

文章编号:1673-9981(2020)03-0236-04

板式换热器失效原因分析*

况敏,邓畅光,刘自敬,陈焕涛,张玉桢

广东省科学院新材料研究所,广东 广州 510006



摘要: 换板式热器安装使用一个月即发生泄漏故障,解剖拆解换热器后发现,泄漏层位于换热器板壳内的传热不锈钢薄片钎焊热影响区。采用断口分析、表面宏观和微观形态分析、能谱成分分析、金相组织分析、维氏显微硬度测试等方法综合检测失效部位,发现失效性质为不锈钢应力腐蚀为,主要原因为钎焊工艺不当造成不锈钢基材晶界弱化,弱化晶界的不锈钢薄片无法承受设定工作要求而发生应力腐蚀开裂,导致换热板泄漏失效。

关键词: 不锈钢板;晶间腐蚀;应力腐蚀

中图分类号:TQ051.5

文献标识码:A

板式换热器由热交换板、密封垫片及压紧装置组成,其工作单元热交换板由板壳和壳内多层不锈钢曲面薄片真空钎焊而成,是实现热量以流体方式冷热交换且满足设定工艺要求的核心部件。板壳内金属传热薄片表面通常加工成特殊的空间曲面,如波纹形或槽形,规则曲面交错叠加的结构可以达到提高换热片刚度、增强流体湍流程度、提高传热效率的目的。近年来,板式换热器以设计巧妙、换热效果优良、价格适中而被广泛用于空调设备、建筑的供热和食品轻工等行业^[1],深受市场欢迎。

近期在北方市场,接连出现换热器使用一个月即泄漏的故障,鉴于生产厂家已严格规范制作过程,为寻找失效原因,根除该类隐患,特进行分析。

1 宏观观察

经工厂拆解测试,确定泄漏部位位于板式换热器F面起第二层通道板边沿。工厂从换热器截取待分析部分,并标注泄漏位置。送达后细查标注的泄

漏部位发现,泄漏点位于冷却水导流换热壳板与传热薄片真空钎焊处,焊缝处钎料充填均匀饱满,钎料向不锈钢传热薄片表面流铺流畅,标记泄漏位置的不锈钢传热薄片表面存在轻微氧化层,未发现明显裂纹和孔洞。图1为泄漏部位宏观形貌。

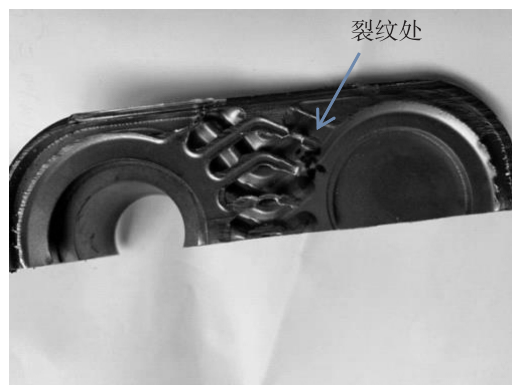


图1 失效不锈钢导流薄片宏观形貌图

Fig. 1 Macroscopic image of failed stainless steel diversion sheet

收稿日期:2020-05-27

* 基金项目:广东省科学院创新驱动发展专项(2018GDASCX-0111);广东省科学院院士科研基金(2018GDASCX-0402);“广东特支计划”本土创新创业团队项目(2019BT02C629)。

作者简介:况敏(1963-),湖南长沙市人,教授级高级工程师,从事金属材料失效分析、表面处理层解剖评定等方向研究工作。

2 实验部分

2.1 故障薄片基材成分

由于不锈钢传热薄片为空间弯曲薄片,无法截取足够数量的材料进行化学成分分析,故直接在金相制备试样的不锈钢传热薄片横截面进行能谱成分分析,分析结果列于表 1. 由表 1 可知,不锈钢传热薄片 Cr 和 Ni 元素含量符合《GB/T3280-2015 不锈钢冷轧钢板和钢带》中 0Cr19Ni10(牌号 S30408) 钢的要求.

