

推进剂贮箱用 2A14 铝合金接头应力腐蚀性能研究

刘观日^{1,2} 雷勇军¹ 刘德博² 常志龙² 王渭平³

(1 国防科学技术大学航天科学与工程学院,长沙 410073)

(2 北京宇航系统工程研究所,北京 100076)

(3 长征机械厂军事代表室,成都 610100)

文 摘 为了研究推进剂贮箱用 2A14 铝合金接头介质相容性,分析了铝合金的应力腐蚀机理,以 2A14-T6 铝合金本体、搅拌摩擦焊(FSW)接头和变极性氩弧焊(VPTIG)接头为研究对象,通过慢应变速率拉伸法进行应力腐蚀试验研究。结果表明,2A14 铝合金在 3.5% NaCl 溶液中存在应力腐蚀现象,FSW 接头的抗腐蚀性优于 VPTIG 接头。

关键词 铝合金,应力腐蚀,慢应变速率法

中图分类号:V146.2+1

10.12044/j.issn.1007-2330.2017.02.010

Stress Corrosion Study of 2A14 Alloy Joint Used on Propellant Tank

LIU Guanri^{1,2} LEI Yongjun¹ LIU Debo² CHANG Zhilong² WANG Weiping³

(1 College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

(2 Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076)

(3 Changzheng Machinery Factory Military Representative Office, Chengdu 610100)

Abstract In order to study the compatibility of 2A14 alloy joint used on propellant tank, stress corrosion mechanism of aluminum alloy was analyzed in this paper. The base metal, FSW joint and VPTIG joint of 2A14-T6 aluminum alloy were chosen to make corrosion experimentation with slow strain rate method. The result shows 2A14 aluminum alloy have stress corrosion tendency in 3.5% NaCl solution. And the corrosion resistance of FSW joint is better than VPTIG joint.

Key words Aluminum alloy, Stress corrosion, Slow strain rate method.

0 引言

铝及铝合金具有高比强度、高比模量、高耐蚀性及易加工成型等诸多优点,在航空航天领域得到广泛应用,目前其产量和使用量仅次于钢铁材料,居有色金属之首位。自上世纪初铝合金诞生以来,应力腐蚀开裂(SCC)问题就成为铝合金广泛应用的一大瓶颈。

20 世纪 40 年代,德国齐柏林飞艇的铝合金构件因应力腐蚀而断裂,美国阿波罗登月舱以及土星号火箭结构也发生了类似的应力腐蚀破裂问题^[1]。即便是现在研制喷气式飞机也不可避免的存在铝合金应力腐蚀问题。应力腐蚀最主要的特征是结构件在断裂破坏前没有明显的预兆,而其破坏性以及危害性却极大。因此,铝合金应力腐蚀开裂问题倍受学术界关

注^[2,3],多年来国内外众多学者在此领域做了大量的研究工作,并在铝合金的 SCC 破坏机理、影响因素及防范控制措施等方面已取得了较大研究进展。

在通常情况下,金属材料产生 SCC 需要具备三个基本条件:(1)材料本身必须对 SCC 敏感;(2)结构件必须处于特定的腐蚀环境中(对铝合金而言,在盐水介质中);(3)结构件必须受拉应力作用。推进剂贮箱结构充分具备了以上条件,特别是对于长期接触推进剂介质的贮箱而言,在贮箱选材时需要考虑材料的应力腐蚀性能。我国航天器贮箱通常采用 2XXX 系列铝合金作为结构主材料(如我国 CZ-3A 系列火箭贮箱即采用了 2A14 铝合金),其中 2A14 铝合金在成熟火箭贮箱应用最为普遍,而这类铝合金通

收稿日期:2016-12-28

第一作者简介:刘观日,1975 年出生,博士研究生,从事弹箭体结构设计工作。E-mail:13683157563@139.com

常对 SCC 比较敏感,有必要对材料的 SCC 性能进行研究。

本文对铝合金材料 SCC 的机理进行了分析,采用慢应变速率拉伸法(SSRT)对 2A14 铝合金本体和两种工艺焊接接头的 SCC 性能进行深入的试验对比,研究了应力腐蚀对材料性能的影响,对两种焊接工艺的应力腐蚀敏感性进行了对比分析,为 2A14 铝合金的工程应用提供了一定支撑。

