Q215风机盘管管道渗漏原因分析

李景瑞[1, 2]，史伟[1, 2]，尹华[1, 2]，张晓程[1, 2]，张文琴[1, 2]，刘海金[1, 2]

1.兰州兰石检测技术有限公司　甘肃兰州　730314
2.甘肃省机械装备材料表征与安全评价工程实验室　甘肃兰州　730314

摘要：某热水锅炉风机盘管管道在使用约3年后相继出现多处漏水，该批风机盘管管道均采用Q215热镀锌钢管。为查明原因，对现场切取的部分钢管分别进行宏观观察、化学成分分析、内壁附着物检测、显微组织检验、力学性能试验、开孔处形貌分析及能谱分析等。结果表明：钢管的化学成分、力学性能均符合标准要求，循环水中氧含量超标，管道内壁存在较多的附着物，管道因垢下腐蚀而失效。

关键词：显微组织；垢下腐蚀；失效

Q215 fan coil pipeline leakage cause analysis

LI Jingrui[1, 2], SHI Wei[1, 2], YIN Hua[1, 2], ZHANG Xiaocheng[1, 2], ZHANG Wenqin[1, 2], LIU Haijin[1, 2]

1. Lanzhou Lanshi Testing Technology Co., Ltd., Lanzhou 730314, Gansu, China
2. Gansu Engineering Research Center of Mechanical Equipment Material Standard and Safety Evaluation, Lanzhou 730314, Gansu, China

Abstract: Many leaks successively occurred in the fan coil pipes of a hot water boiler after about three years of use. The fan coil pipes in this batch all adopt Q215 hot-dip galvanized steel pipes. In order to find out the cause, some of the steel pipes cut on site were respectively subjected to macroscopic observation, chemical composition analysis, detection of the attachments on the inner wall, microscopic structure inspection, mechanical property test, morphology analysis of the opening part, energy spectrum analysis, etc. The results show that the chemical composition and mechanical properties of the steel pipes meet the standard requirements, the oxygen content in the circulating water exceeds the standard, there are many attachments on the inner wall of the pipes, and the pipes fail due to under-deposit corrosion.

Keywords: microstructure; under-deposit corrosion; failure

1　序言

某物业公司使用的全自动燃油（气）热水锅炉在供暖约3年后风机盘管管道相继出现多处漏水，漏水部位均位于盘管管道下方。该批风机盘管管道均采用Q215热镀锌钢管，停止供暖期间管道内仍有余水沉积，为查明风机盘管管道渗漏的原因，现场切取部分钢管并制成试样，然后对试样进行无损检测、宏观观察、管壁附着物检测、化学成分分析、金相检验、力学性能试验、开孔处扫描电镜观察、附着物能谱分析及管道内循环水水质分析等。

第一作者：李景瑞，硕士，工程师，主要从事金属材料理化检验和机械装备失效分析工作，E-mail：lijingrui1988@163.com。

2 理化检验

2.1 宏观观察及无损检测

现场切取的钢管依次标记为1#～4#（见图1）。

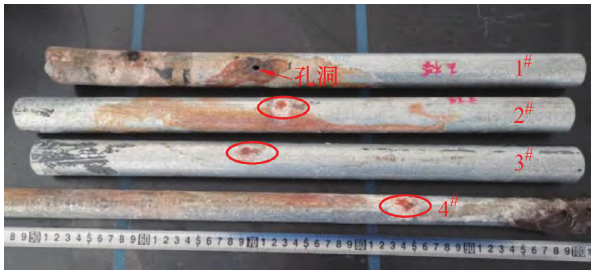
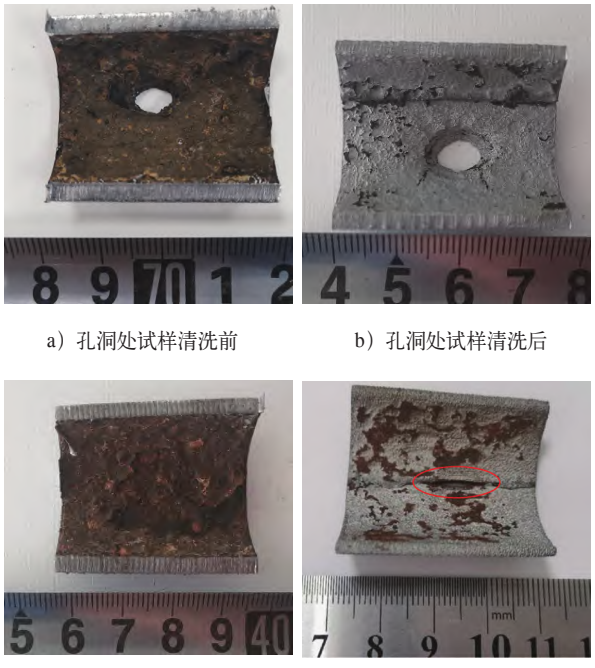


