

轧制方式对工业包装铝合金板材微结构及各向异性的影响

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2018.03.008

范才河¹ 沈彤^{1,2}
范语楠³ 阳建君¹
欧玲¹ 陈喜红⁴

1. 湖南工业大学
冶金与材料工程学院
湖南 株洲 412007
2. 东莞市汇林包装有限公司
广东 东莞 523000
3. 株洲市第二中学
湖南 株洲 412007
4. 中国中车株洲电力机车
有限公司
湖南 株洲 412001

摘要: 为了获得工业包装用高强高韧铝合金材料, 采用喷射成形快速凝固技术和大压下量轧制技术制备了 Al-9Mg 合金板材。采用透射电镜、扫描电镜 (采用 EBSD 技术) 和 X 射线衍射仪测定了挤压态和轧制态 Al-9Mg 合金板材的微结构及织构特征, 并测试了板材的各向异性行为。试验结果表明: 大压下量交叉轧制 CBA 促进了动态再结晶的发生, 细化了晶粒组织, 显著提高了大角度晶界的比例; 与挤压态和 AAA 轧制方式相比较, CBA 轧制方式显著降低了挤压态合金中典型的 Brass 织构 $\{110\}\langle 112\rangle$ 的取向密度, 在 β 取向线上 CBA 轧制态板材中的 Brass 织构取向密度最低, 且板材中没有典型的织构特征; 同时, CBA 轧制态合金板材具有更好的深冲性能, 在 3 个方向 0° , 45° 和 90° 的力学性能基本一致, 其室温拉伸强度和伸长率分别在 592 MPa 和 19.6% 以上。

关键词: 轧制; 喷射成形; Al-9Mg 合金; 微结构; 各向异性

中图分类号: TG146.21 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2018)03-0052-07

0 引言

Al-Mg 合金具有低密度、高强韧性以及良好的可焊性和耐腐蚀性, 被广泛应用于航天航空、工业包装等领域^[1-3]。近年来, 国内外学者对 Al-Mg 合金的变形过程中微结构和织构进行了大量的研究。O. Engler 等^[4-5]研究了不同冷轧和退火状态下 Al-Mg 合金的微观组织和织构演变规律, 分析了再结晶织构与冷轧板材各向异性的关系。Chen Z. W. 等^[6]研究了热轧过程中 Al-Mg 合金的织构特征, 研究表明: 再结晶过程中晶粒取向的变化是导致部分 Brass 织构 $\{110\}\langle 112\rangle$ 转变为 S 织构 $\{123\}\langle 634\rangle$ 的主要原因。Li H. P. 等^[7]研究了静态再结晶退火对轧制态 Al-Mg

合金的晶粒组织和织构的影响, 研究结果表明: 随着再结晶温度的升高, Al-Mg 合金的织构强度下降。以上研究都是针对常规轧制态 Al-Mg 合金板材, 而对不同轧制方式下 Al-Mg 合金板材的微结构演变及其力学性能各向异性的研究鲜见报导。

常规铸造方法制备的高 Mg 含量铝合金存在容易形成粗大的离异共晶组织 (α -Al 相和 Al_3Mg_2 相)^[8], 从而降低 Mg 在铝基体中的固溶度, 削弱固溶强化效果等缺点, 而喷射成形快速凝固技术因具有加快冷却速度、提高合金固溶度、细化晶粒和消除宏观偏析等优点, 是制备高 Mg 含量铝合金的理想方法^[9-13]。因此, 本课题组拟以采用喷射成形快速凝固技术制备的 Al-

收稿日期: 2018-03-22

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2017JJ2073)

作者简介: 范才河 (1976-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事喷射成形快速凝固技术方面的研究, E-mail: 369581813@qq.com

9Mg 合金板材为研究对象, 研究挤压态与轧制态喷射成形 Al-9Mg 合金板材的微观组织及织构特征, 并分析不同变形方式对合金板材的各向异性行为的影响, 旨在为制备高综合性能的 Al-Mg 合金板材提供理论参考。

