

温度与保温时间对 2519A 铝合金高温力学性能的影响

张新明, 刘 波, 刘 瑛, 李慧中, 李惠杰

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 利用高温拉伸力学性能测试、扫描电镜与透射电镜等分析手段对 2519A 铝合金在不同温度与保温时间下的高温力学性能进行研究。结果表明: 合金在保温 10 min 后进行拉伸, 从室温至 400 °C, 随着温度的升高, 抗拉强度从 471 MPa 下降至 55.5 MPa, 屈服强度从 440.3 MPa 降至 50.3 MPa, 延伸率由 11.6% 提高至 21.3%。300 °C 时, 随保温时间的延长, 合金的抗拉强度先由 171.6 MPa 下降至 151.4 MPa, 屈服强度由 139.4 MPa 降至 130.5 MPa, 1 h 后基本上稳定不变。高温条件下, 该合金力学性能的下降主要是由于析出相的粗化与转变引起的。

关键词: 2519A 铝合金; 高温力学性能; 显微组织

中图分类号: TG 146.21

文献标识码: A

Effects of temperature and holding time on elevated-temperature mechanical properties of aluminum alloy 2519A

ZHANG Xin-ming, LIU Bo, LIU Ying, LI Hui-zhong, LI Hui-jie

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The elevated-temperature mechanical properties of aluminum alloy 2519A annealed at different temperatures and different holding times were investigated by tensile test, scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). The results showed that for the holding time of 10 min, with increasing of temperature from room temperature to 400 °C, the ultimate tensile strength descended from 471 MPa to 55.5 MPa, the yield strength from 440.3 MPa to 50.3 MPa, and the elongation rose from 11.6% to 21.3%. At 300 °C, with the prolongation of holding time, the ultimate tensile strength descended from 171.6 MPa to 151.4 MPa and the yield strength from 139.4 MPa to 130.5 MPa, and then they had no remarkable changes after 1 h. At high temperatures, the decrease of the mechanical properties of the studied alloy was due to coarsening and transformation of the precipitates.

Key words: aluminum alloy 2519A; elevated-temperature mechanical properties; microstructure

2519 铝合金是美国于 20 世纪 80 年代开发的装甲铝合金, 该合金具有良好的抗弹性能、焊接性能以及抗应力腐蚀性能, 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^[1-3]。我国在该合金的基础上研发了 2519A 型铝合金, 有关该合金的报道主要集中在耐蚀性能、力学性能、焊接性能及热处理制度方面^[4-5]。在目前工业上应用的工程合金中, 温度在 100 °C 以内时, 时效铝合金

具有最高的比强度, 然而在 100 °C 以上的高温条件下, 铝合金的力学性能迅速下降, 这主要是由于决定其强度的细小沉淀相的粗化引起的^[6]。李慧中等^[7-8]研究 Ag、Y 等元素对 2519A 合金高温力学性能的影响, 指出添加适量的 Ag 后, 在{111}面析出 Ω 相, 该相在高温下比较稳定, 不易长大, 使合金高温力学性能得到较大提高; 而添加微量元素 Y, 会与 Cu、Al 形成 $\text{Al}_6\text{Cu}_6\text{Y}$ 金属间化合物, 沿晶界分布, 有效阻碍

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: 2007-01-10; 修订日期: 2007-06-21

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

高温时基体的变形和晶界的移动,从而提高合金高温强度。由于装甲材料对合金耐热性能有较高要求,同时为了全面提高该合金的综合性能,扩大其应用领域,因此研究其高温力学性能具有十分重要的意义。本文作者对2519A铝合金在不同的温度与保温时间下的高温力学性能及其变化规律进行研究,以期为该合金的高温实际应用提供依据。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料为20 mm厚的2519A-T87铝合金成品板料,化学成分列于表1。

按照GB/T 4338-1995标准^[9],沿板材轧向截取拉伸试样。加工尺寸为 $d10\text{ mm}\times 114\text{ mm}$ 的圆形比例试样。

表1 合金的化学成分

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

Cu	Mg	Mn	V	Ti	Zr	Fe	Si	Al
5.80	0.20	0.30	0.06	0.05	0.20	0.20	0.10	Bal.

