

文章编号: 1004 - 0609(2006) 10 - 1743 - 06

热处理对 2519 铝合金应力腐蚀开裂敏感性的影响^①

张新明, 李慧中, 陈明安, 梁霄鹏, 李 洲, 贾寓真

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 通过慢应变速率拉伸测试、扫描电镜及透射电镜分析等研究了 2519 铝合金在 T6、T8 热处理状态下, 在空气和 3.5% (质量分数) 的 NaCl 溶液中的应力腐蚀开裂(SCC) 行为, 研究了应变速率对 2519 铝合金 SCC 行为的影响。结果表明: 同一热处理状态下, 2519 铝合金在 3.5% 的 NaCl 溶液中应力腐蚀开裂敏感性高于干燥空气中; 在应变速率为 $1.33 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时, 其 SCC 敏感性比应变速率为 $6.66 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时的敏感性大; 同一应变速率下, T6 状态比 T8 状态 SCC 敏感性大, T8 状态时抗应力腐蚀性能比 T6 状态时好。

关键词: 2519 铝合金; 热处理; 慢应变速率拉伸; 应力腐蚀敏感性

中图分类号: TG 172.9

文献标识码: A

Effect of heat treatment on stress corrosion cracking susceptibility of aluminum alloy 2519

ZHANG Xin-ming, LI Hui-zhong, CHEN Ming-an,

LIANG Xiao-peng, LI Zhou, JIA Yu-zhen

(School of Materials Science and Engineering,

Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The stress corrosion cracking(SCC) performance of aluminum alloy 2519 in air and in 3.5% NaCl solution was investigated by using slow strain rate tension, scanning electron microscope and transmission electron microscope. The experimental results show that aluminum alloy 2519 is more susceptible to SCC in 3.5% NaCl solution than in air and the alloy is more susceptible to SCC at $1.33 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ than at $6.66 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ at the same temper. Alloy 2519-T6 is more susceptible to SCC than 2519-T8 at the same strain rate.

Key words: aluminum alloy 2519; heat treatment; slow strain rate tension; stress corrosion cracking susceptibility

2519 铝合金是 20 世纪 80 年代美国开发的一种高强、高韧铝合金, 主要用于飞机蒙皮、火箭、舰船等的结构件和两栖装甲突击车、空投空降车等的装甲材料, 美国已将该合金用作先进的两栖突击车(AAAV)的装甲材料^[1-4]。2519 与其它 $2 \times \times \times$ 系合金相比, 该合金有比较优良的耐蚀性能。关于该合金耐蚀性能的研究, 文献[5]报道了热处理制度对 2519 合金的晶间腐蚀性能的影响, 认为 T8 状态具有比 T6 状态好的抗晶间腐蚀性能。同一热处

理制度下不同时效阶段 2519 铝合金抗晶间腐蚀性能的研究已有报道^[6], 认为抗晶间腐蚀能力顺序为: 过时效 > 峰值时效 > 欠时效。Dymek 等^[7]研究了 Cu 含量对 2519 铝合金抗应力腐蚀性能的影响, 随 Cu 含量的增加合金抗应力腐蚀性能逐渐降低。Kramer 等^[8]研究了不同热变形方式对 2519 铝合金制品抗应力腐蚀性能的影响, 不论是采用锻造、轧制还是挤压方法生产的 2519 合金均有较好的抗应力腐蚀性能。但在不同热处理状态、不同应变速率

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2005CB623706)

收稿日期: 2006-02-24; 修订日期: 2006-07-03

通讯作者: 张新明, 教授; 电话: 0731-8830265; E-mail: xzm@mail.csu.edu.cn

或不同的环境条件下 2519 合金应力腐蚀开裂性能研究报道较少。应力腐蚀实验常采用光滑试样和预裂纹试样，预裂纹试样一般被用来研究应力腐蚀裂纹生长行为的 SCC(Stress corrosion cracking) 敏感性，并不能提供应力腐蚀裂纹成核的信息，而裂纹成核过程对于腐蚀环境下，具有光滑表面材料的 SCC 敏感性是非常重要的^[9]。因此采用光滑试样慢应变速率拉伸 SSRT(Slow strain rate tension) 方法评定 SCC 敏感性，能较准确地反映材料的抗应力腐蚀开裂性能，并且具有测试周期短的最大的优点。本文作者采用该方法研究了不同热处理制度对 2519 铝合金的抗应力腐蚀性能的影响。