1 2A14 铝合金的 SCC 试验

1.1 试验方法

SCC 试验方法多种多样,如恒载荷法、恒应变法、慢应变速率拉伸试验法(SSRT,又称恒应变速率法)等,SSRT 方法是一种将材料与环境体系的应力腐蚀敏感性进行快速分类的实验室方法,其优点是试验周期短,可快速鉴别材料应力腐蚀敏感性。GB15970^[4]和 HB7235 标准^[5]中将 SSRT 法作为评价金属腐蚀性能的一种有效方法。

对大多数金属材料来说,应变速率在 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 之间时力腐蚀最敏感,W. T. TSAI 等^[6]研究表明 7050-T7451 铝合金在中性 3.5% NaCl 溶液中应力腐蚀最敏感的应变速率为 $8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 。R. BRAUN^[7]研究表明 7050-T651 铝合金在人工海水中应力腐蚀最敏感的应变速率小于 10^{-6} s^{-1} 。因此,本文分别选取了 5×10^{-6} 、 1×10^{-6} 、 $5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 三种应变速率进行

SSRT 试验,腐蚀介质均采用 3.5% NaCl 溶液,每类试验均有 2 件空气中对比件。

1.2 试验件

选取 T6 态 2A14 铝合金,分别对本体材料、搅拌摩擦焊接头(FSW)和变极性氩弧焊接头(VPTIG)进行试验研究,具体试验矩阵见表 1 所示,试样典型结构尺寸见图 1。

表 1 SSRT 试验矩阵

Tab.1 SSRT sample matrix

件

序号	材料状态	试样类型	NaCl 溶液	空气
1	2A14-T6	本体	3	2
2	2A14-T6	FSW 接头	3	2
3	2A14-T6	VPTIG 接头	3	2

3 结果分析

通过 SSRT 试验,获得了各类试样在不同应变速率下的断裂强度和延伸率,结果见表 2 所示。

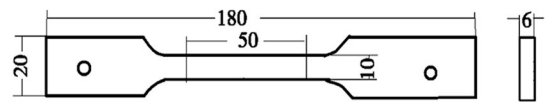


图 1 SSRT 试样示意图

Fig. 1 SSRT sample sketch

表 2 SSRT 试验结果

Tab.2 SSRT test results

试样编号	试样类型	环境	拉伸速率/ 10^{-6} s^{-1}	σ_b/MPa	$\delta/\%$
1-1	本体	空气	-	473.8	9.26
1-2	本体	空气	-	471.4	9.35
1-3	本体	3.5% NaCl	5	469.8	9.24
1-4	本体	3.5% NaCl	1	467.7	8.37
1-5	本体	3.5% NaCl	0.5	467.2	8.25
2-1	FSW 接头	空气	-	385.1	5.23
2-2	FSW 接头	空气	-	392.8	6.09
2-3	FSW 接头	3.5% NaCl	5	380.2	5.75
2-4	FSW 接头	3.5% NaCl	1	322.1	3.39
2-5	FSW 接头	3.5% NaCl	0.5	372.3	4.40
3-1	VPTIG 接头	空气	-	286.6	4.42
3-2	VPTIG 接头	空气	-	288.5	4.45
3-3	VPTIG 接头	3.5% NaCl	5	273.7	4.22
3-4	VPTIG 接头	3.5% NaCl	1	272.3	3.88
3-5	VPTIG 接头	3.5% NaCl	0.5	264.3	3.63

