

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201611133

# 拉伸变形对 AA6016 铝合金汽车外板再结晶组织及性能的影响

高冠军, 李家栋, 李 勇, 王昭东, 贺 晨, 邱洪双

(轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学), 沈阳 110819)

**摘要:** 为优化冲压成形工艺, 研究了不同拉伸形变量对 T4P 态 AA6016 冷轧薄板再结晶、析出行为、烘烤硬化性及断裂方式的影响规律。采用与气垫炉生产线类似的新型热处理设备, 对合金进行固溶处理, 预时效后室温停放, 获得 T4P 态合金。以单向拉伸模拟板材局部冲压成形过程, 采用金相显微镜、扫描电镜和透射电镜, 对合金再结晶组织、拉伸断口以及位错进行观察, 并结合 DSC 测定和拉伸性能测定, 对合金析出行为及力学性能表征。结果表明: 随拉伸形变量增加, 局部晶粒有被拉长的趋势; 形变可抑制 GP 区溶解, 并促进强化相析出; 烘烤硬化性随形变增加而减弱; 形变较小时, 烘烤前后断裂方式均为塑性断裂, 而形变较大时, 烘烤前合金更加趋向于解理断裂, 烘烤后解理断裂趋势减弱。

**关键词:** 铝合金; 拉伸变形; AA6016; 再结晶; 析出行为; 烘烤硬化性; 断裂

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)05-0154-05

## Influence of tensile deformation on recrystallization and mechanical properties of AA6016 aluminium alloy used for automotive body outer sheet

GAO Guanjun, LI Jiadong, LI Yong, WANG Zhaodong, HE Chen, DI Hongshuang

(State Key Laboratory of Rolling and Automation (Northeastern University), Shenyang 110819, China)

**Abstract:** In order to optimize stamping process, the effect of tensile deformation on recrystallization, precipitation behavior, bake hardenability and fracture mechanisms of a cold-rolled AA6016 sheet with T4P state were investigated. The alloy was solution heat treated in new heating treatment equipment, similar to air-cushion furnace production line, and then pre-aged immediately. After that the sheet was placed at room temperature in order to achieve T4P state. The local stamping process was simulated by uniaxial tensile. Recrystallization, fracture and dislocations were observed by optical microscopy, scanning electron microscopy and transmission electron microscopy respectively. Combined with differential scanning calorimetry (DSC) and tensile tests, precipitation behavior and mechanical property were characterized. The results indicated that local grains were elongated with the increasing of the deformation. GP zones were suppressed, and strengthening phase precipitation was promoted by deformation. Bake hardenability decreased with the increasing of the deformation. The fracture mechanisms were plastic fracture before and after bake hardening with small deformation. While the alloy tended to cleavage fracture before bake hardening, and the trend of cleavage fracture weakened after bake hardening with large deformation.

**Keywords:** aluminium alloy; tensile deformation; AA6016; recrystallization; precipitation behavior; bake hardenability; fracture

铝合金因高强度重量比、良好成形性和抗腐蚀性、高回收利用率等优点, 已成为汽车轻量化首选材料<sup>[1-3]</sup>。汽车外板预时效后先经过冲压成形, 再进行涂漆烘烤处理。冲压平均形变量为 2%, 局部可达 5% 甚至更高, 涂漆烘烤后强度增加。室温下拉伸变形对合金板材的组织及性能产生重要的影响, 有研究指出, AA6016 合金板经固溶处理后立即进行适量的预应变, 可以有效抑制自然时效的恶化效应, 且

变形引入的位错可以为 GP 区提供不均匀形核质点, 以便更容易转变为  $\beta''$  相<sup>[4]</sup>。而预时效态 AA6016 合金板经适当拉伸形变处理后, 可大大促进沉淀相的析出, 合金烤漆硬化增量大幅增加, 从而满足作为车身外板抗凹性的需求<sup>[5-6]</sup>。对充分自然时效 AA6082 合金板进行变形处理和烤漆处理后, 会出现明显烤漆软化现象, 但经过拉伸形变处理, 可以部分弥补由软化导致板材屈服强度的降低<sup>[7]</sup>。还有研究表明, 随拉伸形变量增大, AA6016 合金板中各析出相析出温度降低, 但改变形变量并不能使其析出激活能发生变化<sup>[8]</sup>。虽然对室温变形后续影响的研究增多, 但由于预时效态合金不同部位冲压时变

