

2197 铝锂合金的耐热性能

魏修宇, 郑子樵, 李世晨, 陈秋妮

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 研究了 2197 铝锂合金的高温拉伸性能以及长时间热暴露后的室温力学性能, 同时对合金热暴露前后的显微组织进行透射电镜观察。结果表明: 2197 合金的高温拉伸强度随拉伸温度的升高而逐渐降低, 在 200 °C 下的高温拉伸性能优于传统高温用铝合金; 在低于 150 °C 的温度下热暴露 100 h 后, 2197 合金的强度略有上升, 这与 T1 相具有较强的抗粗化能力及 θ' 相的二次析出有关; 但在 200 °C 和 250 °C 热暴露条件下, 合金的力学性能快速下降, 这与在此温度下 θ' 相的溶解和 T1 相的快速粗化有关。

关键词: 2197 铝锂合金; 热暴露; 耐热性能; T1 相

中图分类号: TG 146.21

文献标识码: A

Heat resistant properties of 2197 Al-Li alloy

WEI Xiu-yu, ZHENG Zi-qiao, LI Shi-chen, CHEN Qiu-ni

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

Abstract: The tensile properties at elevated temperatures and the room-temperature properties after long time thermal exposure of 2197 alloy were studied. Microstructures of 2197 alloy after long time thermal exposure at different temperatures were observed by TEM. The results show that the tensile strength at elevated temperatures decreases with increasing test temperature, and the tensile properties at 200 °C are higher than those of traditional aluminum alloy used at elevated temperature. After exposure at temperatures below 150 °C for 100 h, the mechanical properties of 2197 alloy increase slightly. This is related to the high coarsening resistance of T1 phase and secondary precipitation of θ' phase at these temperatures. However, after exposure at 200 °C and 250 °C for 100 h, the mechanical properties of 2197 alloy decrease rapidly due to the dissolution of θ' phase and rapid coarsening of T1 phase at these temperatures.

Key words: 2197 Al-Li alloy; thermal exposure; heat resistant properties; T1 phase

铝锂合金由于具有低密度、高比强度和比刚度以及良好的耐腐蚀性和卓越的超塑成型性能^[1-2], 用其取代常规铝合金, 可使构件质量减轻 10%~15%, 刚度提高 15%~20%, 特别是它的价格比先进的复合材料便宜很多, 因此被认为是 21 世纪航空航天工业领域中最理想的轻质高强结构材料。2197 合金是一种新型的第三代铝锂合金, 该合金已成功取代 2124 合金用于 F-16 战斗机的后隔框, 满足了 8 000 h 使用寿命的要求, 而且

该合金相对减重 5%, 断裂韧性提高 7%^[3-4]。

一般来说, 航空工业对材料往往有一定的使用温度要求。当飞机航速为 2.0~2.4 马赫时, 机体与空气摩擦会使机身蒙皮温度达 90~190 °C^[5]。铝锂合金属于时效强化型铝合金, 在一定温度下长时间热暴露后, 由于强化相的粗化会导致合金强度水平的快速下降, 因此合金显微组织和性能的稳定性的判断合金能否在这些温度下使用的有效依据^[6]。然而, 目前国内对铝

基金项目: 国防科工委“十五”重点资助项目(MKPT-2004-19ZD)

收稿日期: 2006-12-28; **修订日期:** 2007-06-19

通讯作者: 魏修宇, 博士研究生; 电话: 0731-8830270; E-mail: s-maloy@mail.csu.edu.cn

锂合金的耐热性能研究较少,仅有少量报道^[7-8]。为此,本文作者研究了 2197 铝锂合金的高温拉伸性能以及不同温度、不同时间热暴露对合金常温力学性能及显微组织的影响,以期了解 2197 铝锂合金的耐热特性,为改善合金热稳定性和开拓新的应用领域提供基础数据和理论参考。

1 实验

实验用料为西南铝加工厂提供的 2197 铝锂合金热轧板材。该合金的化学成分分析结果见表 1。

表 1 2197 合金化学成分分析结果(质量分数, %)
Table 1 Measured chemical composition of 2197 alloy (mass fraction, %)

Cu	Li	Mg	Mn	Zr	Al
2.87	1.48	0.24	0.32	0.11	Bal.