1 试验

1.1 材料制备

本课题组利用自行研制的 SD380 大型喷射成形装置制备了喷射成形高 Mg 含量铝合金圆柱坯, 该合金的成分 (质量分数) 为 9.0% 的 Mg、0.5% 的 Mn, 余量是 Al; 再采用 1 250 t 挤压机将圆柱坯挤压成截面尺寸为 20 mm × 100 mm 的板材, 挤压温度为 450 °C, 挤压比为 15:1; 挤压成型后的板坯立即喷雾水冷; 最后, 在板坯上选取长 × 宽 × 厚为 100 mm × 80 mm × 10 mm 的试样进行大应变轧制, 试样分 3 道次轧制, 轧辊直径为 350 mm, 单道次轧制压下量不低于 50%, 中间退火温度为 380 °C, 各道次轧制完成后立即浸入室温水冷却。本试验选取 2 种轧制方式单向轧制 AAA 和交叉轧制 CBA 对挤压板材进行大压下量轧制变形, 其中 A 表示板材的挤压方向为 0°, B 表示轧制方向与挤压方向成 45°, C 表示轧制方向与挤压方向成 90°。轧制工艺参数如表 1 所示。

表 1 轧制工艺参数

Table 1 The parameters of hot rolling technology

道次	轧制温度 / °C	退火保温时间 / min	板材厚度 / mm		单道次变形量 / %	累积变形量 / %
			h_0	h_1		
1	400	15	10	5	50	50
2	400	15	5	2	60	80
3	400	15	2	1	50	90

1.2 微观组织观察

采用 Titan G260-300 透射电镜 (transmission electron microscopy, TEM) 和 Helios Nanolab 600i 扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 分析试样的微观结构。TEM 测试时, 试样采用机械预减薄至 80 μm 左右后进行双喷电解, 电解液为硝酸和甲醇的混合溶液 (体积比为 1:3), 工作温度低于 -25 °C。SEM 测试采用电子背散射衍射技术 (electron backscatter diffraction, EBSD), 试样采用电解抛光, 电解液是质量分数为 10% 的高氯酸、90% 的乙醇混合溶液, 抛光电压为 20 V, 电流为 1.0 A, 抛光时间

为 30 s, 工作温度低于 -25 °C; 采用 TSL OIM 软件分析试验数据, 加速电压为 20 kV, 角度为 70°, 扫描步长为 0.2 μm。

1.3 板材织构测定

试样经过 1500 号砂纸打磨后进行电解抛光, 抛光液为硝酸和甲醇的混合溶液 (体积比为 1:3), 工作温度为 -25 °C, 电压为 20 V, 电流为 0.5 A, 抛光时间约为 40 s; 试样抛光后立即用酒精反复冲洗、吹干, 并放干燥皿内保存。织构测定在 Bruker D8 Discover X 射线衍射仪上进行, X 射线源为 CuK α 辐射, 管电压为 40 kV, 管电流为 40 mA, 极图测量范围如下: α 为 5° ~ 85°, β 为 0° ~ 360°。

1.4 各向异性测试

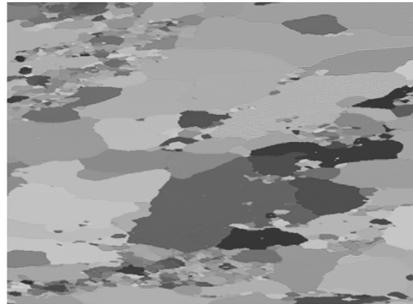
在板材与轧制方向成 0°, 45° 和 90° 的 3 个方向切取拉伸试样, 利用 Instron 3369 拉伸机在室温下以 1.0 mm/min 的拉伸速度对试样进行拉伸性能测试; 通过在线切割机从 2 mm 厚的合金板材上截取 Φ 50 mm 的圆板, 并在 380 °C 保温 15 min 后立即在自行设计的深冲模具中进行深冲试验, 模具预热温度为 350 °C, 冲头移动速度为 150 mm/min。

