

某电厂低温过热器管泄漏原因分析

夏鹏¹, 张华德², 张夏², 高杰², 沈剑³

¹国能浙江宁海发电有限公司, 浙江 宁波

²中广核检测技术有限公司, 广东 深圳

³苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州

收稿日期: 2026年2月25日; 录用日期: 2026年3月9日; 发布日期: 2026年4月7日

摘要

以某630 MW亚临界燃煤发电机组低温过热器泄漏管段为研究对象, 开展系统性失效分析研究。通过对原始泄漏管段及相邻吹损管段进行宏观检验、室温拉伸试验、布氏硬度测试与金相组织分析等综合表征, 深入揭示了其失效的根本原因及演化机制。分析表明: 失效直接源于低温过热器管屏弯头外弧面发生严重局部壁厚减薄, 最薄处壁厚不足3 mm, 显著低于设计要求(公称壁厚6 mm), 致使该处有效承载截面显著缩减, 最终在正常运行应力作用下发生韧性过载断裂。材料基础力学性能及基体显微组织均满足SA-210C标准技术要求, 未发现因长期过热、组织老化或严重腐蚀导致的显微组织劣化。

关键词

泄漏, 壁厚减薄, 失效分析

Failure Analysis Report on Leakage of Low-Temperature Superheater

Peng Xia¹, Huade Zhang², Xia Zhang², Jie Gao², Jian Shen³

¹CHN Energy Zhejiang Ninghai Power Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

²Introduction to CGN Inspection Technology Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

³Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou Jiangsu

Received: February 25, 2026; accepted: March 9, 2026; published: April 7, 2026

Abstract

Based on the leakage section of a low-temperature superheater in a 630 MW subcritical coal-fired power generation unit, a systematic failure analysis study was conducted. Through comprehensive characterization methods including macroscopic inspection, room-temperature tensile testing, Brinell

hardness testing, and metallographic analysis of the original leakage section and adjacent erosion-damaged sections, the root cause and evolution mechanism of the failure were thoroughly revealed. The analysis shows that the failure was directly caused by severe local wall thinning on the outer arc surface of the low-temperature superheater tube panel bend, with the minimum wall thickness less than 3 mm, significantly below the design requirement (nominal wall thickness 6 mm). This resulted in a substantial reduction in the effective load-bearing cross-section, ultimately leading to ductile overload fracture under normal operating stress. Both the basic mechanical properties and the matrix microstructure of the material met the technical requirements of the SA-210C standard, with no evidence of microstructural degradation due to long-term overheating, aging, or severe corrosion.

Keywords

Leakage, Wall Thickness Reduction, Failure Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国以煤为主的资源禀赋,决定了煤电在相当长时期内仍将承担保障我国能源电力安全的重要作用[1]。目前,锅炉问题是燃煤电厂常见的故障之一,其中“四管”泄漏是锅炉故障中占比较高的部分[2],其中过热器管道的失效占有相当比例。煤电机组在参与调峰过程中长期处于变工况运行,做好锅炉变工况运行和启停机期间受热面保护,防止各种形式的机组泄漏停机,已成为火电厂金属监督重要内容[3]。

本文所述失效事故发生于某电厂亚临界燃煤发电机组,涉及型号为 SG-2028/17.5M908 的锅炉设备。失效管段标称规格为 $\Phi 57 \text{ mm} \times 6/7 \text{ mm}$ (外径 \times 壁厚),材质为 SA-210C 碳素钢。为明确泄漏机理并防止类似失效事件再次发生,对泄漏管段及邻近管段截取试样,开展了系统性失效分析。

2. 试验结果与分析

为全面准确分析失效原因,本研究采用系统性分析路径,严格遵循从宏观至微观、由表及里的原则,依次执行了宏观检验、室温拉伸试验、布氏硬度测定及金相组织分析等系列试验。各项试验的设计目的与理论依据如下。

