

# 浅析压力容器应力腐蚀及其控制措施

杨 洲, 李明君, 王 蕾

(四川科宏石油天然气工程有限公司输气分公司, 四川 成都 610213)

**摘 要:**分析了压力容器应力腐蚀的危害性及其影响因素,阐述了压力容器应力腐蚀的形态特征,综述了近年来学者们对压力容器应力腐蚀的研究进展,提出了控制压力容器应力腐蚀的措施。

**关键词:**压力容器; 应力腐蚀; 残余应力

**文章编号:** 1006-5539(2009)02-0051-03 **文献标识码:** B

压力容器是工业生产中的常用设备,在石油、化工、冶金、食品、制药、城市煤气、环境工程、重型机械、能源、核站、宇航工程和海洋开发等领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>。

应力腐蚀断裂 (Stress Corrosion Cracking SCC) 是指敏感金属或合金在一定的拉应力 (施加的外应力或残余应力) 和一定的腐蚀介质共同作用下产生的一种特殊断裂方式。应力腐蚀断裂是化学工业、天然气与石油开采及加工工业、冶金工业、火电工业、核电工业等领域使用的压力容器的最危险损伤之一。据统计,应力腐蚀造成的安全事故在腐蚀事故中所占的比例就高达 35%。应力腐蚀所引起的破坏在事先往往没有明显的变形预兆而突然发生脆性断裂,其危害性相当大,可以说是一种灾难性腐蚀<sup>[2]</sup>。因此,研究压力容器的应力腐蚀断裂,对确保压力容器安全运行是十分必要的。

## 1 压力容器应力腐蚀的影响因素<sup>[3]</sup>

### 1.1 拉应力因素

压力容器承受的拉应力包括负载应力和残余应力,残余应力包括焊接残余应力、金属冷加工变形产生的残余拉应力以及由于结构设计不合理产生的应力集中等。当压力容器所受的拉伸应力  $\sigma$  超过临界应力  $\sigma_{SCC}$  时就会发生应力腐蚀断裂。据统计,应

力腐蚀断裂事故有 80% 以上是由于残余拉应力引起的,而压力容器正好具备这一因素。

### 1.2 环境因素

环境温度、环境介质中某些成分的浓度、PH 值、溶解氧等对金属或合金的应力腐蚀断裂敏感性都有不同程度的影响。如特征介质 (如  $Cl^-$ ) 浓度越大,越容易引起应力腐蚀断裂。

压力容器在不同的工作环境中,具有不同的应力腐蚀断裂的温度限。当低于温度限时,不发生应力腐蚀断裂,而当在临界温度以上时,则腐蚀断裂加快。

PH 值对应力腐蚀的影响也相当大,因为酸性溶液对低碳钢的硝脆有加速作用,凡是水溶液呈酸性的硝酸盐类都能促进硝脆。如在不锈钢应力腐蚀断裂中,PH 值越低应力腐蚀速度就越快。

当压力容器处于热水和高温水环境中时,溶解氧对应力腐蚀断裂起着决定性的作用,例如在含有微量  $Cl^-$  的溶液中,如果没有溶解氧,Cr-N 不锈钢就不会产生腐蚀断裂。

### 1.3 冶金因素

#### 1.3.1 成分影响

杂质对金属 (或合金) 的 SCC 敏感性影响颇大。如纯铁或低碳钢除氮、除碳后,在硝酸盐中不会发生应力腐蚀断裂,纯铁中含有 0.43% 的氮时,应力腐蚀断裂抗力明显下降。

收稿日期: 2008-04-12

作者简介: 杨 洲 (1983-), 女, 四川宣汉人, 助理工程师, 学士, 主要从事压力容器设计工作。手机: 13880489915。

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

### 1.3.2 材料强度

在不同条件下, 压力容器的材料强度对应力腐蚀断裂有着不同的影响, 对于氢脆 (Hydrogen Embrittlement, 简称 HE) 型的 SCC 降低强度可有效地降低钢的 SCC 敏感性, 对塑性变形起控制作用的 SCC 适当提高钢的屈服强度也可提高抗腐蚀断裂的能力。