1.2 实验方法

高温拉伸实验在Instron Model 8032电子拉伸机上进行,取平行实验试样2~4个,试样随炉升温,升到实验温度开始计时,保温一定时间后进行拉伸,拉伸速度为0.02 mm/s。

实验分两组进行,第1组是在相同的保温时间(10 min)下改变温度,选取7个温度:100、150、200、250、300、350和400 °C,分别标记为10m100、10m150、10m200、10m250、10m300、10m350和10m400,另外将室温(25 °C)下拉伸的样品标记为10m25;第2组是在300 °C保温,改变保温时间,选取6个保温时间:10 min、30 min、1 h、2 h、6 h和10 h,分别标记为10m300、30m300、1h300、2h300、6h300和10h300。

在KYKY-2800扫描电镜上观察拉伸试样的断口形貌;在Tecnai G²20型透射电镜上进行TEM分析,加速电压为200 kV,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,在-15 °C和15 V条件下制备。

2 实验结果

2.1 拉伸力学性能

图1所示为2519A合金在不同温度下保温10 min之后拉伸所得的力学性能。室温下合金的抗拉强度为471 MPa,屈服强度为440.3 MPa,延伸率为11.6%。随着温度升高,强度逐渐下降,延伸率逐渐上升,并出现3个不同的阶段:由室温至150 °C,强度的下降与延伸率的上升都较为平稳;150 °C至300 °C,延伸率上升速率变化不大,而强度下降明显加快;300 °C至400 °C,强度下降变缓,而延伸率增幅显著提高。到400 °C时,抗拉强度、屈服强度分别降至55.5 MPa、50.3 MPa,延伸率增至21.3%。

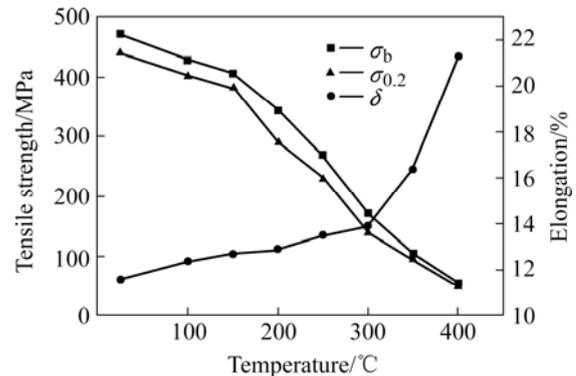


图1 温度对2519A铝合金拉伸性能的影响

Fig.1 Effects of temperature on tensile properties of aluminum alloy 2519A

通常Al-Cu合金应用的耐热温度范围主要集中在250到350 °C之间^[10],因而选取300 °C来研究保温时间对合金力学性能的影响,如图2所示。当保温时间

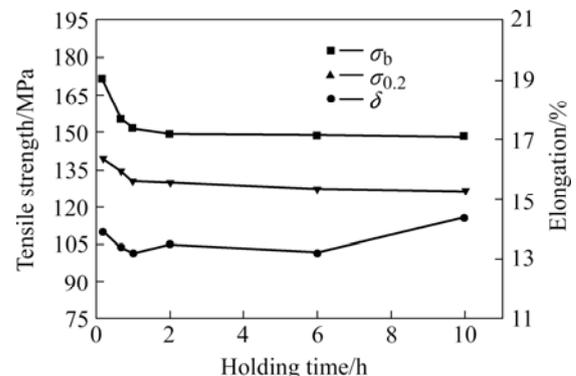


图2 保温时间对2519A铝合金300 °C拉伸性能的影响

Fig.2 Effects of holding time on tensile properties of aluminum alloy 2519A at 300 °C