1 实验

1.1 材料及热处理工艺

本实验所用材料为 40 mm 厚 2519 铝合金热轧板材，其化学成分列于表 1。实验前材料按以下两种热处工艺进行热处理：

- 1) 固溶(525 °C, 1 h) - 时效(180 °C) (T6 处理)；
- 2) 固溶(525 °C, 1 h) - 冷轧 - 时效(180 °C) (T8 处理)。

表 1 2519 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2519 aluminum alloy(mass fraction, %)

Cu	Mn	Mg	Zr	
5.80	0.29	0.22	0.22	
Ti	V	Fe	Si	Al
0.06	0.06	0.15	0.05	Bal.

1.2 实验方法

实验按 HB7235—95 进行^[10]，用工作段标距长 30 mm、直径 5 mm 的圆形试棒进行 SSRT 测试，试样取的方向为长横向，均为 T6、T8 态试样，试样安装后施加一定的载荷以消除夹具间隙。应变速率分别取 $1.33 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $6.66 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ；环境分别为空气和 3.5% NaCl 水溶液两种，环境温度为 $(35 \pm 1) \text{ °C}$ 。用记录仪记录整个应力腐蚀拉伸断裂过程。试样断裂后，断口形貌用 Sirion200 场发射扫描电镜进行分析。透射电子显微分析在 H-800 型透射电镜上进行，薄膜试样采用电解双喷减薄，电解液(体积比)为 30% 硝酸和 70% 甲醇混合液。

2 实验结果

2.1 T6、T8 状态合金在不同环境和应变速率条件下拉伸结果

表 2 所列为 2519 合金在不同热处理状态，分别在干燥空气和 3.5% 的 NaCl 溶液中的慢拉伸实验结果。从表 2 可见，在 3.5% NaCl 溶液中慢拉伸与在干燥的空气中相比、合金的强度、伸长率均有不同程度的下降。并且，随拉伸速率的降低，其强度、伸长率减少幅度增大。应变速率为 $6.66 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时，2519-T6 与干燥空气环境中的力学性能相比，在 3.5% 的 NaCl 溶液中合金的断裂强度、断裂伸长率明显减小，其比值分别为 91% 和 74%，表明 2519-T6 合金在 3.5% 的 NaCl 溶液中的断裂具有 SCC 敏感性。而 2519-T8 与干燥空气环境中的力学性能相比，在 3.5% 的 NaCl 溶液中合金的断裂强度、断裂伸长率也有所减小，但比 2519-T6 合金减少的幅度小，其比值分别为 96% 和 81%，表明 2519-T8 合金在 3.5% 的 NaCl 溶液中断裂具有 SCC 敏感性，且较 2519-T6 小。从表 2 还可以看出，应变速率为 $1.33 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时，2519 合金在 3.5% 的 NaCl 溶液中合金的断裂强度和断裂伸长率均比应变速率为 $6.66 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时的低。

表 2 2519 铝合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of aluminum alloy 2519

Sample No.	Elongation/%	Tensile strength/MPa	Temper	Medium	Strain rate/ 10^{-5} s^{-1}
1	12.3	500	T8	Dry air	6.66
2	20.0	478	T6	Dry air	6.66
3	10.0	480	T8	3.5% NaCl	6.66
4	14.8	435	T6	3.5% NaCl	6.66
5	7.6	475	T8	3.5% NaCl	1.33
6	10.8	423	T6	3.5% NaCl	1.33

