

低温不锈钢换热器管板开裂失效分析

■ 魏志刚, 魏耀东, 于明明, 宋艳会, 张友冬, 张晓琴

摘要: 对出现开裂后的管板进行了现场金相分析与试验室检测。结果表明, 管板开裂为脆性断裂和正断断裂, 裂纹从管箱一侧的管板表面首先形成, 管板表面氧化层上的显微裂纹是裂纹形成的源点, 低温是管板变脆的原因, 管程中的介质使管板表面产生氧化层以及温度差所产生的热应变循环作用是裂纹产生及扩展的原因。并对此类换热器的制造与使用提出了建议。

关键词: 裂纹; 断口检验; 应力腐蚀; 失效分析

某化工厂压力罐区冷火炬液化气在使用一年左右发现管板产生了开裂渗漏。经检查发现, 裂纹纵横交错布满整个管板表

面。内部液体不断通过裂纹向外渗漏, 呈穿透型裂纹。管板的材质为06Cr19Ni10。管程介质为乙烯, 设计压力为1.0MPa, 最高工

作压力为0.02MPa, 设计温度为 $-120^{\circ}\text{C}/260^{\circ}\text{C}$; 壳程介质为水蒸气, 设计压力为0.7MPa, 最高工作压力为0.4MPa, 设计温度为 260°C 。

的。从夹杂物的能谱试验分析, 可以得出夹杂物的主要成分为硫化物。内部裂纹是锚板在淬火应力的作用下, 由硫化物的存在而产生。

4. 结语

通过试验分析结果, 可以得到锚板钢坯的低倍组织为1级中心疏松。样品内部产生了不连续的裂纹, 裂纹附近有较多的夹杂物, 从能谱试验分析结果表明夹杂物的成分主要由硫化物组成。通过分析可以得到内部裂纹是在淬火应力作用下, 由硫化物夹杂引起的。锚板为“蜂窝煤”形状产品, 产品在淬火过程中锥孔中蒸气膜阶段的时间会相对较长, 热量不容易瞬间散发, 热处理质

量一致性控制较难。因此, 严格控制原材料中硫元素含量及热处理工艺, 确保产品质量, 是保证高强度预应力锚板使用性能的必要手段。

参考文献

- [1] 周玉, 武高辉. 材料分析测试技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
- [2] 吴承建, 陈国良, 强文江. 金属材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [3] 刘永铨. 钢的热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986.

作者简介: 吴建, 安徽金星预应力工程技术有限公司。

MW 20160726

1. 现场初步检验与分析

(1) 开裂管板的宏观裂纹形貌 通过宏观检验可以看到, 管板开裂为脆性开裂, 裂纹周围没有明显塑性变形。管板表面有多条裂纹纵横交错, 呈龟裂状, 属于多源裂纹。裂纹穿透管板, 为穿透裂纹。从裂纹的位置看, 裂纹不仅在管板的表面, 在远离换热管处及管板的边缘也有裂纹。图1是开裂管板的宏观形貌, 图2是换热管周围的裂纹,

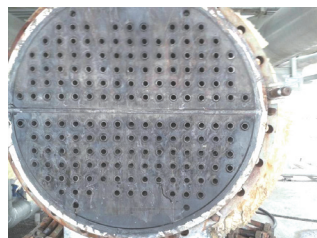


图1 开裂管板的宏观形貌

图3是远离换热管处的裂纹，图4是管板边缘处的裂纹。

(2) 开裂管板的现场金相检验 通过金相检验可以看到，裂纹扩展是穿过奥氏体晶粒的，扩展过程中有枝杈，并向奥氏体晶界方向伸展，开裂的裂纹中有因为撕裂而剥落的颗粒，在裂纹附近有与裂纹大致平行的小裂纹，在裂纹尖端的前方有新的裂纹产生，如图5~图7所示。

2. 实验室检验及分析

(1) 裂纹的形貌 通过扫描电镜发现管板表面一层氧化层，裂纹呈分叉状，有一定的宽度，裂纹附近没有塑性变形，是脆性开裂，见图8。将管板表面的氧化层（圆圈内的部位）分别放大到200倍、500倍和1000倍进行观察，发现表面的氧化层有大量的显微裂纹，呈龟裂状，有的起层，有的剥落，此龟裂裂纹是热疲劳产生的，是管板产生开裂的源点，如图9~图11所示。