2 结果与讨论

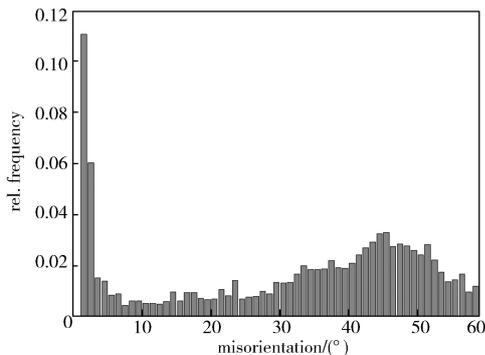
2.1 不同变形方式对 Al-9Mg 合金板材微观组织的影响

挤压态及不同轧制方式下 Al-9Mg 合金板材的 EBSD 形貌如图 1 所示。由图可知: 挤压态 Al-9Mg 合金板材的晶粒较粗且不均匀, 较大晶粒的晶界处发生了明显的再结晶, 这提高了大角度晶界的比例 (见图 1a); 采用 AAA 轧制方式制备的 Al-9Mg 合金板材的晶粒组织呈纤维状, 方向同轧制方向, 晶粒边界可观察到少量细小的再结晶晶粒, 与挤压态 Al-9Mg 合金板材相比, 小角度晶界显著增加 (见图 1c); 采用 CBA 轧制方式制备的 Al-9Mg 合金板材的晶粒组织均匀, 发生了较为完全的再结晶, 纤维状晶粒基本消失, 晶粒主要以大角度晶界为主, 晶粒形貌主要以等轴晶为主。可见, 采用 CBA 轧制方式能显著改善挤压态 Al-9Mg 合金板材的微观结构, 即明显改善合金板材的晶粒组织形貌及晶粒分布的均匀性, 显著缩小了板材平面上晶粒取向分布的差异, 提高了大角度晶界的比例。已有研究表明, 细小的球状晶是高强韧材料的重要结构特征, 且与合金的变形机制及各向异性密切相关, 即其可促进非基面位错和多

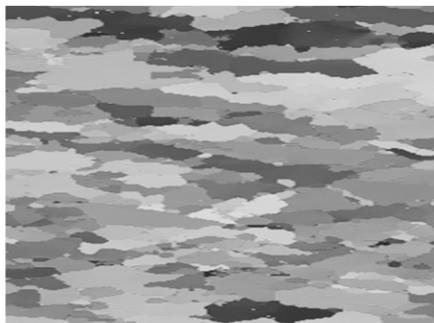
滑移系的开启,以提高材料的协调变形能力,改善合金的力学性能各向异性^[13-14]。这与本课题组观察不同变形方式对 Al-9Mg 合金板材的微观组织得到的结论一致。