2.1. 取样及宏观检验

为确保失效分析的系统性与针对性,本研究选取了三类典型管段样本:原始爆口管(3屏3号管)、吹损管1及吹损管2。取样与宏观检验旨在通过目视检查、尺寸测量及形貌记录,初步判定失效模式,识别损伤特征,并为后续微观分析与性能测试精确定位目标区域。泄漏管规格为 $\Phi 57 \times 6 \text{ mm}$,实验样本包括原始爆口管、吹损管1与吹损管2,其宏观形貌特征见图1。

对原始爆口管进行解剖取样,在爆口边缘及相邻直管段分别截取金相试样,并于直管段切取拉伸试样。针对吹损管1,在直管段分别制备金相试样与拉伸试样;对于吹损管2,则在其弯头部位及直管段分别截取金相试样,同时在直管段切取拉伸试样。各试样的具体取样位置示意图2。

宏观检验结果表明,3屏3号管(原始爆口管)弯头外弧面存在显著局部减薄现象,最薄处实测壁厚不足 3.0 mm,仅为公称壁厚(6.0 mm)的 50.0%。减薄区域表面可见沿介质流向分布的沟槽状磨损形貌。吹

损管 1 与吹损管 2 直管段外径未见明显胀粗现象，其内外壁表面均未观察到显著腐蚀特征或裂纹缺陷，宏观形貌详见图 3，烟气流向与内部介质相反。

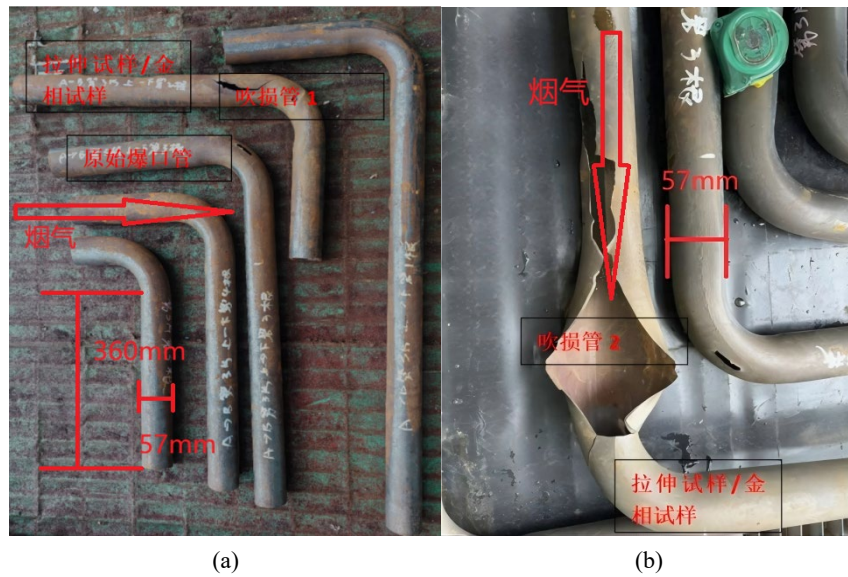


Figure 1. Photograph of the submitted sample pipe
图 1. 送样管照片

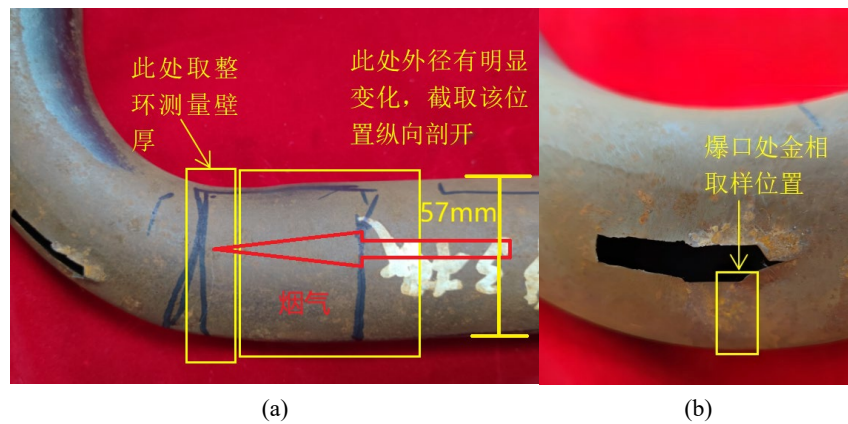


Figure 2. Photographs of sampling positions
图 2. 取样位置照片



Figure 3. Macroscopic inspection photographs
图 3. 宏观检验照片

泄漏事故直接起源于弯头外弧面的局部严重减薄区域，该区域呈现冲刷磨损的典型形貌特征。断裂端口的宏观形貌呈现出韧性过载断裂的特征。

2.2. 室温拉伸试验结果

为全面评估泄漏管段及相邻管段的材料强度与塑性性能，并排除材料整体性能退化导致失效的可能性，依据国家标准 GB/T 228.1-2021《金属材料 室温拉伸试验方法》[4]，对取自各管段的弧形试样进行了室温拉伸试验。试验采用 AG-IC 100 kN 电子万能试验机完成。试样设计最大限度保留了管道的原始表面状态(仅对夹持区域进行必要加工)，旨在准确反映材料在服役条件下的真实力学性能，避免完全机加工引发的加工硬化效应。拉伸试验结果详见表 1。