三种试样在空气中拉伸应力-应变曲线见图 2 所示,三种试样分别在空气与 3.5% NaCl 中的应力-应变曲线见图 3~图 5 所示。

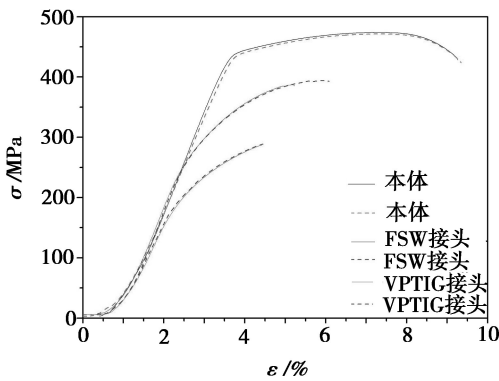


图 2 空气中三种试样拉伸应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain chart of the three type samples in air

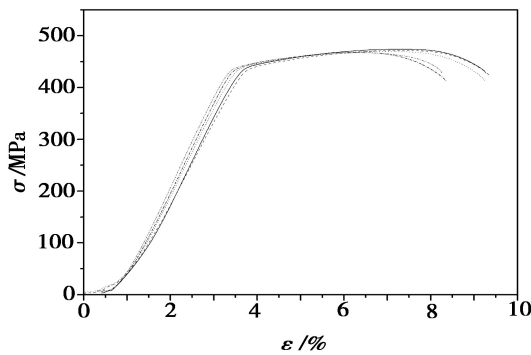


图 3 本体试样在不同介质、不同加载速率情况下应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain chart of the three basic type samples with different load-speeds in different media

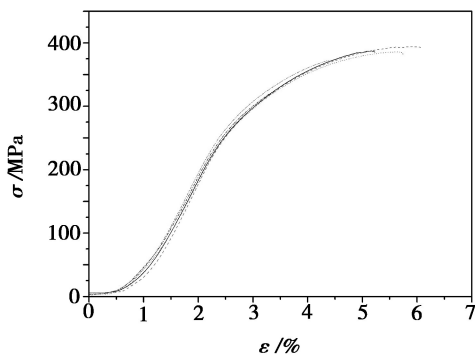


图 4 FSW 接头试样在不同介质、不同加载速率情况下应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain chart of the FSW samples with different load-speeds in different media

从表 2 与图 2 可以看出,在空气中进行试验的三种试样,每种各自重复性非常好,但是三种试样的应力-应变曲线明显不同,其中本体试样屈服强度高,存在明显的屈服点,且断裂延伸率高,在接近断裂前有明显的应力下降趋势;而焊接接头应力-应变曲线无明显屈服点,且断裂前应力一直在上升;FSW 焊接

接头屈服点及断裂应力明显高于 VPTIG 焊接接头,从表中数据可知,FSW 焊接接头强度达到本体的 82.3%,而 VPTIG 焊接接头强度仅达到本体的 60.8%,由此可见,FSW 接头性能要远高于 VPTIG 接头性能。

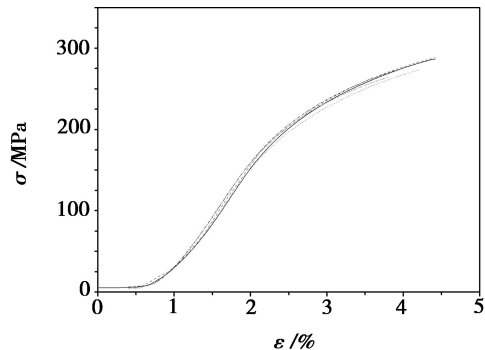


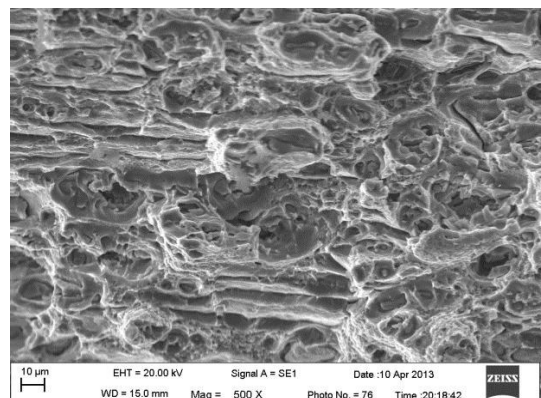
图 5 VPTIG 接头试样在不同介质、不同加载速率情况下应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain chart of the VPTIG samples with different load-speeds in different media