收稿日期: 2016-11-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(N140703002)

作者简介: 高冠军(1989—), 男, 博士研究生;

王昭东(1968—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 李 勇, liyong@ral.neu.edu.cn

形不均,冲压后合金组织性能变化规律较为复杂,研究仍不够详尽.因此,以单向拉伸模拟板材局部冲压成形过程,掌握不同形变条件下合金再结晶组织性能变化规律,就可以对后续时效过程进行调控,为制定合理的热处理及冲压工艺提供良好的理论基础.

本文以 AA6016 车身外板为研究对象,采用与气垫炉生产线类似的特色热处理实验设备,重点研究和讨论了不同拉伸变形量对预时效态板材再结晶组织、后续析出行为、烘烤硬化性以及断裂方式的影响规律,从而为 AA6016 汽车外板的生产与性能预测提供可参考试验依据.

## 1 试验

试验材料采用某企业提供的 AA6016 冷轧薄板,厚 1mm,板材表面质量与尺寸精度均符合相关标准要求,其成分如表 1 所示.

表 1 实验合金化学成分

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Cr	Al
1.100	0.550	0.136	0.090	0.050	0.010	0.015	0.103	余量

一般高端铝板带由于在热处理过程中强度低,容易表面擦伤,且处理效果对温度敏感性较高,只能采用气垫式连续热处理炉进行热处理.所谓气垫式连续热处理炉是使板带被炉内的气流像垫子一样支撑起来,不与炉体接触的一种高速连续退火炉<sup>[3]</sup>.本实验合金板经实验室自行开发的新型热风循环式铝合金热处理全自动实验平台进行热处理,该热处理实验平台的固溶炉、时效炉采用强制热风循环高速热空气加热料片,配置水冷、风冷淬火装置,采用高速移动机械手进行实验料片的快速转移,可以进行与气垫炉生产线类似的快速及均匀固溶、预时效处理.

实验 AA6016 汽车板进行 560℃×110 s 快速固溶并快速风冷后,使可溶相充分回溶于基体及晶粒完全再结晶.随后立即于时效炉中进行预时效处理,预时效温度为 100℃,时间 8 h.预时效后空冷至室温,停放 2 周(T4P 态)模拟板材从铝加工厂到汽车制造厂存储运输过程.以单向拉伸模拟板材局部冲压成形,拉伸试样取于 T4P 态,取样方向垂直于轧制方向.拉伸变形量分别为 0%、2%、5%、10% 和 15%,记为 S0 至 S15.变形后试样于时效炉中进行 185℃×20 min 的模拟烤漆处理,随后风冷至室温.金相、DSC 和透射样均取自变形后拉伸板平行段,对变形及烤漆后试样分别进行拉伸试验,获取其力学性能,并进行断口观察.

采用 INSTRON 4206 型万能电子试验机,并根

据 GB/T228.1-2010 标准进行拉伸试验.再结晶组织经电解抛光+阳极覆膜后,在 Imager.M2m 型蔡司光镜下观察.采用 Q100 型差示扫描量热仪(differential scanning calorimetry, DSC)进行 DSC 试验,纯铝坩埚作参比物及样品坩埚,以 10℃/min 的速率从室温加热至 500℃,氩气保护.透射试样约为 60 mm 厚的  $\phi 3$  mm 圆片,双喷减薄后在 Tecnai G2 F20 型透射电镜(TEM)下进行位错观察.采用 ZEISS ULTRA 55 型扫描电镜(SEM)对拉伸断口进行观察.