由 10 min 延长到 1 h 时, 合金抗拉强度由 171.6 MPa 下降至 151.4 MPa, 屈服强度由 139.4 MPa 降至 130.5 MPa, 但 1 h 以后, 合金强度基本上保持不变; 同时, 合金的延伸率的变化也不明显。

2.2 微观组织

合金在不同温度与不同保温时间下的微观组织如图 3、4 所示。对盘片状析出相的半径进行统计, 其平均尺寸如图 5 所示。

由图 3、5 可看出, 温度对析出相的大小与分布影响显著, 随着温度升高, 析出相尺寸增大, 密度降低。室温合金晶内分布着大量细小而弥散的强化相, 而晶界析出相则呈链条状分布。随着温度升高, 晶内析出相聚集长大, 并逐渐变得尺寸不均匀, 晶界析出相也由链条状连续分布聚集长大为不连续分布, 到 400 °C 时析出相变得特别粗大, 数量很少。

300 °C 下随着保温时间延长, 合金析出相的微观组织变化如图 4 所示。保温时间从 10 min 至 10 h, 对比 3 个不同时间下试样的显微组织照片, 尽管保温 10 h 的试样晶内出现个别粗大的析出相, 但整体比较, 由图 5 可以看出, 析出相的尺寸变化并不明显。

2.3 断口形貌

将拉伸后的断口进行扫描电镜观察, 如图 6 所示, 室温(图 6(a))试样断口为韧窝区与沿晶断裂组成的混合型断口, 韧窝的数量多, 但韧窝小而浅, 因而塑性相对较差; 随着温度的升高, 延性韧窝状断口形貌越来越明显, 韧窝数量减少, 尺寸变大, 400 °C 下(图 6(d)), 拉伸断口的韧窝变得特别粗大且很深, 此时合金的延伸率最高, 表明合金在高温下塑性好。

3 分析与讨论

2519A 铝合金是高 Cu/Mg 比的 Al-Cu-Mg 系时效强化铝合金, 其沉淀析出序列如下^[11]: S.S.S.S. → G.P.(I)区 → G.P.(II)区(θ'' 相) → θ' 相 → θ (CuAl₂)相, 合金的主要析出强化相是 θ' 。在高温下, 析出相发生粗化, 刘刚等^[12]提出了 Al-Cu 合金中析出相的粗化模型:

