

电场时效对 2E12 铝合金力学性能和微观组织的影响

李智燕, 易丹青, 周明哲

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 研究时效时加高强电场对 2E12 铝合金的力学性能和微观组织的影响, 采用力学性能测试及透射电镜检测材料的力学性能和微观组织, 并分析电场对 2E12 铝合金的作用机理。结果表明: 16 kV/cm 电场时效使晶内 S' 相(Al_2CuMg) 粒子变得更加细小, 电场也使 T 相($\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$) 粒子变小, 这略微降低了 2E12 铝合金的屈服强度; 加电场时效时, 合金晶界上析出相细小弥散使合金的塑性提高; 电场一方面能够促进 S' 相的形核, 另一方面也能抑制其长大和粗化; 空位扩散时, 电场影响了空位周边的势场, 使空位倾向于朝电场强度的反方向运动。

关键词: 2E12 铝合金; 电场; 时效; 力学性能; 微观结构

中图分类号: TG 146.2+1

文献标识码: A

Effect of electric field aging on mechanical properties and microstructures of 2E12 aluminum alloy

LI Zhi-yan, YI Dan-qing, ZHOU Ming-zhe

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

Abstract: The influence of electric field aging on the mechanical properties and microstructures of 2E12 aluminum alloy was investigated by means of mechanical tests and transmission electron microscopy (TEM). The mechanism of the effect of an electric field was analyzed. The results show that the S' phase(Al_2CuMg) particles and T phase($\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$) particles are smaller after 16 kV/cm electric field aging, which decreases the yield strength of the alloy. Meanwhile, the grain boundaries of the specimen aged in electric field are composed by numerous ultra micro precipitates, and the ductility of the alloy is improved. The electric field can accelerate the nucleation of the new phase S' , while the coarsening of the S' phase is retarded by the electric field during the aging process. The electric field can influence the potential field of vacancies. As a result, the vacancies tend to move toward the opposite direction of the electric field.

Key words: 2E12 aluminum alloy; electric field; aging; mechanical properties; microstructure

电场是一种特殊能量场, 与传统能量场处理如温度场、应力场等相比, 电场处理对材料的影响有很大不同, 因此, 从 20 世纪 60 年代起, 国内外很多学者开始就电场处理对材料的影响进行研究。研究发现: 电场对某些金属及合金的再结晶^[1-2]、均匀化^[3-4]、固溶^[5-7]和时效^[8-9]等过程会产生影响; 电场

主要是通过影响某些元素的扩散从而影响固态相变的过程进而影响材料的性能, 如 Al-Li 合金中电场会影响 Li 元素的扩散; 电场会对某些合金和化合物的超塑性变形^[10-11]产生影响, 表明电场会通过影响合金及化合物位错运动及晶粒的变形进而影响其塑性; 电场还会影响某些液态合金的凝固^[12-13]过程。

基金项目: 中国铝业公司科技发展基金资助项目(CHALCO-2007-KJ-09)

收稿日期: 2008-10-27; **修订日期:** 2009-04-06

通讯作者: 易丹青, 教授, 博士; 电话: 0731-88876691; E-mail: danqing@mail.csu.edu.cn

不同的学者关于电场对不同材料的影响的观点也不尽相同。LIU 等^[9]认为电场时效会降低 2091 合金的时效峰值强度, 而肖伯涛等^[14]研究表明电场时效有助于提高 2014 铝合金板的屈服强度和硬度。电场处理对不同材料的作用效果不同, 原因可能与电场对不同元素的特定作用有关, 但具体的作用机制尚待研究。

2524 铝合金具有优良的室温强度、硬度、断裂韧性及抗疲劳性, 是目前断裂韧性和抗疲劳性能最为优异的航空 Al-Cu-Mg 合金^[15]。2E12 合金是我国在 2524 铝合金基础上最新研制的高性能 Al-Cu-Mg 合金, 目前还未有关于电场对 2E12(2524) 铝合金性能的影响的研究成果报道。本文作者以 2E12 合金为研究对象, 研究不同电场强度下人工时效 2E12 铝合金的力学性能和微观组织, 探讨电场对该合金的力学性能和微观组织的影响机理。

