

DOI: 10.11973/fsyfh-201707013

# 爆炸焊不锈钢复合钢板封头裂纹成因及解决方法

朱晏萱<sup>1</sup>, 柏明清<sup>2</sup>, 王立坤<sup>2</sup>, 郭金鼎<sup>2</sup>, 刘家飞<sup>3</sup>

(1. 克拉玛依职业技术学院, 独山子 833699; 2. 独山子石化公司研究院, 独山子 833699;  
3. 新疆独山子天利实业总公司, 独山子 833699)

**摘要:** 对 16 台大型爆炸焊不锈钢复合钢板制压力容器进行检验, 发现 14 台容器封头内部存在大量裂纹, 通过宏观检查、硬度测试、金相检测、磁记忆检测、介质组分分析等方法, 确定封头内壁裂纹属应力腐蚀裂纹。磁记忆检测出裂纹发生的部位均为高应力区, 与介质中含有的敏感性  $F^-$ 、 $Cl^-$  共同作用导致应力腐蚀开裂的发生。对封头产生的高应力进行了分析, 对大型复合钢板封头的选取及裂纹的处理提出了建议。

**关键词:** 爆炸焊; 不锈钢复合钢板; 应力腐蚀开裂; 磁记忆检测; 沿晶裂纹

**中图分类号:** TG172 **文献标志码:** B **文章编号:** 1005-748X(2017)07-0543-04

## Cracking Reason and Solution for Head Plate Made of Explosive Welding Stainless Complex Steel Plate

ZHU Yanxuan<sup>1</sup>, BAI Mingqing<sup>2</sup>, WANG Likun<sup>2</sup>, GUO Jinding<sup>2</sup>, LIU Jiafei<sup>3</sup>

(1. Kelamayi Vocational Technique Institute, Dushanzi 833699, China; 2. Research Institute of Dushanzi Petrochemical Corp, Dushanzi 833699, China; 3. Xin Jiang Dushanzi Tianli Industrial Company, Dushanzi 833699, China)

**Abstract:** By the inspection of 16 large pressure vessels of explosive welding stainless complex steel plates, amounts of crack were found in 14 vessel heads, the cracking in heads was determined as stress corrosion cracking by macrography, hardness test, optical microscopy, magnetic memory testing, medium component analysis etc. High stress area was in the location where cracking occurred. Under the combined action of the stress and corrosive medium of  $F^-$  and  $Cl^-$ , stress corrosion cracking in heads occurred. High stress in head was analyzed, and large complex steel plate head type choice and crack treatment were proposed.

**Key words:** explosive welding; stainless complex steel plate; stress corrosion cracking; magnetic memory testing; intergranular cracking

爆炸焊不锈钢复合钢板(以下简称复合钢板)具有成本低、制造工艺简单的优点,能够实现异种金属间高强度冶金结合,且覆层和基层结合面不易产生脆化物,目前在各行业得到广泛的应用。复合钢板由基层和覆层材料组成,在加工制造压力容器时,由于两种材料的属性及加工制造工艺差异导致复合钢板的力学性能变化较大。若设计、制造过程未对此类问题进行充分考虑,复合钢板在使用过程中会出现严重的问题。

胶液罐 A、B 分别为某化工厂 2013 年和 2011 年

投用的设备。8 台胶液罐 B 设备,在 2013 年停工检修时在内部封头部位均发现大量裂纹,裂纹消除后在 2015 年 5 月停工检修期间发现 2013 年消除裂纹位置又出现大量裂纹;2 台胶液罐 A 设备,2015 年 5 月停工检修期间未发现裂纹。蔡储罐为某化工厂工业蔡储存设备,共 6 台,在 2015 年 5 月停工检修期间,6 台蔡储罐在封头内部均发现大量裂纹。上述 3 类设备均由爆炸焊不锈钢复合钢板制成,基本信息详见表 1。

