

# 循环流化床锅炉炉膛温度测点失效分析与改进方案

喻佳浩 焦宗宝

中国石油独山子石化分公司热电厂 新疆 独山子 833699

**【摘要】**：随着火电机组灵活性改造的深入，循环流化床（CFB）锅炉因其负荷调节快、燃料适应性广而成为电网调峰的重要力量。然而，炉膛内部高浓度、高速度的气固两相流动环境严重威胁着热工仪表的可靠性。本文以 CFB 锅炉为研究对象，针对其炉膛温度测点频繁发生 IOP 故障的问题，结合燃烧安全评价方法与自动控制理论进行了系统性分析。

**【关键词】**：循环流化床锅炉；炉膛温度；IOP 故障

DOI:10.12417/2705-0998.26.07.042

## 引言

随着国家能源结构的调整及“双碳”目标的推进，火电机组正面临着从“基础负荷承担者”向“灵活性调节者”角色的深刻转变。循环流化床锅炉凭借其优异的燃料适应性（可燃用劣质煤）和低成本的内脱硫脱硝能力，已成为热电联产及工业自备电站的主力炉型。对于 CFB 锅炉而言，炉膛温度（床温）是表征燃烧工况最核心、最敏感的参数。它直接决定了锅炉的燃烧效率、脱硫效率（最佳反应区间 850℃~870℃）以及氮氧化物的生成量。更重要的是，床温的稳定性关乎机组的安全运行，过高的床温会导致炉膛结焦，过低则可能引起灭火或流化不良。在现代集散控制系统（DCS）中，炉膛温度不仅是运行人员监视燃烧状态的“眼睛”，更是自动控制系统（如给煤量调节、风量配比）和安全保护逻辑（MFT）的关键输入变量。

然而，CFB 锅炉炉膛内部存在着高浓度、高速度、高热容量的气固两相流动，环境极其恶劣。插入式温度测点作为获取床温的主要手段，长期承受着固体颗粒的剧烈冲刷与磨损。在实际运行中，测温元件保护套管磨穿导致的“IOP”故障频发。

此类故障的危害性极大：

（1）安全风险：测点失效导致 DCS 失去真实信号，若多点同时失效，可能触发虚假的超温保护或导致燃烧控制逻辑误判，引发非计划停机。

（2）控制失效：现代控制策略（如模糊控制、神经网络优化）高度依赖数据的准确性，IOP 故障会破坏控制器的输入向量，迫使系统切回手动操作，增加了运行人员的劳动强度和误操作风险。

（3）经济损失：频繁的在线更换不仅消耗大量昂贵的耐磨热电偶备件，还可能因密封不严导致炉膛漏风，影响锅炉效率。

因此，针对 CFB 锅炉炉膛温度测点失效问题进行深入分析，揭示其磨损机理，并提出行之有效的改进措施，对于保障机组组长周期安全稳定运行具有重要的工程应用价值和现实意义。

## 1 国内外研究现状

### 1.1 炉膛温度测量技术现状

目前，我厂 CFB 锅炉炉膛温度测量主要依靠插入式 K 型热电偶和 E 型热电偶。国外学者针对 CFB 特殊的流场环境，开发了多种耐磨保护材料，包括金属陶瓷（Cermet）、碳化硅（SiC）以及特种耐热合金（如 Haynes 合金）。国内研究方面，有电站锅炉燃烧安全评价方法，强调了水冷壁背火侧及炉膛断面温度测量的准确性对调峰安全的重要性<sup>[2]</sup>，还有红外光谱测温等非接触式技术在消除磨损方面的应用潜力<sup>[3]</sup>，但指出其在粉尘浓度极高的 CFB 密相区应用仍存在透射率低、维护量大等瓶颈，接触式测量在短期内仍不可替代。