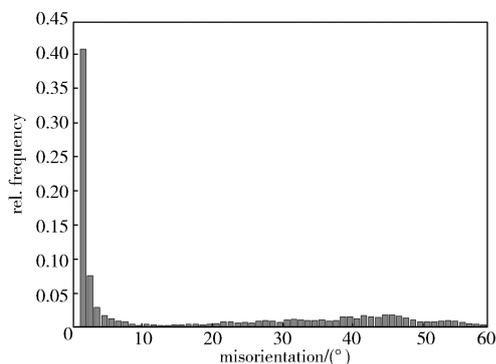
a) 挤压态合金 EBSD 形貌



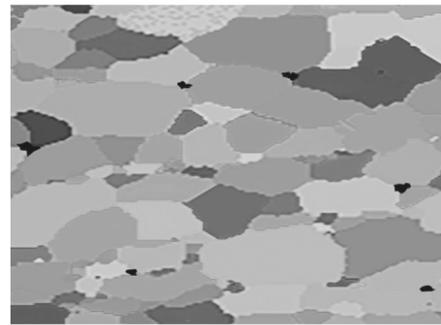
b) 挤压态合金的晶粒取向分布图



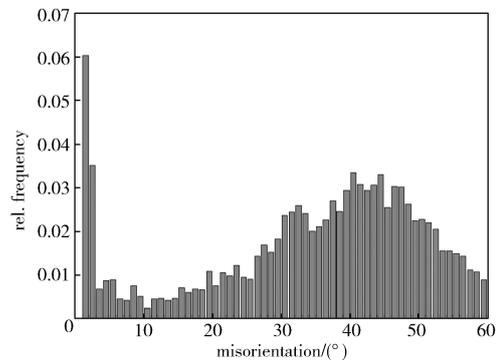
c) AAA 轧制态合金 EBSD 形貌



d) AAA 轧制态合金的晶粒取向分布图



e) CBA 轧制态合金 EBSD 形貌



f) CBA 轧制态合金的晶粒取向分布图

图 1 不同变形条件下 Al-9Mg 合金板材的微观组织及晶粒取向分布

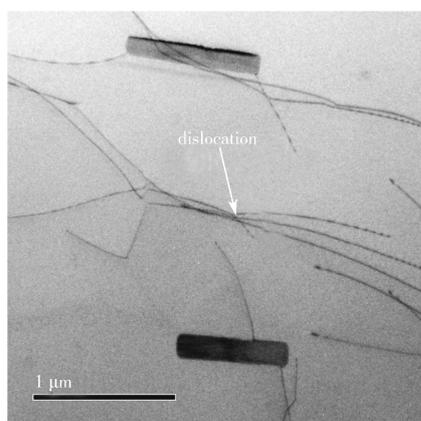
Fig. 1 Microstructure and grain orientation distribution diagram of Al-9Mg alloy plate of different deformation

本课题组的前期研究工作表明,大塑性变形过程中的高应变是高 Mg 含量铝合金晶粒细化的主要因素之一^[11]。将挤压态、AAA 轧制态和 CBA 轧制态的 Al-9Mg 合金板材的 TEM 图像(见图 2)进行对比可知:

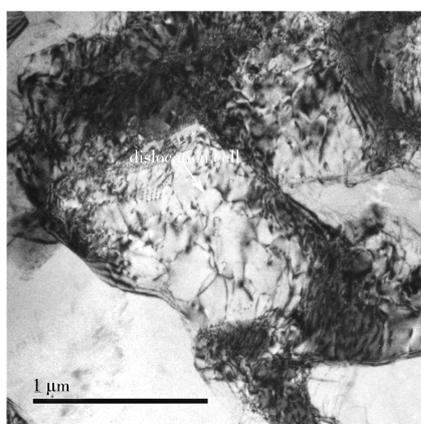
1) 与挤压态 Al-9Mg 合金板材相比,AAA 轧制态 Al-9Mg 合金板材的位错密度显著提高。变形过程中位错不断塞积而形成位错墙和位错缠结,这导致位错胞等亚结构增多(图 2b)。

2) 与挤压态 Al-9Mg 合金板材相比,CBA 交叉热轧过程中位错密度的增加促进了动态回复和动态再结晶的发生,部分晶粒内部被塞积的位错分割为几个亚晶和位错胞结构。与 AAA 轧制态 Al-9Mg 合金板材相比,CBA 交叉热轧过程中位错密度明显降低,再结晶晶粒数量增多(见图 2c)。

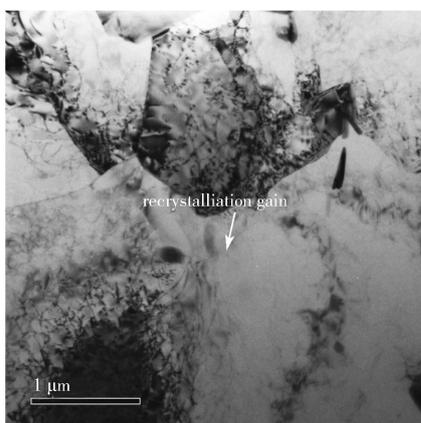
3) 由 Hall-Petch 关系可知^[15],晶粒越细小,晶界就越多,位错运动的阻碍就越大,材料的强度就越高。因此,CBA 轧制态的 Al-9Mg 合金板材的强度较高。



a) 挤压态



b) AAA 轧制态



c) CBA 轧制态

图 2 不同变形方式下 Al-9Mg 合金板材的 TEM 图像

Fig. 2 TEM micrographs of Al-9Mg alloy plates of different deformation

2.2 不同变形方式对 Al-9Mg 合金板材各向异性的影响

AAA 和 CBA 轧制方式下 Al-9Mg 合金板材深冲后的宏观形貌如图 3 所示。由图可知: AAA 轧制态 Al-9Mg 合金板材的各向异性明显, 制耳现象明显;