### 1 理化检验

#### 1.1 宏观形貌

胶液罐 B 设备出现裂纹的位置距离封头环焊缝 200 mm 以上,并向封头轴向延伸。裂纹大多是呈粗、短特征的横向裂纹,另有呈树枝状、网状特征

收稿日期:2015-12-24

通信作者:朱晏萱(1982-),讲师,硕士,从事化工设备检修技术教学及研究工作,13565560121, zhuyanxuan82@163.com

com

表 1 3种设备的基本信息

Tab. 1 Basic information for 3 equipment

设备名称	尺寸/mm	工作压力/MPa	工作温度/°C	介质	材质	封头形式	封头成型方法	封头热处理	检验情况
胶液罐 A	φ6 500×20 470×(18+3)	0.1~0.25	83~105	胶液、溶剂油、丁二烯等	16MnR+0Cr18Ni9	半球形	分瓣成型	无	内外部检验未发现裂纹
胶液罐 B	φ5 000×14 780×(16+3)	0.1~0.25	83~105	胶液、溶剂油、丁二烯等	16MnR+0Cr18Ni9	碟形	旋压成型	消应力热处理	封头内部发现连续裂纹
萘储罐	φ3 500×8 026×(22+3)	0.15	90	萘、油	16MnR+0Cr18Ni9	椭圆形	模压成型	无	封头内部发现连续裂纹

及细、长特征的裂纹,见图 1。

不同于胶液罐 B,萘储罐发生裂纹的位置距离

封头环焊缝 200 mm 内,一些裂纹靠近焊缝,裂纹形态呈横向及网状特征,见图 2。



(a) 横向裂纹

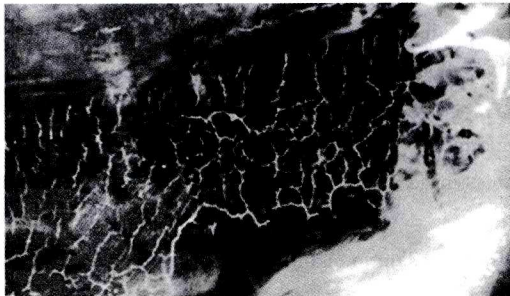
(b) 树枝状、网状裂纹

(c) 细、长裂纹

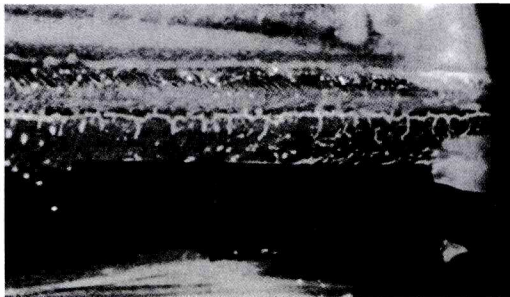
图 1 胶液罐 B 封头处典型裂纹形貌

Fig. 1 Typical morphology of cracks in head for gum liquid vessel B;

(a) transverse cracks; (b) branch-type and grid cracks; (c) long and thin cracks



(a) 网状裂纹



(b) 横向裂纹

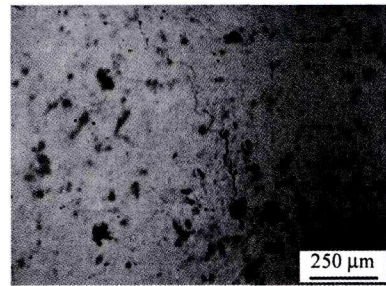
图 2 萘储罐封头处裂纹形貌

Fig. 2 Appearance of cracks in head for naphthalene vessel; (a) net cracks; (b) transverse cracks

