

# 316L 不锈钢人孔盖板爆裂原因分析

刘劲松, 常治平, 吴进强

(四川川润股份有限公司 材料研究所, 自贡 643000)

**摘要:**通过化学成分分析、宏观与微观检验、腐蚀产物分析等方法,对 316L 不锈钢人孔盖板发生爆裂的原因进行了分析。结果表明:人孔盖板爆裂是由应力腐蚀引起的。造成应力腐蚀的原因是采用冷冲压成型的球形人孔盖板具有较大的残余拉应力,而其工作环境中也存在周期性变化的工作应力。

**关键词:**不锈钢; 人孔盖板; 应力腐蚀; 真空制盐

**中图分类号:** TG142.71

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1001-4012(2012)03-0197-03

## Reason Analysis on Bursting of Manhole Cover of 316L Stainless Steel

LIU Jin-song, CHANG Zhi-ping, WU Jin-qiang

(Materials Research Institute, Sichuan CRUN Co. Ltd., Zigong 643000, China)

**Abstract:** The bursting reason of manhole cover of 316L stainless steel was analyzed by means of chemical composition analysis, macro and micro examination, corrosion product analysis. The results showed that manhole cover bursted due to stress corrosion. The reason of stress corrosion was that there would be strong residual stress in hemispherical manhole cover by cold pressing, while stress with cyclical change also existed in the working condition.

**Keywords:** stainless steel; manhole cover; stress corrosion; vacuum salt production

316L 是石油化工容器中常用的超低碳奥氏体不锈钢材料<sup>[1]</sup>。由于该材料在富氯离子环境中具有较强的抗点蚀能力,因此在真空制盐设备中也被广泛应用。

某盐化公司采用真空制盐工艺,其真空制盐设备 I 效加热室在正常运行 5 a(年)后,下循环管人孔盖板发生爆裂事故,笔者自现场取回人孔盖板残片,展开了断裂失效分析。

### 1 理化检验

#### 1.1 宏观检验

该残片位于 I 效人孔盖板中心部位,见图 1,材料为 316L 不锈钢,厚度 6 mm,工作温度约 130 ℃,环境介质为真空制盐卤水,工作压力约 0.9 MPa。

该残片呈近似圆形全断裂,见图 2,裂纹断口附近无明显塑性变形,此外,在残片上还发现大量贯穿性裂纹,残片内壁有大量点蚀斑。该残片经敲击发现已没有金属声,表明其金属物理特性已丧失殆尽。肉眼观察可见断口上存在黑、白、黄色附着物,内壁、断口上均有腐蚀坑,经超声波清洗后,显示为各种形态各异、大小不同的点蚀坑。

#### 1.2 化学成分分析

该人孔盖板为球凸形结构,设计材料为 316L



图 1 失效人孔盖板位置示意图

Fig. 1 Position schemes of the failed manhole cover

收稿日期: 2011-06-28

作者简介: 刘劲松(1986—),男,助理工程师。

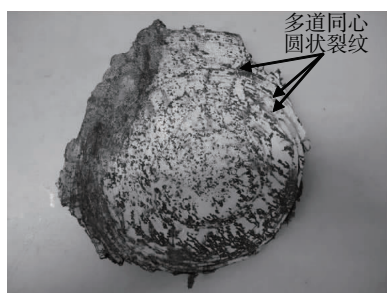


图2 断裂残片内壁的宏观形貌  
Fig. 2 Macro morphology of the inner surface of fracture piece

表1 人孔盖板的化学成分(质量分数)

Tab. 1 Chemical Compositions of manhole cover (mass)

%

条件	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
实测值	0.027	0.46	1.40	0.032	0.001	16.62	2.03	10.23
标准值	≤0.030	≤0.75	≤2.00	≤0.045	≤0.030	16.00~18.00	2.00~3.00	10.00~14.00

#### 1.4 金相检验

断裂残片的显微组织见图3,可见为奥氏体,晶粒度约6~7级,符合ASME标准SA-240/SA-240M中对显微组织的相关规定。且残片材料金相视场内可见多处晶界裂纹。