而 CBA 轧制态合金板材的深冲性能有明显提高, 制耳率较低, 外观质量好, 板材的各向异性明显减小。可见交叉轧制工艺可显著改善合金板材的深冲性能, 提高深冲试样的表面质量。



a) AAA 轧制态

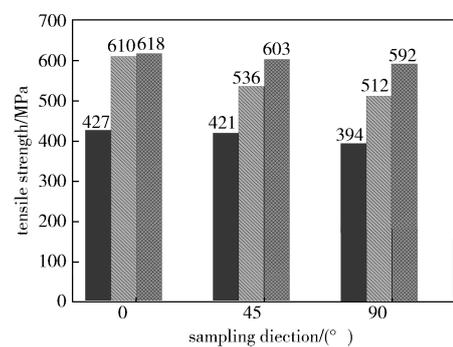


b) CBA 轧制态

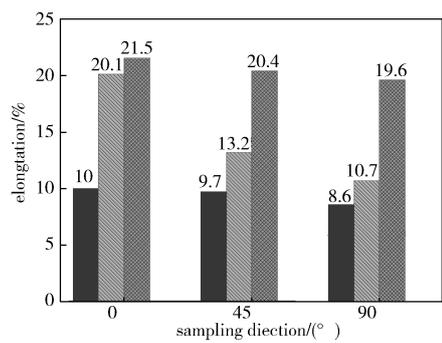
图 3 不同轧制方式下 Al-9Mg 合金板材深冲后的宏观形貌图

Fig. 3 Macro morphology of Al-9Mg alloy plates of different deformation

挤压态及不同轧制方式下 Al-9Mg 合金板材不同方向的室温拉伸性能如图 4 所示。



a) 拉伸强度



b) 伸长率

图 4 不同变形条件下 Al-9Mg 合金板材的室温拉伸性能图

Fig. 4 Tensile properties of Al-9Mg alloy plates of different deformation

由图4可知：挤压态 Al-9Mg 合金板材的室温拉伸强度和塑性均较低，且3个方向 0°、45°和 90°的力学性能各向异性明显，在 0°方向的拉伸性能较好，90°方向的拉伸性能较差；轧制态 Al-9Mg 合金板材的室温拉伸性能较挤压态 Al-9Mg 合金板材显著提高；与 AAA 轧制态 Al-9Mg 合金相比较，CBA 轧制态 Al-9Mg 合金板材在 0°、45°和 90°的力学性能各向异性更小，综合性能更优，其室温拉伸强度和伸长率分别在 592 MPa 和 19.6% 以上。依据泰勒织构理论 $\sigma = M\tau$ （式中： σ 为屈服强度； M 为多晶体泰勒因子，晶体 Schmid 取向因子倒数关系 m 的平均值； τ 为临界切应力）和霍尔佩奇公式 $\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}$ （式中：

σ_0 和 k 为与晶体类型有关的常数； d 为晶粒平均直径）等经典理论^[10,16]，铝合金在轧制方式中表现出来的力学性能各向异性是晶粒形貌、晶体学织构及相组织对合金交互作用的结果，即材料性能的各向异性来源于微结构与晶粒组织的各向异性。可见，本试验的结果很好地验证了上述经典理论。