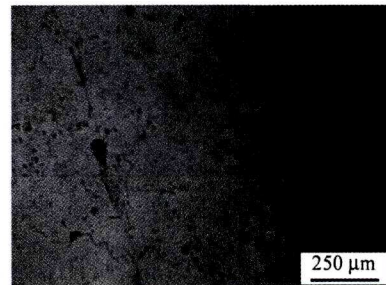
### 1.2 金相组织

对胶液罐 B 横向裂纹及网状裂纹位置进行现场金相覆膜检测,结果表明:横向裂纹及网状、树枝

状裂纹为典型沿晶裂纹,横向裂纹周围也伴有网状特征的沿晶小裂纹,树枝状及网状裂纹周围存在大量细小沿晶小裂纹,见图 3。



(a) 横向裂纹

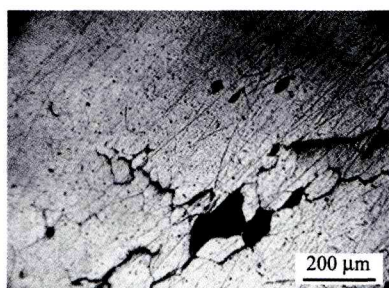


(b) 网状、树枝状裂纹

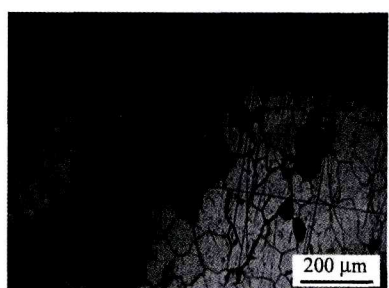
图 3 胶液罐 B 封头处裂纹微观形貌

Fig. 3 Micro morphology of cracks in head for gum liquid vessel B; (a) transverse cracks; (b) branch-type and grid cracks

对萘储罐横向裂纹及网状裂纹位置进行现场金相覆膜检测,结果表明:横向裂纹与网状裂纹均为典型的沿晶裂纹,网状裂纹存在大量晶粒剥落现象,见图4。



(a) 横向裂纹



(b) 网状、树枝状裂纹

图4 萘储罐封头处裂纹微观形貌

Fig. 4 Micro morphology of cracks in head for naphthalene vessel B; (a) transverse cracks;

(b) branch-type and grid cracks

### 1.3 硬度检测

由表2可见,3种容器筒体衬里的硬度正常,胶液罐B、萘储罐封头衬里的硬度偏高,硬度偏高的位置均处于发现裂纹的区域,表明封头内表面发生裂纹的部位强度较高。

表2 3种设备的硬度测试结果

Tab. 2 Hardness test results for 3 equipment HB

设备	封头衬里	筒体衬里	封头环焊缝
胶液罐 A	180~230	170~189	—
胶液罐 B	280~320	165~174	—
萘储罐	177~351	183~220	185~210

### 1.4 化学成分

对胶液罐A、胶液罐B、萘储罐覆层进行化学成分分析,结果见表3。由表3可见,3种设备覆层化学成分符合GB/T 3280—2007《不锈钢冷轧钢板和钢带》的要求。

### 1.5 磁记忆检测

采用俄罗斯产TSC-1M-4型应力集中磁测试仪

表3 不锈钢复层化学成分分析结果

Tab. 3 Chemical analysis result for stainless steel clad

设备	w <sub>C</sub>	w <sub>Si</sub>	w <sub>Mn</sub>	w <sub>P</sub>	w <sub>S</sub>	w <sub>Cr</sub>	w <sub>Ni</sub>	w <sub>Cu</sub>	w <sub>N</sub>
胶液罐 A	0.059 0	0.039 2	1.078 7	0.032 4	0.004 2	18.187	8.562 1	0.055 8	0.036 6
胶液罐 B	0.052 2	0.402 3	1.086 6	0.030 7	0.001 8	18.051	8.080 6	0.072 3	0.039 2
萘储罐	0.073 1	0.382 4	1.102 2	0.025 8	0.005 5	18.357	8.465 4	0.056 7	0.052 4
标准值	0.080 0	0.750 0	2.000 0	0.045 0	0.030 0	18~20	8~10.5	—	0.100 0

对萘储罐内表面封头、封头环焊缝、筒体进行磁记忆检测。在容器底部从封头环焊缝沿轴向进行扫描,确定应力最大的部位就是裂纹发生的部位;对渗透检测的封头环焊缝进行扫描,检测长度2 000 mm,可以看到裂纹区位置与高应力水平区域保持一致;对封头衬里发生补焊的区域进行扫描,发现补焊的位置应力水平较低,而附近产生裂纹的区域应力水平较高,筒体环缝间的应力水平较低。

