

## 铝合金在镦挤复合过程中的组织演变及力学性质研究

李益生 范翰 袁凯杰 刘智宇

宝鸡钛业股份有限公司, 陕西 宝鸡 721014

**[摘要]** 结合等通道转角挤压和多向压缩方法, 从不同路径进行圆柱体复合镦挤 6063 铝合金 (属 Al-Mg-Si 系), 并通过力学性能、XRD 和 SEM 方法分析断面形貌, 研究镦挤复合工艺对 6063 铝合金组织和性能的影响。结果表明: 经过镦挤加工后的 6063 铝合金产生了第二相  $Mg_2Si$ , 具有较高的强度, 强化相  $Mg_2Si$  的含量越高, 6063 铝合金的强度越大; 镦挤后 6063 铝合金的抗拉强度增加最高, 到达了 397.261 MPa, 镦挤的抗拉强度比挤挤增加了大约 170 MPa, 其中挤镦, 镦挤的伸长率较大, 分别为 15.879%, 15.113%, 挤挤的伸长率最小, 为 13.374%。

**[关键词]** 镦挤复合; 6063 铝合金; 断面形貌; 抗拉强度; 伸长率

DOI: 10.33142/sca.v2i8.1204

中图分类号: TB333

文献标识码: A

## Discussion on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Aluminum Alloy during Upsetting Extrusion

LI Yisheng, FAN Han, YUAN Kaijie, LIU Zhiyu

Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji, Shaanxi, 721014, China

**Abstract:** In combination with equal channel angular extrusion and multi-directional compression, 6063 aluminum alloy (belonging to Al-Mg-Si system) is upset extruded from different paths. Fracture morphology is analyzed by means of mechanical properties, XRD and SEM, and effect of upset extrusion on structure and properties of 6063 aluminum alloy is studied. The results show that the second phase  $Mg_2Si$  is produced in 6063 aluminum alloy after upsetting and extrusion, which has higher strength. The higher content of  $Mg_2Si$  is, the stronger strength of 6063 aluminum alloy is. The tensile strength of 6063 aluminum alloy after upsetting and extrusion upsetting increases to 397.261 MPa, and tensile strength of upsetting and extrusion upsetting increases about 170 MPa compared with extrusion upsetting, in which elongation of extrusion upsetting and extrusion upsetting is larger of 15.879% and 15.113%. The elongation of extrusion and upsetting extrusion is smallest of 13.374%.

**Keywords:** upsetting extrusion composite; 6063 aluminum alloy; fracture morphology; tensile strength; elongation

6000 系铝合金主要有 6061, 6063, 6082, 6160, 6125, 6262, 6060, 6005, 6463, 其中 6063、6061 用的最多<sup>[1-4]</sup>。6063 铝合金具有良好的热塑性、耐蚀性以及加工性能, 也是一种有色金属结构材料, 被广泛应用于建筑行业, 航空、航天、汽车、机械制造、船舶及化学工业中<sup>[5-6]</sup>。随着铝装饰业的飞速发展, 市场对铝合金型材提出了更高要求。韩行霖等报道钛对铝合金的组织及性能具有重要影响, 工业生产中常在铝合金中加入钛等多种方式以改变其组织及性能, 但成本较高, 强度差, 密度低, 腐蚀性低, 极容易氧化等特征, 阻碍了铝合金的发展<sup>[7-8]</sup>, 为此, 国内外科人员致力于提高铝合金性能的开发。

张新建等报道 6063 合金中的 Mg、Si 含量低时, 导电率高些, 适宜的热处理能够提高 6063 合金材料的导电性能和抗拉强度<sup>[9-10]</sup>。郭志斌等人<sup>[11]</sup>对两组成分含量不同的合金进行挤压, 试验表明  $Mg_2Si$  的降低会提高合金的极限挤压速度, 同时指出 Mg、Si 元素的增加会提高合金的变形抗力, 增加挤压变形热, 加剧金属表面粘着。但实际生产中  $Mg_2Si$  含量降低会影响型材的时效强化效果。