合金板材经 510 ℃、1 h 固溶处理后水淬,并经过冷轧预变形 6%后,在 160 ℃时效 16 h 达到峰值强度。将经 T8 峰时效处理后的试样分别在 70、100、150、200 和 250 ℃下进行高温拉伸实验以及在这些温度下长时间热暴露后测量其室温拉伸性能。高温拉伸实验在 Instron8032 型电子拉伸机上进行,试样在测试温度下保温 20 min 后进行拉伸,拉伸应变速率为 2×10^{-4} s⁻¹。热暴露后的试样拉伸实验在 CSS-44100 万能电子拉伸机上进行,名义拉伸速度为 2 mm/min,所有样品都平行轧向截取。

透射电镜观察试样经打磨和双喷电解减薄制取,电解溶液为 1/4 硝酸和 3/4 甲醇混合溶液(体积分数),采用液氮冷却到-20~-35 ℃,工作电压为 15~20 V,电流控制在 80~95 mA。电镜观察在 TecnaiG²20 上进行,加速电压为 200 kV。

2 实验结果

2.1 高温拉伸性能

表 2 所列为 2197 合金在不同测试温度下的拉伸性能测试结果。从表 2 可以看出,随着温度的升高,合金强度逐渐降低。变形温度高于 150 ℃以后,合金强度下降速度加快。尽管如此,由实验结果可知,2197 合金在经过 T8 态峰值时效后,具有良好的高温性能,

250 ℃下的强度可达到常温时的 55%,而 200 ℃下的强度可达常温时的 72%。合金的伸长率随变形温度的升高而逐渐升高,在 200 ℃和 250 ℃高温拉伸,合金的伸长率分别比常温下提高了 55%和 89%。总体来说,从高温拉伸性能来看,2197 合金优于 2618、2219 等传统耐热铝合金^[9]。

表 2 2197 合金不同温度下的拉伸性能
Table 2 Tensile properties of 2197 alloy tested at different temperatures

Test temperature/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
25	491.9	397.5	14.5
70	487.8	377.3	14.3
100	470.5	349.6	18.4
150	434.6	328.3	20.2
200	355.4	294.5	21.7
250	271.0	228.6	27.4

2.2 热暴露后的室温拉伸性能

图 1 所示为 2197 合金经不同温度热暴露 100 h 后的室温拉伸性能。可以看出,2197 合金在 150 ℃以下的温度下热暴露 100 h 后,与未热暴露的合金相比,其强度没有降低,反而略有上升。当热暴露温度高于 200 ℃时,热暴露使合金的强度降低。经 200 ℃热暴露后,合金的抗拉强度降低了 19.5%;而经 250 ℃热暴露后,合金的抗拉强度降低了 47.7%。在 200 ℃以下温度热暴露 100 h,合金的伸长率变化不大,而经 250 ℃热暴露 100 h 后,合金的伸长率明显升高。

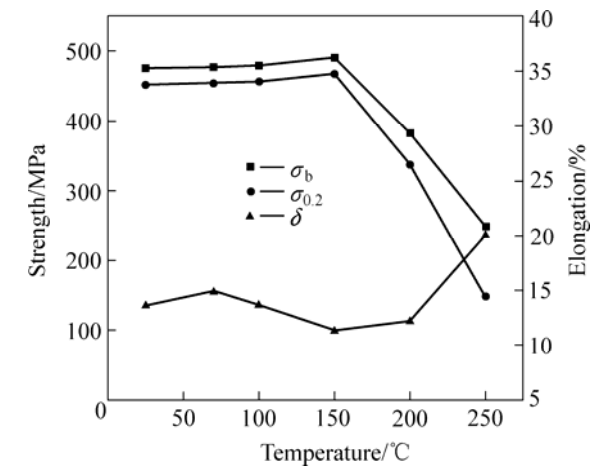


图 1 2197 合金经不同温度热暴露 100 h 后的室温拉伸性能
Fig.1 Tensile properties of 2197 alloy after 100 h exposure at different temperatures