### 1.6 介质成分分析

胶液罐A、胶液罐B内介质(胶液)的主要成分为丁二烯3.040 1%(质量分数,下同),溶剂油79.452%,干胶17.117%,防老剂0.161%,水0.000 5%,丁烯0.195%,HF 10 mg·L<sup>-1</sup>,终止剂0.010 4%。由于丁二烯聚合是用镍、铝硼作催化剂,催化剂中的三氟化硼乙醚络合物遇到水会产生氢氟酸,对设备有一定的腐蚀<sup>[1]</sup>。6台萘储罐内介质为萘液,其主要组分为:萘前组分0.37%,萘95.82%,中间组分3.78%,甲基萘0.02%,重组分0.01%,水0.01%,Cl 10 mg·L<sup>-1</sup>。

8台胶液罐B、6台萘储罐发生裂纹的位置均为封头不锈钢衬里层,发生裂纹的部位有差异,但都发生在硬度偏高的区域,筒体及焊缝部位硬度较低,渗透检测未发现表面裂纹;磁记忆检测磁场梯度值高的位置与发生裂纹的位置一致,表明裂纹区域存在较高应力;裂纹在微观上呈沿晶特征、在外观上表现为树枝状、网状特征,结合介质组分分析,表明8台胶液罐B和6台萘储罐封头衬里表面开裂的主要原因为应力腐蚀开裂,开裂敏感性主要与材料的高应力水平有关。

## 2 分析与讨论

### 2.1 复合钢板封头的应力

复合钢板封头在压制过程中,基层受拉应力影响,覆层受压应力影响,由于基层和覆层的变形程度不同,在覆层和基层结合面会受到切应力的作用,另

外封头在冷成型后会存在明显的加工硬化现象,使表面硬度升高,8台胶液罐B、6台萘储罐现场硬度检测表明,封头硬度偏高,发生裂纹部位的硬度大于300 HB。磁记忆检测结果可见,萘储罐发现大量裂纹部位附近仍存在较高的应力,另外在封头内表面局部补焊过位置发现了大量的裂纹,裂纹附近应力水平较高,结合裂纹部位的硬度结果可见,高应力及较高的开裂敏感性导致了应力腐蚀开裂的发生。另外,碟形封头发生裂纹的部位、椭圆形封头发生裂纹的部位与封头自身薄膜应力及边缘应力、弯曲应力叠加的部位大体相同。2台胶液罐A的封头为半球形封头,半球形封头的薄膜应力沿整个壳体均匀分布,大小相等,椭圆形封头和碟形封头的薄膜应力沿径向分布不等。3种封头的受力情况如下:半球形封头的好于椭圆形封头的,碟形封头的受力情况最差<sup>[2-4]</sup>。2台胶液罐A在首次开罐检验时未发现应力腐蚀裂纹,证明封头应力在应力腐蚀开裂中有重要影响。

## 2.2 复合钢板的热处理

压力容器用不锈钢复合钢板封头的压制分为冷压和热压,主要由材料厚度及制造单位的设备条件等因素决定,案例中涉及压力容器封头均为冷压成型,8台胶液罐B进行了消应力热处理,2台胶液罐A及6台萘储罐均未进行热处理。不锈钢复合钢板的覆层主要为满足介质的耐蚀性要求,低成本的基层主要满足设备的强度要求。使用不锈钢复合钢板用于压力容器制造过程需充分考虑它的使用性能,GB 150.4-2011《压力容器 第4部分:制造检验和验收》要求复合钢板容器及其受压元件热处理时,应采取措​​施保证容器(特别是覆层材料性能)满足使用要求;JB/T 4709-2007《压力容器焊接规程》规定奥氏体不锈钢复合钢板应尽量避免消除应力热处理。TSG R0004-2009《固定式压力容器安全技术监察规程》无复合钢板焊后热处理的相关要求,但对奥氏体不锈钢的规定是一般不要求做焊后热处理。HG/T 20584-2011《钢制压力容器制造技术要求》对碳钢、低合金钢类封头与不锈钢类封头应进行热处理的条件进行了说明,没有复合钢板的热处理要求,对于不锈钢材料,当加工完后表面硬度达到235 HB时应进行固溶热处理,对所有材料,当介质对材料具有应力腐蚀开裂危害时应进行热处理。

