惯（习

惯性行为）是否存在不足；继而，关键一步是审视组织层面的安全管理体系，例如：相关的规章制度、操作规程、培训效果、职责分工、监督考核等环节是否存在漏洞或失效（根本原因）；最终，追溯至最深层次的安全文化层面，审视组

织的价值观、领导力示范和整体氛围。

通过这一系统性的追溯，分析结论将不再是“某员工违章”此类浅表归因，而是精准定位出如“作业许可流程存在缺陷”或“安全培训内容与实际脱节”等具体的管理问题，为后续的精准治理提供明确靶点。

3.2 以“5831 班组安全屋”为施工图，构建综合性治理方案

在诊断与剖析隐患的原因后，工作重心随即由“诊断”转向“治疗”。此阶段需依托“5831 班组安全屋”这一结构化框架，将前期识别出的系统性“病因”转化为一套全面、协同的治理“处方”。治理团队将每一个已识别的管理体系缺陷或文化薄弱点，对应到“5831 班组安全屋”中的相应模块。例如，原因是“安全职责不清”，便对应其“五项班组安全基础工作”，通过细化岗位安全责任书、建立清晰的责任矩阵并将其纳入绩效考核，来系统性地解决职责悬空问题；若原因是“员工风险辨识能力不足”，则需联动“教育培训”这一基础模块与“安全文化”保障要素，共同发力。

通过这种系统性的映射，针对单一隐患的治理方案将自然拓展为一项多维度、一体化的综合治理工程。它不再是孤立的点状整改，而是有机地涵盖了制度流程的修订、作业标准的优化、针对性培训的强化以及安全文化的引导等多个层面，形成一个内在关联、协同作用的“措施包”。这种方法从根本上避免了“头痛医头、脚痛医脚”的碎片化弊端，实现从治理一个隐患到提升一套体系的根本性转变。

3.3 “根源分析 - 系统治理”双轮驱动模式隐患治理实践

针对“高空作业平台护栏被临时拆除后未及时复位”这一隐患，运用该模式后，治理措施将不再仅是“要求复位护栏”。通过“2-4”模型分析，可能发现根本原因是“临时拆除作业许可流程缺失”（管理体系缺陷）和“便利性优先于安全性的潜文化”（安全文化根源）。据此，在“5831 班组安全屋”模型框架下，系统措施将包括：（1）修订作业许可程序（“标准化”支柱），明确临时拆除护栏的审批、隔离和恢复流程；（2）对相关人员进行专项培训（“教育培训”基础）；（3）领导者现场观察时重点检查此流程（“安全领导力”保障）；（4）在安全会议上表彰正确执行程序的案例（“安全文化”保障）。如此一来，治理的深度和广度得到质的提升。

综上所述，“根源分析 - 系统治理”双轮驱动模式实现事故隐患治理深度从“治标”到“治本”的转变，治理维度从“点状碎片”到“系统联动”的维度升级，治理导向从“归咎个人”到“反思系统”的文化变革，治理效能从“被动应对”到“主动预警”的关口前移。从而突破事故隐患治理“反复治、治反复”的瓶颈。

4 应用路径与实施建议

为确保“根源分析 - 系统治理”双轮驱动模式事故隐

患治理的有效应用，企业安全管理人员可遵循以下路径：

（1）培训与宣贯。首先对各级管理人员，特别是安全管理人员进行“2-4”模型和“5831 班组安全屋”的深度培训，统一思想和方法论。

（2）整合入流程。修订本单位的《隐患排查治理管理制度》，明确规定对重大隐患、重复性隐患必须启动“2-4”模型根因分析程序，并形成分析报告。

（3）建立映射矩阵。制作一个“根源”与“措施”的映射矩阵表，将“2-4”模型分析出的常见管理体系缺陷（如培训不足、职责不清、程序缺失等），对应到“5831 班组安全屋”中应加强的具体工作项（如修订培训计划、明确职责分工、完善程序文件等），为整改提供直接指南。

（4）赋能与激励。鼓励一线员工和管理者使用该模型分析身边隐患，并将其作为安全观察与沟通、班组安全活动的重要内容。对通过系统整改有效消除重复性隐患的案例给予表彰奖励。

（5）数字化赋能。有条件的企业可将此逻辑嵌入 EHS 信息化系统，实现隐患上报、整改反馈、效果评估的全流程线上化、数据化，提升效率并沉淀知识。

5 总结

（1）“根源分析 - 系统治理”双轮驱动模式事故隐患治理实现从“被动应对”到“主动免疫”的效能跃迁，治理过程的动态闭环，促进了治理导向的文化变革与全员参与，实现了业务治理与文化建设的同频共振。

（2）“根源分析 - 系统治理”双轮驱动模式事故隐患治理不再是一次性的项目，而是一个推动安全管理体系自我学习、自我完善的动态循环，最终不断提升组织的本质安全水平。

（3）事故隐患治理措施的落实并非流程的终点，企业应对整治效果进行验证，并将经验固化，把成功、优秀的治理案例进行总结提炼，纳入企业的安全知识库，用于员工安全教育、管理层评审和体系文件修订，不断提升安全组织韧性。

参考文献

- [1] 谢洪岭, 董菲菲, 王明光, 等. CMS隐患排查与治理体系在企业中的应用[J]. 化工管理, 2015(25):12-113
- [2] 孙翊锋. 公共安全治理模式转型的实践路径[J]. 中国应急管理, 2023(7):58-61
- [3] 黄小勇, 李霆, 刘琦晖, 等. HFACS在实验室安全隐患分类治理的应用 [J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(05): 250-5.
- [4] 傅贵, 陈奕燃, 许素睿, 等. 事故致因“2-4”模型的内涵解析及第6版的研究 [J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(01): 12-9.
- [5] 傅贵, 索晓, 王春雪, “2-4”Model 的系统特性研究[J]. 系统工程理论与实践, 2018(1):263-272.
- [6] 傅贵. 安全科学学及其应用探讨[J]. 安全, 2019, 40(2):1-9.
- [7] ISO.What is a management system? [EB/OL]. [2021-09-13]. <https://www.iso.org/management-system-standards.html>.