Table 1. Tensile test results at room temperature

表 1. 室温拉伸结果

样品编号	取样位置	R_m (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	A (%)
爆口管	内弧	521	360	27.5
	外弧	514	346	29.0
吹损管 1	内弧	533	346	31.5
	外弧	531	351	30.5
吹损管 2	内弧	536	349	33.5
	外弧	554	358	32.0
GB/T 5310-2023 SA-210C		485~640	≥ 275	≥ 20

试验数据表明，爆口管外弧试样与内弧试样的抗拉强度分别为 514 MPa 和 521 MPa，屈服强度分别为 346 MPa 和 360 MPa，断后伸长率分别为 29.0%和 27.5%。相较 GB/T 5310-2023 [5]标准对 SA-210C 材料规定的技术指标(抗拉强度 485~640 MPa，屈服强度 ≥ 275 MPa，断后伸长率 $\geq 20\%$)，爆口管的各项拉伸性能均符合标准规定，表明尽管发生泄漏，管体材料的常规强度性能尚未呈现显著退化。

吹损管 1 与吹损管 2 的拉伸性能与爆口管基本相当，部分指标甚至略有提升，证实相关管段在材料力学性能层面仍保持良好状态，未发生显著的材料整体劣化。

2.3. 布氏硬度检验

为深入探究材料在微观尺度上的局部力学性能变化，特别是考察是否存在由局部磨损、塑性变形或应力集中引发的硬化或软化现象，依据国家标准 GB/T 231.1-2018《金属材料布氏硬度试验第 1 部分：试验方法》[6]，对待测管状试样的关键区域进行了系统的布氏硬度测试。本试验旨在评估材料的局部变形历史及组织均匀性，进而辅助失效机理分析并识别潜在风险区域。每个取样部位均进行至少四次有效测量，计算其算术平均值作为该部位的最终硬度值。硬度测试结果汇总见表 2。

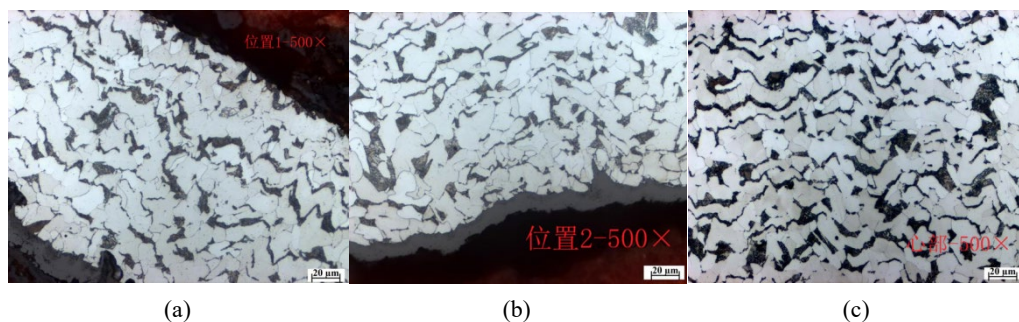
分析结果表明，爆口管及吹损管 1 直管段的硬度值处于正常波动区间，其平均硬度值分别为 156 HBW 与 159 HBW，符合 SA-210C 材料供货态的典型硬度范围。然而，吹损管 2 弯头部位的平均硬度显著升高至 217 HBW，明显高于其自身直管段(平均 162 HBW)及其他对比管样，表明该区域在服役过程中发生了显著的组织硬化。