$$\Delta r = \frac{2}{3} \sqrt{A^2 \beta D t} \quad (1)$$

式中 Δr 为析出相半径增加值; A 为析出相直径与厚度比值, 可近似为恒量; β 为无量纲长大参数; D 为扩散系数; t 为保温时间。

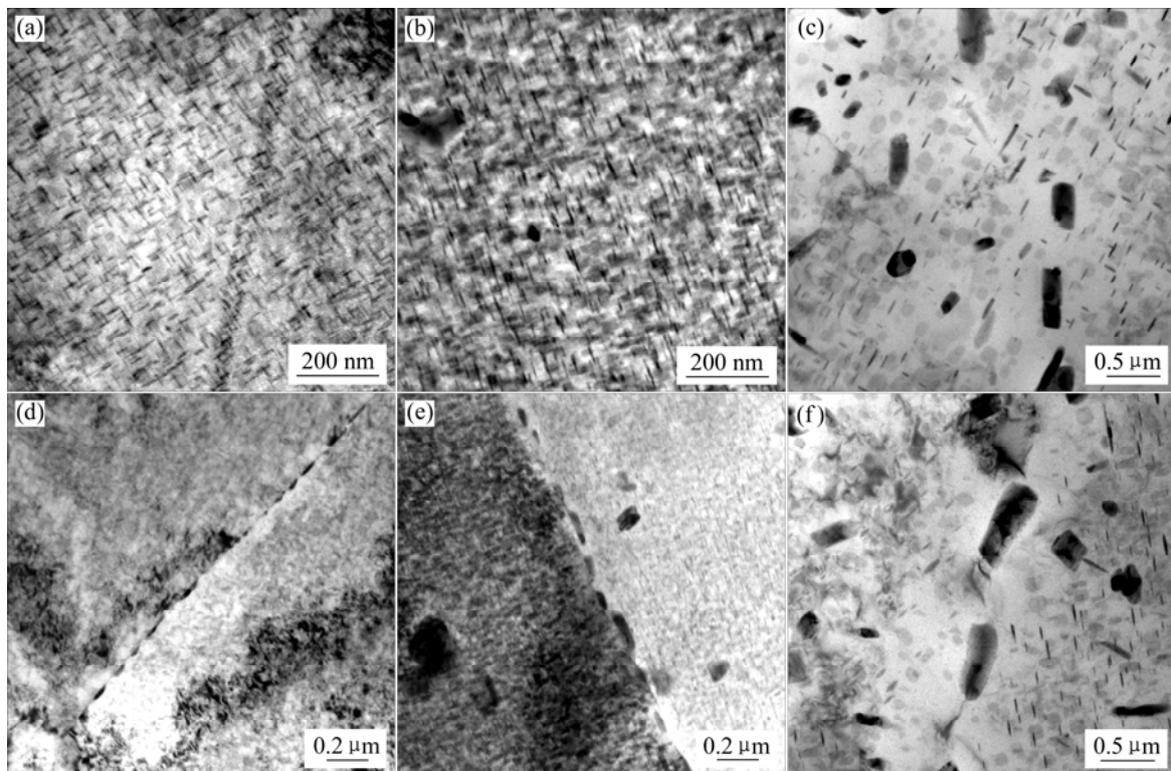


图 3 不同温度下合金的 TEM 像

Fig.3 TEM images of studied alloy annealed at different temperatures for 10 min: (a)–(c) In grains—10m25, 10m150, 10m400; (d)–(f) Along grain boundaries—10m25, 10m150, 10m400

