

换热器试运行期间管束焊缝发生疲劳断裂分析

路宝玺

(上海赛科石化股份有限公司,上海 201507)

摘要:采用金相、扫描电镜方法对 304L 不锈钢换热管试运行期间的焊缝开裂进行了分析。宏观分析和微观分析表明管子与管板连接的焊缝断裂是疲劳破坏所致。流体诱导导致的管束共振是换热管短期失效的主要原因,胀接不合格、焊接缺陷加速了管束的疲劳失效。

关键词:换热器;疲劳;管束共振;焊接缺陷;胀接

中图分类号: TE965 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001 - 4837(2010)04 - 0051 - 04

doi: 10. 3969/j. issn. 1001 - 4837. 2010. 04. 012

Fatigue Failure Analysis of Heat Exchanger Tube Weld during Trial Operation

LU Bao - xi

(Shanghai Secco Petrochemical Co., Ltd., Shanghai 201507, China)

Abstract: The fatigue fracture of the heat exchanger tube weld of 304L stainless steel, which occurred during trial operation, was studied by means of microstructure and scanning electron microscope. Resonance of the tubes caused by the water in the shell is mainly responsible for the fatigue cracks. Weld defect and improper expansion of tube to tubesheet accelerated the fatigue failure of the tubes.

Key words: heat exchanger; fatigue; tubes resonance; weld defect; expansion joint

1 引言

由于换热器结构的复杂性和使用工况的多样性,常引发多种形式的失效^[1]。造成换热器管子与管板连接接头的失效原因是多方面的,如接头因高温应力松弛失效;管束在流体的冲击下产生振动,导致接头的疲劳破坏;操作不当使温度和压力频繁波动引起的循环载荷所导致的疲劳失效等^[2~4]。设备的失效与制造、安装和操作等都密切相关。设备在运行期间即发生失效尚少见,本例换热器管在试运行当天就发生断裂失效,具有典型性,文中对其断裂原因进行分析、总结,对指

导换热器的制造、运输和安装具有重要的实用价值。

失效的冷凝器管束为 304L 不锈钢,管板为 16Mn 复合 304L 不锈钢板,为固定管板式换热器。壳程介质为冷却水,工作压力 0.7 MPa,工作温度 38 °C;管程介质为水蒸气 + 少量有机物,工作压力 - 80 kPa,工作温度 47 °C。新设备安装后进行试运行,试运行期间壳程通入循环水,流量 $Q = 510 \text{ m}^3/\text{h}$ 。管内通入蒸汽,密度 600 kg/m^3 。但试运行发现壳程的真空度无法达到,同时发现管程的液位异常升高。打开设备发现有多根管子在焊缝处断裂并泄漏。从试运行到泄漏约 24 h,图 1 示出泄漏现场照片。

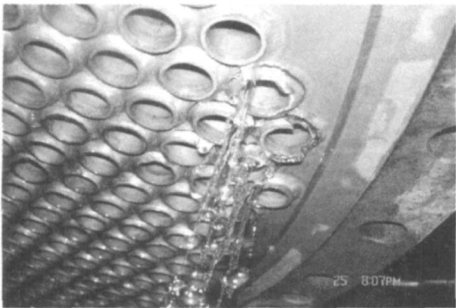


图 1 管口焊缝处开裂

2 断口宏观分析

对断裂的管子取出进行分析。在取管子过程中发现管子取出时没有阻力,另外,从拆下的管子检查发现,胀接区的尺寸和非胀接区的尺寸没有差别,这说明失效的管子在制造时胀接不到位而未胀紧。图 2 示出断口宏观形貌,断裂是沿焊缝处脱开的,断口光亮,有放射纹和贝壳纹,是疲劳特征。对换热器进行解剖检查发现折流板有大约 30 mm 的移位。折流板的定位杆套管尺寸短,在定位螺栓和定位杆之间存在较大间隙,同时,折流板孔径偏大。因此,在吊装、运输过程中出现较大移位。