A Brief Analysis of the Application of the Dual Prevention Mechanism in Grain Storage Enterprises

Guoliang Liu Shuai Wang Haitao Wang

Sinograin (Hulunbuir) Limited Reserve Company, Inner Mongolia Hulunbuir 165456, China

Abstract

“Double prevention measures” is a general term for risk classification control and hidden danger investigation and rectification. The first priority is ‘prevention’, that is, risk classification and control, to prevent risks from evolving into hidden dangers. The second priority is ‘prevention’, that is, hidden danger investigation and rectification, to prevent hidden dangers from causing accidents. Constructing and perfecting the dual prevention mechanism is the key action to practice the principle of “safety first, prevention first, comprehensive improvement,” fulfill the requirements of “safety production law,” enhance the safety production management system and management efficiency, and promote the transformation from post-processing to pre-prevention. This paper briefly expounds how to construct a dual prevention mechanism system for grain storage institutions, and discusses how to effectively use the dual prevention mechanism in daily operations.

Keywords

dual prevention mechanism ; hazard source ; risk assessment ; hidden danger investigation

粮食仓储企业双重预防机制的应用浅析

刘国梁 王帅 王海涛

中储粮（呼伦贝尔）储备有限公司，中国·内蒙古呼伦贝尔 165456

摘要

“双重防范举措”乃是风险等级划分管控以及隐患排查整治的统称。首重“防范”即风险等级划分管控，防范风险演变成隐患，次重“防范”即隐患排查整治，防范隐患导致事故。构建完善双重防范机制，是践行“安全首位、防范优先、综合整治”原则、履行《安全生产法》规定要求、增强安全生产管理体系及管理效能、推动从事后处理向事前防范转变的关键行动。本文针对粮食仓储机构怎样构建双重防范机制体系展开了简要阐述，对日常作业中怎样有效运用双重防范机制展开了研讨。

关键词

双重预防机制；危险源；风险评估；隐患排查

1 引言

双重预防机制的构建乃是贯彻落实党中央、国务院关于构建风险管控以及隐患排查治理机制这一重大决策部署，是习近平总书记针对安全体系所做出的全新阐释与解读。双重预防机制以风险识别与分级管控作为根基，以隐患排查治理当作手段，将风险管控在隐患产生之前，借助隐患排查，及时查找出风险管控进程中的疏漏之处，把隐患消除在事故发生之前。

2 构建原则

要秉持风险居先准则。以风险防控作为主要脉络，将全方位识别评估风险以及严格把控风险当作安全生产的首道防线，切实处理“看不明、料不到、管不佳”的显著难题。

要秉持系统性准则。从人员、物品、环境、管理这四个层面，在企业安全管理工作巾，需以风险防控、隐患整治

为两道核心防线，将其贯穿于企业生产运营的全流程与全生命周期，着力推动风险防控前置与隐患形成之前，隐患排查整治前置与事故发生之前，构建“防风险、治隐患、遏事故”的递进式安全屏障。

在机制落地层面，需坚守全员参与的基本原则。应将“双重预防机制”建设的各项工作责任，细化分解并精准落实到企业各层级管理者、各业务部门及每一个具体工作岗位，明确不同主体在风险辨识、隐患排查、整改闭环等环节的具体职责，确保责任链条无断点、职责边界清晰化，形成“人人有责、人人尽责”的安全管理格局。

要秉持持续改进的准则。持续地展开风险分级管控以及更新完善的工作，持续地开展隐患排查治理的工作，使得“双重预防机制”能够不断地朝着深入、深化的方向发展，推动机制构建的水准持续得以提升^[1]。

3 具体方法

3.1 风险点管控

风险点是存在风险的设施、部位、场所和区域，以及伴随风险的作业活动，或以上两者的组合。根据粮食仓储企业工作实际，建立粮食仓储企业安全风险辨识数据库，其中，设备设施类包括仓房设施、粮机设备等；作业活动类包括出入库作业、熏蒸作业等；场所类包括药品库、办公楼等。具体内容可以参照安全风险点分类，全面建立企业风险点数据库，健全风险点名称、可能导致事故类型、风险等级等信息^[2]。

3.2 危险源辨识

危险源是可单独或共同引发事故的内在要素、状态、行为或其组合。经全面辨识分析，粮食仓储企业主要涉及人的因素包括心理生理性危险、行为性危险等；物的因素包括设备设施工具、防护缺陷等；环境因素包括室内作业场所环境、室外作业场地环境不良等；管理因素包括安全责任制、操作规程不规范等。粮食仓储企业可参照危险源分类标准，组织开展危险源辨识，健全风险名称、所在位置、所属科室、可能导致后果等内容。

3.3 开展风险评估

风险评估是对风险发生的可能性和后果严重性进行定性分析和定量计算，根据评价结果划分风险等级。粮食仓储企业可以统一采用作业条件危险分析法（简称 LEC 法），在现有安全管控措施基础上，剖析意外产生的概率情况（可能性）揭示危险环境呈现的频繁状况（频繁程度）以及意外可能引发的结果情形（后果）给予数值后把这三者相乘来明确风险数值（风险值），意外产生概率的高低程度（可能性），在概率极小的时候设定为 0.1，肯定会发生的意外设定为 10，处于两者中间的确定为一些中间数值（表 1）

表 1 事故事件发生的可能性 (L) 判定准则

分值	事故、事件或偏差发生的可能性
10	完全可以预料
6	相当可能；或危害的发生不能被发现（没有监测系统）；或在现场没有采取防范、监测、保护、控制措施；或在正常情况下经常发生此类事故、事件或偏差
3	可能，但不经常；或现场没有检测系统或保护措施（如没有保护装置、没有个人防护用品等），也未作过任何监测；或未严格按照操作规程执行；或未有效执行控制措施；或危害在预期情况下发生
1	可能性小，完全意外；或危害的发生容易被发现；或现场有监测系统或曾经作过监测；或过去曾经发生类似事故
0.5	很不可能，可以设想；或危害一旦发生能及时发现，并能定期进行监测
0.2	极不可能；或有充分、有效的防范、控制、监测、保护措施；或员工安全意识高，严格执行操作规程
0.1	实际不可能

