

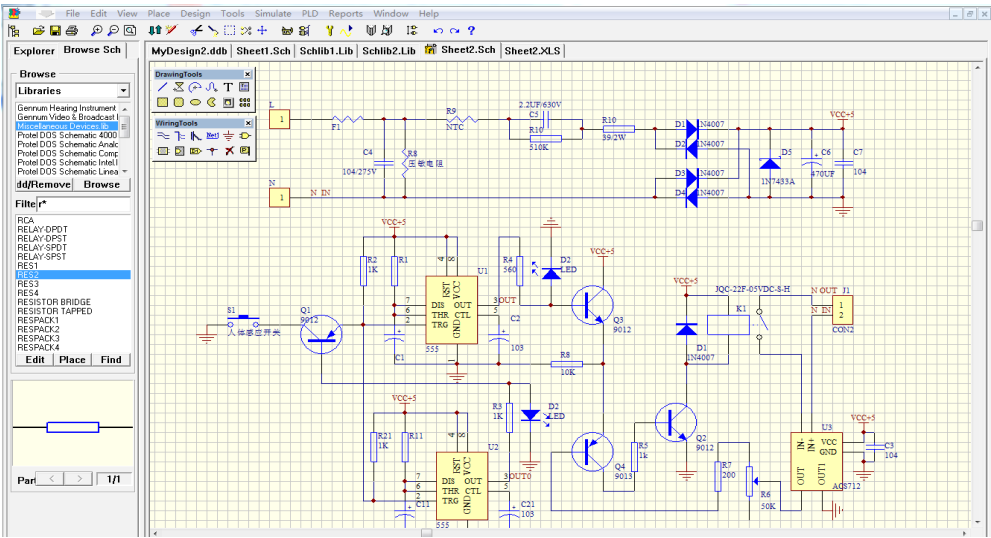


图 3 电路仿真图

表 1 电子元件用料及价格表

序号	元件名称	型号	数量 / 个	市场参考单价 / 元	总价 / 元
1	电阻	39/2W	1	0.06	0.06
2	电阻	1/4W	8	0.008	0.064
3	压、热电阻	471	2	0.1	0.2
4	电容	2.2UF/630V	1	0.2	0.2
5	电容	104/275V	1	0.2	0.2
6	电解电容	470UF/10V	1	0.05	0.05
7	无极性电容	103/104	4	0.01	0.04
8	整流二极管	1N4007	4	0.04	0.16
9	稳压二极管	1N7433A	1	0.18	0.18
10	三极管	9012/9013	4	0.03	0.12
11	继电器	JQC-22F-05VDC	1	1.4	1.4
12	人体感应开关	红外线	1	3.2	3.2
13	555	Ne555	2	0.1	0.2
14	电流传感器	ACS712	1	1.8	1.8
总计			7.874（元）		

根据系统测试和用料成本分析可知，本系统实现了智能化间歇性供电、定时断电和过载保护功能，相对于现有的同功能型号产品更为节能，低廉，部署方便简单。其设计理念已贯彻落实了党中央、国务院重大决策部署《“十四五”节能减排综合工作方案》，达到了预计的目标。

5 结语

本文采用 555 集成芯片单稳态延时工作模式，结合电流检测、继电器控制电路设计了一款适用与公共场所的智能化插座。通过实验和测试，系统实现了智能化间歇性供电、低功耗工作、和自动过载保护功能。它的优势在于成本低、无需联网、易于批量部署，解决了现有智能插座成本高、功耗高、部署和维护存在一定难度等缺点，具有良好的公共场

所场景使用前景。

参考文献

[1] 555定时器原厂手册(Signetics NE555)[S].

[2] 林群聪. 公共卫生管理中心项目智能化系统规划探析[J]. 智能建筑电气技术, 2024.

[3] 潘绍明, 尚会增, 王浩, 尹梦蝶. 基于STM32的智能插座的设计与实现[J]. 电子器件, 2024.

[4] 洪德欣, 许炜, 吴娟美. 基于大模型智能插座的存量空调智能化改造方案研究 [J]. 技术 · 创新, 2025.

[5] 郭正妍, 胡立夫, 史佳伟, 刘雨珊. 基于单片机的多功能插座设计[J]. 电子基础, 2023.

[6] 刘伟, 丁雷, 许婷, 卢传涛, 杨世江, 汤东东. 基于单片机微控制器的简易数字示波器设计[J]. 技术应用, 2010.