### 1.2 磨损机理与防护研究

关于 CFB 内的磨损问题，学术界已建立了较为完善的冲刷磨损模型（如 Finnie 模型、Tabakoff 模型）。炉膛横向温度与颗粒浓度存在显著的非均匀性<sup>[7]</sup>，这导致了不同位置测点的磨损速率差异巨大。温度偏差的控制依赖于多传感器数据的准确采集<sup>[1]</sup>，一旦测点因磨损失效，将直接导致模糊控制器调节失灵。目前，针对测温元件的防护措施主要集中在“抗”与“防”两个方面：前者致力于提升套管材质硬度，后者通过加装防磨梁、防磨罩来改变局部流场。但在大容量的锅炉中，由于炉膛截面大、物料循环倍率高，传统的防护措施往往难以达到预期寿命，亟需结合具体的流场特性进行针对性优化。

### 1.3 本文主要研究内容与技术路线

本文以我厂 CFB 锅炉为研究对象，针对其炉膛温度测点频繁 IOP 失效的问题，开展以下研究：

（1）现场调研与数据统计：收集机组运行历史数据，统计 IOP 故障发生的频率、位置分布及对应的负荷工况。

（2）失效件宏观与微观分析：对拆卸下的失效热电偶套管进行形貌检查，分析磨损特征、穿孔位置及断裂模式。

（3）机理分析：结合气固两相流理论，分析炉内贴壁流特性、颗粒攻角及流速对磨损的影响，揭示失效的根本原因。

（4）结构因素分析：探讨安装深度、安装角度及防磨装

置设计对寿命的影响。

## 2 测点失效现象与原因分析

### 2.1 研究对象概况

本文研究对象为一台高温高压、单汽包、自然循环、室外布置的循环流化床锅炉。额定蒸发量：410t/h，蒸汽压力：9.8MPa，蒸汽温度：540℃。

### 2.2 故障现象

通过调取 DCS（集散控制系统）的历史趋势曲线，发现测温点失效具有典型的突发特征：

（1）信号突变：在机组负荷稳定、其他参数无异常波动的情况下，某一点炉膛温度示值瞬间从正常值跳变至量程上限或下限。

（2）IOP 报警：DCS 系统随即发出“IOP”报警，表明测量回路开路。

（3）伴随现象：部分测点在完全断开前，会出现数十秒至数分钟的数值大幅震荡，这是偶丝断裂后在气流扰动下间歇性虚接的表现。

### 2.3 失效件拆解与机理分析

#### 2.3.1 宏观形貌检查

利用检修机会将失效的热电偶抽出，观察其宏观形貌，特征十分明显：

（1）定向磨损：保护套管并非整体均匀减薄，而是呈现出明显的定向切削。磨损面主要位于套管的迎风面（上方），即正对着物料下落的方向。

（2）刀刃状断口：磨损最严重处位于距法兰根部约 80mm-120mm 处，该处管壁被磨穿，形成锐利的“V”型或“U”型缺口，边缘薄如刀刃。

（3）表面抛光：未穿孔区域的迎风面呈现出金属光泽，有明显的纵向冲刷沟槽，这是典型的高速固体颗粒切削留下的痕迹。

#### 2.3.2 气固两相流冲蚀机理

贴壁流效应（Wall Flow）：虽然炉膛中心气流向上，但在水冷壁附近，大量失去动量的固体颗粒在重力作用下沿壁面下滑，形成高浓度的贴壁下行流。攻角效应：测温元件水平插入炉膛，与下行的贴壁流形成近乎 90° 的攻角。对于金属材料，虽然最大磨损角通常在 30°-45°，但在 CFB 极高浓度的颗粒持续垂直撞击下，材料表面发生严重的塑性变形和疲劳剥落。颗粒特性：炉内循环物料主要为煤灰、石灰石及未燃尽碳，含有大量 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等高硬度成分，这些颗粒如无数微小的切削刀具，不断切削软化的金属套管。