## 2 结果与分析

### 2.1 拉伸变形量对再结晶组织的影响

T4P 态合金板材在不同变形量条件下,经电解抛光且阳极覆膜处理后的金相组织如图 1 所示.冷轧薄板固溶处理后,其纤维组织均已完全再结晶,形成等轴的再结晶晶粒,平均晶粒尺寸约为 39 nm.随着变形量增大,再结晶晶粒变形程度增加,沿单向拉伸方向,局部等轴晶粒有伸长的趋势.由图 1 可知,当形变为 15% 时,个别晶粒长宽比约为 3:1,而形变为 5% 以下时,再结晶晶粒无明显变化.

单向拉伸时,外加载荷逐渐增大,再结晶晶粒开始进行塑形变形,但由于受到晶界的阻碍和晶粒不同位向的影响,变形并不均匀,即各晶粒变形是不均匀的,有的晶粒变形量较大,有的晶粒变形量较小.所以即使在较大变形条件下(见图 1(e)),也只是观察到部分晶粒被拉长<sup>[9]</sup>.

### 2.2 拉伸变形量对合金析出行为的影响

T4P 态合金板材经不同变形后 DSC 升温曲线如图 2 所示.可以看出 T4P 态合金变形后,DSC 曲线主要包括 GP 区溶解峰、 $\beta''$  相析出峰和  $\beta'$  相析出峰<sup>[10]</sup>.合金 S0 曲线在 210℃ 左右出现强烈的 GP 区溶解峰,当变形增加到 5% 时,GP 区溶解峰小消失,而在 S15 曲线的 155℃ 左右重新出现.一方面,由变形产生的形变能高于某个临界值时,可能在室温下促使 GP 区向  $\beta''$  相转变.合金 S5 形变较大,室温下已经发生相转变,从而减弱 GP 区溶解峰.另一方面,变形引入的大量位错分布于基体中,如图 3 所示.其在升温过程中发生回复,部分能量用于位错运动,使 GP 区溶解能量削弱.合金 S15 曲线 GP 区溶解峰重现且在 120℃ 左右出现析出峰,这是由于过量变形产生大量空位,这些空位可在升温过程中为  $\beta''$  相前驱相提供形核位置,形成更多 GP 区原子团簇.继续升温,新形成的 GP 区相继溶解,故在合金 S15 中出现回溶峰.