表 1 失效不锈钢板基体能谱成分分析表
Table 1 Analysis table of energy spectrum composition of failed stainless steel plate matrix

含量 $w/\%$	检测值	S30408
Ni	8.69	8.00~10.50
Cr	18.23	17.50~19.50

2.2 实验方法

截取带裂纹和钎焊接头的不锈钢壳板,以垂直于钎焊接头方向用环氧树脂冷镶嵌,待完全凝固后在连续更细的 SiC 砂纸上研磨,然后使用金刚石抛光膏镜面抛光至 $1\mu\text{m}$ 的光洁度. 在化学溶液(5 g 的 FeCl_3 +10 ml 的 HCl +100 ml 的水)中浸蚀. 使用 LEICA DIM5000M 光学显微镜,分析失效部件基体的微观组织. 采用 Struers DuraScan-70 维氏显微硬度仪测试失效件基材维氏显微硬度使用 FEI NNS 450 扫描电镜 (SEM) 和 EDAX Octanc Plus 能谱仪(EDS)进行观察失效部件的表面、横截面形貌,以及分析疑似问题区域成分.

3 实验结果

3.1 金相显微检查

图 2 为不锈钢薄板基体金相组织图. 从图 2 可见:不锈钢导热薄片边沿可见明显沿晶裂纹,薄片心部奥氏体晶界明显增粗,典型的奥氏体晶间腐蚀特征;不锈钢薄片基体为固溶处理完全的单相奥氏体,可见孪晶,晶粒平均直径约为 $562\mu\text{m}$. 按 ASTM E112 标准可评定为 5 级.

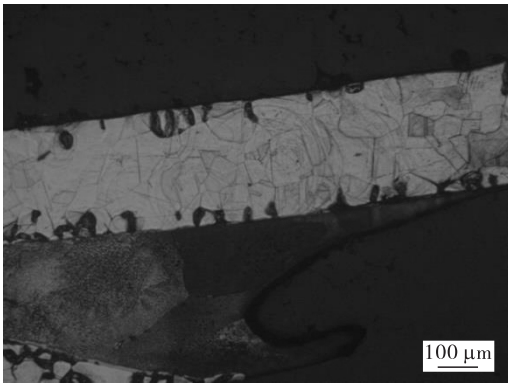


图 2 不锈钢薄板基体金相组织图
Fig. 2 Metallographic structure of stainless steel sheet matrix

3.2 硬度测试

在金相试样上测试不锈钢导热薄片基材维氏显微硬度,测试结果列于表 2. 由表 2 可知,试样的平均维氏硬度值为 $197\text{HV}_{0.1}$,符合《GB/T3280-2015 不锈钢冷轧钢板和钢带》中奥氏体不锈钢固溶处理后的硬度要求. 测试结果表明,不锈钢薄片基体为固溶态.

表 2 失效不锈钢导热薄片基材维氏显微硬度
Table 2 Vickers microhardness of failed stainless steel thermal conductive sheet substrate

序号	测试硬度值 $\text{HV}_{0.1}$
1	192
2	208
3	182
4	201
5	201
平均值	197

3.3 扫描电镜观察及能谱分析

采用扫描电镜进一步观察标注失效部位发现,不锈钢传热薄片沿焊料存在一条裂纹(图 3(a)和图 3(b)). 观察金相制备的不锈钢传热薄片横截面,所有不锈钢薄板两侧沿奥氏体晶界均存在粗裂纹,不锈钢薄板心部存在晶间细裂纹(图 3(c)和图 3(d)). 故此,确认不锈钢薄板基体不仅晶界弱化且存在晶间微裂纹.

对裂纹两侧进行能谱分析,能谱分析结果列于

表 3. 由表 3 可知,靠近焊缝侧的主要元素为 Cr, Fe, Ni 和 Cu,远离焊缝侧的主要元素为 Cr, Fe, Ni, Cu 和 S. 能谱分析结果表明:裂纹不是焊料铺展边

界,裂纹两侧均残存铜基焊料;裂纹远离焊料端还存在腐蚀性元素 S.