2.3 不同变形方式对 Al-9Mg 合金板材织构特征的影响

不同变形方式下 Al-9Mg 合金板材的取向分布函数（orientation distribution function, ODF）截面图如图5所示。

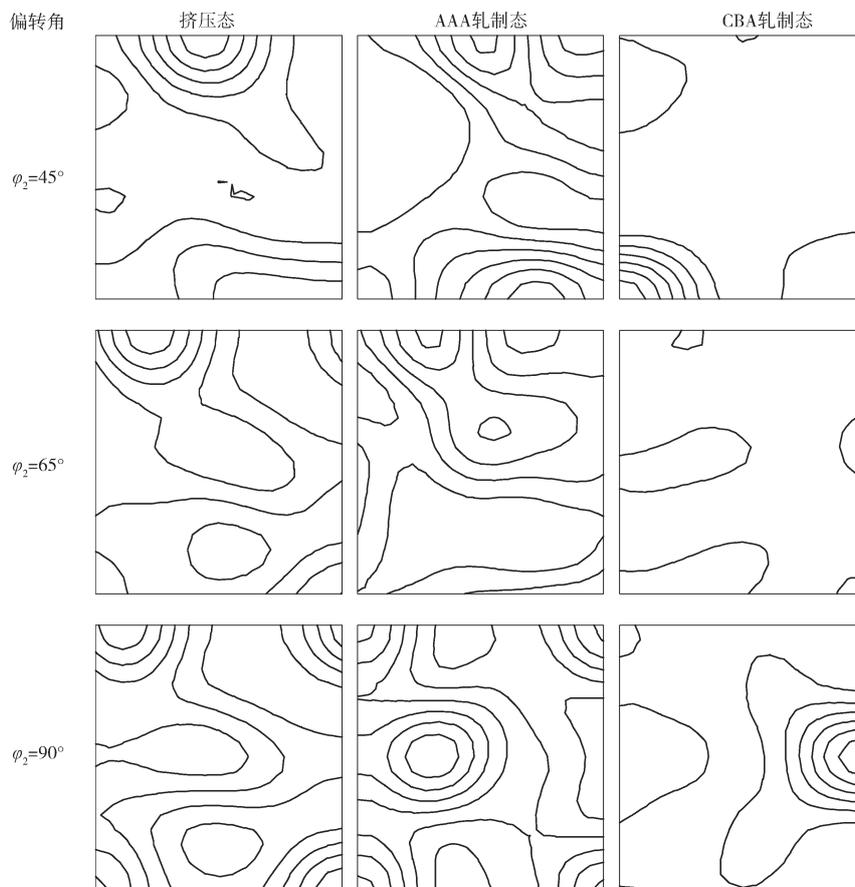


图5 不同变形方式下 Al-9Mg 合金板材的 ODF 截面图

Fig. 5 Sections of ODFs of Al-9Mg alloy plates of different deformation

由图5可知：挤压态 Al-9Mg 合金的织构特征表现为典型的 Brass 织构 $\{110\}\langle 112\rangle$ 和 S 织构 $\{123\}\langle 634\rangle$ ，轧制态 Al-9Mg 合金板材的织构特征主要以 Brass 织构 $\{110\}\langle 112\rangle$ 、Copper 织构 $\{112\}\langle 111\rangle$ 和 S 织构 $\{123\}\langle 634\rangle$ 为主，但在中间退火过程中会演变为以 Cube 织构 $\{001\}\langle 100\rangle$ 、Goss 织构

$\{011\}\langle 100\rangle$ 和 R 织构 $\{124\}\langle 211\rangle$ 为主要组分的织构特征；与 AAA 轧制态 Al-9Mg 合金板材相比，CBA 轧制态 Al-9Mg 合金板材没有典型的织构特征，织构强度显著减小，这是因为 CBA 轧制方式更能促进板材轧制过程中动态再结晶的发生，形成更为均匀的等轴晶组织（见图1），从而有利于晶粒在变形过程中

转动, 即形成大量随机取向的晶粒。可见, 选择合理的轧制方式是弱合金板材形变织构的关键, 也是改善合金板材的各向异性、提高深冲性能的基础^[17]。

不同变形方式下 Al-9Mg 合金板材 β 取向线上的取向密度 (f/g) 如图 6 所示。由图可知: AAA 轧制态 Al-9Mg 合金板材中 Brass 织构 $\{110\}<112>$ 的取向密度最强, 等级为 11.3 级, 挤压态板材次之, 约为 6 级, CBA 轧制态 Al-9Mg 合金板材较弱, 约为 2.5 级; 挤压态 Al-9Mg 合金板材中 Copper 织构 $\{112\}<111>$ 的取向密度最强, 接近 5 级, CBA 轧制态板材次之, 约为 1.5 级, AAA 轧制态板材较小, 约为 0.5 级。对比 3 种变形方式可知, CBA 轧制态 Al-9Mg 合金板材在 β 取向线上的取向密度均较低, 没有典型的织构特征。其主要原因如下: 一是大应变轧制促进了板材变形过程中动态再结晶的发生, 细化了晶粒的同时实现了小角度晶界向大角度晶界的转变, 从而改善了晶粒的取向分布; 二是 CBA 轧制方式显著弱化了挤压态 Al-9Mg 合金板材中 Brass 织构特征, 改善了挤压态合金的形变织构特征。