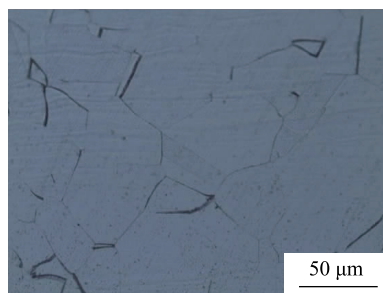


图3 断裂残片的显微组织  
Fig. 3 Microstruction of fracture piece

#### 1.5 断口分析

由图2可见,断裂残片内表面存在多条同心圆状裂纹,均垂直于该不锈钢板冷成型变形反向。引起该试样爆裂的即为一条贯穿性同心圆裂纹。此外,外壁也有多条贯穿性直道裂纹,由于该裂纹不是引起此次人孔盖板断裂的主要原因,因此仍重点关注同心圆状环形裂纹的产生机理。

同心圆状环形裂纹的显微形貌见图4~6,可见为典型的树根状裂纹,在扫描电镜下呈现穿晶形态,部分裂纹起源于内壁点蚀坑底部。

不锈钢,交货状态为固溶态,经冷冲压一焊接加工成型。使用美国热电ARL-3460直读光谱仪进行化学成分分析,结果见表1。将分析结果与ASME材料卷SA-240/SA-240M中所规定的316L不锈钢的化学成分对照,可见试样各项化学成分均符合标准要求。

#### 1.3 夹杂物检查

以GB/T 10561-2005附录A为评级标准,对残片进行夹杂物检查,残片试样非金属夹杂为D类球状氧化物细系1.0级,粗系0.5级,表明该材料夹杂物控制在正常水平。

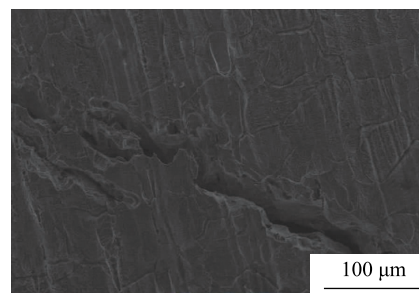


图4 穿晶裂纹的扫描电镜形貌  
Fig. 4 SEM pattern of transgranular crack

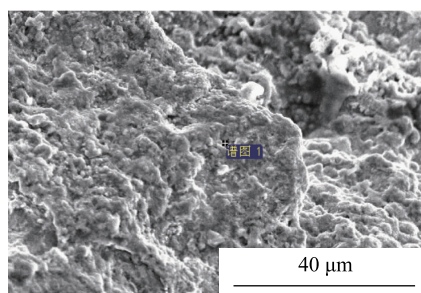


图5 起源于点蚀坑底的裂纹形貌  
Fig. 5 Morphology of crack under the pit

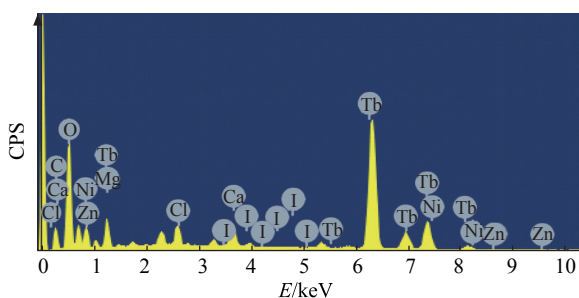


#### 1.6 腐蚀产物分析

对残片断口上附着的腐蚀产物进行EDS分析,发现了大量复杂的腐蚀产物,如图7所示。



(a) 电子图像



(b) EDS 谱

图 7 腐蚀产物的 EDS 分析结果

Fig. 7 EDS results of corrosion products

(a) Electronic image (b) EDS spectrum

## 2 分析与讨论

### 2.1 材料冶金质量

从残片试样的显微组织和夹杂物水平上均未发现明显异常,唯一引起关注的是疑似晶界开裂造成材料丧失金属物理性能的现象。根据文献[2—3],现场运行工况下造成此种晶界弱化开裂现象通常有以下几种因素:①中子辐照造成材料脆化;②晶间腐蚀;③应力腐蚀。由于盐厂工作环境不存在中子辐照环境,故推测是由于腐蚀造成材料脆化,进而使其丧失金属物理性能。