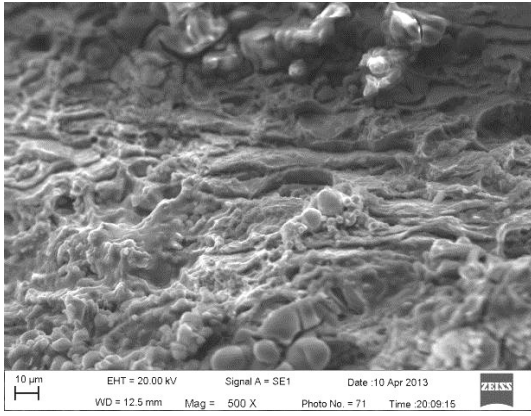
从表 2 和图 3 可以看出,采用慢应变速率拉伸试验的本体试样,其强度和延伸率都低于空气中本体性能,且随着拉伸速率的降低而降低,说明 2A14 铝合金本体在 3.5% NaCl 溶液中发生了应力腐蚀,在 $5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 速率情况下其强度下降约 1.2%,而延伸率下降了 11%,由此可见,应力腐蚀对延伸率影响更大。

从表 2 和图 4、图 5 可以看出,FSW、VPTIG 焊接接头采用慢应变速率拉伸试验后,其强度和延伸率基本上也随着拉伸速率的降低而降低,在 $5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 速率情况下其强度下降分别为 4.3%、8.0%,延伸率下降分别为 22%、18%,与本体试样数据对比可知,焊接接头对应力腐蚀更为敏感,其强度和延伸率下降更为明显,且 FSW 焊接接头抗应力腐蚀性要优于 VPTIG 焊接接头。

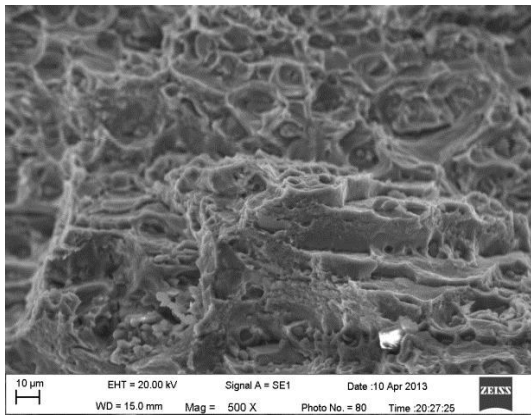
试验完成后,对各种试样的断口进行了微观组织观察,图 6~图 8 分别给出了 2A14 本体、FSW 接头、VPTIG 接头部分断口微观组织形貌。



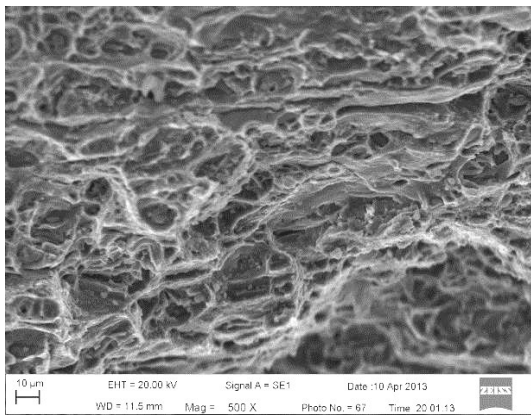
(a) 空气中



(b) 3.5% NaCl 溶液 $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$



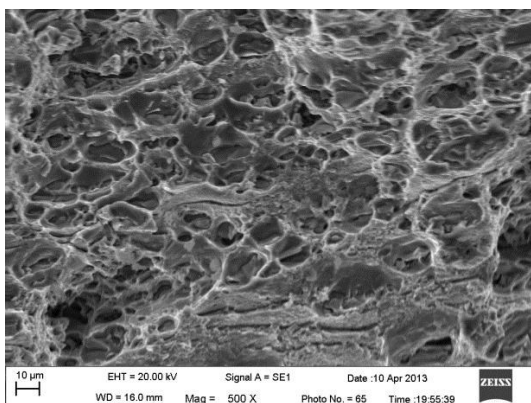
(c) 3.5% NaCl NaCl 溶液 $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$