Prevention of Boiler Tube Explosion by TCD Online Hydrogen Content Monitoring

GuanJian YuFeng

Qinghuangdao Power Plant CO.,Ltd., Qinghuangdao, Hebei, 066003, China

Abstract

With the increasing installation of supercritical and ultra supercritical units in thermal power plants, the superheater, reheater tube clogging and tube explosion of large units, main steam valve jamming and scale problems of turbine components occur frequently. Because of this characteristic of over temperature and concomitant release of hydrogen during the production of scale, the advantages of accurate online hydrogen content detection of water vapor are highlighted. This paper analyzes the advantages and disadvantages of the mainstream technology, and deeply analyzes the application of thermal conductivity (TCD) analysis technology in monitoring thermal power plant boiler over temperature oxidation and corrosion.

Keywords

oxide; monitoring; TCD

热导法在线水汽含氢量监控预防锅炉超温腐蚀

关键 于枫

秦皇岛发电有限责任公司, 中国·河北 秦皇岛 066003

摘 要

随着火力发电厂超临界、超超临界机组装机增加,大机组过热器、再热器管堵塞爆管、主汽门卡涩和汽轮机部件的氧化皮问题频发。因超温及产生氧化皮的过程中伴随释放氢气的这一特性,准确的在线水汽含氢量检测技术优势凸显。本文分析了主流技术的优缺点,并对应用热导(TCD)分析技术在监控火电厂锅炉超温氧化、腐蚀的案例进行了深入剖析,探索了在线监测受热面高温氧化与受热面超温之间的关系,指出了机组深调峰背景下的受热面高温氧化监测与控制方向。

关键词

氧化皮; 监测; TCD

1 蒸汽系统高温腐蚀不可避免

国内的黄兴德、周新雅、陈戎、沈保中等先后锅炉高温受热面蒸汽氧化皮的生长与剥落特性进行了研究。黄兴德阐述了超超临界锅炉高温受热面蒸汽氧化皮的晶粒特征,重点分析了铁素体钢和奥氏体钢蒸汽氧化皮的结构特征及生成剥落规律,指出高温受热面蒸汽氧化皮的产生是不可避免的。陈戎、沈保中调研了国内19台蒸汽通流部件表面氧化情况,总结出锅炉有超温运行的机组一般5万小时开始出现氧化皮、基本不发生超温运行的机组运行10万小时以上也会受到氧化皮影响,超温严重的机组运行几千小时就可能高温氧化引起的爆管问题。

20世纪60至70年代,德国的科学家通过电子显微镜的观察,发电厂过热蒸汽管道金属表面的氧化膜并非由水汽

中的溶解氧和铁反应形成的,高温水汽氧化是金属腐蚀的一种特殊形式。在450℃~570℃,水蒸汽与铁反应生成 Fe_3O_4 并释放出氢气: $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$ (图1、图2)。在575℃以上,水蒸汽与纯铁反应除了生成 Fe_3O_4 以外,还会在 Fe_3O_4 层下生成 FeO ,由于 FeO 是不致密的,因此破坏整个氧化膜稳定性,氧化速率会大大增加。从上述反应式可看出,氧化膜的形成过程,并无溶解氧参加反应。氧化膜的生成遵循塔曼法则 $d^2 = Kt$ (d 为氧化皮厚度, K 为与温度相关的塔曼系数, t 为时间),氧化膜的生成与时间和温度有关,氧化速度与压力有关。华北电力大学樊泉桂对超临界锅炉中间点温度的优化控制进行了研究,指出合理控制中间点温度可以使烟气温度最高的区域中保持较低的金属管壁温度,以减轻金属的高温腐蚀、避免超温爆管。

【作者简介】关键(1968-),男,满族,中国辽宁辽阳人,本科,高级工程师,从事发电厂化学监督研究。

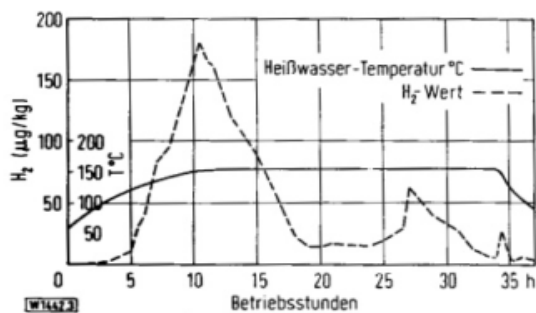


Abb. 3. Wasserstoffmessungen beim Schutzschichtbetrieb eines Kessels im Anschluß an die Beizung (5)