余珠华等<sup>[12]</sup>报道了 6063 铝合金在大挤压比和高速挤压下均可获得表面质量优良的挤压棒材。晶粒随着挤压比的增大不断细化, 组织由沿着挤压方向拉长的晶粒转变为完全由等轴再结晶晶粒组成。由于细晶强化的作用, 合金力学性能随着挤压比的增大而提高。刘丘林等人<sup>[13]</sup>研究了挤压比对喷射态 6061 铝合金组织和性能的影响, 发现随着挤压比增大, 合金晶粒细化, 组织分布均匀, 力学性能得到提高。顾振华等<sup>[14]</sup>提出反复镦挤法 (Cyclic Equal Channel Compression, CECC), 由等通道转角挤压和多向压缩的两种方法互相组合而成。反复镦挤的目的是可以通过较少道次变形, 能达到和仅 ECAP 相同的细化效果<sup>[15]</sup>。Horita Z<sup>[18]</sup>等人认为 1 道次 ECAP 挤压后铝合金的断后伸长率下降明显, 当继续挤压时, 延伸率下降趋于平缓, 铝合金的塑性经 ECAP 挤压后明显提高。不过当 ECAP 挤压到一定程度时, 若继续增加挤压道次<sup>[16]</sup>, 材料的力学性能不增反降<sup>[17]</sup>, 与 Hall-Petch 公式相悖, Kim<sup>[18]</sup>认为此现象产生的原因是晶粒细化

的作用小于组织软化的作用，使得已经细化的晶粒重新开始长大。

在本工作中，结合等通道转角挤压和多向压缩方法，从不同路径进行圆柱体复合锻造 6063 铝合金（属 Al-Mg-Si 系），并通过力学性能、XRD 和 EBSD 方法分析断口形貌，研究锻造复合工艺对 6063 铝合金组织和性能的影响。作为一种新的复合挤压方法，不仅从成本上、经济效益上还是材料的组织性能方面都有优越性，有望工业化生产，应用前景广阔。

### 1 试验材料与方法

在东莞市佰程金属材料有限公司购买 6063 铝合金，其化学成分如表 1 所示，用线切割将 6063 铝合金切成  $10 \times 10 \times 6\text{mm}$  的试样。将 6063 铝合金试样在真空管式炉内（ZR-15-9，4KW， $1400^\circ\text{C}$ ），在  $300^\circ\text{C}$  时退火 3h 后随炉冷却，使得组织均匀化，消除缩孔缩松等缺陷，组织均匀性更好。

在试验开始前，先使用二硫化钼与机油的混合液对上下模的通道处、挤压杆以及试样表面进行润滑，减小挤压时的摩擦力，方便试样取出。复合挤压的路线有多向压缩+多向压缩+等通道挤压（锻锻挤 CCDC+CCDC+ ECAP）、多向压缩+等通道挤压+多向压缩（锻挤锻 CCDC+ECAP+CCDC）、多向压缩+等通道挤压+等通道挤压（锻挤挤 CCDC+ECAP+ ECAP）、等通道挤压+等通道挤压+多向压缩（挤挤锻 ECAP+ ECAP+CCDC）、等通道挤压+多向压缩+等通道挤压（挤锻挤 ECAP+CCDC+ECAP）、等通道挤压+多向压缩+多向压缩（挤锻锻 ECAP+CCDC+CCDC）六种复合方式。ECAP 模具材料为 9SiCr，模具有一定的刚性和塑性，在反复试验中不易发生变形，能适应较大的挤压力，其中内角为  $90^\circ$ ，外角为  $30^\circ$ ，如图 1 所示。

在万能实验机（SUIMADZU 型）上进行 ECAP 挤压 1-3 道次，得到试样的抗拉强度，屈服强度和延伸率，拉伸尺寸如图 2 所示。在 HV-5 型维氏硬度机（HXD-1000TMC/LCD，上海泰明光学仪器有限公司）上测试硬度值，在金相显微镜（BX51M，奥林巴斯公司生产）下观察金相组织。将试样抛光后，利用 90% 的磷酸酒精进行电解腐蚀，利用扫描电镜观察试样的断口形貌。

表 1 6063 铝合金化学成分表（质量分数，%）

Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Cr	Fe	Al
0.20~0.60	0.10	0.45~0.9	0.10	0.10	0.10	0.10	0.35	余量