1 实验

实验用 2E12 铝合金为 2 mm 冷轧薄板, 其化学成分(质量分数, %)为 4.23Cu、1.4Mg、0.56Mn、0.06Fe、0.08Si、0.05Ti、余量 Al。板材按国标 GB228—76 沿轧制方向取样, 制成拉伸试样。试样放入 498 ℃ 左右的盐浴中固溶 30 min, 取出立刻淬火。然后放入 190 ℃ 恒温烘箱中进行电场时效 10 h, 电场强度分别为 0、8、12 和 16 kV/cm。采用正电场时效, 试样放在两块不锈钢板之间, 试样接高压直流电源正极, 两块不锈钢板与烘箱一起接高压直流电源负极。试样、不锈钢板之间用云母板隔开, 保证它们之间彼此绝缘。

时效后的板材在 CSS244100 电子拉伸机上进行拉伸试验, 测量其拉伸性能, 每个拉伸实验数据均为 3 个以上试样所测得的平均值。时效后样品经打磨和双喷电解减薄(电解液为硝酸和甲醇的混合溶液, 其质量比为 1:3)后, 在 TECNAIG²20 透射电镜上对其微观组织进行观察, 加速电压为 200 kV。

2 实验结果

2.1 电场时效对力学性能的影响

表 1 所列为时效后材料的拉伸实验结果。第一组数据来自 8 kV/cm 电场下时效样品, 和不加电场时效样品对照分析可看出, 加电场时效后材料的屈服强度略微降低, 伸长率略微提高。第二组数据来自 12 kV/cm 电场下时效样品, 与不加电场时效的样品相比, 加电场时效后材料的屈服强度下降了 10 MPa, 伸长率由 18.7% 提高到 19.7%。当电场强度提高到 16 kV/cm

表 1 时效后合金力学性能

Table 1 Mechanical properties of aged alloy					
Group No.	$E/(\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1})$	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta/\%$	$\Delta\delta/\%$
1	0	482	350	19.6	2.04
	8	490	346	20.0	
2	0	494	366	18.7	5.35
	12	493	355	19.7	
3	0	484	332	21.0	9.52
	16	483	325	23.0	

时, 与不加电场时效的样品相比, 电场时效后的样品的屈服强度仅降低了 7 MPa, 而伸长率从 21.0% 提高到 23%。每组实验中加电场时效样品比不加电场时效样品的伸长率都有所提高, 屈服强度略微降低, 并且随着电场强度的提高, 加电场时效和不加电场时效样品伸长率的差值 $\Delta\delta$ 也增大。

2.2 电场时效对微观结构的影响

2.2.1 电场时效对晶内析出相的影响

图 1 所示为第 3 组试验样品的 TEM 像, 其入射

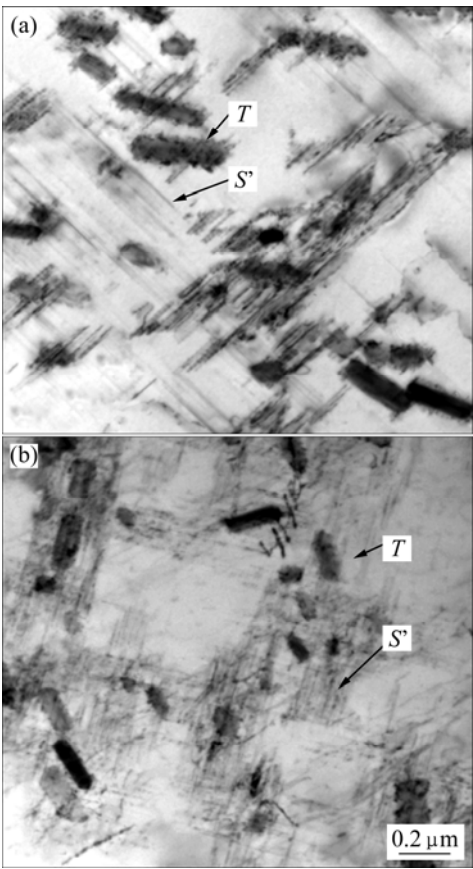


图 1 2E12 合金在 190 ℃ 时效 10 h 的 TEM 像
Fig.1 TEM images of 2E12 alloy aged at 190 ℃ for 10 h:
(a) Without electric field; (b) With electric field of 16 kV/cm