暴露于危险环境的频繁程度 (E)，将连续出现在危险环境的定为 10，非常罕见地出现在危险环境中定为 0.5，介于两者之间的确定为若干中间值（表 2）。

表 2 暴露于危险环境的频繁程度 (E) 判定准则

分值	频繁程度	分值	频繁程度
10	连续暴露	2	每月一次暴露
6	每天工作时间内暴露	1	每年几次暴露
3	每周一次或偶然暴露	0.5	非常罕见地暴露

事故产生的后果 (C)，将需要救护的轻微损伤或较小财产损失的确定为 1，把造成多人死亡或重大财产损失的确定为 100，介于两者之间的确定为若干中间值（表 3）。

表 3 事故产生的后果 (C) 判定准则

分值	法律法规要求	人员伤亡	直接经济损失	停工	公司形象
100	严重违反法律法规和标准	10 人以上死亡，或 50 人以上重伤	5000 万元以上	公司停产	重大国际、国内影响
40	违反法律法规和标准	3 人以上 10 人以下死亡，或 10 人以上 50 人以下重伤	1000 万元以上	装置停工	行业内、省内影响
15	潜在违反法规和标准	3 人以下死亡，或 10 人以下重伤	100 万元以上	部分装置停工	地区影响
7	不符合上级或行业的安全方针、制度、规定等	丧失劳动力、截肢、骨折、听力丧失、慢性病	10 万元以上	部分设备停工	公司及周边范围
2	不符合公司的安全操作程序、规定	轻微受伤、间歇不舒服	1 万元以上	1 套设备停工	引起关注，不利于基本的安全卫生要求
1	完全符合	无伤亡	1 万元以下	没有停工	形象没有受损

风险值 (D) 求出之后，企业应参考风险界限值，确定重大风险、较大风险、一般风险和低风险，分别用红、橙、黄、蓝四种颜色进行标识（表 4）。

表 4 风险等级判定准则 (D) 及控制措施

风险值	风险等级	控制措施	颜色标识
> 320	重大风险	应当设有工程技术措施，严格执行安全审批和监管，划定作业人数上限，制定突发事故应急预案	红
160~320	较大风险	加强安全生产管理，宜设置工程技术措施，明确现场安全监管，及时处置突发情况	橙
70~160	一般风险	加强日常安全教育培训，保证设施设备安全运行，及时处置突发情况	黄
< 70	低风险	落实作业人员安全防护用具，严格执行作业安全规程	蓝

3.4 风险管理

遵循风险越高管控层级越高原则，重大风险由企业主要负责人管理；较大风险由科室负责人管理；一般和低风险由岗位人员管理。安全风险应对办法涵盖：工程技术类举措、

管控类办法、培训教导类手段、个体防护类方式、应急处理类做法等,根据风险大小选择一种或几种措施。安全风险实行岗位公告,公告内容应包括:风险点名称、责任区域、责任人、危险源名称风险类别、可能导致的事故、风险等级、管控措施、应急措施等对重大安全风险和职业病危害的场所和岗位,设置十分明显的警示标识并且加强对危险源的监测以及预警工作^[3]。

3.5 隐患排查

重大风险每日检查,较大风险每周检查,一般风险每月

检查,低风险每季检查。检查发现的隐患分为重大隐患、较大隐患和一般隐患。重大隐患指可能直接导致生产安全事故发生的隐患,具有危害和治理难度大、易造成全部或者局部停产停业,可以包括进出仓作业、熏蒸作业、粉尘爆炸、有限空间等。较大隐患指除重大隐患外,可能导致生产安全事故发生的隐患,包括消防安全、用电安全、作业安全等。一般隐患指除以上两种隐患外,其他可能影响安全生产的隐患

(表5)。^[4]

表5 重大和较大隐患判定标准

等级	依据	分类	内容
重大隐患	粮食仓储行业标准	外包作业与安全资质	没有针对承包主体、承租主体的安全生产事务予以统一的协调与管理,或者没有定时开展安全方面的检查
		特种作业人员未按照规定经专门的安全作业培训并取得相应资格,上岗作业的	
		进出仓作业	房式仓、筒仓(含立筒仓、浅圆仓)、简易仓库及烘干塔粮食进出仓作业时未对可能意外启动的设备和涌入的物料、高温气体、有毒有害气体等采取隔离措施的
较大隐患	企业内部规定	熏蒸作业或散气	以上场所作业未落实防止高处坠落、坍塌等安全措施的
		粉尘爆炸	熏蒸作业未制定作业方案、未经粮库负责人审批,或者熏蒸负责人及操作人员未经专业培训合格的
		有限空间	在存在磷化氢的作业场所未配备磷化氢气体浓度检测报警仪器,或者未采用测氧仪检测氧气浓度,或者未配备检验合格的呼吸防护用品的
		消防安全	未设置警戒线、警示标志,或者熏蒸作业前未确认无关人员全部撤离熏蒸作业场所的
		作业安全	房式仓、罩棚仓、筒仓及配套工作塔、连廊、输粮地沟等存在粉尘爆炸危险的区域未制定和落实粉尘清理制度或作业现场积尘严重的
		电气安全	以上场所未按规定使用防爆电器设备设施的
		劳务安全	气调仓、烘干塔、卸粮仓、地上(下)通廊及药品库等区域没有针对受限空间展开识别、构建起安全管理账目记录,而且没有设立起明显可见的安全警示标识
		防汛安全	以上这些地方进行工作的时候,没有切实执行有限空间作业的批准流程,或者未执行“先通风、再监测、后作业”要求,或者作业现场未设置监护人员的
		危化品安全	未落实消防安全主体责任,库区发现烟火问题、消防设施不完善、消防通道被堵塞、消防器材不足
		施工安全	违规作业、违章指挥、违反劳动纪律,或者经常性疲劳作业
		电气安全	违反电气安全操作规程,电线私拉乱接,设备安全防护不到位
		劳务安全	未按规定配备安全防护设施设备和劳动保护用品,劳动防护用品使用不规范
		防汛安全	未落实防汛预警、预报、预演、预案措施和防汛定级工作,造成汛期灾害损失
		危化品安全	未落实双人、双锁、双收、双发、双账等要求
		施工安全	新建、改建、扩建的工程项目的安全相关设施以及职业病防范保护设施,没有跟主体项目一同进行设计、一同开展施工、一同投入到生产以及投入到使用之中