图 2 所示为 2197 合金在 150 °C 热暴露不同时间后的室温拉伸性能。可以看出, 随着 150 °C 热暴露时间的延长, 合金的强度呈现出先上升后下降的趋势。热暴露 100 h 后, 合金的强度提高 15 MPa 左右, 随后合金的强度就逐渐降低, 但降低的幅度并不大; 热暴露 500 h 后, 合金的强度比未热暴露时降低了 16 MPa。至于伸长率, 随着热暴露时间的延长, 它呈现出逐渐下降的趋势, 但仍维持在较高水平, 经热暴露 500 h 后, 合金的伸长率仍保持在 9% 以上。

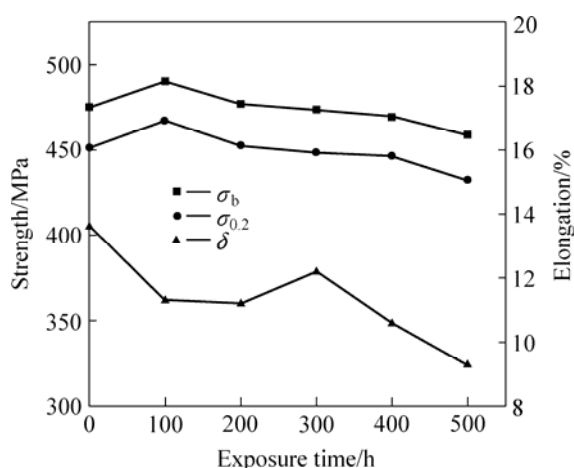


图 2 2197 合金 150 °C 热暴露不同时间后的室温拉伸性能

Fig.2 Tensile properties of 2197 alloy exposed at 150 °C for different times

2.3 显微组织

图 3(a)和(b)所示分别为 2197 合金热暴露前电子束从 $\langle 110 \rangle_\alpha$ 、 $\langle 100 \rangle_\alpha$ 方向入射的透射电镜照片。可以看出, 在 T8 状态下, 2197 合金的主要析出相为大量弥散分布的片状 T1 相(图 3(a))和少量的 θ' 相(图 3(b))。

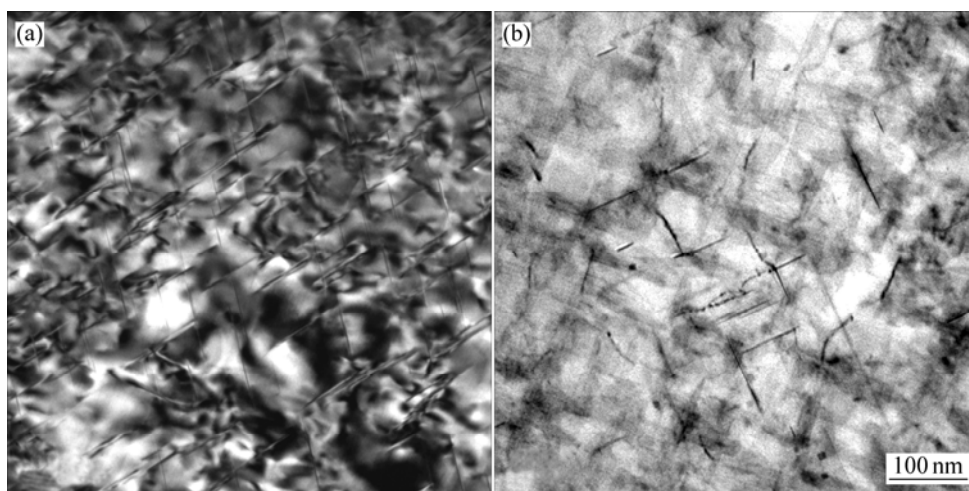


图 3 2197 合金热暴露前的 TEM 组织

Fig.3 TEM micrographs of 2197 alloy before thermal exposure: (a) T1, $\langle 110 \rangle_\alpha$; (b) θ' , $\langle 100 \rangle_\alpha$