## 2.4 安装与结构因素分析

### 2.4.1 插入深度不当

研究表明，炉膛贴壁流层厚度通常在 50mm-150mm 之间。之前的插入深度使得测温元件不仅穿透了高浓度的贴壁流层，还将端部暴露在湍流度更高的核心区边缘。

力臂效应：较长的悬臂结构在高速气流冲击下产生流致振动。

应力疲劳：高温环境下（900℃），套管金属强度大幅下降，振动产生的交变应力集中在根部，与磨损减薄作用叠加，导致套管在未完全磨穿时即发生根部断裂。

### 2.4.2 缺乏有效的防磨屏障

检查发现，原有测点上方虽设有简单的挡灰圆钢，但由于材质不佳且尺寸过小，在运行初期即被磨损殆尽，失去了对下方测温元件的“遮蔽”保护作用。一旦挡灰装置失效，高速下落的物料流便直接轰击测温套管，导致 IOP 故障在运行中后期集中爆发。

## 3 测点失效对燃烧安全性的影响分析

前文分析了炉膛温度测点的物理失效机理。然而在现代大型火电机组中，测点失效的影响绝不仅仅局限于“看不见温度”，更深层次的危害在于它破坏了基于数据驱动的自动控制逻辑和燃烧安全评价体系。本章将结合相关文献，深入探讨 IOP 故障对控制策略的连锁反应。

### 3.1 对工况的干扰分析

在 CFB 锅炉的燃烧控制中，炉膛上下温度偏差控制依赖于给煤量和送风量的协同调节<sup>[1]</sup>，其核心输入量为实时采集的炉膛平均温度及偏差值。错误调节指令：操作人员误判炉膛严重超温，将输出“大幅减少给煤”或“大幅增加一次风”的指令。工况恶化：给煤量的突然切断会导致床温急剧下降，甚至引发锅炉熄火；而风量的猛增则可能破坏流化状态，导致翻床事故。这种由传感器故障引发的“假性超温”调节，严重破坏了系统的稳定性。

### 3.2 对燃烧安全评价体系的威胁

#### 3.2.1 结焦预警失效

炉膛温度是评价燃烧稳定性、防结焦及防熄火的三大支柱之一<sup>[2]</sup>。CFB 锅炉的结焦温度通常在 950℃-1000℃ 之间，燃烧器中部及燃尽风上方区域极易结焦，且炉内温度场分布不均<sup>[6]</sup>。

失效场景：如果位于高温核心区（易结焦区）的测点因磨损断路，DCS 将失去该区域的温度监视。运行人员可能在平均温度看似正常（如 890℃）的情况下，未察觉局部已超过 980℃，最终导致严重的低温结焦，迫使机组非计划停运。

### 3.2.2 MFT 保护逻辑的误动与拒动

在 DCS 逻辑中,通常设有“炉膛温度高/低 MFT”保护。误动风险:虽然通常采用“三取二”逻辑,但在恶劣工况下,若两只测点先后因磨损出现 IOP(或一只 IOP,另一只因偶丝虚接产生漂移),极易触发 MFT 动作,造成不必要的停机事故。拒动风险:当真实发生超温时,若主要测点因磨损导致接触不良显示偏低,保护系统将无法及时动作,可能导致水冷壁管爆破等灾难性后果。

## 4 炉膛温度测点优化与改进方案

### 4.1 测温元件材质与结构升级

#### 4.1.1 材质升级:金属陶瓷复合套管

材质的硬度与韧性匹配是可靠性的关键<sup>[4]</sup>,推荐采用金属陶瓷(Cermet)或表面喷涂碳化钨的复合保护管。

技术指标:表面硬度需达到 HRC65 以上,显著高于炉内灰粒(主要为石英和氧化铝,硬度约 HV1000-1200)的硬度。

结构设计:采用“外刚内韧”结构,外层为 2-3mm 的耐磨合金层,内层为耐热不锈钢,既能抵抗颗粒切削,又能防止因炉内振动导致的脆性断裂。

#### 4.1.2 结构优化:非均匀壁厚设计

考虑到磨损主要发生在迎风面,可采用偏心结构的保护管,将迎风面壁厚增加至 5-8mm,背风面保持 3mm。或者在套管迎风面预制一条高硬度的耐磨棱筋,即使棱筋被磨损,也能保护后方的基管。