3.6 隐患整改

建立事故隐患管理台账,依据事故隐患等级实施综合治理,落实隐患排查、治理、验收、销号管理要求。粮食仓储企业对发现的事故隐患能整改的应立即整改,无法立即消除的重大事故隐患,应当结合实际采取隔离防护、停工停产等紧急措施,防止事故发生。

4 讨论与结论

企业将安全风险的识别与管控作为根本,自始至源头系统性地识别风险、按级别管控风险,着力使各类风险被控制在可接纳的范围之内,尽力避免并降低事故隐患。以隐患的排查与治理作为方法,仔细排查风险管控流程里出现的缺失之处、漏洞以及风险控制失效的环节,坚决在事故发生之前将隐患消除掉。日常双重预防体系运行过程中,在新设备、新工艺、新技术投入使用前,进行危险源辨识和风险分级管

控。每年定期进行“双重预防机制”自评,根据人员、设备、环境和管理等因素变化,持续进行风险辨、评估、管控与更新完善,持续提升企业安全风险管理能力。通过这些步骤,双重预防机制能够帮助企业建立一个安全、可靠的工作环境,有效预防事故的发生。

参考文献

- [1] 胡国江;企业安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制建设探究[J].中国科技投资,2024(6)
- [2] 刘泽潘,周艳;工贸企业隐患分析及双重预防机制的应用[J].天津理工大学学报,2025(4)
- [3] 李建波;企业安全风险分析与管控措施研究[J].企业改革与管理,2021, No.405(16).
- [4] 中华人民共和国应急管理部令(第10号)工贸企业重大事故隐患判定标准.应急管理部.2023(4)

Error analysis and control strategy in liquid flow measurement verification

Chuangfu Xu

Alxa League Inspection and Testing Center, Alashan, Inner Mongolia, 750306, China

Abstract

Liquid flow measurement is extensively applied in energy, chemical, water resources, and environmental protection sectors, where its accuracy directly impacts trade settlements, process control, and operational safety. As a critical step in ensuring measurement instrument accuracy, verification is often affected by various factors in practice, leading to measurement deviations. This paper systematically analyzes the primary error sources in liquid flow measurement verification, including equipment system errors, environmental influence errors, operational human errors, and errors caused by medium characteristic variations. For different error types, corresponding control strategies are proposed, such as optimizing equipment selection and calibration, improving environmental conditions, standardizing operational procedures, and establishing quality control systems. These strategies provide both theoretical foundations and practical guidance for enhancing the accuracy of liquid flow measurement verification.

Keywords

liquid flow; measurement verification; error analysis; control strategy

液体流量计量检定过程中的误差分析及控制策略

徐创福

阿拉善盟检验检测中心, 中国 · 内蒙古 阿拉善 750306

摘要

液体流量计量广泛应用于能源、化工、水利、环保等领域, 其准确性直接影响贸易结算、过程控制和安全运行。检定作为确保计量器具量值准确的关键环节, 在实际操作中常受多种因素影响, 导致测量结果产生偏差。本文系统分析了液体流量计量检定过程中的主要误差来源, 包括设备系统误差、环境影响误差、操作人为误差和介质特性变化引起的误差。针对不同类型的误差, 提出了优化设备选型与校准、改善环境条件、规范操作流程、建立质量控制体系等相应控制策略, 为提高液体流量计量检定准确性提供了理论依据和实践指导。

关键词

液体流量; 计量检定; 误差分析; 控制策略

1 引言

液体流量计量是现代工业生产以及社会生活里的关键部分, 关联着石油、天然气、化工、食品、制药等众多行业。流量测量的精准度不仅关乎贸易结算的公平, 还会直接影响生产过程的控制精度和产品质量。检定是量值溯源的关键步骤, 将被检流量计与标准装置作比对, 保证量值传递准确一致。开展检定工作期间, 因为设备、环境、操作、介质等方面因素的作用, 会产生误差。细致剖析这些误差产生的源头, 并实施有效的管控策略, 对提高检定结果可信度、降低经济损失十分关键。

2 液体流量计量检定基础

2.1 流量计量基本原理

液体流量计量的主要工作是测算单位时间里流经管道横截面的流体体积或者质量。按照测量原理的差异, 常见的流量计有差压式、容积式、涡轮式、电磁式、超声波式等多种类别, 即便各种流量计的工作原理有差别, 然而都遵循质量守恒定律和能量守恒定律^[1]。检定过程中, 常利用标准装置对被检流量计开展校准, 通过对比读数评估被检流量计量性能, 标准装置的精准度直接影响检定结果的可靠程度, 需定期进行溯源和维护。

2.2 常用检定方法与标准装置

常用的液体流量计量检定方法有静态称重法、动态称重法、容积法、标准表法等。静态称重法称量一定时间流入容器的流体质量, 进而计算流量, 可用于中小流量的检定工作。动态称重法则借助持续称量流体质量的变化达成实时流

【作者简介】徐创福 (1976-), 男, 中国内蒙古阿左旗人, 本科, 高级工程师, 从事计量检测研究。

量测量,可用于大流量检定。容积法借助已知容积的标准容器来测定流体的体积,虽操作简便但受温度影响明显,采用标准表法进行检定时,将被检流量计与高精度标准表串联起来,通过对两者读数完成检定,适合现场检定工作,不论选用哪种办法,标准装置都得符合相应的准确度等级要求,且需定期校准。