合金在低于 150 °C 的温度下热暴露 100 h, 合金中主要析出相 T1 相的尺寸及分布没有发现明显的变化(图 4(a)), 这说明 T1 相在 150 °C 以下的温度具有良好的热稳定性, 有利于合金保持稳定的力学性能。同时, 低于 150 °C 温度热暴露的合金中 θ' 相数量有所增多, 尺寸有所增大, 并且这种趋势随热暴露温度的提高而更加明显(图 4(b)、(c)、(d))。当合金在 200 °C 热暴露时, TEM 组织中观察到析出相主要是 T1 相, θ' 相的数量很少, 说明在此温度下, 合金中的 θ' 相已经发生溶解, 同时 T1 相已经开始长大粗化且数量减少(图 4(e))。进一步升高热暴露温度到 250 °C, T1 相密度显著减小, 且尺寸更加粗大(图 4(f))。

图 5 所示为 2197 合金在 150 °C 热暴露不同时间后的 TEM 组织。可以看出, 150 °C 热暴露 300 h 后, 合金中的 T1 相和 θ' 相逐渐发生长大粗化, 因此其强度有所降低。热暴露 500 h 后, 合金中的 T1 相和 θ' 相进一步粗化, 且 T1 相的数量有所减少。

3 分析与讨论

2197 合金属中等 Cu/Li 比的铝锂合金, 在 T8 状态下, 其主要强化相为大量细小、弥散分布的 T1 (Al_2CuLi)相和少量的 θ' 相。T1 相为密排六方结构, 其惯析面为 $\{111\}^{[10]}$ 。在 $\{111\}$ 面上析出的片状相引起的临界分切应力增量大于在其它面所析出粒子引起的临界分切应力增量^[11], 因此以 T1 相为主要强化相的 2197 合金的室温及高温拉伸强度, 高于以在 $\{100\}$ 面析出的 θ' 相 (如 2219)或在 $\{210\}$ 面析出的 S' 相(如 2618)为主要强化相的传统耐热铝合金。