方向都为[001]方向。其中图 1(a)所示为不加电场时效后样品的 TEM 像,图 1(b)所示为加 16 kV/cm 电场时效后样品的 TEM 像。由图 1 可见,两个样品中晶内都分布着大量棒状相和少量针状相粒子。结合 TEM 形貌观察结果和相关的文献报道可以确定,棒状粒子为 T 相($\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$),针状相为 S' 相(Al_2CuMg)。从图 1 还可以看出,加电场时效后棒状的 T 相粒子变小和针状 S' 相变细变短。 T 相在时效以前就已经析出,电场时效后 T 相变小,可能是由于电场的作用促进了 T 相的回溶。加电场时效后 S' 相更加细小,可能是由于电场抑制了 S' 相的长大。

2.2.2 电场时效对晶界的影响

图 2 所示为不加电场时效后 2E12 铝合金晶界的 TEM 像,其中图 2(b)所示为图 2(a)的高倍像。由图 2 可以看出:不加电场时效样品的晶界清晰,晶界上析出物密集,看不出明显的粒子间隙。图 3 所示为图 2(b)中晶界 A 点的 EDS 分析结果。由图 3 可知, Mg 与

Cu 的摩尔比接近 1:1,表明晶界处的第二相成分应该为 Al_2CuMg 。那么可以推测,晶界上可能聚集着大量 S 平衡相。

图 4 所示为加 16 kV/cm 电场时效后 2E12 铝合金

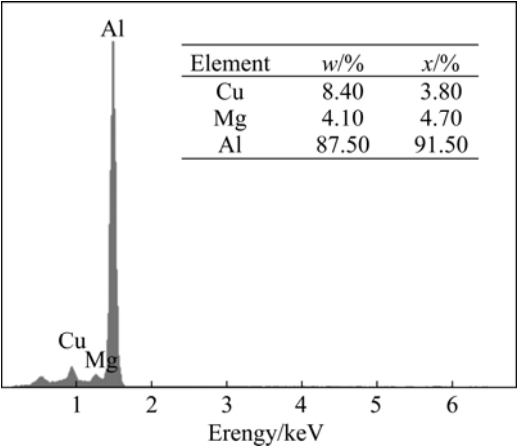


图 3 图 2(b)中 A 点的 EDS 分析结果
Fig.3 EDS analyst result of point A shown in Fig.2(b)

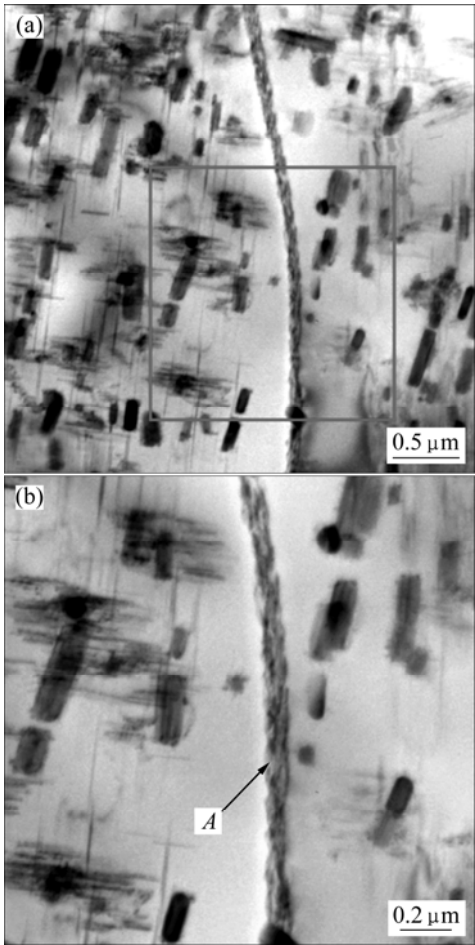


图 2 2E12 合金在 190 °C 不加电场时效 10 h 的晶界 TEM 像
Fig.2 TEM images of grain boundary of 2E12 alloy aged at 190 °C for 10 h without electric field