### 2.2 316L 不锈钢人孔盖板断裂失效机理

众所周知,奥氏体不锈钢在拉应力和特定腐蚀性环境的联合作用下,会出现低于材料强度极限的脆性开裂现象,致使设备部件过早失效。与单纯由腐蚀和纯力学作用引起的开裂不同,即使腐蚀性极弱的介质也能引起这种应力腐蚀,其特征是材料发生脆化,在没有塑性变形的情况下突然开裂<sup>[4]</sup>。通常,应力腐蚀裂纹起源于表面点蚀坑,并伴生有大量的二次裂纹分叉,呈现典型的树杈状形貌。这是因为在应力腐蚀裂纹扩展的过程中,材料—环境系统不断“选择”最优扩展路径,达到降低应力腐蚀裂纹尖端应力集中系数,释放拉应力能量的目的。

此外,应力腐蚀开裂必须同时满足材料、应力和环境三者的特定条件<sup>[5]</sup>。针对 316L 类铬-镍-钼系奥氏体不锈钢,虽然对氯离子的点蚀倾向不敏感,但是在氯离子溶液环境下,仍然有较强的应力腐蚀倾向,尤其当工作环境存在硫化氢时,应力腐蚀裂纹极易在此处萌生并扩展。在盐厂卤水检测报告中也发现了硫化氢的存在。故在盐厂真空制盐恶劣的氯离子腐蚀环境下,316L 不锈钢往往在 70 °C 以上即可发生应力腐蚀。

### 2.3 同心圆状裂纹形成机理

应力腐蚀裂纹的扩展总是沿与拉应力垂直的方向。首先分析该人孔盖板的加工工艺,发现该人孔盖板是球形凸面设计,采用冷加工成型工艺,变形量约在 3%~5%,因考虑变形量较小及成本因素,加工后通常不进行消除应力热处理,其必然存在加工残余应力。其次设备每天两次的周期性加热启动、停机冷却,容器内的工作压力、温度总是处于周期性变化过程中,也成为人孔盖板附加应力的来源。分析发现,无论加工残余应力,还是设备工作附加应力,均是沿圆弧盖板冷加工成型方向,故圆弧人孔盖板大量分布的裂纹均为垂直于拉应力方向的环向同心圆状裂纹,如图 8 所示。

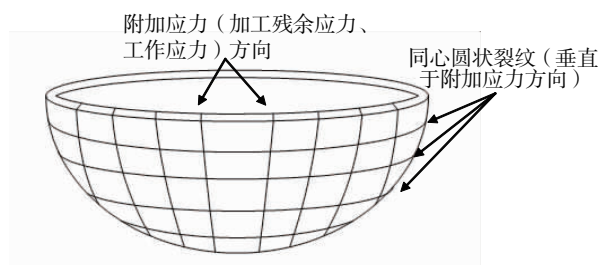


图 8 同心圆状裂纹形成机理示意图

Fig. 8 Mechanism schemes of cracks of concentric circles

### 2.4 SA240-316L 与 00Cr17Ni14Mo2 不锈钢在盐厂使用工况下的区别

化学分析结果显示,该 316L 不锈钢的化学成分虽然合格,但铬、钼、镍元素的含量均偏下限,尤其在应力腐蚀环境中,镍含量对不锈钢耐应力腐蚀性能起到至关重要的作用。但相关研究资料显示<sup>[6]</sup>,对于铬-镍系不锈钢,镍的质量分数在 10% 左右时,其耐氯离子应力腐蚀性能最差。前述化学分析显示,该 316L 不锈钢的镍含量恰好在此范围附近。国内等同于 316L 不锈钢的材料是 00Cr17Ni14Mo2 不锈钢,其镍含量相应更高,对耐应力腐蚀更有积极

(下转第 205 页)