综上所述,应根据设备的使用要求来选择是否进行热处理,有晶间腐蚀倾向的设备在设计时需充

分考虑选材和热处理与介质间的相容性。对于胶液罐B的消应力热处理,在600℃停留时间过长,导致富Cr相在晶界析出,产生敏化,没有考虑介质对覆层的腐蚀;而焊后未进行热处理的萘储罐,由于加工硬化影响及两种材料的延展性不同,会产生较大的应力,表面硬度值升高,抗应力腐蚀开裂能力下降。文献[5]的试验结果表明,正确选择钢板供货状态,制造过程的热成形或热处理制度尽可能与钢板供货状态一致,才能保证复合板覆层和基层的各项性能。文献[6]通过16MnR+0Cr18Ni9复合钢板热处理试验得出,在620~670℃范围内,覆层耐蚀性试验不合格,并提出提高热处理温度既能改善钢板的应力,又能兼顾耐蚀性能。而对于热成形设备,文献[7]通过热成形和热成形后不同热处理制度,研究复合钢板组织结构、力学性能和不锈钢耐腐蚀性的影响。从上述相关研究可以看出,不锈钢复合钢板制造后的热处理应谨慎进行,相关标准对此未提及恰恰说明了复合钢板热处理的复杂性。大量试验结果表明,热处理应保证钢板的力学性能和耐蚀性,只有这样方能保证钢板在使用过程中不出现或少出现问题。

## 2.3 检测方法的选择

应至少采用超声检测或衍射时差超声TOFD检测、磁粉检测、渗透检测、磁记忆检测等对爆炸焊复合钢板制压力容器进行检测。渗透及磁记忆检测重点在覆层焊缝、热影响区、焊接修复部位、应力集中较为明显的母材部分,超声及TOFD检测应从压力容器外壁进行,重点对焊缝内部面积型缺陷、基层与覆层的复合界面处熔合缺陷进行检测。

## 2.4 裂纹的处理

发现覆层表面出现裂纹,采用渗透检测方法进行扩检,确定裂纹范围,采用金相覆膜技术进行检测,明确裂纹的性质。对于较浅的表面裂纹进行打磨处理并圆滑过渡,对于接近或达到覆层、基层结合面的裂纹,由持有效证件的焊工按经评定合格的焊接工艺进行修复,修复后的部位采用渗透检测、超声检测及磁记忆检测进行复验,最后缩短该压力容器的检验周期。

## 3 结论

(1) 8台胶液罐B、6台萘储罐封头内部发生裂纹的原因主要为爆炸焊复合钢板封头存在较大的应

(下转第550页)

荷条件下发生了氢致开裂,裂纹为树枝状沿晶型裂纹,在启裂区域有较多的沿晶二次裂纹,具有鸡爪状纹的氢脆断口特征。

(2) 裂纹启裂位置和裂纹内部有腐蚀产物存在,腐蚀产生的氢和材料本身存在的可扩散氢是发生氢致滞后断裂的主要原因。

(3) 40CrNi2MoA 高强度合金钢进行脱氢处理后,抗拉强度和屈服强度明显下降,断面收缩率明显上升,冲击功也有所上升。脱氢处理可以有效改善40CrNi2MoA 高强度合金钢的氢脆敏感性。

#### 参考文献:

- [1] 褚武扬. 氢致开裂和应力腐蚀机理的前沿问题[J]. 腐蚀科学与防护技术,1993,5(3):151-157.
- [2] 李春光,于洋. 机翼盖板用 30CrMnSiNi2A 钢螺钉断裂失效分析[J]. 机械工程材料,2010,34(10):75-78.
- [3] 刘昌奎,李运菊,陶春虎,等. 紧固螺栓开裂原因分析[J]. 机械工程材料,2008,32(4):70-73.
- [4] 云江,申常江,雷小荣. 40CrNi2MoA 钢大锻件的调质热处理[J]. 金属热处理,2004,29(12):68-70.
- [5] 刘孝红,王毛球,时捷,等. 热处理对 25CrNi2MoVNb 钢氢脆敏感性的影响[J]. 金属热处理,2009,34(12):9-13.
- [6] CHEN T C, CHEN S T, KAI W. Effect of the degree temper embrittlement on the susceptibility of hydrogen

embrittlement[J]. Transactions ISIJ,1992,22(9):285-291.