图1 现场切取的部分钢管

经宏观观察，发现1#钢管存在一处明显的孔洞，2#～4#钢管表面存在锈斑，用砂纸打磨锈斑之后进行渗透检测，发现该处存有“砂眼”或裂纹缺陷，如图1所示。剖开1#钢管后进行观察，发现内壁存有一层厚而硬的附着物（见图2a），将附着物清洗之后发现孔洞沿壁厚方向由内向外逐渐变小，最大直径约为12.0mm，最小直径约为8.0mm（见图2b）。剖开2#钢管后发现内壁同样存有一层厚而硬的附着物（见图2c），清洗后发现一处大小约为1.5mm×8.0mm的缝隙（见图2d）。依据GB/T 226—2015《钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法》对1#钢管的横截面进行检验，未发现折叠、裂纹等缺陷（见图3）。



a）孔洞处试样清洗前　b）孔洞处试样清洗后

c）锈斑处试样清洗前　d）锈斑处试样清洗后

图2 风机盘管管道内表面形貌

图3 1#钢管横截面形貌

2.2 化学成分分析

依据GB/T 20125—2006《低合金钢 多元素含量的测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法》对风机盘管管道钢管进行化学成分分析，结果见表1。从表1可知，化学成分符合GB/T 700—2006《碳素结构钢》对Q215的要求。

表1 Q215钢管化学成分分析结果（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	P	S
实测值	0.08	0.17	0.41	0.029	0.023
标准值	≤0.15	≤0.35	≤1.20	≤0.045	≤0.050（Q215A）
					≤0.045（Q215B）

2.3 管道内壁附着物检测

在管道内壁发现存有厚且硬的附着物，依据DL/T 1151.22—2012《火力发电厂垢和腐蚀产物分析方法》对管道内壁附着物进行分析，结果见表2。从表2可看出，主要成分为Fe_2O_3和ZnO。

表2 附着物化学成分（质量分数） （%）

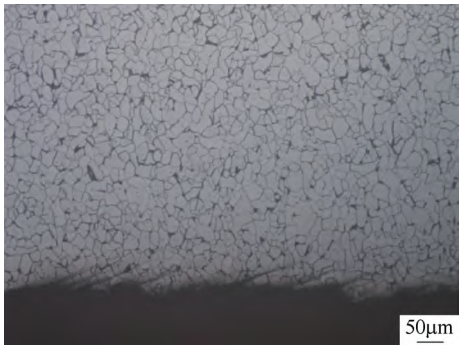
SO_3	P_2O_5	SiO_2	Fe_2O_3	ZnO	MnO	CaO	CuO	Cl
0.56	0.01	0.66	84.19	13.60	0.27	0.25	0.21	0.04

2.4 金相检测

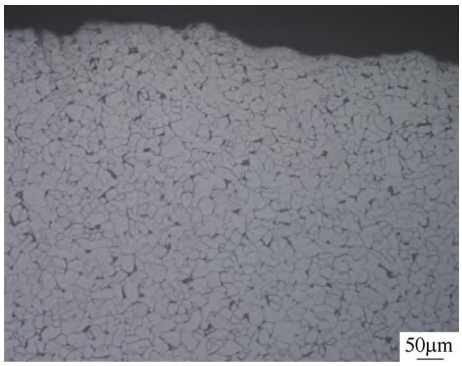
（1）夹杂物检测 依据GB/T 10561—2023《钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法》对试样纵截面进行非金属夹杂物的检测，结果级别均为：A1.0、B0.0、C0.0、D0.5、Ds0.0（见图4）。