应力腐蚀指数 I_{SSRT} 是将 SSRT 实验所获得的各项力学性能指标进行数学处理的结果，与单项力学性能指数相比能更好地反映应力腐蚀断裂敏感性，常作为应力腐蚀的重要判据，计算式为^[11]

$$I_{SSRT} = 1 - [\sigma_w \times (1 + \delta_w)] / [\sigma_A \times (1 + \delta_A)] \quad (1)$$

式中 σ_w 为在环境介质中的断裂强度，MPa； σ_A 为在惰性介质中的断裂强度，MPa； δ_w 为在环境介质中的断裂伸长率，%； δ_A 为在惰性介质中的断裂

伸长率, %; I_{SSRT} 从 $0 \rightarrow 1$ 表示应力腐蚀断裂敏感性增加。不同热处理状态的 2519 铝合金的应力腐蚀指数如表 3 所示。从表 3 可见, T6 状态的应力腐蚀指数均大于 T8 态; 拉伸速率较慢试样的应力腐蚀指数均大于拉伸速率较快试样。

表 3 2519 铝合金的应力腐蚀结果

Table 3 Results of SCC of aluminum alloy 2519

Temper	$\dot{\epsilon} / s^{-1}$	I_{SSRT}
T6	6.66×10^{-5}	0.129 4
	1.33×10^{-5}	0.182 9
T8	6.66×10^{-5}	0.057 1
	1.33×10^{-5}	0.089 8

2.2 拉伸断口扫描电镜分析

不同热处理状态 2519 铝合金慢应变速率拉伸断口扫描电镜像如图 1~ 3 所示。图 1 所示为两种

不同热处理状态的合金在干燥空气中的拉伸断口形貌。由图可以看出, 拉伸断口表面上分布大大小小的韧窝, 断面上发生明显的塑性流动, T6 态塑性流动较 T8 态剧烈, 这与 T6 的塑性比 T8 态好是一致的。两种状态的断裂均为典型的韧性断裂。图 2 所示为合金拉伸应变速率为 $6.66 \times 10^{-5} s^{-1}$ 时, 在 3.5% 的 NaCl 溶液中合金的拉伸断口形貌。从图可见, T8 态合金的断面仍由一些细小的韧窝组成, 此时的韧窝较浅, 仍具有机械断裂特征(图 2(b)); 而 T6 态合金拉伸断口表面(图 2(a)), 应力腐蚀区呈平滑的类解理形貌, 沿晶界也出现少量韧窝, 是典型的沿晶腐蚀断口形貌, 与图 2(b) 相比, 图 2(a) 断口形貌有明显的沿晶腐蚀裂纹和二次裂纹, 表明有较强的 SCC 敏感性。这与 SSRT 力学分析结果是一致的。图 3 所示为合金拉伸应变速率为 $1.33 \times 10^{-5} s^{-1}$ 时, 在 3.5% 的 NaCl 溶液中合金的拉伸断

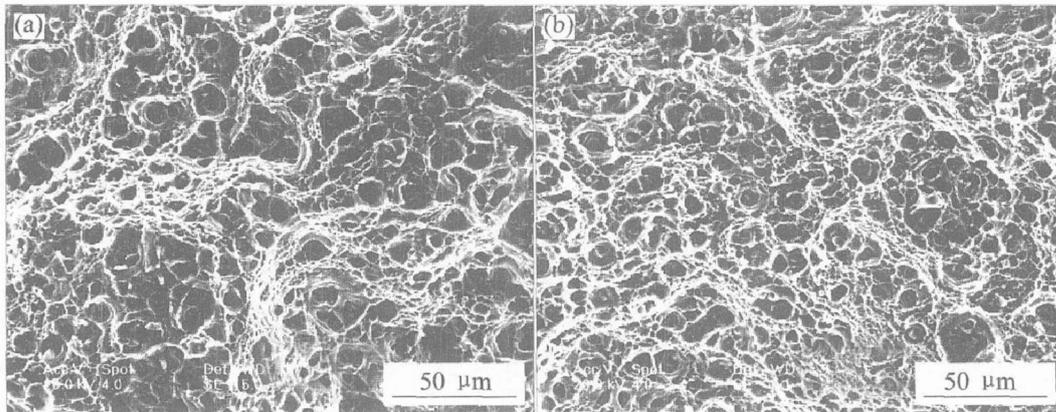


图 1 2519 铝合金在空气中的拉伸断口形貌

Fig. 1 Morphologies of fracture surface by SSRT testing in dry air

(a) —T6; (b) —T8

(strain rate $6.66 \times 10^{-5} s^{-1}$)