透过对裂纹尖端的微观检查，发现裂纹尖端的形貌非常细小，带有枝杈，见图12。通过裂纹扩展的金相显微镜观察，发现裂纹形成于管板表面，垂直向管板内部进行扩展，裂纹穿过奥氏体的晶粒，在裂纹上有撕裂剥落的金属颗粒，裂纹穿过奥氏体晶粒进行扩展，在一个奥氏体的晶粒内，有两条平行的裂纹，裂纹穿过孪晶界，剥落的晶粒有移动，说明裂纹扩展是沿着奥氏体的某一晶面进行的，是穿晶脆性断裂，即解理断裂，如图13~图16所示。

(2) 化学成分分析 通过对

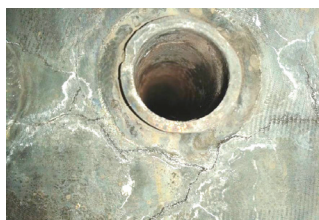


图2 换热管周围裂纹的形貌

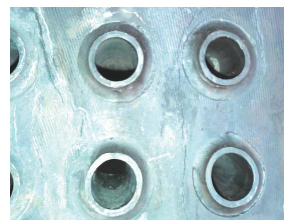


图3 远离换热管处的裂纹



图4 管板边缘处的裂纹



图 5

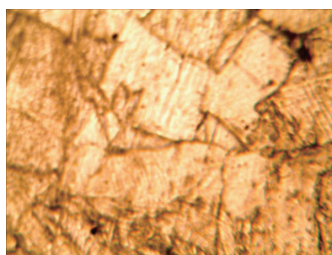


图 6

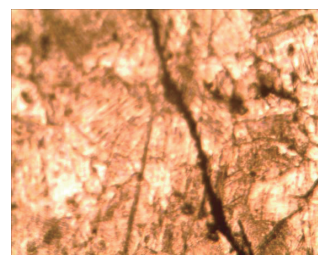


图 7

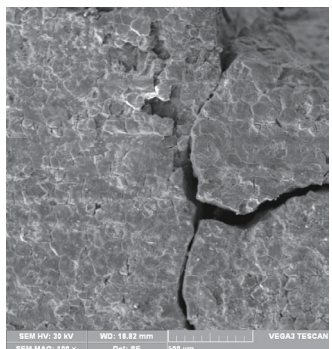


图 8

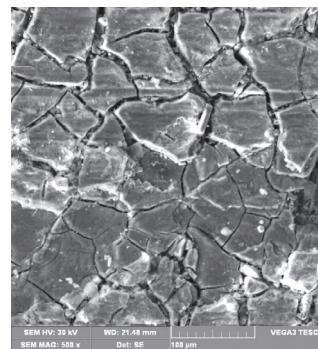


图 9

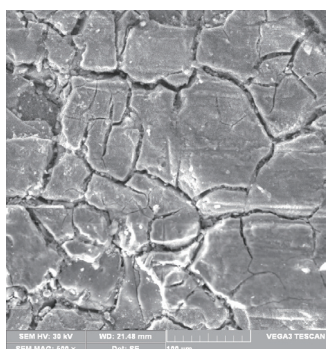


图 10

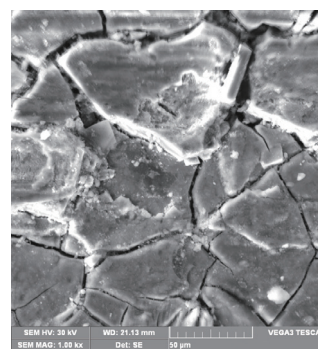


图 11

管板的化学成分分析，发现含碳量略高于标准，硫含量略有超标，铬含量略低于标准（见表1）。

(3) 金相与非金属夹杂物检验 通过对管板进行金相检验，材料组织为奥氏体，晶粒大小均匀，晶粒度评级为5级，如图17、图18所示；对非金属夹杂物检验，发现表面有颗粒状夹杂物，判断为 Al_2O_3 夹杂物和硫化物，见图19。

(4) 断口检验 通过扫描电镜观察可以看到在断口表面分布许多细小的颗粒，分析确定是具有氧化物的金属颗粒，也可看到断口表面有二次裂纹，是层状撕裂形貌，如图20、图21所示；对断口清洗后的扫描电镜可以看到断口表面有台阶，有孔洞，台阶说明沿着某晶面开裂，孔洞是夹杂物，且有滑移台阶，有二次裂纹，是剥落颗粒被挤压的形貌，如图22、图23所示。