图4　非金属夹杂物

（2）显微组织及晶粒度检验　依据GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》对风机盘管管道横截面进行金相组织检验，如图5所示。从图5可看出，显微组织为铁素体＋少量珠光体。依据GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定法》对风机盘管管道横截面晶粒度进行检测，结果为9.0级，未发现晶粒粗大、魏氏组织、脱碳等现象存在。



a）风机盘管管道内壁



b）风机盘管管道外壁

图5　显微组织

2.5　力学性能试验

依据GB/T 4340.1—2024《金属维氏硬度试验 第一部分：试验方法》在风机盘管管道横截面上进行维氏硬度检测，由于风机盘管管道尺寸限制无法进行拉伸试验，参照GB/T 33362—2016《金属材料硬度值的换算》对维氏硬度进行抗拉强度换算，结果见表3。

表3　维氏硬度检测结果及抗拉强度

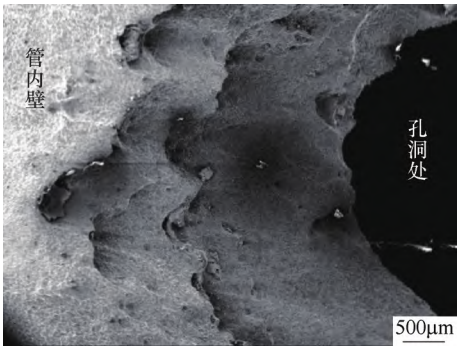
项目	硬度/HV10			抗拉强度（转换值）/MPa		
实测值	144	140	151	465	450	480
标准值（GB/T 3091—2015）	—			⩾335		

2.6　扫描电镜观察及能谱分析

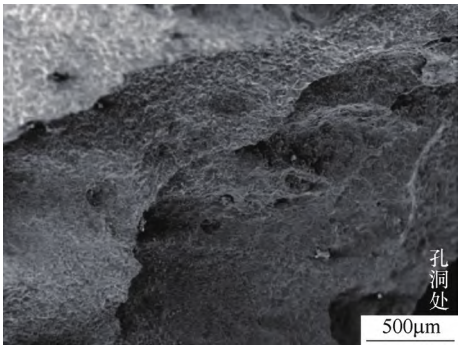
通过扫描电子显微镜（SEM）对1#试样孔洞处进行观察，孔洞沿壁厚方向从内向外逐渐减小（见图6）。对风机盘管管道内附着物进行能谱分析，结果表明主要为铁和锌的氧化物，此外还存在S和Cl（见图7）。