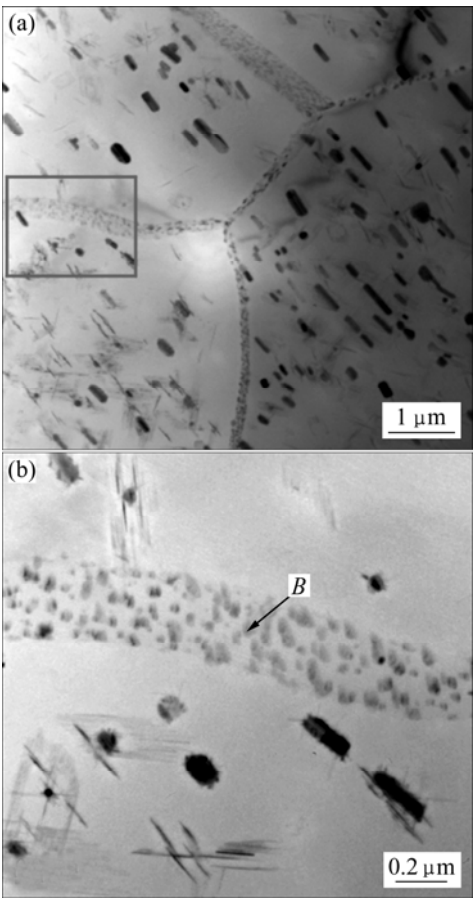


图 4 在 190 °C 加 16 kV/cm 电场时效 10 h 时 2E12 合金的晶界 TEM 像
Fig.4 TEM images of grain boundary of 2E12 alloy aged at 190 °C for 10 h with electric field of 16 kV/cm

晶界的 TEM 像,其中图 4(b)所示为图 4(a)中方框的高倍像。由图 4 可以看出,加 16 kV/cm 电场后,晶界上明显均分布着细小弥散的点状析出物,其形状与不加电场时效后的不相同。图 5 所示为图 4(b)中晶界处 B 点的 EDS 分析结果。由图 5 可知,B 点处的析出相的 Mg 与 Cu 的摩尔比为 1:1 左右,推测此晶界处析出粒子的成分也为 Al_2CuMg ,与不加电场时效后晶界处析出物的成分基本相同,从析出相的形状和成分推测它们为细小的 S' 非平衡相。

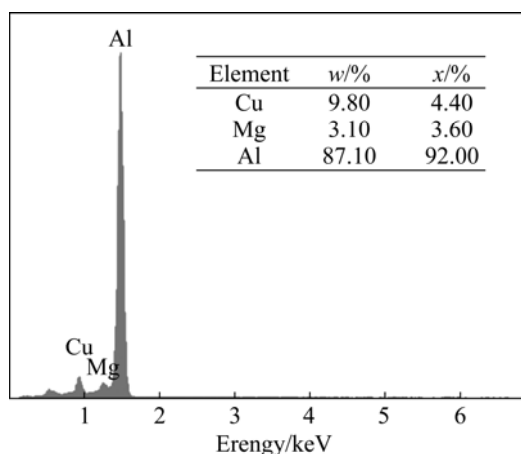


图 5 图 4(b)中 B 点的 EDS 分析结果

Fig.5 EDS analyst result of point B shown in Fig.4(b)

3 分析与讨论

3.1 微观组织的变化与力学性能变化之间的联系

在 16 kV/cm 的高强电场作用下,合金的屈服强度仅降低了 7 MPa,伸长率从 21% 提高到 23%。既然电场时效和非电场时效合金的析出相成分相同,那么加电场后力学性能的变化必定与微观组织的变化有密切的联系。

根据金属强化理论^[16],第二相粒子的体积分数和析出相粒子的弥散度对沉淀强化型合金的强度有影响。在其他条件都相同的情况下,析出相的体积分数越大,弥散度越高,合金的强度越大。加强电场后, T 相发生回溶而变短小,晶内 S' 相更细小,因此,电场时效后合金的屈服强度略有降低。