2.3 检定流程与质量控制要点

液体流量计量检定步骤如下:开展检定工作前需做好准备工作,包括设备检查、介质准备和环境控制,随后将被检流量计与标准装置正确安装连接;按规程要求设置不同流量点进行检定操作,最后记录各流量点读数,算出误差和不确定度;判定结果并出具证书(依据检定规程判断被检流量计是否合格,并签发检定证书)^[2]。在整个流程里,质量控制自始至终都有涉及,包含设备状态检查、环境参数监测、操作过程监督、数据审核这些环节,任何环节出现疏忽,都可能导致检定结果出现偏差,故而需建立完善的质量控制体系。

3 误差来源分析

3.1 设备系统误差

3.1.1 标准装置误差

检定结果受标准装置自身准确度的影响最为关键,使用标准装置的过程中,零部件磨损、老化或校准不及时都可能造成误差增大,若静态称重法中的衡器没有定期校准,称量的结果或许存在偏差。若容积法里的标准容器出现变形,其容积值就会与标称值存在差异,标准装置与被检流量计是否匹配也会影响检定结果,要是二者的量程范围不相符,可能使某些流量点的测量误差增大。

3.1.2 被检流量计误差

被检测的流量计,其自身性能是误差产生的另一个重要源头,不同种类的流量计,工作特性与误差规律各有不同,涡轮流量计的轴承一旦磨损,就会造成仪表系数改变。电磁流量计测量信号的稳定性会因电极污染而受影响。超声波流量计易受流体流动状态和温度变化的影响,流量计安装质量的好坏会直接左右其测量的精准度,像前后直管段不够、安装角度有偏差等情况都会产生额外误差。

3.2 环境影响误差

3.2.1 温度影响

温度的变化会影响液体的密度、黏度等物理参数,最终造成流量测量结果出现变化,对于测量对象为体积流量的流量计而言,温度升高会让液体体积膨胀,若质量流量不发生改变,体积流量会增大。温度改变会引发设备零部件热胀冷缩,进而对标准装置和被检流量计的几何尺寸造成影响^[3]。温度变化会使标准容器的容积发生改变;内部结构尺寸的改变或许会让流量计的仪表系数出现漂移。

3.2.2 压力影响

液体的密度和压缩性主要受压力变化的影响,高压条件下,液体密度会增大,或许会让某些类型的流量计(如差压式流量计)的测量结果出现偏差,压力波动有可能让流体的流动状态出现变化,如产生气泡或涡流,进而干扰流量计正常运行,检定过程中,倘若压力控制不稳定,便无法获取准确可靠的检定结果。

3.2.3 其他环境因素

除了温度和压力,湿度、振动、电磁干扰等环境因素或许也会对检定结果造成影响,高湿度环境易使电子设备受潮,进而降低其性能;振动会对衡器、传感器这类精密仪器的正常工作产生干扰。电磁干扰对电子流量计的信号采集与处理造成影响,检定实验室,需采取有效举措把控这些环境因素,给检定工作创造稳定可靠的条件。

3.3 操作人为误差

3.3.1 安装操作误差

安装操作失误是引发人为误差的一大主因,检定装置安装期间,若管道连接密封不严,会引发流体泄漏,进而使测量结果偏低。若被检流量计前后的直管段未达到规程要求,会影响流体流动状态,进而引入附加误差。阀门操作方式会对流量稳定性造成影响,阀门开启太快,可能引发流体冲击,进而影响流量计的读数。

3.3.2 读数与记录误差

检定过程中,操作人员的读数与记录操作也有引入误差的可能,读取流量计时,若视线和刻度盘不垂直,会引发视差误差。若在记录数据的过程中,要是出现笔误或者数据录入错误,会直接影响检定结果的准确性。操作人员对检定规程的理解与执行情况有别,会使操作过程出现偏差,如流量点设置、稳定时间控制等方面就存在差异。

3.4 介质特性变化误差

3.4.1 密度与黏度变化

流量测量受液体的密度和黏度等重要参数影响,各种液体的密度和黏度差别明显,即便为同一种液体,其密度和黏度也会随温度、压力等条件变动而改变,某些类型的流量计,如容积式流量计,液体黏度对其测量结果的影响较为明显。对于差压式流量计而言,密度改变会直接影响流量计算的结果,检定过程中,要是介质的密度或黏度和流量计标定条件差别较大,会使测量误差增大。

3.4.2 含气与含杂质影响

若液体里存在气泡或固体杂质,会极大影响流量测量的精确性,气泡会占用一定的流道空间,实际通过流量计的液体体积变少,并且有可能引发流量计内部零部件的磨损或损坏。固体杂质或许会堵塞流量计的流道,也可能损坏传感器,进行检定的时候,若介质处理没做好,包含气泡或者杂质,便无法得到精准的检定结果。

4 误差控制策略

4.1 设备系统误差控制

4.1.1 标准装置定期校准与维护

制定标准装置定期校准与维护的制度，依照检定规程规定的周期，将标准装置送至上级计量机构开展溯源校准，保证量值精准可靠。加大日常维护保养力度，迅速更换出现磨损的零部件，保障设备始终处于良好工作状态。针对关键设备，需设立设备档案，记录该设备的使用情况、维护记录以及校准证书，做到全生命周期管理^[4]。

4.1.2 被检流量计安装与调试

对被检流量计做全面检查，确保其外观无瑕疵、零部件完备。依照检定规程的严格要求开展安装工作，前后直管段长度、安装角度等符合相关规定。新安装的流量计，要进行全面调试和试运行，等其工作稳定后开展正式检定，若在检定期间察觉流量计存在异常，要即刻停止检定并实施维修操作。

4.2 环境影响控制

4.2.1 温度与压力控制

应在检定实验室，检定实验室应配置齐全的温湿度控制设备，让环境温度处于检定规程要求的范围，同时维持温度稳定，针对需进行温度修正的检定项目，应于检定进程中实时监测流体温度，精准记录温度数据以计算修正值，保证检定系统压力稳定，杜绝因压力波动产生测量误差，针对需要恒定压力的检定项目，要配备可靠的压力调节装置。