2.7　水质分析

对风机盘管管道内循环水进行水质分析，结果见表4。参考GB/T 1576—2018《工业锅炉水质》对锅内水处理自然循环锅炉的水质要求。

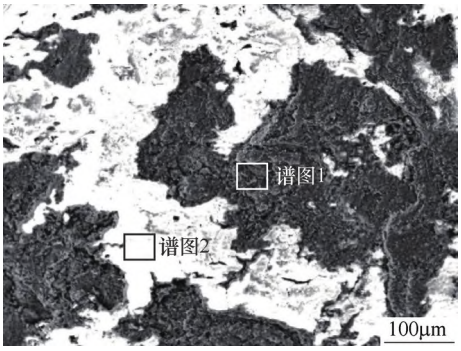


a）孔洞边缘（23×）

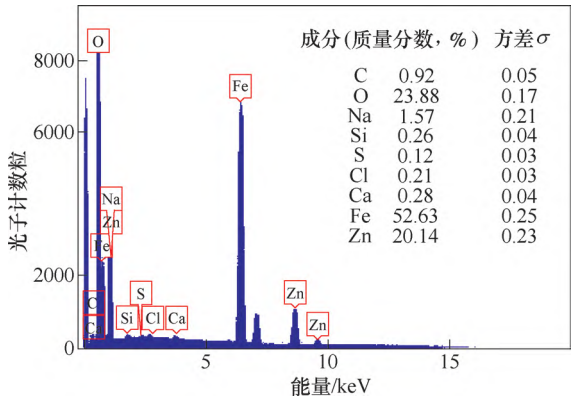


b）孔洞边缘（50×）

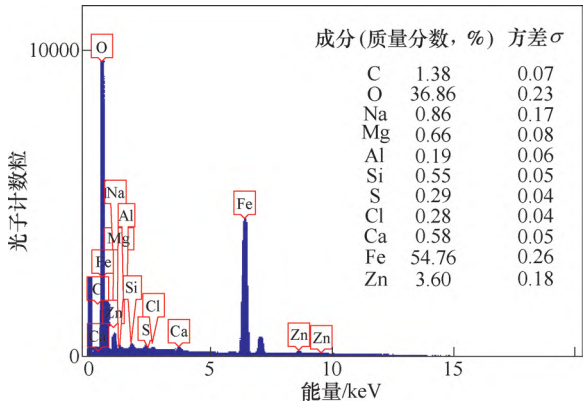
图6　SEM形貌



a）管道内壁附着物SEM形貌



b）谱图1EDS结果



c）谱图2EDS结果

图7 附着物SEM形貌及EDS结果

表4 风机盘管管道内循环水水质分析结果

项目	pH（25℃）	酚酞碱度/（mmol/L）	全碱度/（mmol/L）	总硬度/（mmol/L）
实测值	10.62	0.70	2.10	0.03
标准值	7.0～11.0	—	—	≤0.6

项目	铁/（mg/L）	磷酸根/（mg/L）	溶解氧/（mg/L）	氯化物/（mg/L）
实测值	2.50	12.00	15.60	2.50
标准值	≤0.30	—	≤0.10	—

3 分析与讨论

宏观观察结果表明，除肉眼可见的孔洞缺陷外，其余钢管锈斑处均存在裂纹或“砂眼”缺陷。孔洞直径由内向外逐渐变小，直径为8～12mm，说明管道发生了由内向外的腐蚀，穿透形成“砂眼”直至进一步腐蚀形成孔洞。管道具有局部腐蚀形貌，未发现均匀腐蚀现象，未发现折叠、裂纹等缺陷。化学成分分析结果表明，风机盘管材质符合GB/T 700—2006《碳素结构钢》对Q215钢的化学成分要求。非金属夹杂物检测结果显示，无引起风机盘管管道腐蚀失效的夹杂物级别。金相组织、晶粒度检测结果均符合GB/T 3091—2015《低压流体输送用焊接钢管》的要求，内外壁未发现脱碳、晶粒粗大等异常现象。风机盘管管道内壁附着的水中污物在管道内结垢，垢物颜色呈红褐色，其量多且厚，化学成分分析及能谱分析结果表明，其主要为Fe_2O_3和ZnO。垢物的存在使介质在金属表面的流动和电介质的扩散受到限制，造成被阻塞的空腔内介质成分与整体介质存在很大差别，形成阻塞电池腐蚀[1]。同时由于垢的阻挡，使得水中的高浓度溶解氧扩散到垢下的速度减慢，使垢下的氧浓度与周围的氧浓度形成浓度差[2, 3]。

垢下封闭金属作为阳极不断溶解，阴极主要是氧的还原[4, 5]，其反应式为

阳极反应：$Fe \rightarrow Fe^{2}+2e$

阴极反应：$O_2+2H_2O+4e \rightarrow 4OH^-$

阴极、阳极综合反应：$Fe^{2+}+2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2\downarrow \rightarrow Fe_2O_3 \cdot H_2O$（腐蚀产物）

氧的存在使腐蚀速率加快[1]，重力作用使管道底部的局部腐蚀发展成小孔的速度远高于其他部位，导致风机盘管管道底部率先穿孔。能谱分析结果显示垢物中还存在S和Cl，对局部腐蚀的发展起到促进作用[6-8]。