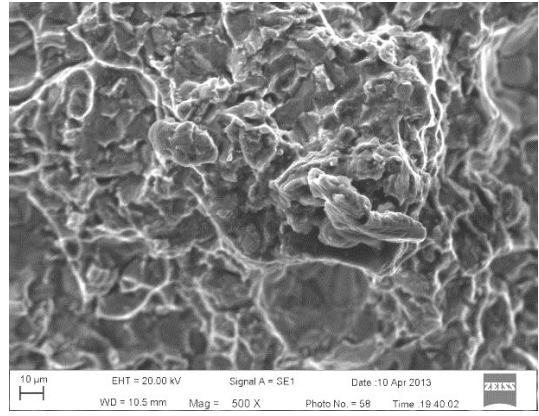
(d) 3.5% NaCl NaCl 溶液 $5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$

图 6 本体试样断口形貌

Fig. 6 Fracture section of the basic samples



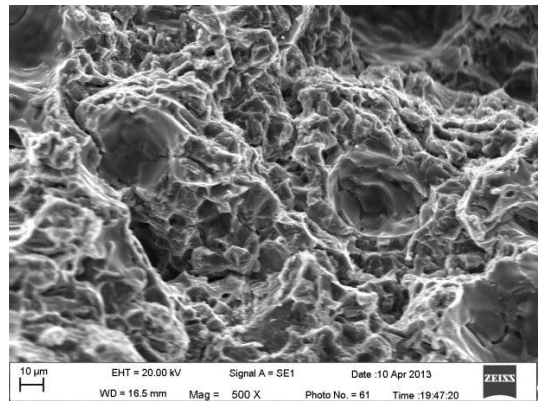
(a) 空气中



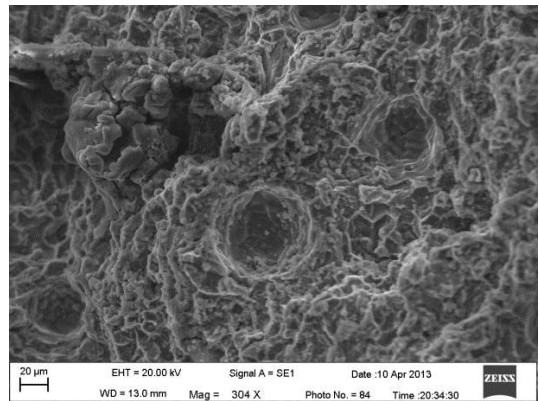
(b) 3.5% NaCl 溶液 $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

图 7 FSW 接头断口形貌

Fig. 7 Fracture section of the FSW samples



(a) 空气中



(b) 3.5% NaCl 溶液 $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

图 8 VPTIG 接头断口形貌

Fig. 8 Fracture section of the VPTIG samples

从图 6 可以看出,2A14 铝合金本体断口存在大量韧窝,属于韧性断裂,随着拉伸速率的降低,局部区域出现少量解理断口形貌,发生混合型断裂,由此可见,2A14 铝合金具有应力腐蚀倾向但敏感性并不高。

从图 7、图 8 可以看出,FSW 接头和 VPTIG 接头断口仍呈现韧性断裂,但是 VPTIG 接头韧窝不均匀,呈现一定程度脆性,慢应变速率拉伸断口出现较多解理断口形貌,其应力腐蚀敏感性比本体高。