应力。在扫描电子显微镜下观察未发现明显的疲劳辉纹,但存在少量二次裂纹,断口呈现准解理特征,断面 B 上观测到逆时针方向的扭转韧窝,在断面 A 和退刀槽相交部位发现微裂纹(图 3)。这些结果表明,螺栓从根部结构不连续的退刀槽上萌生出了初始裂纹,由于初始裂纹的存在导致螺栓抗疲劳能力下降,最终在载荷长时间作用下螺栓发生了疲劳断裂。

### 3 结论与建议

(1) 螺栓断裂的主要原因是螺栓在应力集中的退刀槽上萌生了初始裂纹,在载荷长时间的作用下发生疲劳破坏,最终导致螺栓发生了疲劳断裂失效。

(2) 合理设计螺栓结构,提高退刀槽等应力集中部位的加工粗糙度要求,减少应力集中,提高抗疲劳能力。

(3) 合理布置螺栓,使螺栓载荷均匀分布,避免载荷波动,防止螺栓疲劳破坏。

#### 参考文献:

- [1] 常用结构钢金相图谱编写组. 常用结构钢金相图[M]. 北京:国防工业出版社,1982:37-58.
- [2] 黄春峰. 18Cr2Ni4WA 钢热处理工艺研究[J]. 机械设计与制造工程,1999,28(4):49-50.
- [3] 陈黄埔,金达增,邓赠杰,等. 18Cr2Ni4WA 钢不同组织形态及其机械性能之间关系[J]. 西安交通大学学报,1984,18(6):45-54.

(上接第 199 页)

影响。可见,虽然通常认为是同种材料,但国内外相关标准的差异,对其具体使用性能仍然是有一定影响的。

### 3 结论与建议

(1) 该 316L 不锈钢人孔盖板脆化爆裂的原因在于其发生了应力腐蚀。造成应力腐蚀的原因是采用冷冲压成型的球形人孔盖板具有较大的残余拉应力,而其工作环境中也存在周期性变化的工作应力。

(2) 从应力腐蚀作用机理考虑,建议后续更换成平板形人孔盖板设计,材料建议选择 00Cr17Ni14Mo2 不锈钢,或选择耐氯离子应力腐蚀用双相钢材料,如 2205 钢。

(上接第 202 页)

(2) 结构方面:避免承力构件局部应力集中,引起承力处断裂。对连接螺柱根部进行圆滑过渡,尽量减小根部的应力集中系数;为提高连接螺柱根部承载能力,在满足结构整体尺寸要求的前提下,增大连接螺柱根部直径;从连接螺柱承力角度考虑,可在整体结构重心处增加飞控部件与弹壳的连接约束,减小电子组合和电子舱骨架部分施加给连接螺柱的弯矩,从而减小连接螺柱根部所受的应力水平。

### 5 结论

(1) 连接螺柱断裂的主要原因是其疲劳抗力不足以及结构上的承力构件布局不合理。

(2) 经过试验验证,通过更换连接螺柱材料以及增加飞控部件重心附近连接约束的方式可避免连接螺柱再次断裂失效。

#### 参考文献:

- [1] 刘文琰. 结构可靠性设计手册[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 龚庆祥. 型号可靠性工程手册[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [3] 祝效华. ANSYS 高级工程有限元分析范例精选[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [4] 安刚,龚鑫茂. 随机振动条件下的疲劳失效分析[J]. 机械科学与技术,2000,19(s):40-42.
- [5] 张栋. 失效分析[M]. 北京:国防工业出版社,2004.

#### 参考文献:

- [1] 陆世英,张廷凯,康喜范,等. 不锈钢[M]. 北京:原子能出版社,1995:246.
- [2] 张栋,钟培道. 失效分析[M]. 北京:国防工业出版社,2008:194-197.
- [3] REVIE R W. 尤利格腐蚀手册[M]. 杨武,译. 北京:化学工业出版社,2005:138-141.
- [4] 吴剑. 不锈钢的腐蚀破坏与防蚀技术[J]. 腐蚀与防护,1997,18(4):38-40.
- [5] 骆素珍,彭建国. 316L 不锈钢换热器的失效原因分析[J]. 宝钢技术,2007(4):24-28.
- [6] 龚敏,余祖孝,陈琳. 金属腐蚀理论与腐蚀控制[M]. 北京:化学工业出版社,2009:121.