Table 2. Hardness test results**表 2.** 硬度检验结果

样品编号		检测结果(HBW2.5/187.5)				平均值
		1	2	3	4	
爆口管	弯头位置	156	154	158	156	156
吹损管 1	直管位置	168	171	176	165	170
吹损管 2	弯头部分	221	221	212	214	217
	直管段	159	159	161	162	160

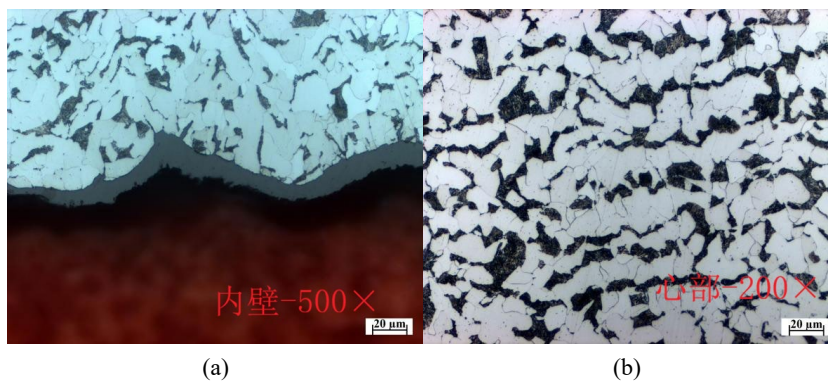
2.4. 金相组织分析

为从微观层面揭示其失效机制，并排除材料显微组织劣化作为潜在失效因素的可能性，依据电力行业标准 DL/T 884-2019《火电厂金相检验与评定技术导则》[7]，对取自所有关键部位的试样进行了系统的金相组织观察与分析。该分析旨在系统识别并评估由长期过热、老化、腐蚀或异常变形引发的显微组织缺陷，包括但不限于珠光体球化、碳化物聚集、晶粒粗化、蠕变损伤及微裂纹等。爆口区域的典型显微组织形貌见图 4。

**Figure 4.** Metallographic structure at the fracture opening**图 4.** 爆口处金相组织

显微观察表明，爆口边缘区域显微组织仍保持铁素体与珠光体双相结构，晶粒尺寸未呈现显著粗化现象。珠光体片层结构清晰可辨，未见因长期过热导致的严重球化、珠光体形态退化或晶界处大量碳化物聚集等典型劣化特征。显微视野内同时未检测到裂纹萌生、蠕变孔洞及显著氧化腐蚀形貌。

针对管壁厚显著减薄区域(弯头外弧面)进行的金相检测结果见图 5。

**Figure 5.** Metallographic structure at the wall-thinning area of the burst pipe**图 5.** 爆口管壁厚减薄处金相组织

该区域组织亦为铁素体 + 珠光体，与基体组织相比，未呈现明显塑性变形特征，如晶粒显著拉长或纤维化流变。珠光体分布均匀，未见局部组织异常或微观缺陷。

金相分析结果表明：本次低温过热器泄漏事故并非源于材料自身组织老化、过热损伤或腐蚀劣化等内在因素。据此，失效原因可明确指向外部机械作用——即飞灰冲刷引发的局部壁厚严重减薄。