## 2 应力腐蚀断裂的形态特征<sup>[4]</sup>

应力腐蚀断裂的特点是几乎完全没有金属宏观体积上的塑性变形, 这种断裂是压力容器灾难性事故以及大量材料损耗的原因。在无裂纹、无蚀坑或无缺陷的情况下, 应力腐蚀断裂过程可分为三个阶段: 首先是孕育阶段, 即由于腐蚀引起裂纹或蚀坑的阶段; 其次为裂纹扩展阶段, 即由裂纹源或蚀坑到达极限应力值 (单位面积所能承受最大载荷) 为止的这一阶段; 最后是失稳断裂阶段。

腐蚀区裂纹一般呈树枝状, 主干方向与拉应力方向垂直; 对于某些材料如奥氏体不锈钢裂纹及断口的形态与应力大小有密切关系: 当应力较小时, 其裂纹为一条直裂纹; 应力中等时裂纹呈分枝形裂纹; 应力较大时裂纹呈网络状裂纹。因此, 可以根据裂纹形状对压力容器所受应力情况作初步判断。裂纹断口一般呈脆性断裂的特征, 没有宏观的塑性变形的痕迹。

从微观上观察, 应力裂纹有沿晶裂纹、穿晶裂纹和穿晶沿晶混合裂纹。在混合裂纹中有一种是主要的, 即以沿晶为主或者以穿晶为主。不同的合金在不同的介质中有不同的裂纹趋向。镍基合金、铝合金和高强度钢多是沿晶型, 奥氏体不锈钢大多是穿晶型, 而钛合金为混合型的。即使是同种合金, 随着环境、应力大小的改变, 裂纹形态也会随之改变。

## 3 压力容器应力腐蚀的研究进展

近年来对压力容器应力腐蚀的研究较多。1999年, 孙华光结合液化气球罐检测实例, 分析了液化气球罐表面裂纹的成因, 提出了减少和避免延迟裂纹与应力腐蚀裂纹形成及扩展的措施, 即降低钢材的淬硬倾向; 选择合理的焊接工艺和整体热处理工艺; 避免强行组装; 尽量少使用工卡具。此外, 焊后进行

整体热处理也可防止应力腐蚀裂纹的产生。对使用中的贮罐, 在不具备整体热处理条件时可采取对焊缝表面进行喷丸处理来防止应力腐蚀裂纹的产生和扩展<sup>[5]</sup>。张纯楠和王志文讨论了高强钢 CF62用于液氢球罐防止发生应力腐蚀的可行性, 并对球罐焊缝及其热影响区产生应力腐蚀开裂的问题提出了具体的解决办法: 在应力腐蚀的多发区——焊缝及热影响区的表面用热喷涂的方式喷涂上金属涂层, 将腐蚀介质与焊缝表面隔开, 并用牺牲阳极的方法保护球罐材料, 避免基体发生应力腐蚀<sup>[6]</sup>。2002年, 杨景针对石化企业压力容器中的典型腐蚀环境, 优化筛选配制了适用性涂料并进行了模拟环境与实物环境的试验研究, 提出以表面涂层技术为基础与断裂力学安全评估方法相结合进行在用压力容器的综合延寿, 以解决在介质作用环境下的压力容器的安全性问题<sup>[7]</sup>。文献<sup>[8]</sup>中介绍了将压力容器用钢防止硫化氢应力腐蚀的热喷涂技术, 实验表明将压力容器用钢——WH530钢经热喷涂后可提高抗 H<sub>2</sub>S 应力腐蚀能力, 并得出热喷涂铝涂层较镀锌复合涂层更适于抗 H<sub>2</sub>S 应力腐蚀的结论。在对氨制冷压力容器应力腐蚀开裂原因的研究中, 曹志明得出的结论为: 氨制冷压力容器应与非制冷用的氨容器分开处理, 将介质、材料、结构设计和焊接工艺进行合理控制, 即便不采用焊后热处理亦能有效地解决氨制冷压力容器的应力腐蚀开裂问题, 提出控制氨制冷压力容器应力腐蚀开裂的措施是: 改善材质、控制介质、降低和消除应力 (尽量避免或减小应力集中, 尽量避免或减少残余应力, 采用热处理消除残余应力)<sup>[9]</sup>。刘伟芳在文献<sup>[10]</sup>中提出的防止储存高含硫原油的球罐应力腐蚀开裂的方法是: 在球罐内壁与腐蚀介质间设置隔离层并且严格控制进入球罐的总硫及 H<sub>2</sub>S 采用阴极保护法、选择材料强度及硬度较低, 或含硫超低的优质钢制造新的球罐用于盛装介质总含硫量或含 H<sub>2</sub>S 量超标的原料, 并在最短的时间内将介质返送至脱硫装置; 采用喷丸处理以及热处理方法消除焊接残余应力。