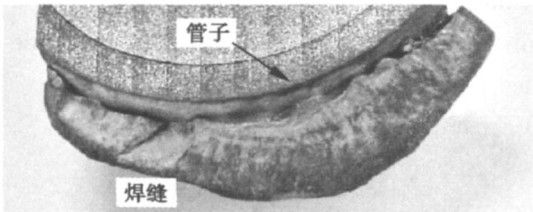


图 2 断裂管子宏观形貌

3 材料化学成分和金相分析

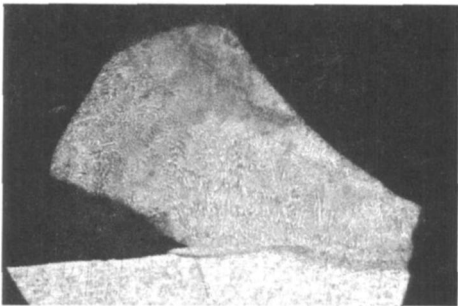
为考察材料性能,判断失效是否与材料性能有关,对材料进行成分分析、力学性能测试和金相分析。材料化学成分分析结果见表 1。从表中可以看出,材料成分符合 304L 奥氏体不锈钢的牌号要求。

对管子采用原样进行拉伸试验,试验表明抗拉强度 R_m 为 588 MPa,断后伸长率 A 为 50%。

图 3 示出焊缝和管子连接处金相组织,组织为单相奥氏体,组织正常。

表 1 材料成分分析结果 (%)

元素	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
实测值	0.019	0.59	0.39	0.005	0.034	18.08	8.37
标准 (304L 不锈钢)	<0.03	<2.0	<1.0	<0.03	<0.045	18~20	8~12



(a) 管子焊缝和管子连接处金相组织



(b) 母材金相

图 3 管子和焊缝金相组织

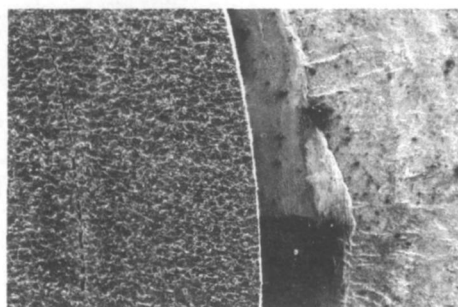
从材料成分、力学性能和金相组织可看出,材料符合要求。

4 试样断口扫描电镜分析

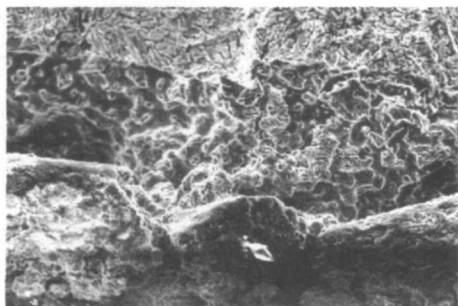
图 4 示出管子焊缝沿管板脱开处断口扫描电镜形貌。图 4(a)显示焊缝与管子未完全贴合,焊缝上有多处起源的放射纹并有贝壳纹,这是由振动导致的,裂纹从焊缝的内侧起裂向外侧(管板上)扩展;图 4(b),4(c)示出疲劳起源处形貌,裂纹起源处存在焊接缺陷,焊接过程发生氧化现象;图 4(d)示出断口上的疲劳辉纹。

5 讨论

根据材料分析、断口分析和金相分析,换热器



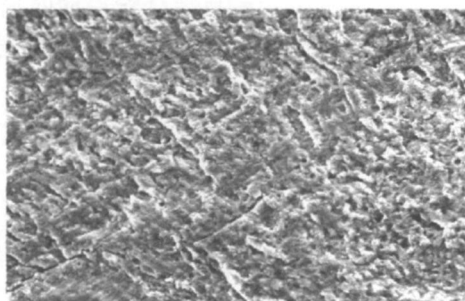
(a) 未焊透处起源的放射状断口



(b) 裂纹起源处焊缝的焊接缺陷 200 ×



(c) 焊接缺陷 400 ×

(d) 疲劳辉纹 100 ×
图 4 断口扫描电镜形貌

管束失效是疲劳所致。疲劳裂纹需要具备管子振动的条件和疲劳裂纹起源的条件。由于该根管子未胀紧,振动时传递到焊缝处而出现疲劳。而流体导致的管束共振可能是发生换热管短时疲劳破