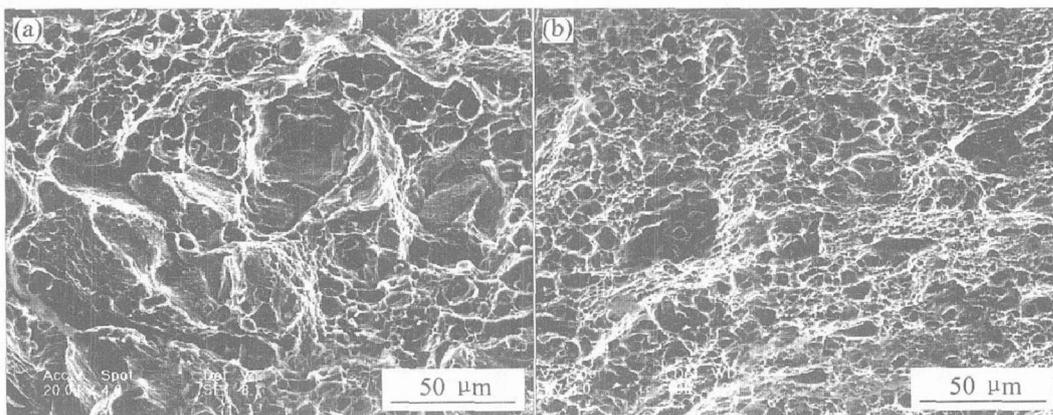


图 2 2519 铝合金在 3.5% NaCl 溶液中的拉伸断口形貌

Fig. 2 Morphologies of fracture surface by SSRT testing in 3.5% NaCl water solution

(a) —T6; (b) —T8

(strain rate $6.66 \times 10^{-5} s^{-1}$)

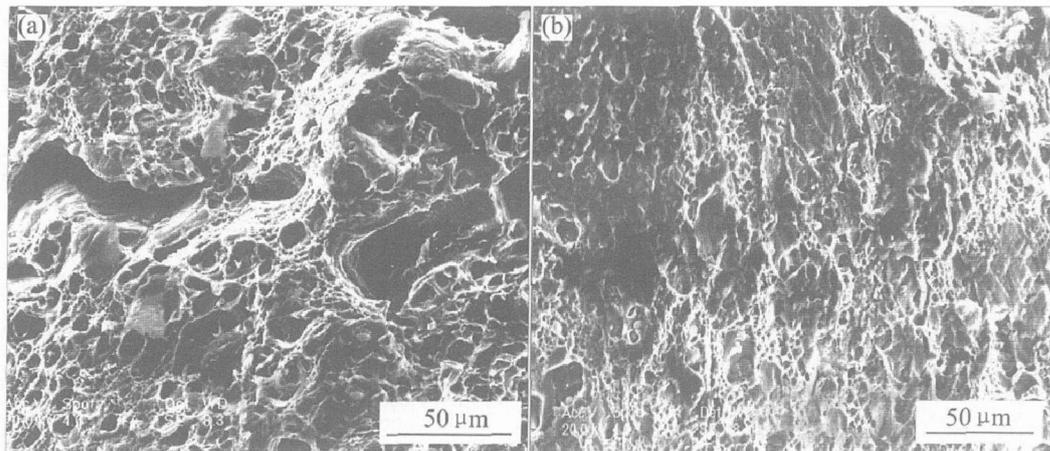


图3 2519铝合金在3.5%的NaCl溶液中的拉伸断口形貌

Fig. 3 Morphologies of fracture surface by SSRT testing in 3.5% NaCl water solution