图 1 氧化膜形成时的氢逸出曲线

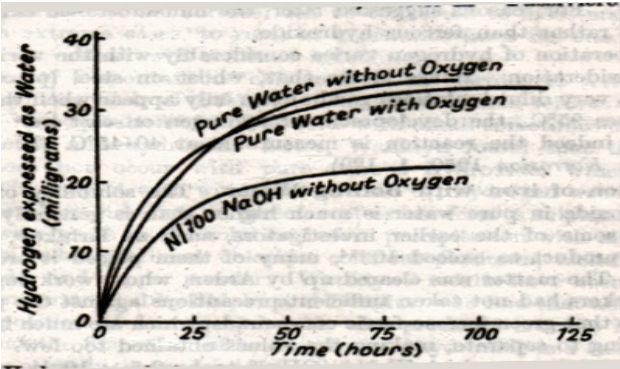


图 2 无氧及含氧纯水与铁反应析氢曲线

2 测量水汽含氢量的技术路线

目前，以在线准确蒸汽溶解氢技术实时监测受热面的高温氧化情况，将蒸汽测的氧化皮生成速度控制在最小是防止过热器和再热器发生爆管的关键技术。研究表明，蒸汽中含氢量变化可以用来衡量高温水蒸气与过热器、再热器内壁之间的反应速度（氧化皮产生速度）。当受热面出现局部过热时，水汽中的氢含量将会明显上升，水汽含氢量比壁温指标及汽温指标更灵敏。

水汽系统中的含氢量是一个循环 + 脱气的过程：从低温的给水系统产生的氢做为炉水（汽水分离器）氢的背景、炉水氢（含给水氢）做为蒸汽氢的背景、蒸汽中的氢进入凝

汽器、除氧器后，由于凝汽器负压的作用及除氧器的脱气作用，氢气被脱出。在上述过程中，整个水汽系统的含氢量一直重复着累加直至脱气回零的循环。这说明，检测到的氢含量代表当时高温腐蚀的程度。只要精准分析水汽的含氢量就能够及时判断高温腐蚀的程度，在产生高温氧化皮反应过程中，氢气是释放的因子。因此，只要能够准确监测水汽中的氢气含量，也就直接量化了金属在高温水汽中的氧化程度。

蒸汽溶解氢在线分析主要通过两种技术路径实现：一是电化学氢气检测器（EC）的测量技术，另一种是热导法（TCD）氢气测量技术。华电电力科学研究院李海洋等人研究发现电化学氢气检测器（EC）的测量准确性较差，在锅炉给水采用加氧处理时尤为突出（表 1），溶解氧质量浓度对溶解氢表的测量存在影响，其影响规律是溶解氢质量浓度越小，溶解氧质量浓度越大，溶解氢表测量相对误差越大；反之，溶解氢质量浓度越大，溶解氧质量浓度越小，溶解氢表测量相对误差越小。

3 TCD 法测量水汽含氢量提前预警蒸汽超温腐蚀

热导式气体分析仪是通过测量混合气体热导率的变化量来实现被测组分浓度测量的。混合气体的热导率具有叠加性，空气热导率为 5.83，氢气的热导率为 41.6，只要测得混合气的热导率，就可以得到氢气的浓度。此外，由于空气与氢气的热导率相差较大，以空气为背景气体，可以保证测量精度和现场测量的便捷性。

2025 年 5 月某电厂 4 号机组锅炉大修后机组 04:48 点火，点火后过热蒸汽、再热蒸汽、汽水分离器溶解氢数据及机组负荷波动曲线（图 1）如下：06:00，再热蒸汽溶解氢快速上升超上限（20µg/L），后持续回落；11:00，再热蒸汽、过热蒸汽溶解氢同时超上限（20µg/L）；13:45，汽水分离器溶解氢快速从 2.13µg/L 上升至 11µg/L 后回落，判断此时水冷壁发生爆管（见图 3 箭头所示）。事实上，由于氢气在系统的累加效应，06:00 至 08:00，过热、再热蒸汽氢含量随负荷快速上涨时，超温腐蚀已经开始加剧；在线蒸汽氢含量的曲线提前预测了爆管的发生。

表 1 不同浓度的溶解氧对溶解氢测量的影响

溶解氧质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	溶解氢测量值/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	溶解氢实际值/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	溶解氢测量差值/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	测量相对 误差/%
0	1.22	1.22	0.00	0.00
50	1.02	1.20	-0.18	-15.00
100	0.89	1.21	-0.32	-26.45
150	0.74	1.22	-0.48	-39.34
200	0.63	1.21	-0.58	-47.93