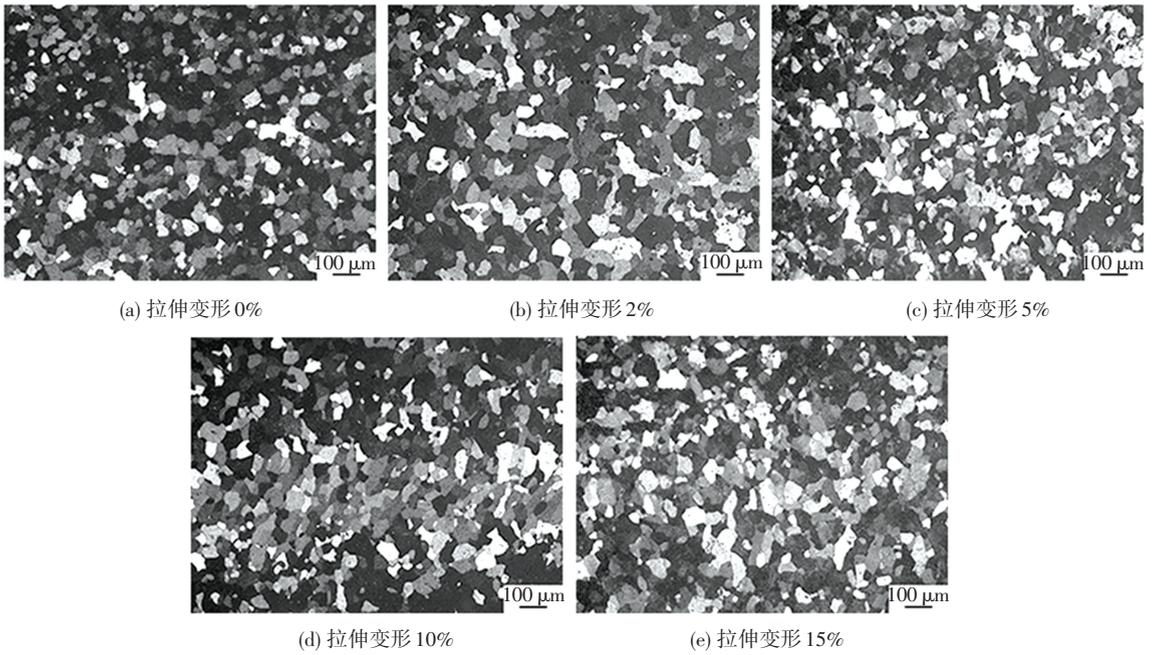


图 1 不同拉伸变形 AA6016 合金再结晶金相组织

Fig.1 Metallographic structure of AA6016 alloy with different tensile deformation

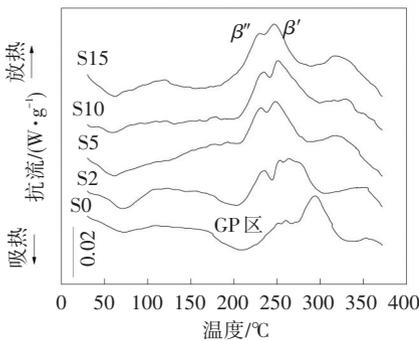
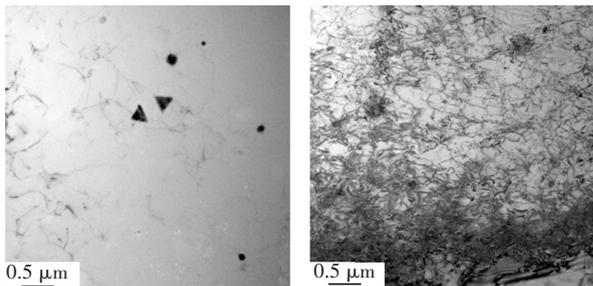


图 2 不同拉伸变形 T4P 态 AA6016 合金 DSC 升温曲线

Fig.2 DSC thermograms of AA6016 alloy with T4P state after different tensile deformation



(a) 拉伸变形 0% (b) 拉伸变形 15%

图 3 不同拉伸变形 T4P 态 AA6016 合金位错分布

Fig.3 Dislocation distribution of AA6016 alloy with T4P state after different tensile deformation

由图 2 还可知,随着变形量的增加,β<sup>''</sup>相以及 β<sup>'</sup>相析出峰析出温度显著降低.合金 S0 的 β<sup>''</sup>相析出温度约为 250 °C,而合金 S15 的 β<sup>''</sup>相析出峰析出温度降低至 230 °C.变形产生的空位可为溶质原子提供扩散通道,加快溶质原子扩散速率,使其在升温

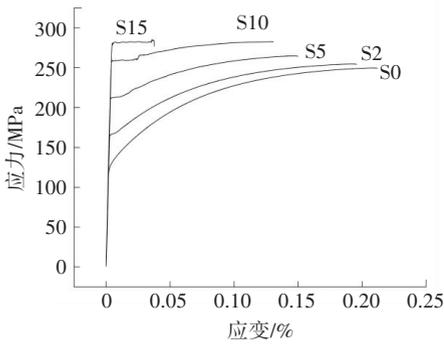
过程中可以快速聚集.并且由变形获得的形变储能也可以在一定程度上加快溶质原子运动,提高 GP 区长大大速率而发生相转变,或可以补充 β<sup>''</sup>相及 β<sup>'</sup>相重新形核长大所需的能量,降低 β<sup>''</sup>相及 β<sup>'</sup>相析出峰析出温度.