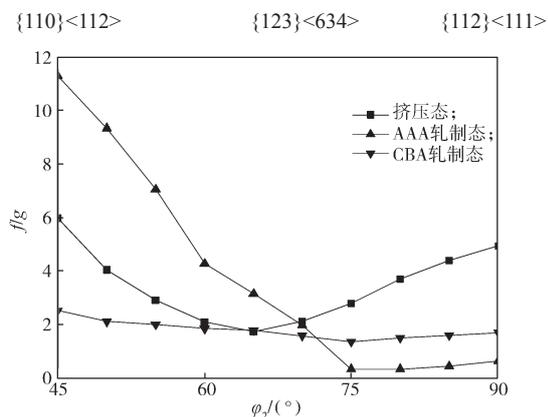


图 6 不同变形条件下 Al-9Mg 合金板材 β 取向线上的取向密度图

Fig. 6 Changes of orientation densities along β orientation line of Al-9Mg alloy plates of different deformation

3 结论

本课题组对不同变形方式下的喷射成形 Al-9Mg 合金板材进行了研究, 试验结果分析如下:

1) CBA 交叉轧制方式显著地提高了挤压态 Al-9Mg 合金板材的力学性能, 明显改善了合金板材在 3 个方向 0° , 45° 和 90° 的各向异性, 其室温拉伸强度和伸长率分别在 592 MPa 和 19.6% 以上。

2) CBA 交叉轧制方式促进了合金板材再结晶的发生, 显著细化了晶粒, 提高了合金中大角度晶界的比例。

3) CBA 交叉轧制方式显著降低了挤压态合金中典型的 Brass 织构 $\{110\}<112>$ 的取向密度。

参考文献:

- [1] 宋得康, 廖建华, 郑堂介, 等. 大飞机铝锂合金等直段研制关键技术 [J]. 航空制造技术, 2015(4): 82-85. SONG Dekang, LIAO Jianhua, ZHENG Tangjie, et al. Key Technology of Al-Li Alloy Liner Part Development of Large Aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(4): 82-85.
- [2] DURSUN T, SOUTIS C. Recent Developments in Advanced Aircraft Aluminium alloys [J]. Materials and Design, 2014, 56(2): 862-871.
- [3] 吴若梅, 巢光华, 孙兆飞, 等. 润湿性对铝合金涂层耐蚀及防污性能的影响 [J]. 包装学报, 2016, 8(4): 8-12. WU Roumei, CHAO Guanghua, SUN Zhaofei, et al. Effect of Wettability on Corrosion Resistance and Vulnerability of Aluminum Alloy Coating [J]. Packaging Journal, 2016, 8(4): 8-12.
- [4] ENGLER O. Texture and Anisotropy in the Al-Mg Alloy AA 5005 Part I: Texture Evolution During Rolling and Recrystallization [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 618: 654-662.
- [5] ENGLER O, AEGERTER J. Texture and Anisotropy in the Al-Mg Alloy AA 5005 Part II: Correlation of Texture and Anisotropic Properties [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 618: 663-671.
- [6] CHEN Z W, ZHAO J, LI S S. Texture Evolution of Al-Mg-Li Aeronautical Alloys in In-Situ Tension [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2012, 19(12): 1100-1106.
- [7] LI H P, YE L Y, ZHANG P, et al. Microstructure and Texture Characterization of Superplastic Al-Mg-Li Alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(7): 2079-2087.
- [8] JIN S B, TAO N R, MARTHINSEN K, et al. Deformation of an Al-7Mg Alloy with Extensive Structural Micro-Segregations During Dynamic Plastic Deformation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 628: 160-167.
- [9] CHEN Z H, FAN C H, CHEN Z G, et al. Densification of Large-Size Spray-Deposited Al-Mg Alloy Square