(a) -T6; (b) -T8

(strain rate $1.33 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

口形貌, T8态的合金断口仍由一些细小的韧窝组成, 同时在断面上可见细小的裂纹, T6态合金的断口仍是典型的沿晶腐蚀断口形貌断面上由粗大的沿晶裂纹和一些细小的韧窝组成, 说明随应变速率的降低, 合金应力腐蚀敏感性逐渐增强。

3 讨论

3.1 应变速率对2519铝合金SCC行为的影响

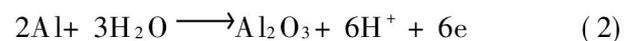
应变速率是影响材料SCC行为的重要参量^[12], 实验通常采用的应变速率范围为 $10^{-4} \sim 10^{-8} \text{ s}^{-1}$, 对大多数材料, 应力腐蚀最敏感的应变速率约为 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, 在一给定环境介质条件下, 将存在一个最佳应变速率(或应变速率范围), 以区分材料的SCC敏感性。从表2可见, 同一热处理制度下, 拉伸应变速率较低的试样具有较高的SCC敏感性。研究表明^[13], 发生SCC行为必然存在某一应变速率范围内, 应变速率过高, 断裂伸长率接近空气介质中所测得的, 韧性损失较少, SCC不敏感, 即在高应变速率下, 环境介质和试样间还未进行SCC所要求的恰当反应, 塑性形变就使试样很快断裂; 另一方面, 应变速率过低, 材料被拉伸滑移产生新鲜表面, 而新鲜表面上的钝化膜形成得足够快, 3.5%的NaCl溶液不能充分发挥其在SCC过程中的作用, 试样的强度、韧性与干燥空气中测试的相差不大。

从表3可以看出, 在实验速率范围内, 随着应变速率的减少, 2519铝合金的SCC敏感性随之增大。在较低应变速率条件下, 2519合金有较大的

SCC敏感性主要有以下两方面的原因。

1) 2519铝合金在自然状态下易形成氧化层保护膜, 具有较好的耐蚀性, 在拉应力作用下, 由于氧化膜与基体金属延伸性存在差异, 氧化膜破裂, 使裸露的基体金属与氧化膜在介质环境中形成小阳极和大阴极的自腐蚀电池, 发生阳极溶解, 促使裂纹较快扩展。

2) 在腐蚀介质中拉伸变形时, 暴露出来的新鲜铝合金表面与环境中的水可能发生如下电化学反应^[14]:



通过上述反应所形成的氢原子具有活性, 通过吸附、扩散或位错运输到材料内部而导致氢脆。在较低的应变速率下, 试样有较多的时间与介质发生反应, 从而能吸收更多的氢, 因此其SCC敏感性较高。而在高应变速率下, 变形对电化学平衡而言来得太快, 因而限制了该区域的应力腐蚀敏感性, 故相应的SCC敏感性也就低。

3.2 热处理状态对2519铝合金SCC行为的影响

从表3可见, 合金经T8处理后, 合金的应力敏感性大大降低, 抗应力腐蚀能力大大提高。图4所示为不同热处理制度下的合金透射电镜照片。图4(a)所示为合金在T6峰值时效态下晶界及晶内沉淀相。从图4(a)可见, 合金晶界析出的 θ 相粗大且沿晶界连续分布, θ 相的两侧有较宽的无沉淀析出带, 晶内析出的 θ' 相也非常粗大, 并且分布不均匀。