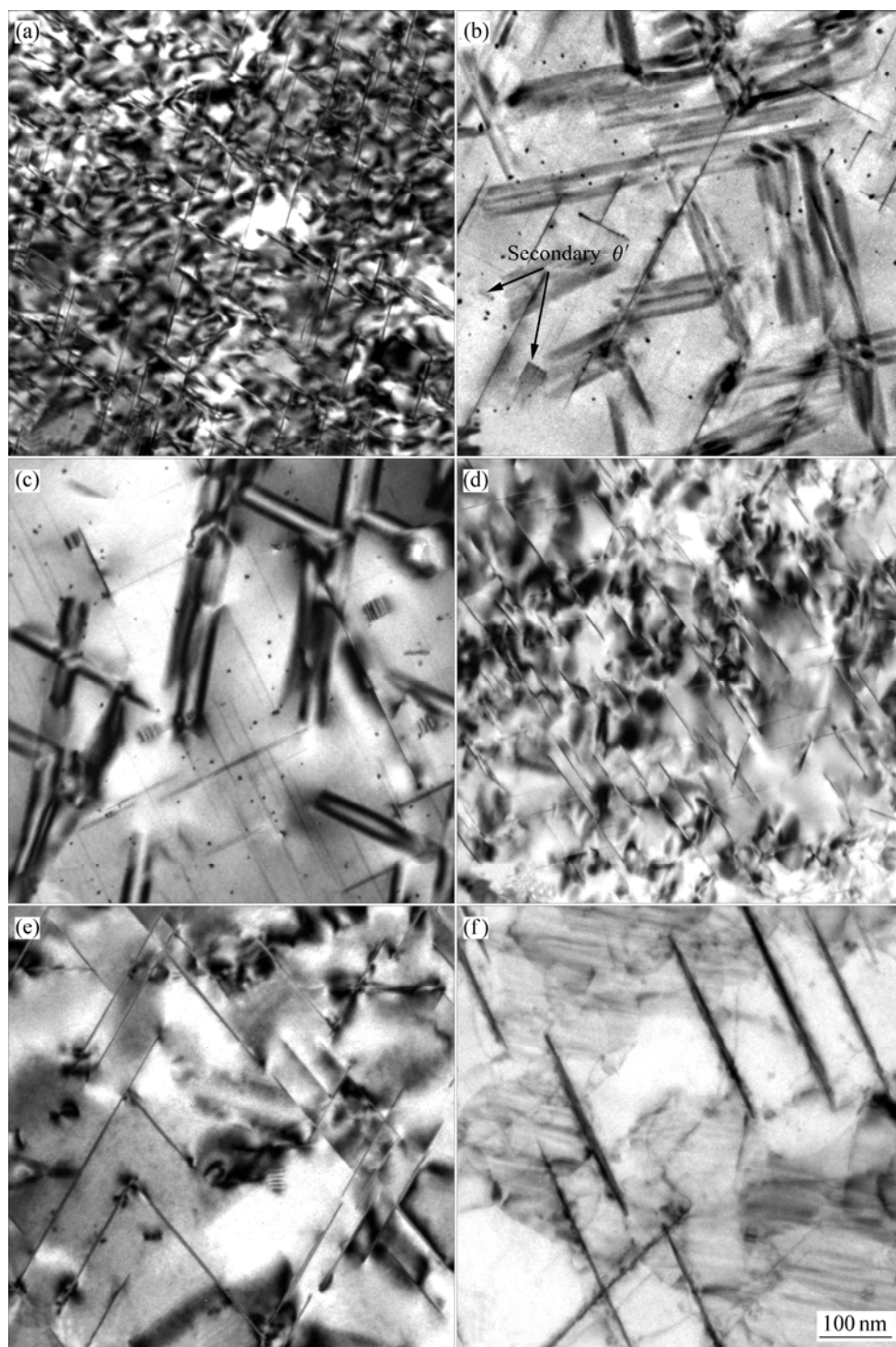


图 4 2197 合金经不同温度热暴露 100 h 后的 TEM 组织

Fig.4 TEM micrographs of 2197 alloy after 100 h exposure at different temperatures: (a) 70 °C, $\langle 110 \rangle_{\alpha}$; (b) 70 °C, $\langle 100 \rangle_{\alpha}$; (c) 100 °C, $\langle 100 \rangle_{\alpha}$; (d) 150 °C, $\langle 110 \rangle_{\alpha}$; (e) 200 °C, $\langle 110 \rangle_{\alpha}$; (f) 250 °C, $\langle 110 \rangle_{\alpha}$

本文的实验结果表明,2197 合金在 150 °C 以下具有较好的耐热性能,这主要与 T1 相有较高的抗粗化能力有关。片状相的长大粗化受台阶机制的长程扩散控制^[12-14]。T1 相与基体之间产生的错配较小,为

0.12%^[15],因此 T1 相与 Al 基体具有良好的匹配性,这种与基体良好的共格关系使得提供 T1 相粗化所需的台阶数量有限,T1 相粗化驱动力较小,因此 T1 相在一定的温度下粗化倾向较小,从而起到稳定合金力