### 2.3 拉伸形变量对合金烘烤硬化性的影响

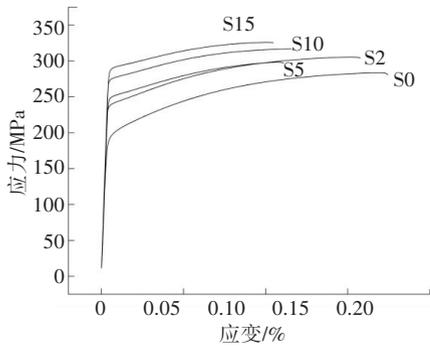
合金板材在冲压成形后,需进行烘烤硬化处理,从而大幅提高板材强度.这不仅可以使合金作为汽车外板具有良好的表面光鲜性,而且还满足客户对其抗凹性的要求<sup>[11-12]</sup>.一般烘烤涂装工艺是在 185 °C 温度下加热保温 20 min<sup>[13]</sup>.图 4 为合金板材不同变形及烘烤硬化处理后的应力-应变曲线.由图 4(a)可知,随着形变量的提高,合金强度增加而塑性下降.最大形变量为 15% 时,其屈服强度 R<sub>p0.2</sub> 为 281.78 MPa,较未变形合金 S0 增加 152.58 MPa.形变引入大量位错(图 3),位错密度增加,运动时相互交割加剧,产生位错塞积群、缠结网等障碍,阻碍位错进一步运动,引起变形抗力增加,合金强度提高.

涂装烘烤处理后,不同变形合金板材强度均有所提高,随着形变量的增加,其屈服强度 R<sub>p0.2</sub> 随之增加,而屈服强度增量 ΔR<sub>p0.2</sub> (烘烤处理前后屈服强度差)显著降低,如图 5 所示.合金 S0 的强度增量为 63.97 MPa,而合金 S15 的强度增量下降至 7.42 MPa.随着变形增加,烘烤前后伸长率先降低后升高,合金 S0 烘烤处理后伸长率降低 4.66%,当形变量增大到 15% 时,合金烘烤后比烘烤前伸长率提高 5.11%.合

金板材在烘烤过程中,预时效形成的 GP 区沿着一维方向快速长大,形成  $pre-\beta''$  相,强度大幅增加<sup>[14-15]</sup>。但大变形导致位错过高,局部区域发生位错缠结,强化相形成过程中,溶质原子扩散不均匀,进而其尺寸与分布也不均匀,强度提升受限<sup>[5]</sup>。烘烤处理过程中,大变形合金发生回复,位错运动消耗了部分能量,减少用于促进 GP 区长大的能量,强度增量  $\Delta R_{p0.2}$  降低。同时,位错由于运动而相互抵消,位错密度降低,减少合金应力集中和各种缺陷,而使烤漆后塑形增加。



(a) 烘烤处理前



(b) 烘烤处理后

图4 不同拉伸变形 AA6016 合金烤漆前后应力应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of AA6016 alloy with different tensile deformation before and after baking treatment

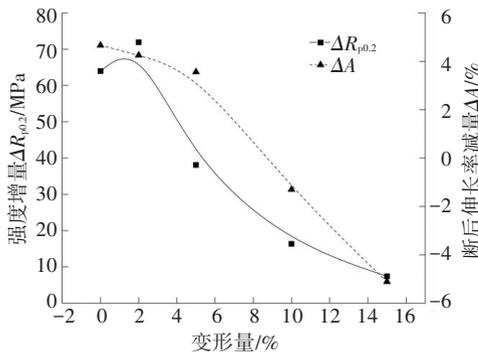
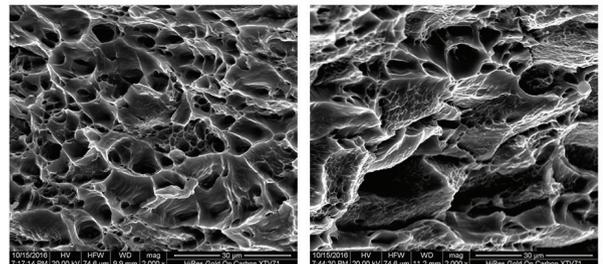