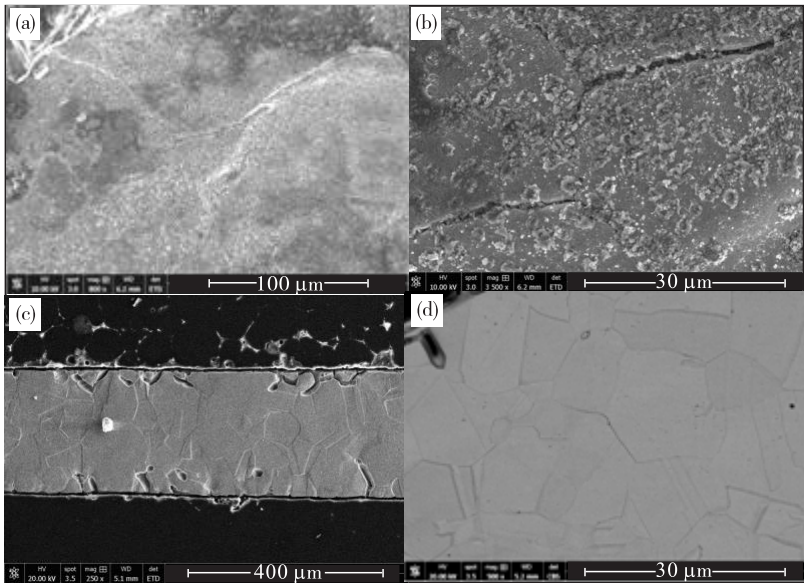


图 3 失效部位不锈钢基体晶间裂纹

(a)表面低倍形貌;(b)表面高倍形貌;(c)截面低倍形貌;(d)截面心部高倍形貌

Fig. 3 Intergranular cracks in the stainless steel matrix at the failure site

(a) low-magnification surface morphology; (b) high-magnification surface morphology; (c) low-magnification cross-section morphology; (d) high-magnification morphology of the center of the section

表 3 失效部位表面能谱成分分析表

Table 3 Surface EDSanalysis table of failure parts

位置	$w(\text{Cr})/\%$	$w(\text{Fe})/\%$	$w(\text{Ni})/\%$	$w(\text{Cu})/\%$	$w(\text{S})/\%$
裂纹靠近焊缝侧	0.65	2.74	1.09	95.52	—
裂纹远离焊缝侧	10.11	38.68	6.12	44.48	0.62

4 讨 论

虽然无法进行精确的化学成分分析,但能谱分析结果表明,失效不锈钢薄片基材的 Ni 及 Cr 元素含量符合《GB/T3280-2015 不锈钢冷轧钢板和钢带》关于 0Cr19Ni10(牌号 S30408)钢的 Cr 和 Ni 要求,说明不锈钢薄片基材成分满足奥氏体不锈钢抗腐蚀性能通常要求.

金相观察显示换热通道的不锈钢传热薄片基体组织为带孪晶的奥氏体,为完全固溶态. 硬度测试显示不锈钢薄板基体的维氏显微硬度为 197 HV_{0.1},符合《GB/T3280-2015 不锈钢冷轧钢板和钢

带》关于奥氏体不锈钢固溶处理后的硬度要求. 硬度测试结果验证了金相观察的结论. 不锈钢薄片一般为交货状态为冷作硬化态^[2],微观组织一般为存在大量滑移线的拉长变形奥氏体,不能观察到孪晶,而且维氏显微硬度值应大于 210 HV. 而目前失效件观察到的不锈钢薄板微观组织为带孪晶的奥氏体,而且晶粒较粗大,维氏显微硬度值 197 HV,显示换热器内的不锈钢薄片钎焊过程是比较温和的高温循环.