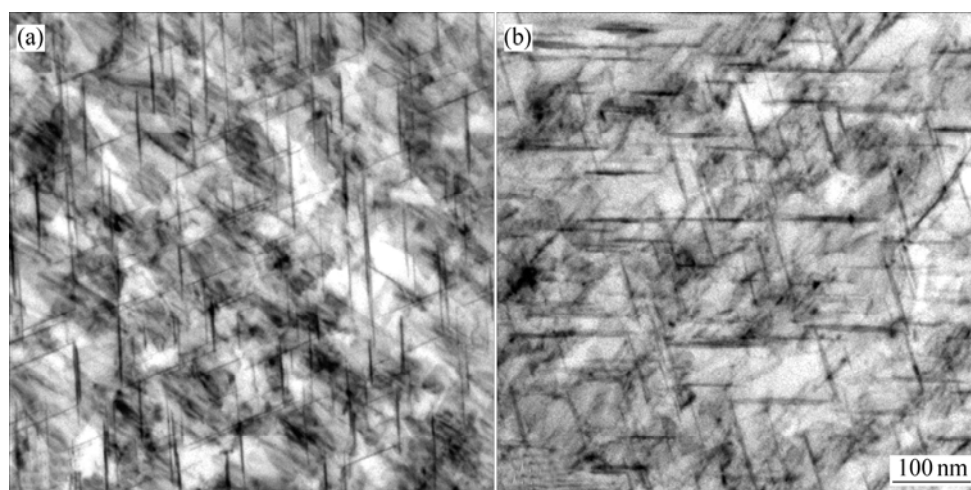


图 5 2197 合金在 150 °C 热暴露不同时间后的 TEM 组织

Fig.5 TEM micrographs of 2197 alloy exposed at 150 °C for different times: (a) 300 h, $\langle 110 \rangle_a$; (b) 500 h, $\langle 110 \rangle_a$

学性能的作用。

另一方面, 由于 2197 合金经 160 °C 时效 16 h 后, 合金基体中仍残留有部分的过剩溶质原子, 当合金在 150 °C 以下的温度长时间热暴露时, 会在合金中二次析出细小弥散的强化相^[16-17]。Gao 等^[17]的研究表明, 2090 合金在 90~150 °C 温度范围内热暴露时, 视热暴露温度的高低分别有 GP 区、 θ'' 相和 θ' 相析出。而在本实验中仅发现有 θ' 相数量的增多, θ' 相的二次析出可能是 2197 合金在 150 °C 以下温度热暴露后, 强度有所提高的主要原因。

当合金在 200 °C 和 250 °C 热暴露时, 合金中 Cu、Li 原子的扩散速度加快, 从而加快溶质原子向台阶迁移的速率; 同时, 在 200 °C 和 250 °C 下长时间热暴露, T1 相与基体逐渐失去共格关系, 台阶的形核阻力变小^[18-19], 提供 T1 相粗化的台阶数目增加, 因此 T1 相显著长大粗化, 合金的强度降低。另一方面, 高温下热激活过程进一步降低合金抵抗变形的能力。此外, 在 200 °C 和 250 °C 长时间热暴露, 合金可能出现表面脱 Li 现象, 进一步导致合金力学性能的下降。

4 结论

1) 2197 合金的高温拉伸强度随拉伸温度的升高而逐渐降低, 在 200 °C 下的高温拉伸性能优于传统高温用铝合金, 这与 $\{111\}$ 面析出的 T1 相的强化效果有关。