(5) 性能检验 对管板取样进行弯曲试验，弯曲 90° 时，表面没有裂纹，说明此材料有一定的塑性和韧性；当弯曲 180° 时，表面产生了大致平行的两条裂纹，且垂直最大正应力，呈弯曲状，见图24。用微纳米压痕仪对管材测试硬度，硬度在350HV左右，用微纳米压痕仪将压痕压在微裂纹上，裂纹没有扩展开裂，没有压碎现象，说明此材料在常温下具有良好的塑性，即常温条件下应力不会使裂纹产生脆性开裂，如图25、图26所示。

(6) 残余应力测试 采用应变仪对管板表面的残余应力进行测试（见图27），测试结果如表2所示。管板表面的各个方向

表1 管板的化学成分分析（质量分数） (%)

元素	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr
实测值	0.094	1.30	0.80	0.044	0.033	8.12	17.45
标准值 (GB/T20878—2007)	0.08	2.00	1.00	0.030	0.045	8.00~11.00	18.00~20.00

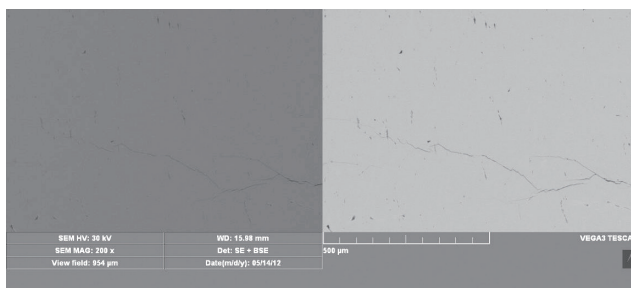


图12 管板剖面裂纹尖端的微观形貌



图 13

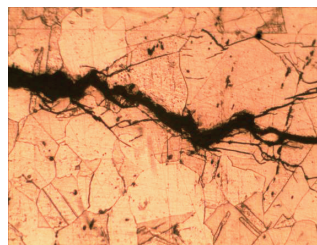


图 14

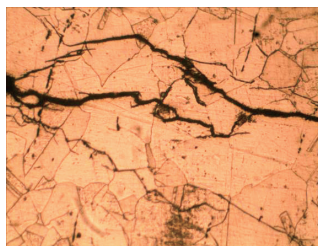


图 15

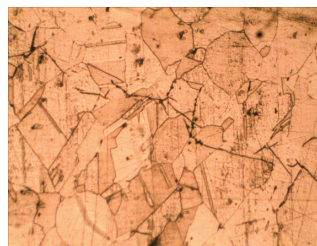


图 16

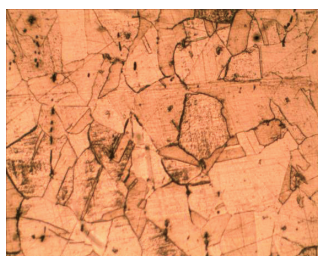


图 17

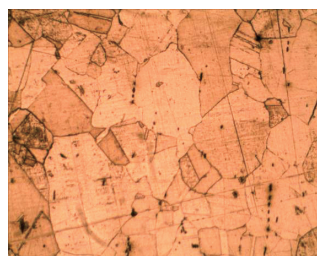


图 18

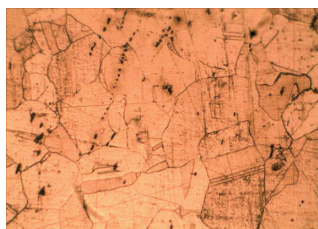


图 19

表2 管板残余应力测试值 ($\mu\epsilon$)