4.2.2 其他环境因素控制

运用有效方法管控湿度、振动、电磁干扰等环境要素，维持实验室环境的干燥状态，防止电子设备受潮；配备防震装置，降低外部振动对精密仪器的干扰。运用屏蔽、接地等手段，减少电磁干扰对电子流量计造成的影响，按照固定周期对实验室环境实施监测与评估，迅速找出并处理环境问题^[5]。

4.3 操作误差控制

4.3.1 人员培训与资质管理

加大对检定人员的培训力度，让他们熟知检定规程和操作流程，掌握各类设备的使用方法与注意要点，构建人员资质管理体系，要求人员持证上岗。定时对检定人员开展考核，保证其拥有相应专业能力，激励检定人员参与专业培训与学术交流活动，时时更新知识，提升业务水准。

4.3.2 标准化操作流程

设计细致的标准化操作规范，确切明确各环节操作要求和注意事宜，开展检定工作时，严格依照操作规程开展工作，降低人为因素干扰。运用自动化的数据采集与处理系统，

降低人工读数和记录步骤，提升数据精准度与工作效能。构建数据审核体系，迅速对采集的数据开展审核与纠错工作，保障数据质量。

4.4 介质特性控制

4.4.1 介质选择与预处理

依照被检流量计的类型与检定要求，选择合适的检定介质，若流量计需要进行密度或黏度修正，应当选取与实际使用状况相近的介质。对介质做充分的预处理，除去里面的气泡和固体杂质，若涉及易挥发的介质，需实施密封手段，降低蒸发损耗。

4.4.2 介质参数实时监测

检定过程中，实时监控介质的温度、压力、密度等参数，及时开展修正计算。针对对温度变化敏感的检定项目，需缩短检定间隔时长，减轻温度变化造成的影响。制定介质参数监测记录制度，精准记录各参数的变化动态，为后续数据分析与误差评估提供基础。

5 结论

本文全面且系统地剖析了液体流量计量检定过程中的主要误差来源，涵盖设备系统误差、环境影响误差、操作人为误差以及介质特性变化造成的误差。针对各类误差，推出了相应的控制策略，强化设备校准与维护、把控环境因素、规范操作流程、优化介质管理等，为提升液体流量计量检定准确性给出可行方案。未来，液体流量计量检定技术会朝着自动化、智能化、网络化方向大步迈进，需深入探究多参数耦合作用产生的误差机理，构建更完备的误差分析模型，为流量计量检定工作提供更有效的制度保障。

参考文献

- [1] 张柯,裘雪玲,樊家成.巴歇尔槽明渠流量计喉宽影响误差的量化研究[J].计量学报,2025,46(08):1127-1133.
- [2] 魏国池,张明明.燃气长输管道中的流量计量与误差控制研究[J].石化技术,2025,32(04):369-370.DOI:CNKI:SUN:SHJS. 0.2025-04-130.
- [3] 安鑫,肖五强.成品油卸车系统计量误差成因分析与对策[J].化工管理,2025,(09):132-135.DOI:10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2025.09.035.
- [4] 郑海霞,杨建琳,林斌发.旋翼式湿式水表计量等级提升的研究[J].中国仪器仪表,2023,(10):74-78.DOI:CNKI:SUN:ZYQB.0.2023-10-013.
- [5] 吴丹.流体黏度对容积式流量计的性能影响[J].石油石化节能与计量,2023,13(09):79-82+99.DOI:CNKI:SUN:GWYT.0.2023-09-015.

Analysis of abnormal phenomena and countermeasures for installation and trial operation of petrochemical mechanical and electrical equipment

Dongchen Li Yongdong Liu

Lanzhou Petrochemical Company, Lanzhou, Gansu, 730060, China

Abstract

The effective implementation of trial operations for petrochemical electromechanical equipment can better ensure the stability and reliability of equipment operation, thereby facilitating the smooth progress and orderly development of petrochemical production. It is essential to identify common abnormal phenomena during the installation and trial operation of petrochemical electromechanical equipment and develop corresponding countermeasures. This article focuses on analyzing abnormal phenomena in the installation and trial operation of petrochemical electromechanical equipment, particularly in core scenarios such as mechanical vibration, abnormal temperature, and sealing leakage. The study explores how to leverage intelligent technologies like Industrial Internet, AI algorithms, and digital twin systems to enhance troubleshooting strategies, thereby improving the efficiency and quality of issue resolution.

Keywords

petrochemical electromechanical equipment; abnormal trial operation; intelligent technology; AI diagnosis

石油化工机电设备安装试运行异常现象分析与应对方法分析

李东宸 刘永东

兰州石化公司, 中国·甘肃兰州 730060

摘要

石油化工机电设备试运行工作的有效落实可以更好的保障机电设备运行的稳定性与可靠性, 进而影响石油化工生产的顺利推进和有序开展, 明确石油化工机电设备安装试运行的常见异常现象并找到应对策略是十分必要的。文章将石油化工机电设备安装试运行的异常现象分析聚焦于机械振动、温度异常、密封泄漏等核心场景, 分析如何借助工业互联网、AI算法、数字孪生等智能化技术提高异常问题的处置策略, 提高各类问题处理的效率和质量。

关键词

石油化工机电设备; 试运行异常; 智能化技术; AI诊断

1 引言

石油化工机电设备试运行期间的运行环境较为复杂, 在高温、高压、多介质等多重因素影响下很容易会出现各种各样的异常问题, 如机械振动、温度异常、密封泄露等等, 若单纯依赖人工处理则很容易会出现误判, 影响故障修复效率, 甚至可能会导致故障扩大。为了更好的解决这些问题, 就需要借助工业传感器网络、边缘计算网关、AI故障诊断模型等智能化技术提高异常现象应对及处理能力, 而在此之前, 首先则需要明确智能化技术在石油化工机电设备安装试运行的应用基础。