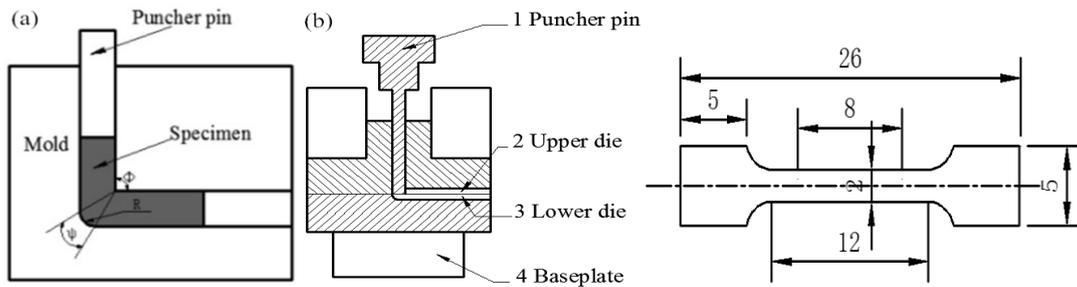


图 1 ECAP 示意图

图 2 拉伸试样尺寸

试样在进入 ECAP 下一个道次之前，由于放置的方式和旋转的角度不同，会产生 4 种不同的路径<sup>[27]</sup>，原理如图 3 所示。路径 A：变形后还按原来的方向进入通道；路径 B<sub>A</sub>：变形后实验先正转  $90^\circ$ ，再反转  $90^\circ$ ；路径 B<sub>C</sub>：在相邻挤压道次间试样绕同一方向旋转  $90^\circ$ ；路径 C：变形后旋转  $180^\circ$ 。

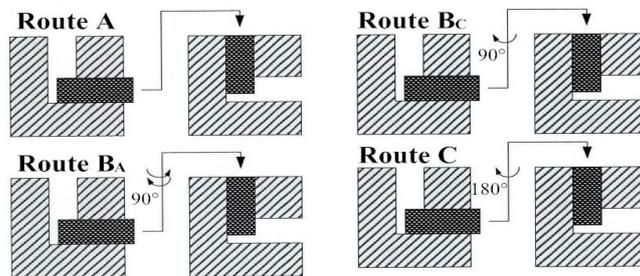


图 3 ECAP 四种挤压路线示意图<sup>[27]</sup>

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD 分析

不同镦挤加工工艺变形后的 XRD 图如图 4 所示, 由图可知, 6063 铝合金退火后主相为 Al, 但经过镦挤加工后出现了第二相  $Mg_2Si$ 。马润香等<sup>[1]</sup>报道强化相  $Mg_2Si$  的含量越高, 合金的强度越大; 强化相数量减少, 合金强度减小。强化相的形貌、密度和分布决定合金的力学性能。强化相的密度越大, 分布越均匀, 合金的强度越高, 因此, 可推出经过镦挤加工后的 6063 铝合具有较高的强度。

与退火后 6063 铝合金相比, 镦挤加工后的试样在 (220)、(311) 晶面的衍射峰强度都增强了, 这是由于镦挤加工后, 晶粒往 (220)、(311) 方向伸长, 晶粒出现择优取向或织构, 晶体的取向也发生了改变。经过镦挤加工后晶粒在 (111)、(200)、(220) 三个衍射峰强度较大, 表明经过加工后晶粒有明显的择优取向或织构, 有助于材料的性能出现各向同性。如图 4 所示, 经过镦挤加工变形后, 衍射峰的半高宽发生了变化, 变形后试样的半高宽都比退火后的大, 根据谢乐公式 (2-1) 可知, 半高宽增大, 晶粒尺寸变小, 说明镦挤加工工艺对 6063 铝合金的微观结构有一定的影响。

$$D = K \lambda / (\beta \cos \theta) \quad (2-1)$$

D 为晶粒尺寸, K 为常数,  $\lambda$  为 X 射线波长,  $\beta$  为衍射峰半高宽,  $\theta$  为衍射角。

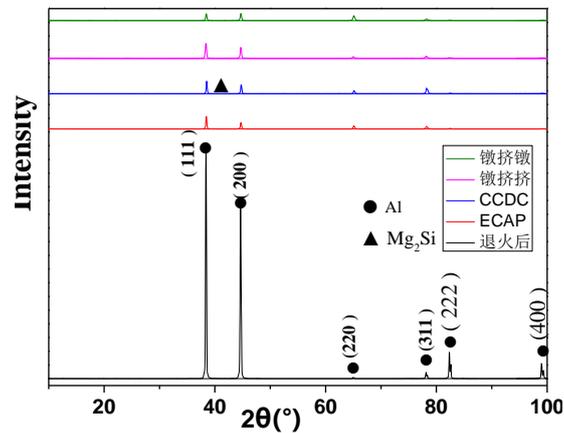


图 4 6061 铝合金各状态 XRD 图

### 2.2 断口分析

图 5 为镦挤加工后的拉伸断口形貌图, 图 5(c) 上有第二相颗粒, 结合图 4 中 XRD 分析可知, 第二相为  $Mg_2Si$ 。由图可知, 挤镦加工后, 断口形貌中韧窝大小比较均匀, 韧窝也较大和深, 宏观上表现为挤镦加工后的伸长率最好。