坏的基本条件^[5]。以下对这些问题进行分析。

5.1 失效换热器振动分析计算

由于折流板作用,水会产生横向流、紊流或涡流,导致管子的振动,一旦这种振动频率与管子的固有频率接近时就会产生共振。这种振动容易在壳体进口处产生^[6]。

列管式换热器中由于壳程流体横向流动诱发管束振动主要原因有卡曼漩涡激振、紊流抖振、声学驻波振动、流体弹性激振和射流转换激振等 5 种形式。

总的说来,在横流速度较低时,容易产生周期性的卡曼漩涡或紊流漩涡,这时在换热器中既可能引起管子的机械振动,也可能产生声振动。当横流速度较高时,管子的振动一般情况下是由于流体弹性激振引起,但不会产生声振动。换热器振动计算模型如图 5 所示。按 GB 151—99^[7]的方法分别计算管子的固有频率、卡曼漩涡频率、紊流抖振的主频率和临界横流速度。计算结果如表 2 所示。

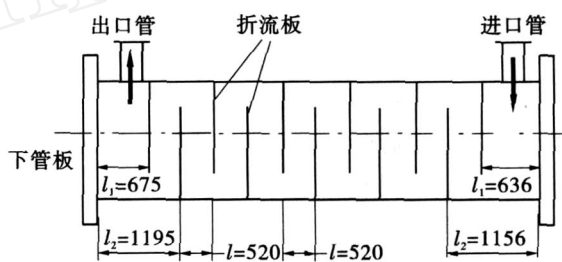


图 5 换热器结构示意图

5.2 管束发生振动可能性评判^[8,9]

(1) 判别卡曼漩涡振动发生的可能性

计算各段列管处卡曼漩涡发生频率 f_v 与列管自身的固有频率之比,若比值越接近 1,则卡曼漩涡激振发生共振的可能性就越大。一般某振型固有频率的 0.85~1.3 倍范围内为共振区。

穿过折流板缺口处的列管:

$$\text{出口处: } f_{v1} / f_1 = 0.9$$

$$\text{进口处: } f_{v2} / f_2 = 1.244$$

$$\text{折流板间: } f_{v3} / f_1 = 0.798$$

折流板间穿过所有折流板共有部分的列管:

$$f_{v3} / f_1 = 0.187$$

故对于该类管子,也不会发生卡曼漩涡振动。

(2) 判别紊流抖振发生的可能性

出口紊流抖振的频率 f_d :

表 2 管束振动计算结果

列管位置		管子自由频率	卡曼漩涡振动频率	紊流抖振频率	壳程横流速度 (m/s)	临界横流速度 (m/s)
折流板间		$f_{折} = 133.28$	$f_{折} = 24.98$	$f_{折} = 16.67$	$v_{折} = 1.39$	$V_{折} = 5.838$
穿过折流板 缺口部分	出口处	$f_1 = 21.38$	$f_{v1} = 19.30$	$V_{c1} = 0.937$	$v_1 = 1.073$	$V_{c1} = 0.937$
	进口处	$f_2 = 24.25$	$f_{v2} = 30.17$	$V_{c2} = 1.062$	$v_2 = 1.14$	$V_{c2} = 1.062$
	折流板间	$f_3 = 31.30$	$f_{v3} = 24.98$	$V_{c3} = 1.371$	$v_3 = 1.39$	$V_{c3} = 1.371$

$f_1 = \frac{v_1 d_o}{LS} [3.05(1 - \frac{d_o}{S})^2 + 0.28] = 12.882 \text{ Hz}$

进口紊流抖振的频率 f_2 :

$f_2 = \frac{v_2 d_o}{LS} [3.05(1 - \frac{d_o}{S})^2 + 0.28] = 13.70 \text{ Hz}$

折流板间紊流抖振的频率 f_3 :