(下转第 55 页)

mm 均压板超差区域较大,且超差程度大。可以看出,提高均压板厚度可以明显提高热管区域的平面度。

2.2 力学性能测试

试件按照有关标准进行无损检测合格,所有试验

件均无脱粘。

在试验件本体中截取试件,进行力学性能验证,主要测试夹层剪切强度和 90°剥离强度,测试结果见表 4。

表 4 力学性能测试统计

Tab.4 Results mechanical property tests

均压板厚度/mm	热管高度/mm	蜂窝高度/mm	L 向剪切强度/MPa	W 向剪切强度/MPa	90°剥离强度/N·cm ⁻¹
1.5	29.1 ⁰ _{-0.1}	29.2	0.85	0.59	24.4
		29.4	0.75	0.58	27.6
29.2		0.99	0.95	23.5	
29.4		0.81	0.74	26.0	
4		29.2	0.81	0.55	18.1
		29.4	0.79	0.55	16.85

从表中可以看出,均压板厚度的提高对于夹层的剪切强度影响较小,对于夹层 90°剥离强度的影响是随着厚度的增大,呈下降的趋势。均压板厚度从 1.5 mm 增大到 3 mm,90°剥离强度平均值仅下降 5%,并且远大于指标值 15 N/cm。相对于均压板从 1.5 mm 增大到 4 mm,剥离强度下降 32%,明显下降。因此采用 3 mm 均压板可以在不影响产品胶接性能的前提下有效提高蜂窝板均压板面热管区域局部平面度。

3 结论

通过蜂窝板热管区域平面度合格情况、蜂窝叠块及胶膜对于热管区域的影响,完成了对热管区域平面度超差原因的分析,测定了不同胶膜在不同固化制度

下的厚度。并通过提高均压板厚度提升平面度,并用工艺试验验证了 3 mm 厚度均压板的工艺可行性。

参考文献

- [1] 章令辉,等. 蜂窝夹层结构常见制造缺陷分析[J]. 航天返回与遥感, 2006. 27(1):58.
- [2] 高慎斌,等. 卫星制造技术(下)[M]. 北京:宇航出版社, 1998:32-47.
- [3] 岳喜山,欧阳小龙,侯金保. 钛合金蜂窝壁板结构制造技术研究[C]. 第十六届全国钎焊及特种连接技术交流会, 2008.
- [4] 蒋文革,蒋元兴,付刚. 铝蜂窝夹层结构蜂窝拼接工艺研究[C]. 全国复合材料学术会议, 2000.

(上接第 46 页)

综上所述,2A14 铝合金在 3.5% NaCl 溶液中存在应力腐蚀倾向,其中本体抗应力腐蚀能力最强,其次是 FSW 接头,而 VPTIG 接头最差,同时应力腐蚀对结构延伸率的影响要远大于对结构强度的影响。

3 结论

2A14 铝合金具有应力腐蚀倾向,应力腐蚀对材料强度影响较小,但对延伸率影响较大;通过对比分析,2A14 本体抗应力腐蚀能力最强,其次是 FSW 接头,而 VPTIG 接头最差,因此对于长期与介质接触的贮箱结构应优先选用 FSW 焊接工艺。

参考文献

- [1] SPEIDEL M O. The theory of stress corrosion cracking in alloys[M]. 1971: 289-344.
- [2] SONG R G, Dietzel W. Stress corrosion cracking and

hydrogen embrittlement of an Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Acta Material, 2004, 52(16): 4727 - 4743.

[3] CAECHOWSKI M. Stress corrosion cracking of aluminium alloys and their welded joints[C]. The 7th Polish Corrosion Conference. . Poland; Krakow, 2002: 17-21.

[4] 金属和合金的腐蚀,应力腐蚀试验[S]. GB15970,

[5] 中华人民共和国航空工业标准慢应变速率应力腐蚀试验方法[S]. HB7235-95,

[6] TSAI W T, DUH J B, YEH J J. et al. Effect of pH on stress corrosion cracking of 7050-T7451 aluminum alloy in 3.5% NaCl solution[J]. Corrosion, 1990, 46(5): 444-449.

[7] BRAUN R. Slow strain rate testing of aluminum alloy 7050 in different tempers using various synthetic environments [J]. Corrosion, 1997, 53(3): 467-474.