- Preforms Via a Novel Wedge Pressing Technology[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 506(1/2): 152–156.
- [10] FAN C H, PENG Y B, YANG H T, et al. Hot Deformation Behavior of Al–9.0Mg–0.5Mn–0.1Ti Alloy Based on Processing Maps[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(2): 289–297.
- [11] 范才河, 严红革, 彭英彪, 等. 大应变热轧喷射成形高镁铝合金的微观结构及力学性能 [J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(1): 64–71.
FAN Caihe, YAN Hongge, PENG Yingbiao, et al. Microstructures and Mechanical Properties of Spray-Forming High Magnesium Aluminum Alloy During Large Strain Hot Rolling[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(1): 64–71.
- [12] ZHA M, LI Y J, MATHIESEN R H, et al. Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of a Binary Al–7Mg Alloy Processed by Equal-Channel Angular Pressing[J]. *Acta Materialia*, 2015, 84: 42–54.
- [13] 范才河, 陈喜红, 戴南山, 等. 变形条件对喷射成形 Al–9Mg–0.5Mn 合金动态再结晶的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2016, 36(1): 79–83.
FAN Caihe, CHEN Xihong, DAI Nanshan, et al. Dynamic Recrystallization Behavior of Spray-Formed Al–9Mg–0.5Mn Alloy During Hot Compression Deformation Process[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2016, 36(1): 79–83.
- [14] LIN Y H, ZHENG Z Q, LI S C. Effect of Solution Treatment on Microstructures and Mechanical Properties of 2099 Al–Li Alloy[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2014, 14(1): 61–71.
- [15] HOGG S C, PALMER I G, THOMAS L G, et al. Processing, Microstructure and Property Aspects of a Spraycast Al–Mg–Li–Zr Alloy[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(6): 1885–1894.
- [16] JATA K V, PANCHANADEESWARAN S, VASUDEVAN A K. Evolution of Texture, Microstructure and Mechanical Property Anisotropy in an Al–Li–Cu Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, 257(1): 37–46.
- [17] 魏齐龙, 陈 铮, 王永欣. 1420 铝锂合金的各向异性 [J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(3): 573–577.
WEI Qilong, CHEN Zheng, WANG Yongxin. Anisotropy of 1420 Al–Li Alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(3): 573–577.

Effects of Rolling Methods on Microstructure and Anisotropy of Aluminium Alloy Sheet for Industrial Packing

FAN Caihe¹, SHEN Tong^{1,2}, FAN Yunan³, YANG Jianjun¹, OU Ling¹, CHEN Xihong⁴

(1. School of Metallurgical and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Huilin Packing Dongguan Co., Ltd., Dongguan Guangdong 523000, China;

3. NO. 2 High School of Zhuzhou, Zhuzhou Hunan 412007, China;

4. CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412001, China)

Abstract: In order to obtain industrial packing Al alloy materials with fine microstructure, high strength and toughness, the spray-formed rapid-quenching technology and high reduction rolling technology could be a viable option to produce Al–9Mg alloy plates. Transmission electron microscopy (TEM), scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction were used to analyze the microstructure and texture characteristics of extruded Al–9Mg alloy and rolling plates, with the anisotropy measured. The results showed that the cross rolling CBA of large reductions promoted the occurrence of dynamic recrystallization, made the grains finer and improved the proportion of the high angle grain boundaries. Compared with extruded and AAA rolling methods, the CBA rolling method reduced the orientation density of the typical Brass texture $\{110\}\langle 112\rangle$ in the extruded alloy, and the orientation density of Brass texture along the β orientation line in the CBA rolling plate was lowest in the plate with no typical texture feature. The rolled alloy plate had better deep drawing performance, and the mechanical properties in the three directions of 0° , 45° and 90° were nearly the same. The room temperature tensile strength and elongation were above 592 MPa and 19.6% respectively.

Keywords: rolling; spray forming; Al–9Mg alloy; microstructure; anisotropy