【作者简介】李东宸 (1985-), 男, 中国甘肃兰州人, 本科, 从事化工机械研究。

2 智能化技术在试运行异常分析中的应用基础

想要更好的发挥智能化技术的技术优势, 就需要搭建“数据采集 - 传输 - 处理 - 应用”的智能化技术框架, 并根据实践应用需求做出针对性优化。

2.1 多维度数据采集层

可通过传感器技术的应用, 实时采集设施设备的运行状态数据, 实现振动数据、温度数据、密封泄露数据、电气参数数据的一键收集、整合, 实时存储, 为后续异常现象诊断及处理提供更多的信息参考。例如可于泵、压缩机的轴承座和机壳部位安装压电式加速度传感器, 捕捉 0.1mm/s 级别的微小振动, 进而及时的发现设备不平衡、不对中、轴承磨损等故障。温度监测中可借助无线无源 RFID 温度标签, 收集电机绕组、密封腔、齿轮箱等部位的温度数据。在法兰等部位可以配置激光气体传感器, 实时监测密封泄漏问题。在电气参数监测中则可以借助智能电量传感器完成电压、电

流、功率因数等参数的收集分析，为启动电流过载、三相不平衡等异常诊断提供帮助^[1]。

2.2 数据传输与边缘处理层

在数据传输及边缘处理层设计中应充分考量石化现场的生产特点，提高防爆、抗干扰能力，可通过边缘计算网关+5G/工业以太网传输架构的应用保障传输稳定。传感器收集的实时数据会通过网络输送至边缘网关，利用其内置算法完成数据的过滤和压缩，降低数据传输负荷的同时保障数据有效，在此之后可借助 5G 网络或工业以太网传输至云端平台，提高数据传输效率。

2.3 智能分析与应用层

智能分析与应用层是发挥智能化技术优势，提高异常问题处理效率和质量的核心，可通过数字孪生模型配合 AI 诊断算法提高应用成效。数字孪生模型应用前需要输入设备 CAD 图纸、安装参数、材质属性等数字信息，这些信息经过特定算法处理后会生成数字孪生体，在设备运行期间，传感器设备监测的数据信息会实时共享至数字孪生平台，数字孪生模型也会实时更新参数，更清晰的呈现设备内部温度场、振动分布、介质流动状态，避免巡检盲区的出现。

AI 故障诊断可大幅降低故障诊断对人力的依赖性，可通过历史故障数据整合不断训练算法，提取不同故乡的特征信息，在出现异常数据时，人工智能技术则会精准识别故障类型，避免故障识别失误带来的损失，相较于人力识别，人工智能算法支持下的故障诊断，准确率可以达到 95% 以上^[2]。

3 典型试运行异常的智能化分析与应对方案

3.1 机械振动异常智能诊断及应对

振动异常的构成原因复杂，例如叶轮结垢、联轴器不对中等问题都有可能引发机械振动异常，传统人工诊断需要耗费较多时间锁定故障原因，且诊断的时效性也无法得到保障，这时则可以借助人工智能技术进行智能化分析，实现提前预警和精准溯源，最大化降低机械振动异常的负面影响。

可借助数字孪生平台构建设备模型，并实时监控设施设备的运行参数，根据设备的使用手册和运行需求进行综合评价，若设备的综合评分低于固定数值，系统则会自动触发警报，由专业维修人员到场处理。孪生平台除了可以记录当下数值以外，还可以对历史数据进行趋势分析，例如基于振动幅值、频率分布、谐波成分综合评分评价设备健康指数，若设备健康指数连续三次检测都成下降趋势同样也会触发警报，由工作人员进行处理^[3]。

针对诊断数据，人工智能技术会自动评价分析问题构成原因并对接数据库启动应急预案，甚至可以实现自动化处理，例如出现设备振动异常问题，人工智能技术可通过数字模型分析确定构成原因并快速生成应急处理方案。首先，紧急停止设备运行，避免故障扩大引发损失增加，在此之后通过模型分析显示联轴器不对中是振动异常的主要

原因，系统则会启动激光对中仪，并通过和数字孪生模型联动的方式显示调整偏差，控制并调整联轴器，直至目标偏差 $\leq 0.05\text{mm}$ 。在此之后系统则会对比调整后设备的振动值，跟踪故障处理成效，不断调整处理方案，直至振动值降至 4mm/s 以下。

3.2 设备温度异常

温度异常问题也是石油化工机电设备安装试运行中的常见异常问题，在过去的温度异常处理中，工作人员需要借助热电偶进行局部温度测量，因测量点有限，因此常常会出现漏判问题，而智能化技术的应用则可以实现全域覆盖，避免漏判问题的出现。

可借助无线 RFID 温度标签进行温度数据采集，根据机组运行特征和常见温度异常点确定监测点位，如电机绕组、轴承、齿轮箱等位置都可布设温度监测点位^[4]。RFID 温度标签采集的数据会实时共享至数字孪生平台，生成设备温度场云图，该云图不仅可以直观呈现不同设备及不同位置的温度变化，同时还可以通过温度分布差异初步断定温度异常的构成原因及解决办法。例如齿轮箱齿面温度异常问题处置中，采用传统模式往往需要温度上升至 80°C 才会报警，但是温度设备场云图可以提前 5min 响应，避免错过最佳维修时间，若监测数据发现某齿面温度达 75°C ，已经超过设计上限的 70°C 时则会触发警报，而经过温度对比发现周边齿面为 65°C ，系统则可以以此为依据判定为局部齿面磨损导致摩擦过热。

在初步诊断后，人工智能技术会根据 AI 模型和监测数据分析温度上升速率如 5 分钟内升温 10°C 、相邻点位温差 (10°C) 及历史数据，对故障成因进行深度排查，分析具体原因，例如若因润滑不足导致的温度异常也会呈现出整体升温的特点，但该案例中只是局部升温，故排除，经过系统分析将故障原因锁定为齿面磨损，并根据数字模型数据和运行数据进行趋势分析，得出剩余安全运行时间约 30 分钟，为故障修复提供明确的安全时间节点^[5]。