- [7] PAN C, SU Y J, CHU W Y, et al. Hydrogen embrittlement of weld metal of austenitic stainless steels[J]. Corrosion Science,2002,44:1983-1993.
- [8] 张永健,惠卫军,项金钟,等. 晶粒尺寸对 42CrMoVNb 钢超高周疲劳性能的影响[J]. 金属学报,2009(7):880-886.
- [9] XIAO G Z, DI H S. Delayed fracture resistance and mechanical properties of 30MnSi high strength steel[J]. J Iron Steel Res,2009,16:49.
- [10] 武光宗,王毛球,王春芳,等. 回火马氏体钢中氢的扩散行为及其氢脆敏感性[J]. 材料热处理学报,2012,33(1):136-140.
- [11] AHMAD S A, RYDER D A, DAVIES T J. On the embrittlement of fracture toughness specimens of two high strength steels[J]. Eng Frac Mech,1975(7):357.
- [12] LI H L, GAO K W, QIAO L J, et al. Strength effect in stress corrosion cracking of high strength steel in aqueous solution[J]. Corrosion,2001,57:295.
- [13] TSAY L W, LU H L, CHEN C. The effect of grain size and ageing on hydrogen embrittlement of a maraging steel[J]. Corr Sci,2008,50:2506.
- [14] 周顺深. 钢脆性和工程结构脆性断裂[M]. 上海:上海科学技术出版社,1983:225-227.

(上接第 546 页)

力,介质中含有微量的敏感性杂质,引起应力腐蚀开裂,裂纹金相组织均为晶间型特征,裂纹虽已消除,由于残余应力的存在,在设备使用过程中可能会继续产生开裂。

(2) 爆炸焊复合钢板的热处理没有明确的标准可以参考,建议设计和制造部门充分沟通,若设备有耐蚀性要求,需考虑残余应力消除的问题,残余应力消除是否按照基材的热处理来进行,取决于覆层材料的属性,热处理前宜进行系列试验,验证热处理后材料的综合性能是否满足使用要求。若设备仅有防锈要求,本案例中涉及的不锈钢复合钢板即属此类,设计时不能只考虑基材的强度问题,也需考虑介质中可能存在的杂质对不锈钢开裂的敏感性问题,一旦产生开裂,会快速扩展到基层。

(3) 大型爆炸焊复合钢板封头的设计建议优先选择球形封头,虽然球形封头的加工难度较大,但球形封头受力均匀,对于大型压力容器的球形封头可以采用先分瓣再组装成型的制造过程,减少加工制

造难度。

#### 参考文献:

- [1] 中国石化设备管理协会. 石油化工装置设备腐蚀与防护手册[M]. 北京:中国石化出版社,2001:411-412.
- [2] 谢铁军,刘东学,陈钢,等. 压力容器应力分布图谱[M]. 北京:北京科学技术出版社,1994.
- [3] 陈可华,金元文. 椭圆形封头的受力分析[J]. 机械设计与制造,2007(3):37-39,55.
- [4] 付磊,罗云蓉,付伶. 球形封头的应力分布研究[J]. 机械设计与制造,2013(10):209-212.
- [5] 任晶波,王殿祥,王晓旭,等. 不锈钢等复合钢板热处理状态对各项性能的影响[J]. 石油和化工设备,2012(6):16-19.
- [6] 孙望秋. 材质及高,中温消应处理对不锈钢复合钢板耐蚀性的影响[J]. 南化科技,1993,14(4):30-32.
- [7] 孙晓龙,张宏祥,葛树涛. 热成形和热处理制度对 16MnR+00Cr17Ni14Mo2 复合钢板组织和性能的影响[J]. 压力容器,2008,25(1):47-49.