2) 在低于 150 °C 的温度下热暴露 100 h, 合金的强度未见明显下降。这是由于 T1 相在低于 150 °C 的

温度下具有较好的热稳定性, 同时 θ' 相的二次析出可能是合金强度略有上升的主要原因。

3) 在 200 °C 和 250 °C 下热暴露 100 h, 合金的强度显著下降。这与 θ' 相的溶解和 T1 相的显著粗化有关。

REFERENCES

- [1] Grimes R, Cornish A J, Miller W S, Reynolds M A. Aluminium-lithium based alloys for aerospace application[J]. Metals and Materials, 1985, 1(6): 357-363.
- [2] Lavernia E J, Grand N J. Aluminum-lithium alloys[J]. Journal of Materials Science, 1987, 22(5): 1521-1529.
- [3] Balmuth E S, Chellman D J. Alloy design for overcoming the limitations of Al-Li alloy plate[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Aluminum Alloys. USA: School of Mater Sci and Eng, The Georgia Institute of Technology, 1994: 282-289.
- [4] 黄兰萍, 郑子樵, 黄永平. 2197 铝-锂合金的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(12): 2066-2072.
HUANG Lan-ping, ZHENG Zi-qiao, HUANG Yong-ping. Microstructure and properties of 2197 Al-Li alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(12): 2066-2072.
- [5] Polmear I J, Pons G, Barbaux Y, Octor H, Sanchez C. After Concorde: evaluation of creep resistant Al-Cu-Mg-Ag alloys[J]. Materials Science and Technology, 1996, 15: 861-868.
- [6] Ortiz D, Brown J, Abdelshehid M, DeLeon P. The effects of prolonged thermal exposure on the mechanical properties and fracture toughness of C458 aluminum-lithium alloy[J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13: 170-180.

- [7] 陆政, 强俊, 吴一雷, 李永伟, 刘波操. 热暴露对铝锂8090合金挤压型材性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 1996, 19(4): 25-29.
- LU Zheng, QIANG Jun, WU Yi-lei, LI Yong-wei, LIU Bo-cai. Effects of thermal exposure on properties of Al-Li 8090 extrudates[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1996, 19(4): 25-29.
- [8] Zheng Z Q, Chen X Z, Chen Z G, Li S C, Wei X Y. Trace element effects on microstructure and mechanical properties in Al-Cu-Li alloy after thermal exposure[J]. Materials Science Forum, 2006, 519/521: 1931-1936.
- [9] Plomear I J, Couper M J. Design and development of an experimental wrought aluminum alloy for use at elevated temperatures[J]. Metallurgical Transactions A, 1988, A19(4): 1027-1035.
- [10] Flower H M, Gregson P J. Solid state phase transformations in aluminium alloys containing lithium[J]. Materials Science and Technology, 1987, 3(2): 81-90.
- [11] Nie J F, Muddle B C, Polmear I J. Effect of precipitate shape and orientation on dispersion strengthening in high strength aluminium alloys[J]. Materials Science Forum, 1996, 217/222: 1257-1262.
- [12] Gable B M, Pana M A, Shiflet G J, Starke E A Jr. The role of trace additions on the T1 coarsening behavior in Al-Li-Cu-X alloys[J]. Materials Science Forum, 2002, 396/402: 699-704.
- [13] Shiflet G J, Mangan M A, Meng W G. Growth by ledges[J]. Interface Science, 1998, 6(1/2): 133-154.
- [14] Ünlü N, Gable B M, Shiflet G J, Starke E A Jr. The effect of cold work on the precipitation of Ω and θ parallel in a ternary Al-Cu-Mg alloy[J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 2003, 34(12): 2757-2769.
- [15] Hutchinson C R, Fan X, Pennycook S J, Shiflet G J. On the origin of the high coarsening resistance of Ω plates in Al-Cu-Mg-Ag alloys[J]. Acta Materialia, 2001, 49(14): 2827-2841.
- [16] Kerr M J, Sweet E D, Bennett C G, Muddle B C. Effect of alkali metal impurities on the low temperature thermal stability of 2090 Al-Cu-Li alloys[J]. Materials Science Forum, 1996, 217/222: 1079-1084.
- [17] Gao X, Nie J F, Muddle B C. Secondary hardening in 2090(Al-Cu-Li) alloy[C]//Proceeding of the 6th International Conference on Aluminum Alloys. Toyohashi: The Japan Institute of Light Metals, 1998: 651-656.
- [18] Huang J C, Ardell A J. Crystal structure and stability of T1 precipitates in aged Al-Li-Cu alloys[J]. Materials Science and Technology, 1987, 3(3): 176-188.
- [19] Gable B M, Pana M A, Shiflet G J, Starke E A Jr. The role of trace addition on the T1 coarsening behavior in Al-Li-Cu-X alloys[J]. Materials Science Forum, 2002, 396/402: 699-704.

(编辑 袁赛前)