综上所述，由于风机盘管管道内污物沉积结垢，致使管道发生垢下腐蚀，水中的高浓度氧加快了腐蚀速率，在重力作用下管道底部率先穿孔。

4 结束语

综合分析，该风机盘管管道失效的原因为管道内污物沉积使管道结垢，管道因垢下腐蚀而穿孔失效。建议完善水处理工艺，加强给水品质的监督并

（下转第153页）

国铝加工产业年度大会”论文集[C]. 北京：中国有色金属加工工业协会，2018.
[13] 叶升平. 2A14铝合金轮毂等温锻造研究[D]. 长沙：中南大学，2015.
[14] 刘鹏辉，郭鸿镇，王涛，等. 等温锻造温度对7050铝合金组织与性能的影响[J]. 热加工工艺，2009（1）：107-109.
[15] 于洋. 某飞机轮毂挤压成形及热处理工艺研究[D]. 太原：中北大学，2024.
[16] 张艳秋，徐福昌，单德彬. 变形程度对复杂铝合金锻件组织性能的影响[J]. 材料科学与工艺，2009，17（6）：806-809.
[17] 孙梦黎，李姚君，丁佐军，等. 2A14铝合金的动态再结晶模型及热变形组织演变[J]. 金属热处理，2018，43（4）：19-23.
[18] 刘文胜，郭伦文，马运柱，等. 2A14铝合金热变形的显微组织及流变行为[J]. 中国有色金属学报，2013（8）：2091-2097.
[19] 刘文胜，刘东亮，马运柱，等. 2XXX系铝合金的热处理工艺研究进展[J]. 轻合金加工技术， 2013（6）：12-20.
[20] 罗苏，吴锡坤. 铝型材加工实用技术手册[M]. 长沙：中南大学出版社，2006.
[21] 李慧中，张新明，陈明安，等. 热处理制度对2519铝合金晶间腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报，2005， 26（1）：20-23.
[22] 邓文卫，易幼平，湛利华，等. 大型铝合金航空模锻件局部加载成形工艺研究[J]. 热加工工艺，2011，40（11）：29-31，34.
[23] 张李骊. 钛合金盘件等温成形工艺优化与过程控制[D]. 西安：西北工业大学，2004.
[24] 胡建军，许洪斌，金艳. 塑性成形数值仿真精度的提高途径[J]. 锻压技术，2009，34（2）：149-152.
[25] 戴亮，姚泽坤，梁新民，等. 不同截面形状结构件等温成形规律的物理模拟[J]. 锻压技术，2004，29（6）：23-26.
[26] 于秋华，刘淑梅，刘雅辉. 基于DEFORM3D的曲轴热锻工艺优化[J]. 热加工工艺，2015，44（11）：132-134，137.

（收稿日期：20241218）

（上接第145页）

定期做好管道排污及清洗工作，避免此类事故的再次发生。

参考文献：

[1] 石仲谋，陈建华，刘保平，等. 石油液化气钢瓶腐蚀穿孔失效分析[J]. 石油化工设备，1999（5）：19-21.
[2] 胡文涛. 等温变换炉换热管泄漏原因分析[J]. 氮肥与合成气，2022，50（9）：48-51.
[3] 吉楠，李长亮，宋文文，等. 某注气井3Cr钢油管腐蚀原因[J]. 机械工程材料，2022，46（12）：85-90，97
[4] 白龙. 锅炉氧腐蚀过程及其控制措施[J]. 全面腐蚀控制，2019，33（5）：87-91.
[5] 张仁珊，刘宇，任耀剑，等. 火电厂锅炉20G水冷壁管失效分析[J]. 热加工工艺，2024，53（2）：78-81.
[6] 张琴. 某输气管道内腐蚀原因分析与研究[J]. 石油和化工设备，2024，27（4）：215-217.
[7] 王艳飞. L360钢在H_2S-CO_2-Cl-体系中元素硫沉积下的点蚀机理[D]. 西安：西安石油大学，2021.
[8] 唐婷. P110钢在含S和CO_2环境中的腐蚀行为研究[D]. 西安：西安工业大学，2017.

（收稿日期：20241224）