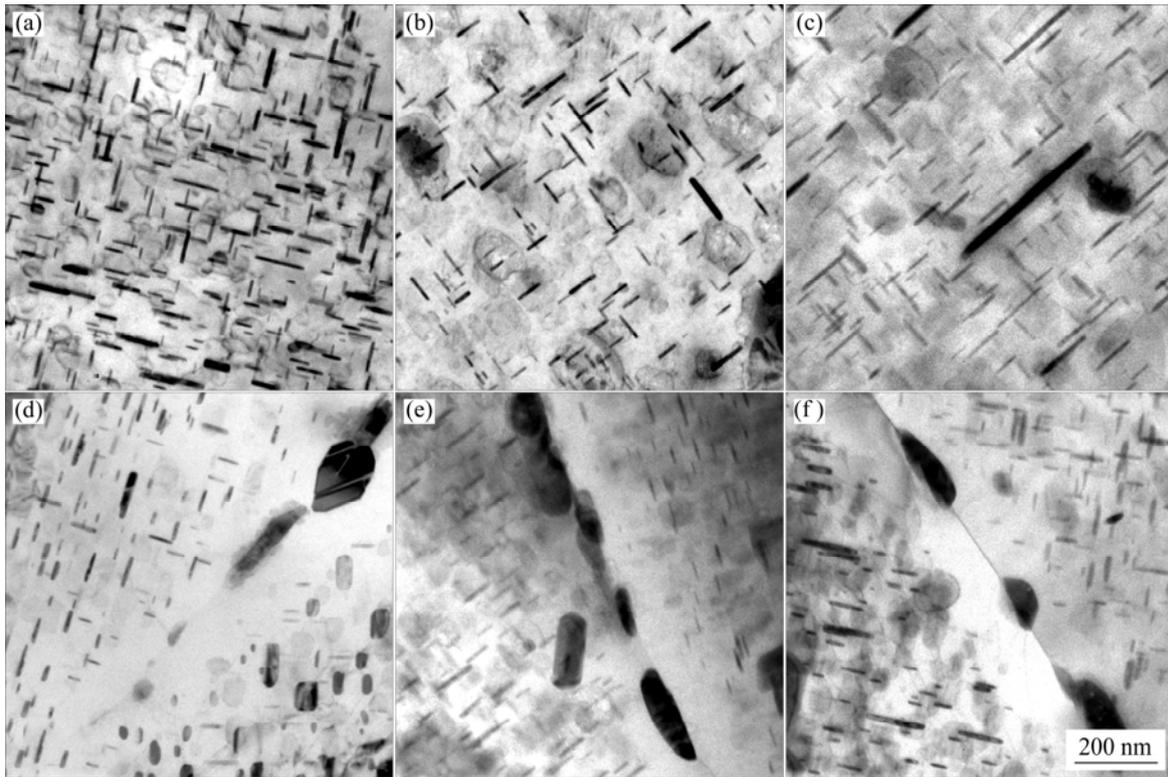


图4 不同保温时间下合金的TEM像

Fig.4 TEM images of studied alloy annealed at 300 °C for different holding times: (a)–(c) In grains—10m300, 1h300, 10h300; (d)–(f) Along grain boundaries—10m300, 1h300, 10h300

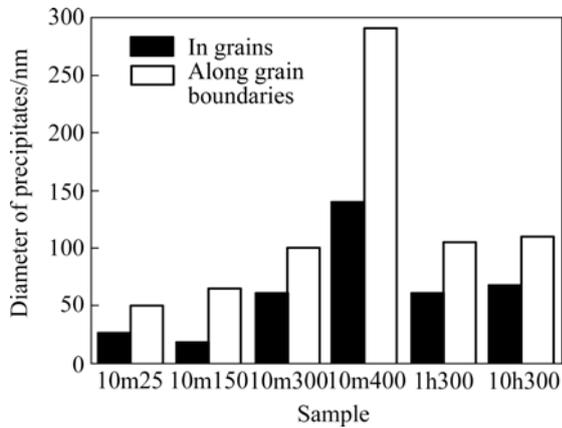


图5 晶内与晶界的析出相尺寸

Fig.5 Precipitates size in grains and along grain boundaries

由扩散第一定律可以得出扩散系数与温度的关系式^[13]:

$$D = D_0 \exp[-Q/(kT)] \tag{2}$$

式中 D_0 为扩散常数, Q 为扩散激活能, T 为绝对温度。

将式(2)代入式(1), 可得:

$$\Delta r = \frac{2}{3} \sqrt{A^2 \beta D_0 \exp[-Q/(RT)] t} \tag{3}$$

即

$$(\Delta r^2) = \frac{4}{9} A^2 \beta D_0 \exp[-Q/(RT)] t \tag{4}$$

由式(3)可得温度与保温时间对析出相粗化的影响规律, 从式(4)可以看出温度的影响是指数关系, 而保温时间的影响是线性的, 因此温度对析出相粗化的影响远大于保温时间。

合金的屈服强度增量与析出相尺寸的关系为^[12]

$$\Delta \sigma = \frac{0.13MGb}{2r} [\varphi_m^{1/2} + 0.75A^{1/2} \varphi_m + 0.14A \varphi_m^{3/2}] \times \ln\left(\frac{0.158r}{r_0}\right) \tag{5}$$

式中 $\Delta \sigma$ 为屈服强度增量; $r = \Delta r + r^*$, r^* 为析出相临界形核半径; M 、 G 、 b 和 r_0 分别为泰勒因子、基体剪切模量、基体位错矢量和位错绕过析出相的半径; φ_m 为析出相体积分数。而合金的屈服强度为基体固有屈服强度(σ_t)与析出相引起的屈服强度增量之和:

$$\sigma = \sigma_t + \Delta \sigma \tag{6}$$

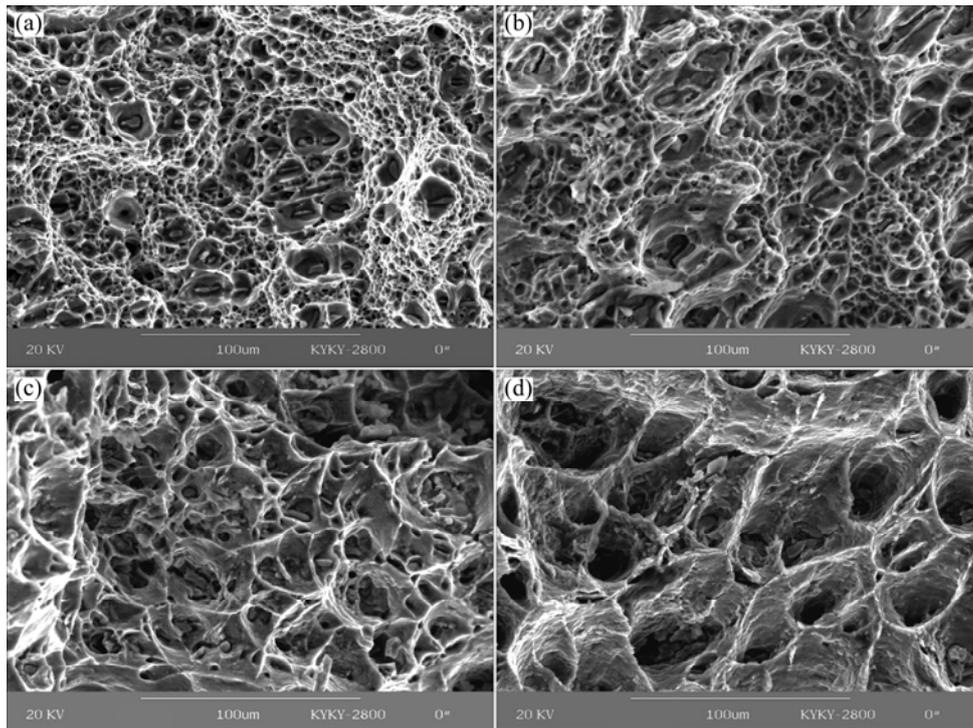


图 6 不同温度下拉伸断口的 SEM 形貌

Fig.6 SEM morphologies of studied alloy annealed at different temperatures for 10 min: (a) 10m25; (b) 10m100; (c) 10m300; (d) 10m400

由式(5)和式(6)可得:

$$\sigma = \sigma_t + \frac{0.13Mgb}{2r} [\varphi_m^{1/2} + 0.75A^{1/2}\varphi_m + 0.14A\varphi_m^{3/2}] \times \ln\left(\frac{0.158r}{r_0}\right) \quad (7)$$

由该式可看出屈服强度 σ 与析出相尺寸 r 的关系。

因此, 温度越高, 析出相尺寸越粗大, 强度下降越多。从室温至 150 °C, 软化机制以析出相 θ' 的粗化为主, 且粗化速率低, 从而合金强度下降较慢。150 °C 之后, 不仅析出相粗化速率提高, 而且 θ' 相的溶解伴随着 θ 相的增加^[14]。由于 θ 相与基体界面是非共格的, 强化作用不如 θ' , 从而使得合金强度下降加快。300 °C 之后, 继续升高温度, 析出相粗化速率进一步提高, 软化机制仍以粗化为主, 因 θ' 相已基本演变成了 θ 相, 因而屈服强度的下降会趋于平缓, 逐渐接近 σ_t 。另一方面, 随着温度升高, 原子扩散能力增强, 界面滑动能力加强, 在晶内第二相处萌生裂纹源的机会减少, 并且, 由于析出相的尺寸越大, 延伸率越大^[15], 从而导致延伸率随着温度升高而显著提高。

300 °C 下保温时, 由式(4)可以看出, 相对于温度, 时间对析出相粗化的影响并不明显, 因而从 10 min 到 10 h 析出相的尺寸变化不明显。但保温时间由 10 min