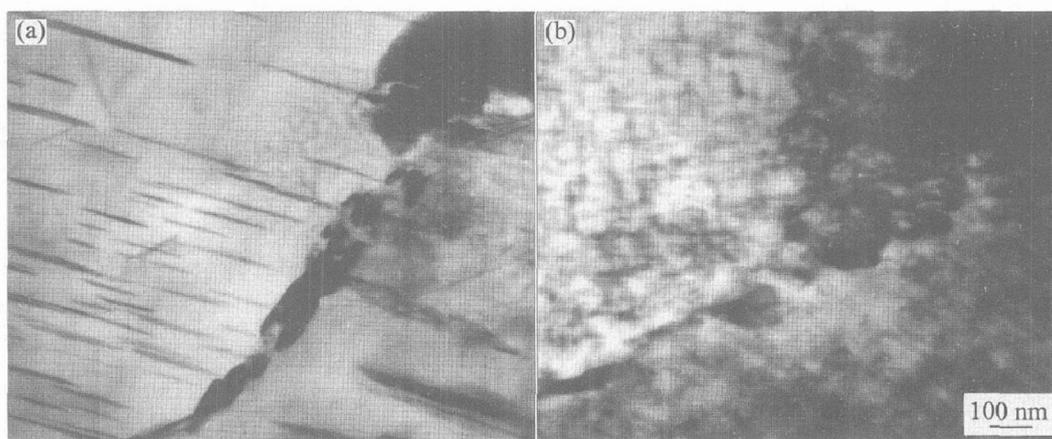


图 4 2519 铝合金峰值时效态的 TEM 像

Fig. 4 TEM images of peak-aged 2519 aluminum alloy

(a) —T6; (b) —T8

因为合金经 T6 处理后, 晶内 θ 相的形核孕育期长, 析出量小, 而晶界沉淀相易形核长大, 导致相间距小, 晶界附近产生较宽的无沉淀析出带。此外由于 θ 相的粗化, 变形时导致共面滑移严重, 致使合金表面和裂纹尖端的滑移台阶高度增大^[15], 从而使合金抗应力腐蚀能力降低。图 4(b) 所示为合金在 T8 峰值时效下晶界及晶内沉淀析出相。从图 4(b) 可见, 与图 4(a) 相比晶界析出的 θ 相数量少, 尺寸减小, 间距明显增大, 且沿晶界不连续分布。无沉淀析出带变窄, 晶内析出的 θ 相数目增加、尺寸减小, 且均匀弥散分布。研究表明^[15], 固溶后时效前的冷变形使基体产生了大量的空位和位错等晶体缺陷, 时效过程中, 加速溶质原子扩散, 其沉淀速度比在其未变形组织中快 100 倍以上, 导致晶内产生大量弥散分布的 θ 相。由于提高了晶内 θ 相的体积分数, 减少了向晶界扩散的溶质原子数, 使晶界 θ 相析出数量减少, 降低了晶界与晶内的电位差, 减缓了晶界沉淀相择优溶解的速度。同时, 晶内大量 θ 相弥散析出, 阻碍了共面滑移的形成, 减少了合金表面和裂纹尖端的滑移台阶高度。因此, 合金经 T8 处理可显著改善合金的组织结构, 分散共面滑移, 从而明显降低 2519 合金的应力腐蚀敏感性。

4 结论

1) 同一热处理状态下, 在 3.5% 的 NaCl 溶液中, 2519 铝合金的拉伸应变速率为 $1.33 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时, 其伸长率、断裂强度均比应变速率为 $6.66 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时低, SCC 敏感性大。

2) 同一应变速率下, 在 3.5% 的 NaCl 溶液中,

2519 铝合金 T8 状态比 T6 状态的 SCC 敏感性小。

3) 2519 铝合金经 T8 处理后, 晶内沉淀析出的 θ 相数目增加、尺寸减小、且均匀弥散分布, 沿晶界析出的 θ 相数目减少、且不连续分布, 无沉淀带变窄, 合金的抗应力腐蚀性能明显提高。