晶界的形态和微观结构对材料的塑性有影响。常规时效和加电场时效后晶界上的析出相的成分几乎相同,但是析出相的形态却有很大区别。加电场时效后 2E12 合金的晶界上的析出相是弥散分布的超微颗粒相。加电场时效后 2E12 合金的塑性提高,而强度只是略微下降,表明这种特殊的晶界可能对材料的塑性变形有好的作用,可以提高 2E12 合金的塑性和强度。

3.2 电场对 2E12 铝合金影响机理分析

至今为止,电场作用对材料的影响机理还不清楚,需要进一步的研究。在先前的研究中^[8-9]有作者认为电场作用对铝合金的合金元素 Li、Cu 等的扩散和分布产生影响,认为 Li 原子在晶界非平衡偏聚,而 Cu 原子等则向外表面扩散。YANG 和 CONRAD 等^[11,17]对合金超塑性的研究结果都表明,电场对合金或化合物的塑性、韧性或相变有明显的影响,但对其作用机理只是解释为电场作用影响了合金或化合物的空位形成或扩散,未对其具体作用机理做出深层次的解释。

LIU 等^[6]试图用电子理论解释电场对金属的作用机理,认为正电场导致合金电子密度的降低,使固溶体的内能降低。在此,本文作者进一步讨论电场对新相的形核以及空位运动的作用机制。

3.2.1 电场对时效时 S' 相形核长大的影响

固态相变时体系的自由能变化由下式表达:

$$\Delta G = -V(\Delta F_v - \varepsilon) + S\sigma \quad (1)$$

式中: ΔF_v 是形成单位体积新相的自由能的变化, ε 是形成单位新相应变能的变化, σ 是新旧相界单位面积界面能的变化, V 为新相体积, S 为新旧相界面面积。假设新相的晶核是半径为 r 的球形,令 $\partial G / \partial r = 0$, 推出临界晶核半径为

$$r^* = \frac{2\sigma}{\Delta F_v - \varepsilon} \quad (2)$$

临界形核功:

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\sigma^3}{3(\Delta F_v - \varepsilon)^2} \quad (3)$$

式(1)中

$$\Delta F_v = \Delta U - T\Delta S \quad (4)$$

式中: ΔU 为新相与固溶体的内能差,

$$\Delta U = U_{S'} - U_0 \quad (5)$$

如前所述,加正电场时,固溶体的内能 U_0 降低,则 ΔU 增大,推出 ΔF_v 增大,则新相的临界形核功 ΔG^* 降低,形核率可能增大。加正电场时,可能更加易于促进 S' 相的形核。

而从实验结果中得出,加电场时效后 S' 相更加细小,说明电场抑制了 S' 相的长大和粗化。由实验结果及以上的理论分析可以说明:电场一方面能够促进 S' 相的形核,另一方面也能抑制其长大和粗化。

3.2.2 电场对空位运动的影响

空位可以看作是带负电荷的粒子^[18],在扩散的过程中会受电场影响。图 6 所示为空位在电场作用下的

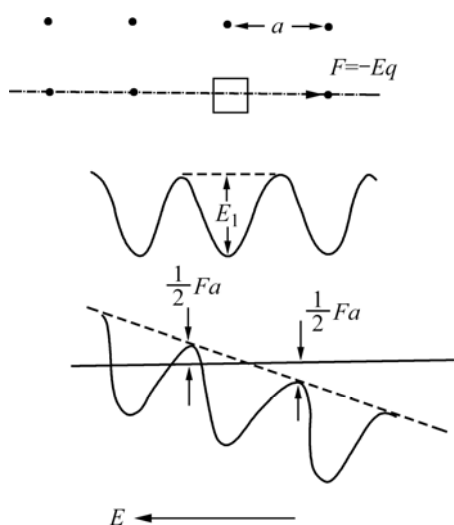


图6 空位在电场作用下的势场^[19]

Fig.6 Potential field of vacancies under effect of electric field^[19]