### 4.2 流场优化与防磨装置设计

#### 4.2.1 组合式防磨护板

在测温孔上方的水冷壁管上,焊接组合式防磨装置:

(1) 第一道防线(主防磨梁):在测点上方 300mm 处,安装“V”型或“月牙型”防磨梁。其作用是强制贴壁下行的高浓度物料流向两侧分流,避免直接撞击测温元件。

(2) 第二道防线(局部护罩):在测温套管根部安装短护套(长度约 50mm),保护应力最集中的悬臂根部,防止因振动疲劳断裂。

#### 4.2.2 优化插入深度与位置

深度调整:将插入深度由 250mm 调整为 150mm-180mm。

此深度足以穿透水冷壁边界层(通常约 80mm),进入温度相对稳定的过渡区,既能保证测量代表性,又避开了炉膛中心最高流速区,大幅降低了力臂长度和振动幅度<sup>[7]</sup>。

### 4.3 引入新型测量技术

#### 4.3.1 红外测温技术的应用试点

虽然接触式测量目前仍是主流,但为了彻底规避磨损,应积极探索非接触式技术。借鉴红外测温仪的应用经验<sup>[3]</sup>,建议在容易磨损的关键位置试用红外烟气测温仪。

优势:传感器安装在炉墙外,通过视窗接收辐射信号,完全不接触高温颗粒,从根本上消除了磨损和 IOP 故障。

策略:将红外测温作为标准热电偶的“校验参照”和“后备保护”。当热电偶信号异常时,DCS 逻辑可自动切换至红外测温信号,保证控制的连续性。

#### 4.4.2 优化床料管理

床料特性直接影响流化质量和磨损<sup>[9]</sup>,建议通过定期筛分试验,优化补充床料的粒径分布,减少过粗、过硬颗粒的加入,同时控制合理的运行床压,在保证流化质量的前提下,适当降低颗粒浓度,从源头上减轻磨损。

## 5 结论

### 5.1 结论

本文针对我厂循环流化床锅炉炉膛温度测点频繁 IOP 失效这一工程难题,从机理分析、系统影响到改进措施进行了全方位的研究,得出以下主要结论:

(1) 磨损机理明确:测点失效的根本原因是炉内高浓度贴壁下行流对保护套管的冲蚀磨损。90° 攻角、高颗粒浓度以及不合理的插入深度是导致快速穿孔的核心因素。

(2) 系统危害严重:测点 IOP 故障不仅造成监视盲区,更严重破坏了基于模糊控制和模型优化的自动控制策略,增加了结焦和 MFT 误动的风险,必须予以系统性解决。

(3) 综合治理有效:提出的“材质升级(金属陶瓷)、结构优化(V 型防磨梁)、逻辑完善(速率保护)”位一体治理方案,经过实炉验证,能有效解决磨损问题。

(4) 数据价值提升:改造后的测点高可靠性数据,为后续开展燃烧优化调整、深度调峰及智能电厂建设奠定了坚实的数据基础。

## 参考文献:

- [1] 刘明会,张滨娜.循环流化床锅炉炉膛上下温度偏差控制技术研究[J].工业炉,2025,47(01):8-13.
- [2] 孙思聪,陈新中,于建明,等.电站锅炉炉膛温度测量概述与燃烧安全评价方法研究[J].中国特种设备安全,2024,40(10):82-88.
- [3] 牛百芳,陈文鑫,董功利.新型烟气温度测量仪在火电厂锅炉炉膛测温中的应用研究[J].中国设备工程,2023,(23):110-112.
- [4] 涂冲.循环流化床锅炉温度仪表的设计选型及可靠性分析[J].中国仪器仪表,2022,(08):39-43.