REFERENCES

- [1] James J F, Lawrence S K, Joseph R P. Aluminum alloy 2519 in military vehicles[J]. *Advanced Materials and Processes*, 2002, 160(9): 43 - 46.
- [2] Devincent S M, Devletian J H, Gedeon S A. Weld properties of the newly developed 2519-T87 aluminum armor alloy[J]. *Welding Journal*, 1988, 67(7): 33 - 43.
- [3] 李慧中, 张新明, 陈明安, 等. 2519 铝合金焊接接头的组织与性能[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(6): 956 - 960.
LI Huizhong, ZHANG Xir ming, CHEN Ming-an, et al. Microstructures and properties of welded joint of 2519 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(6): 956 - 960.
- [4] 李慧中, 张新明, 陈明安, 等. 2519 铝合金热变形行为研究[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(4): 621 - 625.
LI Huizhong, ZHANG Xir ming, CHEN Ming-an, et al. Hot deformation behavior of 2519 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(4): 621 - 625.
- [5] 李慧中, 张新明, 陈明安, 等. 热处理制度对 2519 合金的晶间腐蚀性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2005, 26(1): 20 - 23.

- LI Huirzhong, ZHANG Xir-ming, CHEN Ming-an, et al. Effect of heat treatment on intergranular corrosion of 2519 aluminum alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2005, 26(1): 20-23.
- [6] 张新明, 龚敏如, 李慧中, 等. 2519 铝合金薄板在不同时效状态的抗晶间腐蚀能力[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(3): 349-352.
- ZHANG Xir-ming, GONG Mir-ru, LI Huirzhong, et al. Effect of ageing tempers of aluminum alloy 2519 sheet on intergranular corrosion[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2004, 35(3): 349-352.
- [7] Dymek S, Dollar M. TEM investigation of age-hardenable Al 2519 alloy subjected to stress corrosion cracking tests[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 81(2/3): 286-288.
- [8] Kramer L S, Blair T P, Blough S D, et al. Stress-corrosion cracking susceptibility of various product forms of aluminum alloy 2519[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2002, 11(6): 645-650.
- [9] Preet M, John J. Effects of treatment on stress corrosion cracking of a discontinuously reinforced aluminum (DRA) $7 \times \times \times$ alloy during slow strain rate testing[J]. Scr Metall Mater, 1995, 33(9): 1393-1399.
- [10] HB7235-95. 慢应变速率应力腐蚀实验方法[S]. HB7235-95. The Method for Determining the Stress Corrosion Cracking by Using Slow Strain Rate Testing[S].
- [11] 刘继华, 李 荻, 刘培英, 等. 时效和回归处理对 7075 铝合金力学及腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2005, 26(1): 20-23.
- LIU Jihua, LI Di, LIU Peiying, et al. Effect of ageing and retrogression treatments on mechanical and corrosion properties of 7075 aluminum alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2005, 26(1): 20-23.
- [12] 刘继华, 李 荻, 郭宝兰, 等. LC4 高强铝合金的慢应变速率拉伸实验[J]. 材料科学与工艺, 2001, 9(1): 37-41.
- LIU Jihua, LI Di, GUO Bao-lan, et al. Slow strain rate tension test of high-strength aluminum alloy 7075[J]. Mater Sci Tech, 2001, 9(1): 37-41.
- [13] Tsai W, Duh J, Lee J, et al. Effect of pH on stress corrosion cracking of 7050-T7451 aluminum alloy in 3.5% NaCl solution[J]. Corrosion, 1990, 46(6): 444-449.
- [14] 宋仁国, 张宝金, 曾梅光. 7175 铝合金的应力腐蚀及晶界 Mg 偏析的作用[J]. 金属学报, 1997, 33(6): 595-601.
- SONG Ren-guo, ZHANG Bao-jin, ZENG Meiguan. The stress corrosion and role of Mg segregated to grain boundary in 7175 aluminum alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(6): 595-601.
- [15] 李仁顺, 王佐义. 预温变形对 2091Al-Li-Cu-Mg-Zr 合金应力腐蚀敏感性的影响[J]. 中国腐蚀与防腐学报, 1995, 15(1): 15-20.
- LI Ren-shun, WANG Zuoyi. The effect of warm-rolling prior to aging on stress corrosion cracking susceptibility of aluminum alloy 2091[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1995, 15(1): 15-20.

(编辑 陈爱华)