示意图。图6中黑点为原子，白方框为空位，原子间距为 a 。由于势能的对称性，空位越过势垒跳向左边和右边的几率是一样的，几率 $P = v_{02} \exp\left(-\frac{E_2}{k_B T}\right)$ ，即空位做无规则的布朗运动。当空位处于方向向左的电场中，会受到电场力 $F = -Eq$ 的作用(负号表示力的方向与电场的方向相反)，情况就完全不同。这时的势垒不再是对称的了，空位左边的势垒升高了 $\frac{1}{2}Eqa$ ，右边的势垒降低了 $\frac{1}{2}Eqa$ 。所以，在新的情况下，空位每秒向左和向右跳动的几率分别为

$$P_L = v_{02} \exp\left[-\frac{\left(E_2 + \frac{1}{2}Eqa\right)}{k_B T}\right] \quad (6)$$

$$P_R = v_{02} \exp\left[-\frac{\left(E_2 - \frac{1}{2}Eqa\right)}{k_B T}\right] \quad (7)$$

每秒向左或向右跳动的几率，实际上也可以认为是每秒向左或向右跳动的步数，因此，空位每秒向右跳动的步数可表示为

$$P_R = v_{02} \exp\left[-\frac{\left(E_2 - \frac{1}{2}Eqa\right)}{k_B T}\right]$$

$$v_{02} \exp\left[-\frac{\left(E_2 + \frac{1}{2}Eqa\right)}{k_B T}\right]$$

$$= v_{02} \exp\left(-\frac{E_2}{k_B T}\right) 2 \sinh\left(\frac{Eqa}{2k_B T}\right) \quad (8)$$

所以空位向右运动的速度(v_R)，即与 E 相反方向 S 运动的速度可表示为

$$v_R = av_{02} \exp\left(-\frac{E_2}{k_B T}\right) 2 \sinh\left(\frac{Eqa}{2k_B T}\right) \quad (9)$$

也就是说，空位向与 E 相反方向运动。空位在运动过程中会碰到晶界，然后在晶界处聚集，这些聚集的空位成为晶界处超微颗粒的形核点。因为空位沿电场相反方向运动，所以可推测与电场方向垂直的晶界处聚集的空位相对其他方向较多，析出的超微颗粒也较多。

4 结论

1) 2E12 铝合金电场时效后力学性能的变化为：电场时效略微降低了 2E12 铝合金的屈服强度，同时提高了 2E12 铝合金的伸长率。

2) 16 kV/cm 电场时效使晶内 S' 相变得更加细小，电场也促进 T 相回溶，使 T 相变小。加 16 kV/cm 电场时效晶界上弥散分布着超微点状颗粒，推测它们为细小的 S' 非平衡相。而不加电场时效后样品的晶界清晰，晶界上聚集着大量 S 平衡相。

3) 电场一方面能够促进 S' 相的形核，另一方面也能抑制其长大和粗化。空位扩散时，电场影响了空位周边的势场，使空位向电场强度的反方向运动。当空位运动过程中碰到晶界并在晶界聚集成为晶界超微粒子的形核点。

REFERENCES

- [1] LIU W, WU T K, GODFREY A, LIU Q. Effects of electric field treatment on recrystallization of copper single crystal[J]. Scripta Materialia, 2005, 52(6): 495-499.
- [2] LIU W, CUI J Z. The effect of electric field on the recrystallization of 2091 Al-Li alloy[J]. J Mater Sci Lett, 1997, 16: 1400-1401.
- [3] LIU W, CUI J Z. Effect of the homogenization treatment in an electric field on T1 precipitation in 2091 Al-Li alloy[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1995, 33(4): 623-626.
- [4] 刘伟, 崔建忠. 电场均匀化对 2091Al-Li 合金时效过程中第