序号	1#	2#	3#	4#
1	-112	-104	-123	-95
2	-95	-95	-82	-71
3	-104	-95	-58	-93

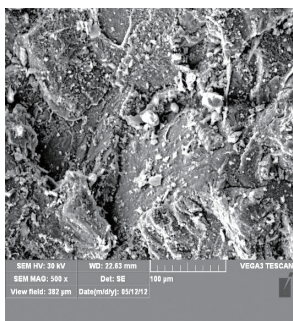


图 20

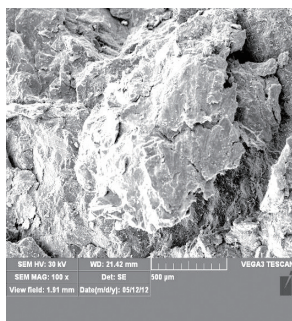


图 21

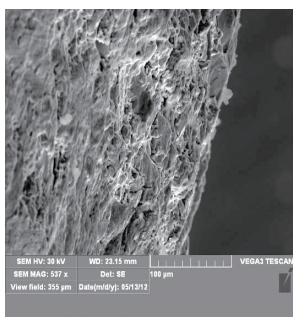


图 22

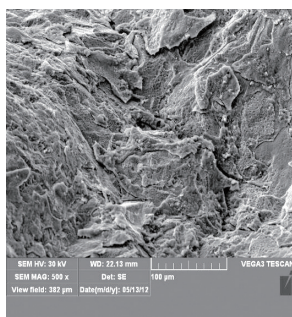


图 23

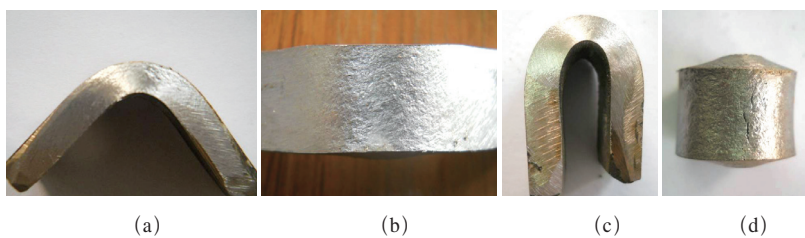
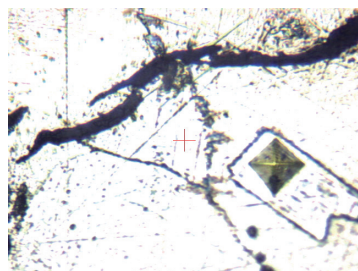
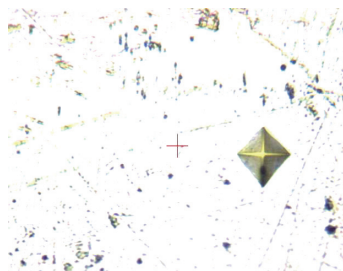


图24 冷弯试验

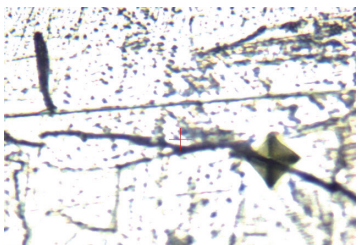


(a)

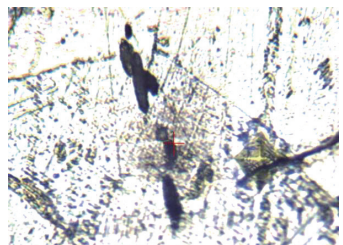


(b)

图25 微纳米压痕仪测试的显微硬度



(a)



(b)

图26 压头压在微裂纹上的组织形貌

上均具有压应力。说明管板在使用过程中，接触低温介质，管板中心收缩，产生的是径向的拉应力，裂纹产生后，应力得到了释放。当温度回到常温时，管板膨胀，但是由于有裂纹存在，表面管板恢复不到原来的位置，则产生了压应力。

3. 综合分析

(1) 管板材质的影响因素 管板的材质为06Cr19Ni10。化学成分分析显示材质没有达到标准要求，碳含量高、铬含量低，使钢的抗晶间腐蚀能力下降，硫含量的超标，会形成非金属硫化物，使钢韧性下降。从断口的宏观形貌上看，其氧化颜色呈灰红色，应该是高温400℃以上温度才能产生的氧化颜色，而管板使用温度最高只有260℃，那么裂纹的产生，应是在加工过程中（锻造或热处理）所产生。

(2) 热疲劳的因素 由于环境温度的交替变化引起热应变循环导致疲劳失效称为热疲劳。热疲劳的裂纹是多源裂纹，表面呈龟裂状，内部呈枝杈状或较平直，裂纹中嵌入氧化物，断口粗糙有氧化物覆盖，呈褐色或深灰^{[1]-[2]}。管板表面裂纹的形貌呈龟裂状，内部裂纹呈枝杈状，断口表面有氧化物覆盖，裂纹中有氧化物嵌入，且