$f_3 = \frac{v_3 d_o}{LS} [3.05(1 - \frac{d_o}{S})^2 + 0.28] = 16.671 \text{ Hz}$

式中, S 为管中心距; d_o 为管子外径; $L = 0.032 \times \sin 60^\circ = 0.0277 \text{ m}$ 。

穿过折流板缺口处的列管:

出口处: $f_1 / f_1 = 12.882 / 21.38 = 0.603 > 0.5$

进口处: $f_2 / f_2 = 13.70 / 24.25 = 0.565 > 0.5$

折流板间: $f_3 / f_3 = 16.671 / 31.30 = 0.533 > 0.5$

穿过所有折流板共有部分的列管:

$f_3 / f_{折} = 16.671 / 133.28 = 0.125 < 0.5$

(3) 流体弹性激振判别

当壳程的流速大于临界流速时会有流体弹性激振可能:

穿过折流板缺口处的列管:

出口处: $v_1 = 1.073 > V_{c1} = 0.937$

进口处: $v_2 = 1.114 > V_{c2} = 1.062$

折流板间: $v_3 = 1.39 > V_{c3} = 1.371$

穿过所有折流板共有部分的列管:

$v_3 = 1.39 < V_{折} = 5.838$

失效换热器发生各种类型振动的可能性评判结果见表 3。

表 3 管束振动可能性评判结果

列管位置		卡曼漩涡 振动	紊流 抖振	流体弹性 激振	结论
穿过折流板 缺口部分	出口处	发生	不发生	发生	振动
	进口处	发生	不发生	发生	振动
	折流板间	不发生	不发生	不发生	不振动
穿过所有折 流板共有处	折流板间	不发生	不发生	不发生	不振动

计算表明换热器进口和出口处发生了共振,这与实际情况相符。只有出现换热器管束共振的条件下,管子才能在很短的时间内发生疲劳断裂。

5.3 疲劳裂纹起源

疲劳裂纹的起源阶段占整个疲劳寿命的比例比较大。焊口处发生的疲劳断裂起源于未焊透和焊接过程的氧化,这样有利于疲劳裂纹的萌生。根据疲劳裂纹的开裂机理,疲劳裂纹包括疲劳裂纹的萌生阶段和扩展阶段。一般,疲劳裂纹的萌生阶段会很长,但对于有缺陷的材料裂纹萌生的时间很短或者不需要裂纹萌生阶段而直接扩展^[9]。从本例来看,焊接缺陷深度大约 0.2 mm,而且缺陷处存在应力集中,因此该缺陷作为疲劳裂纹的起源而不再需要裂纹的萌生阶段是很有可能的。

5.4 胀接的作用

管壳式换热器制造过程中,换热管与管板连接结构的质量直接影响换热器操作运行的安全性和可靠性。胀接和焊接的质量对换热器的质量有直接的影响^[10]。由于断裂的管子没有胀紧,因此,振动传到管口,焊接缺陷成为疲劳源。

6 结论

- (1)通过对材料化学成分分析、断口分析和金相分析,304 L 不锈钢管子与管板连接处的焊缝开裂是振动疲劳所致;
- (2)振动的来源为换热器试运行期间循环水导致的管子振动频率与管子的固有振动频率接近而产生共振;
- (3)胀接不合格、焊接缺陷加速了管束的疲劳失效。

参考文献:

[1] 吴金星,王志文.管壳式换热器失效分析、预防及在线检测[J].压力容器,2001,18(6):57-60

[2] 陆怡,颜惠庚,宋瑞宏,等.换热管与管板液压胀接接头的疲劳性能[J].化工机械,2003,30(4):198-201

[3] 何世恒,姚小静,王芳,等.一分加热器早期泄漏原因分析[J].压力容器,2007,24(1):52-56

由于上述问题,加上 PED 允许压力容器制造商采用质保体系认证的检验模式,欧盟的检验公司对欧盟与中国的压力容器检验相互认可建议持抵触态度。上面所列举的例子都与材料质量有关,因此受压设备和部件的制造商和出口商应加强对原材料的质量检验。