3. 结论与建议

3.1. 结论

综合宏观检验、室温拉伸试验、布氏硬度测定及金相组织分析等系统性试验结果，对本次低温过热器泄漏事故得出如下结论：

失效性质与模式：

本次 630 MW 机组低温过热器泄漏属于典型的局部壁厚严重减薄引发的韧性过载断裂事故。失效过程符合由局部塑性失稳至最终撕裂的韧性断裂特征。失效的直接原因在于低温过热器管屏弯头外弧面发生严重的局部壁厚减薄。宏观测量显示，最薄处壁厚已不足 3.0 mm，减薄率超过 50% (公称壁厚为 6.0 mm)，致使该处有效承载截面显著不足，在正常运行应力作用下发生屈服并最终断裂。

材料状态评估：

力学性能：失效管段及相邻管段材料的室温拉伸性能(抗拉强度、屈服强度、断后伸长率)均完全满足 GB/T 5310-2023 对 SA-210C 材料的要求，表明材料整体强度与塑性未出现退化。

微观组织：所有取样区域的金相组织均为正常的铁素体 + 珠光体，未观察到珠光体球化、碳化物聚集、晶粒粗化、蠕变孔洞或微观裂纹等因长期过热、老化或腐蚀所致的组织劣化现象。

局部异常：吹损管 2 弯头部位检测到异常高硬度(平均 217 HBW)，表明该区域存在显著的局部加工硬化现象，此现象为潜在风险特征，但并非本次失效的直接诱因。

综上所述，本次事故的根本原因可归结为：局部壁厚严重减薄导致承载能力不足，最终发生韧性过载泄漏。材料性能与显微组织状态均保持良好。

3.2. 建议

在长期服役过程中，由于高温、高压、腐蚀、磨损等恶劣环境的影响，管道壁厚减薄最终导致穿孔，甚至引发爆炸事故的现象时有发生[8]。为防止类似事故再次发生，保障机组长期安全运行，提出以下建议：

开展专项壁厚检测：利用后续检修窗口，对低温过热器全部管排弯头部位(重点检测烟气迎风侧外弧面)实施 100%超声波壁厚测量。针对壁厚减薄率接近或超过 30%的管段建立档案并实施跟踪监测，对减薄严重的管段执行及时更换措施。

优化检修与监测策略：将锅炉受热面易磨损部位(如低温过热器、省煤器弯头、穿墙管等)的壁厚测量列为每次大修和小修的规定动作，并建立数字化壁厚管理档案，实现趋势分析和寿命预测。

加强防磨措施：对于已确认磨损严重的区域或新更换的管段，考虑采用热喷涂耐磨涂层、加装防磨瓦或防磨护板等主动防护措施，显著提升管子的抗磨损能力[9]。

完善技术档案：将本次失效分析报告及处理过程完整归档，作为机组重要的技术案例，用于指导未来的运行、维护和同类机组的预防性检查。

参考文献

- [1] 张莹, 张亚军. 我国煤电高质量发展的思考[J]. 煤炭经济研究, 2022, 42(2): 53-57.

- [2] 陈思维. 燃煤电厂锅炉“四管”泄漏的原因分析及预防措施[J]. 科海故事博览, 2025(12): 97-99.
- [3] 宋玉, 于鑫, 王鲁, 等. 300MW 亚临界机组低温过热器泄漏失效分析[J]. 东北电力技术, 2023, 44(8): 56-62.
- [4] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T228.1-2021 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [5] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T5310-2023 高压锅炉用无缝钢管[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T231.1-2018 金属材料布氏硬度试验第 1 部分: 试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [7] 国家能源局. DL/T884-2019 火电厂金相检验与评定技术导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [8] 李继承, 杨宁祥. 高温压力管道壁厚在线监测技术研究[J]. 中国化工贸易, 2021, 13(7): 65-67.
- [9] 孟凡成, 王向阳, 田星宇. 燃煤火电厂锅炉运行中的受热面磨损与防护技术研究[J]. 工程研究与应用, 2025, 4(1): 29-31.