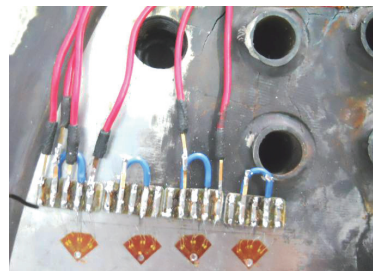


图27 残余应力测试的位置

表面有大量的显微裂纹，有明显的热疲劳特征。

(3) 应力腐蚀的因素 不锈钢在特定的腐蚀性介质和拉应力（可以是焊接、弯曲或其他成形工艺引起的残余应力，也可以是内压、机械载荷或热膨胀引起的应力）的同时作用下会出现低于强度极限的脆性开裂现象，称为应力腐蚀^[3]。奥氏体不锈钢的应力腐蚀开裂为穿晶断裂，裂纹从表面开始，裂纹分叉，有二次裂纹，管板裂纹走向与正应力垂直，这些特点与试验结果相一致。

(4) 低温亚稳定奥氏体转化为 α' 的因素 有人研究认为：亚稳态奥氏体不锈钢（18Cr-8Ni）的应力腐蚀开裂，由于裂纹尖端的塑性形变以及氢原子在裂纹尖端的扩散和聚集，会促使尖端地区发生不同程度的 $\gamma-\alpha'$ （奥氏体向马氏体）转变^{[4]-[5]}。

大部分C-N奥氏体不锈钢在常温下处于亚稳定状态，而在超低温范围内，会因晶格畸变而发生马氏体转变。而06Cr19Ni10经固溶处理是亚稳定状态的奥氏体不锈钢，随着温度的降低，会有一部分马氏体产生，而使强度升高脆性增大。从试验中发现，管板断裂也由韧性的韧窝断裂转变成穿晶脆性断裂，即解理断裂。

4. 结论与建议

(1) 管板的化学成分与标准不符，碳含量、硫含量高，含铬量低，夹杂物多。

(2) 管板开裂为脆性断裂和正断断裂。裂纹扩展过程中有分叉，裂纹是沿着奥氏体的某一晶面开裂的。

(3) 裂纹从管箱一侧的管板表面首先形成，管板表面氧化层上的显微裂纹是裂纹形成的源点。低温是管板变脆的原因。管程中的介质使管板表面产生氧化层以及温度差所产生的热应变循环作用是裂纹产生及扩展的原因。

(4) 在管板生产加工过程中，选择符合标准的材料，对管板锻件进行严格的无损检测，防止表面和内部存在不允许的缺陷。提高管板表面的加工精度。固溶处理采用深冷处理，防止奥氏体在使用过程中向马氏体进行转变。

(5) 在对乙烯气化前，尽量对其进行升温，防止由于温度差过大而产生大的热应力。

(6) 对此材料的低温性能和组织性能进行深入研究，确定其是否能满足使用要求。

参考文献

- [1] 王宾.强化奥氏体不锈钢/钢双金属连铸辊研究[M]. 山西：太原科技大学出版社，2011，54-59.
- [2] 王丽营，邢修三.热疲劳非平

衡统计理论[J].北京理工大学学报，2001，21（2）：151-156.

- [3] 徐在林.应力腐蚀破裂机理探讨[J].化工装备技术，1994（3）：48-51.
- [4] 王辉绵，乔玉，白晋钢，等.亚稳定型奥氏体不锈钢盘条形变马氏体 α' 影响因素研究[C]. 中国钢铁年会，2001.
- [5] 陈海云，褚玲爱，盛水平，等.奥氏体不锈钢封头的形变马氏体含量检测与影响因素[J].理化检验：物理分册，2012（12）：779-783.

作者简介：魏志刚，博士研究生，高级工程师，中国石油大学（北京）化学工程学院，中国石油抚顺石化公司烯烃厂；魏耀东，教授，博士生导师，中国石油大学（北京）化学工程学院；于明明、宋艳会、张友冬、张晓琴，中国石油抚顺石化公司烯烃厂。

MW 20160526

欢迎关注微信号：热处理生态圈

热处理生态圈微信号是以金属加工（热加工）为基点打造的全新的移动端媒体平台，主要报道热处理、锻造、铸造、材料和冶金，内容丰富，表现形式更加多样，现有粉丝12万人，手机扫描二维码即可关注，期待你的到来。