## 4 控制压力容器应力腐蚀断裂的措施

通过以上对压力容器应力腐蚀机理的分析可以看出, 由于压力容器的腐蚀涉及到材料、结构设计、

制造、工艺操作等多种因素, 因此控制压力容器腐蚀应在这几个方面采取相应的对策。

#### 4.1 合理选材

应该综合考虑压力容器的具体用途和工矿环境来选材。若工作温度比较高, 则需考虑材料的热强度和热脆性。同时还要考虑材料耐局部腐蚀如晶间腐蚀、孔蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀、氢探伤等性能。

#### 4.2 设计合理的结构

压力容器设计时, 应注意以下几方面: a 焊缝应尽量远离应力集中处; b 结构不连续处应圆滑过渡; c 避免采用刚性过大的结构; d 避免采用静不定结构。

#### 4.3 正确的制造方法

为避免产生残余应力, 在制造压力容器时应采用热加工成型。如必须采用冷加工成型时, 应采取喷丸或热处理等措施消除冷加工残余应力。根据具体需要, 还可以应进行整体热处理或局部热处理来消除应力。为防止不锈钢制压力容器焊缝的晶间腐蚀, 可采用小规范焊接, 使输出热量少, 并尽量缩短焊接热循环。对高强度不锈钢和低合金高强度钢, 焊接时应采用烘烤过的低氢焊条, 焊接过程中, 周围环境应保持清洁干燥, 应防止水和水蒸气进入熔池导致焊缝氢脆。

#### 4.4 衬里防护

有些压力容器内介质的腐蚀性特别强, 可采用加衬里的方法来解决腐蚀问题或者采用表面改性技

术、表面涂覆技术、阴极保护技术来提高压力容器抗蚀能力。

## 5 结语

压力容器应力腐蚀对设备的安全运行威胁极大, 不容忽视。在设备维护期间, 要严格执行有关法规, 根据设备检修有关规定, 切实做好定期检查、取样, 掌握压力容器在运行中缺陷的发展和腐蚀情况, 对发现的问题及时采取补救措施, 防止设备继续腐蚀, 延长使用寿命, 确保压力容器安全运行。

#### 参考文献:

- [1] 丁伯民, 蔡仁良. 压力容器设计——原理及工程应用 [M]. 北京: 中国石化出版社, 1992
- [2] 陈匡民, 火时中. 化工机械材料腐蚀与防护 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1990
- [3] 中国腐蚀与防护学会. 石油工业中的腐蚀与防护 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001
- [4] 黄永昌. 金属腐蚀与防护原理 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989
- [5] 孙华光. 液化气球罐表面裂纹成因分析 [J]. 化学工业与工程技术, 1999 20(2): 27-29
- [6] 张纯楠, 王志文. 高强度钢液氨球罐防止应力腐蚀的可行性分析 [J]. 化工机械, 1999 26(1): 55-58
- [7] 杨 景. 表面涂层技术在压力容器腐蚀防护上的应用 [J]. 压力容器, 2002 19(5): 43-47
- [8] 王 慕, 张秀英, 孙耀峰, 等. 防止硫化氢应力腐蚀的热喷涂技术研究 [J]. 压力容器, 2002 19(1): 4-5
- [9] 曹志明. 氨制冷压力容器应力腐蚀开裂原因及其对策 [J]. 压力容器, 2003 20(5): 42-44
- [10] 刘伟芳. 球罐应力腐蚀开裂分析及对策 [J]. 石油化工设备, 2005 34(4): 70-71