9 结论

从本文所介绍的有关情况和案例,可以得出以下建议和结论:

(1)召开一些专题讨论会,请中国这方面的专家介绍经验和进展,可能会起到很好的效果;

(2)受压设备设计时,应考虑所有可能出现的失效模式和风险,特别是应力腐蚀、热膨胀问题、外加载荷等;

(3)对受压设备的原材料应进行严格的质量检验;

(4)对在役设备和管道的检验应有重点,但不能放弃全面检验,对设计变更和修补应有详细的记录,对设计变更应有全面的评估。

参考文献:

- [1] 陈学东,艾志斌,范志超,等.我国承压设备事故调查分析及基于风险的设计制造与维护 [A]. 第七届全国压力容器学术会议论文集 [C]. 北京:化学工业出版社,2009. 65 - 73
- [2] Pressure Systems Failures - What Can We Learn? [M]. MechE Seminar Proceedings, 25 March 2009, London
- [3] HSE. Public Report of the Fire and Explosion at the Conocophillips Humber Refinery on 16 April 2001 [R].
- [4] Pipework Integrity [M]. MechE Seminar Proceedings, 24 Nov 2005, London

收稿日期:2010 - 03 - 03 修稿日期:2010 - 03 - 23

作者简介:朱磊,男,高级工程师,英国标准委员会 (BSI) 受压设备委员会成员,现从事受压设备的设计审核、监造、取证和质保体系认证工作,通讯地址:Zurich Engineering, 126 Hagley Road, Birmingham B16 9PF, UK, E - mail: leiz7081@yahoo.com.

(上接第 38 页)

- [7] 陈怀宁,林洪泉,钱百年.运行管道在线焊接工艺研究之评述 [J]. 焊管, 1997, 20(3): 1 - 9
- [8] API RP 1107. Recommended Pipeline Maintenance Welding Practices, Third Edition (USA) [S]. 1991.
- [9] 陈怀宁,林洪泉,钱百年.运行管道在线焊接工艺研究 (一)——流动介质和结构因素对 $\frac{6}{5}$ 影响 [A]. 第八次全国焊接会议论文集 [C]. 北京:机械工业出版社,1997. 135 - 136
- [10] Sabapathy P N, Wahab M A, Painter M J. The Pre-

diction of Burn - through During in - Service Welding of Gas Pipelines [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2000, 77 (11): 669 - 677.

收稿日期:2010 - 01 - 16 修稿日期:2010 - 04 - 18

作者简介:黎超文 (1983 -),男,博士研究生,主要从事压力容器与管道安全、数值仿真方面的研究,通讯地址:257061 山东东营市北二路 271 号中国石油大学 (华东) 机电工程学院, E - mail: lcw_83@163.com.

(上接第 54 页)

- [4] 王琼琦,王正东,涂善东.乙二醛换热器换热管断裂原因分析 [J]. 压力容器, 2009, 26(3): 49 - 53
- [5] 任军平,张克锋,陶志远.加压塔再沸器失效分析与整改方案 [J]. 压力容器, 2008, 25(1): 56 - 58
- [6] 倪群.氧气反应器排气冷凝器失效分析 [J]. 聚酯工业, 2002, 15(4): 55 - 58
- [7] GB 151—99. 钢制管壳式换热器 [S].
- [8] 雷国庆,张治川.板式换热器缝隙腐蚀 [J]. 石油化工设备, 2003, 32(4): 66 - 67.
- [9] 聂北刚.焊趾疲劳裂纹的“萌生” [J]. 机械强度,

1998, 20(2): 108 - 111.

- [10] 陶申昌.管壳式换热器管板与换热管的连接 [J]. 压力容器, 2002, 19(4): 17 - 19.

收稿日期:2009 - 12 - 21 修稿日期:2010 - 02 - 07

作者简介:路宝玺 (1969 -),男,工程师,从事化工设备的运行和管理工作,通讯地址:201507 上海市化学工业区上海赛科石化股份有限公司, E - mail: lu_baoxi@secco.com.cn.