图5 不同拉伸变形 AA6016 合金烘烤处理前后强度及断后伸长率变化量

Fig.5 Variation of strength and elongation of AA6016 alloy with different tensile deformation before and after baking treatment

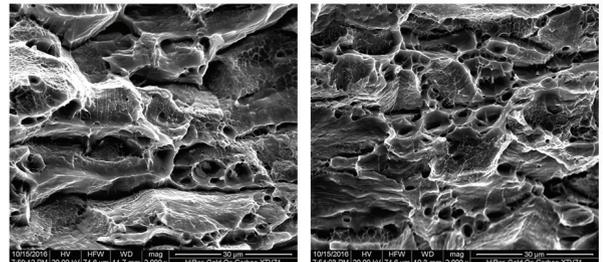
### 2.4 拉伸形变量对合金断裂的影响

图6为合金S2和S15烘烤处理前后拉伸断口形貌。合金S2烘烤处理前,断口处存在大量椭圆形韧窝,这些韧窝粗大、较深,并且分布均匀,其断裂方式为塑形断裂。烘烤后,韧窝整体变小,粗大韧窝分布不均。其原因是当变形较小时,合金塑形较好,而烤漆处理后,强度提高,合金塑性显著降低。当变形量增加到15%时,烘烤前,合金塑性急剧降低,伸长率仅为6.69%,大变形引起位错塞积,造成应力集中,从而开裂。韧窝数量大大减少,“河流花样”出现于断口处,其断裂方式更趋向于解理断裂。烘烤后,如前文所述,合金发生回复,位错密度降低,应力集中减少,塑性提升,伸长率增加至11.80%。断口处虽然仍存在“河流花样”,但韧窝数量比明显增多,解理断裂趋势降低。



(a) 拉伸变形2%烘烤处理前

(b) 拉伸变形2%烘烤处理后



(c) 拉伸变形15%烘烤处理前

(d) 拉伸变形15%烘烤处理后

图6 不同拉伸变形 AA6016 合金烘烤处理前后断口形貌

Fig.6 Fracture appearance of AA6016 alloy with different tensile deformation before and after baking treatment

### 3 结论

1) T4P 态 AA6016 合金板材在不同拉伸形变量条件下,局部再结晶晶粒形态发生变化,形变较小时,再结晶晶粒均为等轴晶,随着变形增加,局部晶粒有被拉长趋势。

2) 拉伸形变可以抑制合金板材在升温过程中低温时 GP 区的溶解,但当形变过大时,抑制作用减弱;形变能够显著降低  $\beta''$  相及  $\beta'$  相析出峰析出温度,促进强化相析出。

3) 随拉伸形变量增加,烘烤处理前后强度增量  $\Delta R_{p0.2}$  整体呈降低趋势,伸长率先降低后升高。不能通过大幅增加变形的的方法提高合金烘烤硬化性。

4) 烘烤处理前, 拉伸形变较小时, 断口存在大量韧窝, 合金断裂方式为塑性断裂; 形变增加, 合金趋向解理断裂. 烘烤后, 小变形合金塑性降低, 但仍为塑性断裂; 形变较大时, 内应力集中情况削弱, 减弱解理断裂趋势.