- 二相析出的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 1997, 26 (1) : 31-34.
- LIU Wei, CUI Jian-zhong. Effect of the homogenization treatment in an electric field on the second phase precipitation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1997, 26(1): 31-34.
- [5] 刘北兴, 冯海波, 李仁顺, 杨德庄. 电场固溶处理对1420铝锂合金组织和性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2000, 8(2): 21-24.
- LIU Bei-xing, Feng Hai-bo, LI Ren-shun, YANG De-zhuang. Effect of solution treatment in an electric field on microstructure and properties of 1420Al-Li alloy[J]. Material Science & Technology, 2000, 8(2): 21-24.
- [6] LIU Bing, CHEN Zheng, WANG Yong-xin, WANG Xi-ning. The effect of an electric field on the mechanical properties and microstructure of Al-Li alloy containing Ce[J]. Mater Sci Eng A, 2001, 313: 69-74.
- [7] LIU W, LIANG K M, ZHENG Y K, CUI J Z. Effect of an electric field during solution treatment of 2091 Al-Li alloy[J]. J Mater Sci Lett, 1996, 15: 1327-1329.
- [8] LIU W, LIANG K M, ZHENG Y K, CUI J Z. Study of the diffusion of Al-Li alloys subjected to an electric field[J]. J Mater Sci, 1998, 33: 1043-1047.
- [9] LIU W, CUI J Z. A study on the ageing treatment of 2091 Al-Li alloy with an electric field[J]. J Mater Sci Lett, 1997, 16: 1410-1411.
- [10] CAO W D, LU X P, SPRECHER A F, CONRAD H. Superplastic deformation behavior of 7475 aluminum alloy in an electric field[J]. Mater Sci Eng A, 1990, 129: 157-156.
- [11] CONRAD H, YANG D. Effect of DC electric field on the tensile deformation of ultrafine-grained 3Y-TZP at 1 450-1 600 °C[J]. Acta Materialia, 2007, 55: 6789-6797.
- [12] LIU Bing, ZHAO Zhi-long, WANG Yong-xin, CHEN Zheng. The solidification of Al-Cu binary eutectic alloy with electric fields[J]. Journal of Crystal Growth, 2004, 271: 294-301.
- [13] 刘兴江, 陈绍红. 脉冲电场对FeMnSiCr 形状记忆合金凝固组织及形状记忆效应的影响[J]. 功能材料, 2007, 10 (38): 1661-1663.
- LIU Xing-jiang, CHEN Shao-hong. Effect of the pulse electric field to the solidification microstructure and shape memory effect of the FeMnSiCr alloy[J]. Function Materials, 2007, 10(38): 1661-1663.
- [14] 肖伯涛, 赵 骧, 何长树, 周俊强, 赵 刚, 左 良. 电场时效对2014铝合金的微观组织和力学性能的影响[J]. 材料与冶金学报, 2006, 5(2): 137-140.
- XIAO Bo-tao, Zhao Xiang, HE Chang-shu, ZHOU Jun-qiang, ZHAO Gang, ZUO Liang. Effects of electric field aging on microstructures and mechanical properties of 2014 aluminum alloy[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2006, 5(2): 137-140.
- [15] SRIVATSAN T S, KOLAR D, MAGNUSEN P. Influence of temperature on cyclic stress response, strain resistance, and fracture behavior of aluminum alloy 2524[J]. Mater Sci Eng A, 2001, 314: 118-130.
- [16] 李松瑞, 周善初. 金属热处理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003: 234.
- LI Song-rui, ZHOU Shan-Chu. Metal heat treatment[M]. Changsha: Centre South University Press, 2003: 234.
- [17] YANG D, CONRAD H. Influence of an electric field on grain growth in extruded NaCl[J]. Scripta Materialia, 1998, 38(9): 1443-1448.
- [18] 王秀芳, 武高辉, 孙东立, 王美玲. 电场时效对 2024 铝合金尺寸稳定性的影响[J]. 材料热处理学报, 2003, 24(1): 52-54.
- WANG Xiu-fang, WU Gao-hui, SUN Dong-li, WANG Mei-ling. Effect of an electric field to the dimensional stability of 2524 aluminum alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2003, 24(1): 52-54.
- [19] 方俊鑫, 陆 栋. 固体物理学(上册)[M]. 上海科学技术出版社, 1982: 173.
- FANG Jun-xin, LU Dong. Solid state physics book(I)[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982: 173.

(编辑 何学锋)