由能谱分析知,换热器钎焊用钎料为铜基钎料. 通常铜基钎料钎焊温度在 1000 ℃ 以上,故可推断失效件不锈钢薄片在经历了 1000 ℃ 的高温循环. 不锈钢薄片基体奥氏体晶粒较为粗大,说明不锈

钢薄板基体由纤维状奥氏体经再结晶转变为等轴晶奥氏体,细小等轴晶再长大为带孪晶的奥氏体,可以推断不锈钢薄板在钎焊中经历了一段时间的高温保温。金相分析发现,不锈钢薄片基体普遍存在晶界增粗,可以推断失效件在钎焊降温时冷却速度较缓慢,这是因为奥氏体不锈钢存在一个敏化温度区间($450\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[3],钎焊或固溶处理时必须快速通过该温度区间,否则奥氏体中碳等杂质原子有足够的时间扩散至晶界,与晶界附近的Cr形成 Cr_{23}C_6 并积聚沉淀在晶界,引起晶界贫铬,降低奥氏体不锈钢抗腐蚀性并弱化奥氏体晶界。由此可以确定,不锈钢传热薄板存在一定程度的晶界弱化。

板式换热器薄片表面结构复杂多变,使腔内流通当量直径小,流体在流动过程中不断改变流向及流速,大大增加了流体的扰动性。流体在流经板式换热器传热片时,低流速下仍然可以呈湍流状态^[4],在显著提高换热器的换热效率的同时也对薄片材料提出要求。换热器工作时,不锈钢传热薄片两侧呈湍流态通行的含微量硫的流体对薄片施加间歇性点状脉冲冲击,至少一侧的流体含微量的腐蚀性元素硫。薄片两侧通行的流体流速不同,点状间歇性脉冲冲击应力也随之不同,但流速高的一侧点状脉冲冲击应力强度持续较大。薄片与换热器外壳板连接的钎焊接头处是流体变速最剧烈的地方,因而也是受脉冲冲击最严重的应力集中处。该处不锈钢薄片在流体反复点状冲击下,薄板基体两

侧将在已经弱化的晶界处萌生沿晶微裂纹,随时间积累,微裂纹由两侧向心部基体扩展,当裂纹贯通不锈钢传热薄片后,发生流体泄漏,导致换热器失效。

5 结 论

(1)板式换热器的不锈钢薄片失效性质为应力腐蚀。

(2)板式换热器的不锈钢薄片失效原因为真空钎焊过程中未快速通过奥氏体不锈钢敏化温度区间,因而引起奥氏体晶界弱化,带缺陷的不锈钢薄片表面在应力集中处受含硫流体间歇性点状脉冲冲击萌生沿晶微裂纹,微裂纹沿晶界扩展直至贯穿薄片导致换热器泄漏失效。

参考文献:

- [1] 郭春生. 新型复合人字形板式换热器传热与流动理论分析及实验研究[D]. 济南:山东大学,2012.
- [2] 武强,张晶晶,徐中杰,等. GB/T3280-2015 不锈钢冷轧钢板和钢带[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [3] 韩晓辉,杨志斌,张志毅,等. 热输入对不锈钢激光搭接焊接头晶间腐蚀敏感性的影响[J]. 焊接学报,2019,40(4):148-153.
- [4] 赵桐. 斜方格板式换热器的流体流动与传热模拟及新板片结构开发[D]. 北京:北京化工大学,2016.

Failure analysis of plate heat exchanger

KUANG Min, DENG Changguang, LIU Zijing, CHEN Huangtao, ZHANG Yuhui

Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

Abstract: The plate heat exchanger was installed and used for a month before leaking failure. After dismantling the heat exchanger, it was found that the leakage layer was located in the heat-affected zone of the heat transfer stainless steel sheet brazing in the heat exchanger plate shell. Fracture analysis, surface macro and micro morphology analysis, energy spectrum component analysis, metallographic structure analysis, Vickers microhardness test and other methods are used to comprehensively detect the failure location, and it is found that the failure property is stainless steel stress corrosion, mainly due to improper brazing process. As a result, the grain boundary of the stainless steel substrate is weakened, and the stainless steel sheet that weakens the grain boundary cannot withstand the set working requirements, and stress corrosion cracking occurs, resulting in the leakage of the heat exchange plate.

Key words: stainless steel plate; intergranular corrosion; stress corrosion