## 参考文献

- [1] SAKURAI T. The latest trends in aluminum alloy sheets for automotive body panels [J]. *Kobelco Technology Review*, 2008, 28(28): 22-28.
- [2] 马鸣图, 毕祥玉, 游江海, 等. 铝合金汽车板性能及其应用的研究进展 [J]. *机械工程材料*, 2010, 12(6): 4-20.  
MA Mingtu, BI Xiangyu, YOU Jianghai, et al. Research progress of property and its application of aluminium alloy auto sheet [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2010, 12(6): 4-20.
- [3] LI Yong, WANG Zhaodong, MA Mingtu, et al. Air cushion furnace technology for heat treatment of high quality aluminum alloy auto body sheet [J]. *Engineering*, 2014, 12(5): 73-80. DOI: 10.15302/J-ENGI-2014016.
- [4] YUCEL B. Pre-straining to improve the bake hardening response of a twin-roll cast Al-Mg-Si alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2005, 52(3): 169-173. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2004.10.001.
- [5] 崔莉, 郭明星, 彭祥阳, 等. 预变形对汽车用 Al-Mg-Si-Cu 合金析出行为的影响 [J]. *金属学报*, 2015, 51(3): 289-297. DOI: 10.11900/0412.1961.2014.00348.  
CUI Li, GUO Mingxing, PENG Xiangyang, et al. Influence of pre-deformation on the precipitation behaviors of Al-Mg-Si-Cu alloy for automotive application [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(3): 289-297. DOI: 10.11900/0412.1961.2014.00348.
- [6] 李勇, 安小雪, 王昭东, 等. 6016 铝合金汽车板的气垫炉式固溶工艺 [J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(1): 144-151.  
LI Yong, AN Xiaoxue, WANG Zhaodong, et al. Solid solution treatment process like in air-cushion furnace of 6016 aluminum alloy auto body sheet [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2015, 36(1): 144-151.
- [7] 田妮, 赵刚, 王建军, 等. 冷变形对汽车车身用 Al-Mg-Si 薄板烤漆硬化性的影响 [J]. *轻合金加工技术*, 2010, 38(9): 52-56.  
TIAN Ni, ZHAO Gang, WANG Jianjun, et al. Effect of cold deformation on paint-backing hardening of Al-Mg-Si alloy sheet used for automotive body [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2010, 38(9): 52-56.
- [8] 高冠军, 李勇, 李家栋, 等. 预时效及预应变对汽车用 AA6016 合金析出行为的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2016, 37(6): 76-81.  
GAO Guanjun, LI Yong, LI Jiadong, et al. Influence of pre-aging and pre-strain on the precipitation behaviors of AA6016 alloy for automotive application [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2016, 37(6): 76-81.
- [9] 马全仓, 毛卫民, 冯惠平, 等. 拉伸变形晶粒所承受的反应应力对其取向变化的影响 [J]. *塑性工程学报*, 2009, 16(2): 171-175.  
MA Quancang, MAO Weimin, FENG Huiping, et al. Effect of reaction stresses on orientation evolution of tensile deformation grains [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2009, 16(2): 171-175.
- [10] EDWARDS G A, STILLER K, DUNLOP G L, et al. The precipitation sequence in Al-Mg-Si alloys [J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(11): 3893-3904. DOI: 10.1016/S1359-6454(98)00059-7.
- [11] SHEN C H, OU B L. Pre-ageing to improve the microstructure and tensile properties of Al-0.72Mg-0.42Si-0.1Cu artificially aged alloy [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2008, 47(4): 449-458. DOI: 10.1179/cmq.2008.47.4.449.
- [12] BIROL Y. Preaging to improve bake hardening in a twin-roll cast Al-Mg-Si alloy [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2005, 391(1): 175-180. DOI: 10.1016/j.msea.2004.08.069.
- [13] HENKEL C I, KAUFMANN H, KLEINER S D I, et al. Precipitation hardening of an aluminium alloy: EP, EP1195449 A2 [P]. 2002.
- [14] CHEN J H, COSTAN E, HUIS M A V, et al. Atomic pillar-based nanoprecipitates strengthen AlMgSi alloys [J]. *Science*, 2006, 312(5772): 416-9. DOI: 10.1126/science.1124199.
- [15] 陈江华, 刘春辉. AlMgSi(Cu) 合金中纳米析出相的结构演变 [J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(10): 2352-2360.  
CHEN Jianghua, LIU Chunhui. Microstructure evolution of precipitates in AlMgSi(Cu) alloys [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(10): 2352-2360.

(编辑 王小唯, 苗秀芝)