最后，在故障处理的过程中还可以联动物联网系统，分析备件库中是否有备用齿轮，在此基础上进行资源调配，确定停机检修流程。为保障运行安全，在更换齿轮后，可通过数字映射，用数字模型模拟运转，分析齿轮更换后的运行温度，在确保温度下降至正常值后启动设备。

3.3 密封泄漏异常

在过去，密封泄露问题多是通过人工巡检发现并加以处理，很有可能会出现疏漏，可通过智能化技术应用提高密封泄露异常的察觉能力。

可借助激光气体传感器完成密封腔周边介质浓度的实时监测，当浓度从 0ppm 升至 5ppm (远低于安全限值 100ppm) 时，系统则判定存在泄露问题，触发警报，同时泄露位置还会自动标注在模型上。人工智能技术会自动分析气体泄露数据，明确变化趋势，如每小时升高 2ppm ，同时，

传感器设备也会自动记录密封腔温度等数值进行问题分析, 例如腔体温度为 60℃, 介质压力为 1.2MPa, 这时则可以排除压力波动导致的瞬时泄漏, 确定泄露原因为静环密封圈老化。在锁定问题后, 系统则会明确密封圈的更换要求, 指导工作人员进行故障处理^[6]。

3.4 电气系统故障

首先, 可借助智能电量传感器完成实时电流数据的采集, 若在数据采集后发现启动电流超过额定电流的 7 倍, 但设计上限为额定电流的 6 倍, 持续时间也超过了 2s, 这时则可以判定存在启动电流过载问题。其次, 人工智能技术会进行数据分析, 从电流波形、控制柜内温度、保护参数设置等多个维度明确问题的构成原因, 得出结论为过载保护参数设置错误。最后, 系统则会根据设备运行需求提出参数调整建议, 例如将过载保护值设为额定电流的 6.5 倍, 然后启动电机, 观看修复效果。

3.5 系统联动失效

数字孪生平台可辅助系统联动, 实现自动联锁, 提高

问题处理效率。可借助数字孪生模型完成虚拟现实联动, 同步设备的运行参数, 如蒸发器液位 (1.1m, 接近高限值 1.2m)、紧急切断阀状态 (待触发)、控制系统信号传输状态, 在设备运转过程中, 若运行参数达到联动要求但却并未有效执行, 系统则会自动分析构成原因和解决对策, 例如当液位升至 1.15m 时, 检测发现液位信号未传输至切断阀控制器, 这时则可以判定为信号链路故障, 并发送预警信号^[6]。

人工智能技术会完成信号传输路径的追溯分析, 如液位变送器→边缘网关→控制柜→切断阀, 通过分析节点数据锁定问题, 如边缘网关至控制柜的信号传输中断, 最终确定问题成因为以太网网线松动。此后, 系统则会明确网线检修位置 (控制柜内第 3 个以太网接口), 检修后数字孪生模型模拟液位升至 1.2m, 切断阀自动动作^[7]。

4 智能化方案的实践效果

以某大型炼化厂机电设备安装试运行为例, 应用上述智能化方案后, 取得显著成效, 具体如表 1 所示。

表 1 某大型炼化厂机电设备安装试运行成效

异常类型	智能化应对模式	核心技术支撑	效率提升效果
机械振动异常	健康指数预警 (未超标时), AI 精准溯源故障, 5 分钟内定位	压电式传感器、AI 诊断模型	故障定位效率提升 92%
密封泄漏异常	ppm 级微泄漏捕捉, 浓度超标即报警	激光气体传感器、边缘计算	泄漏识别灵敏度提升 100 倍
电气系统故障	跳闸前 0.5 秒预警, AI 快速定位参数 / 线路问题	智能电量传感器、云端参数修改	故障处置时间缩短 98%
系统联动失效	信号链路实时监测, 提前预警故障节点	数字孪生联动、信号追溯算法	联动故障响应时间缩短 99%
设备温度异常	温度场云图全域监控, 局部过热提前 5 分钟预警	无线 RFID 标签、数字孪生	漏判率降低 85%

5 结论与展望

智能化技术在石油化工机电设备试运行异常分析及解决中应用了进一步提高异常故障锁定及处理的效率, 在保障异常故障处理效果的同时保障工作安全甚至降低异常处理成本, 为石油化工机电设备试运行异常分析提供了全新解决方案, 相关化工单位可通过“数据驱动 + 模型支撑”, 打破了传统故障识别及处理的局限, 实现了异常从“被动应对”到“主动防控”的转型。

当然, 在石油化工机电设备安装试运行故障处理中, 引入智能化技术并非重点, 还有很多值得完善的地方, 例如可以通过与虚拟现实技术融合的方式更直观的看到异常问题, 也可以通过人工智能模型训练的方式不断的提高故障异常处理的自动化和智能化水平, 为石化行业设备试运行的安全、高效推进提供更强支撑。

参考文献

- [1] 山鹏飞. 石油化工机电设备安装工程施工技术分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45 (15): 160-162.
- [2] 刘沛德. 石油化工机电设备试运行中的故障应对策略及要点 [J]. 造纸装备及材料, 2025, 54 (05): 46-48.
- [3] 席占君, 李成伟. 石油化工特种设备安装存在问题及改进措施研究 [J]. 中国机械, 2025, (14): 120-123.
- [4] 李鹏. 浅析石油化工电气设备运行管理问题及处理 [J]. 中国设备工程, 2023, (24): 53-55.
- [5] 杨行. 石油化工电气设备运行管理问题及处理策略 [J]. 化工管理, 2023, (05): 130-132.
- [6] 郭振春. 石油化工工程中机电安装工程的质量管理研究 [J]. 造纸装备及材料, 2023, 52 (01): 35-37.
- [7] 潘星五. 化工机电设备安装试运行异常现象分析 [J]. 化工设计通讯, 2019, 45 (11): 77+79