至 1 h, 由于 θ' 相向 θ 相转变, 从而导致合金强度有所下降, 1 h 后转变基本完成, 强度也就稳定不变。

4 结论

1) 2519A 铝合金的软化机制从室温至 150 °C 以 θ' 相的粗化为主, 在 150~300 °C 范围是 θ' 相转变成 θ 相以及 θ 相的粗化, 在 300~400 °C 范围以 θ 相的粗化为主。

2) 2519A 铝合金保温 10 min 时, 从室温至 400 °C 间, 随着温度升高, 抗拉强度从 471 MPa 下降至 55.5 MPa, 屈服强度从 440.3 MPa 降至 50.3 MPa, 延伸率由 11.6% 升高至 21.3%。

3) 在 300 °C 保温, 保温时间由 10 min 至 1 h, 析出相由 θ' 转变为 θ , 因而 2519A 铝合金强度从 171.6 MPa 下降至 151.4 MPa, 继续延长保温时间, 析出相长大不明显, 合金强度稳定在 148 MPa 左右。

REFERENCES

- [1] Devincen 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.
- [2] Fisher J Jr, Kramer L S, Pickens J R. Aluminum alloy 2519 in military vehicles [J]. Advanced Materials and Processes, 2002, 160(9): 43-46.
- [3] 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(1): 286-288.
- [4] 李慧中, 张新明, 陈明安, 龚敏如, 周卓平. 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 Hui-zhong, ZHANG Xin-ming, CHEN Ming-an, GONG Min-ru, ZHOU Zhuo-ping. Microstructures and properties of welded joint of 2519 aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(6): 956-960.
- [5] 刘 璞, 张新明, 刘 波. 预变形量对 2519 铝合金抗晶间腐蚀性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(9): 1545-1550.
- LIU Ying, ZHANG Xin-ming, LIU Bo. Effect of degree of predeformation on corrosion resistance of 2519 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(9): 1545-1550.
- [6] Shin Han-cheng, Ho New-jin. Precipitation behaviors in Al-Cu-Mg and 2014 aluminum alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27A: 2479-2483.
- [7] LI Hui-zhong, ZHANG Xin-ming, CHEN Ming-an, ZHOU Zhuo-ping. Effects of Ag on microstructure and mechanical properties of 2519 aluminum alloy[J]. Journal of Central South university, 2006, 13(2): 130-134.
- [8] 李慧中, 张新明, 陈明安, 周卓平, 龚敏如. 稀土钇对 2519 合金组织及耐热性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(1): 38-41.
- LI Hui-zhong, ZHANG Xin-ming, CHEN Ming-an, ZHOU Zhuo-ping, Gong Min-ru. Effect of Y addition on microstructure and elevated temperature properties of 2519 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2005, 23(1): 38-41.
- [9] GB/T 4338-1995. 金属材料高温拉伸试验[S].
- GB/T 4338-1995. Elevated temperature tensile test of metal material[S].
- [10] Mondolfo L F. Aluminum alloys: Structure and properties[M]. London: Butter-worths, 1976.
- [11] Takeda T, Maeda Y, Yoshida A, Yabuta K, Konuma S, Endo T. Discontinuity of G.P. (I): Zone and θ double prime-phase in an Al-Cu alloy[J]. Scripta Materialia, 1999, 41(6): 643-649.
- [12] 刘 刚, 丁向东, 孙 军, 陈康华. 具有盘状析出相铝合金的时效强化模型[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(3): 337-347.
- LIU Gang, DING Xiang-dong, SUN Jun, CHENG Kang-hua. A model for age strengthening of plate like precipitate containing Al alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(3): 337-347.
- [13] 唐仁正. 物理冶金基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.
- TANG Ren-zheng. The foundation of physical metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997.
- [14] Unlu N, Gable B M, Starke E A. The effect of cold work on the precipitation of Ω and θ' in a ternary Al-Cu-Mg alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, 34A(12): 2757-2769.
- [15] LIU Gang, DING Xiang-dong, SUN Jun, CHENG Kang-hua. The influences of multiscale-sized second-phase particles on ductility of aged aluminum alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35A(6): 1725-1734.

(编辑 陈爱华)