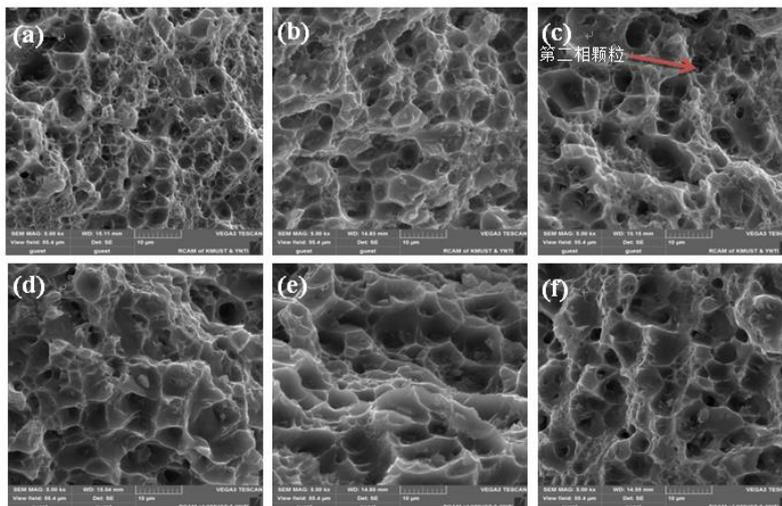


图 5 镦挤加工后拉伸断口图

(a) 镦挤镦 (b) 镦挤挤 (c) 镦挤挤 (d) 挤挤镦 (e) 挤挤镦 (f) 挤挤挤

### 2.3 显微硬度

表 2 列出了镦挤后 X、Y、Z 表面的显微硬度值。从表中可以看出，在 X 平面上，镦挤的显微硬度最高，镦挤的显微硬度最低，而在 Y 和 Z 平面上，镦挤的显微硬度最高。整体上镦粗显微硬度最大，镦粗显微硬度最小。

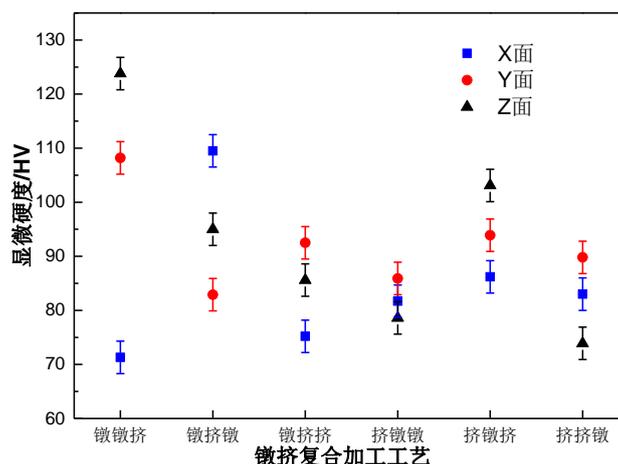


图 6 不同镦挤复合路线在 X, Y, Z 面的, 显微硬度

### 2.4 拉伸性能分析

将镦挤加工后的 6063 铝合金试样进行拉伸性能测试,图 7 为 6063 铝合金拉伸试验的应力-应变曲线。如表 2 所示, 镦挤加工后 6063 铝合金试样的抗拉强度和伸长率, 由表可知, 不同镦挤工艺下的抗拉强度有较大的区别, 其中镦挤挤后 6063 铝合金的抗拉强度增加最高, 到达了 397.261 MPa, 而镦挤的抗拉强度只有 227.183 MPa, 镦挤挤的抗拉强度比挤挤增加了大约 170 MPa; 同时, 不同镦挤复合加工工艺下 6063 铝合金的伸长率比较相近, 其中挤挤, 镦挤的伸长率较大, 分别为 15.879%, 15.113%, 挤挤的伸长率最小, 为 13.374%。

表 2 6063 铝合金抗拉强度和伸长率与复合镦挤方式的关系

复合方式	镦挤挤	镦挤挤	镦挤挤	挤挤	挤挤挤	挤挤挤
抗拉强度/MPa	385.978	397.261	227.183	261.169	308.100	299.182
伸长率/%	14.718	15.113	14.948	15.879	13.374	14.991

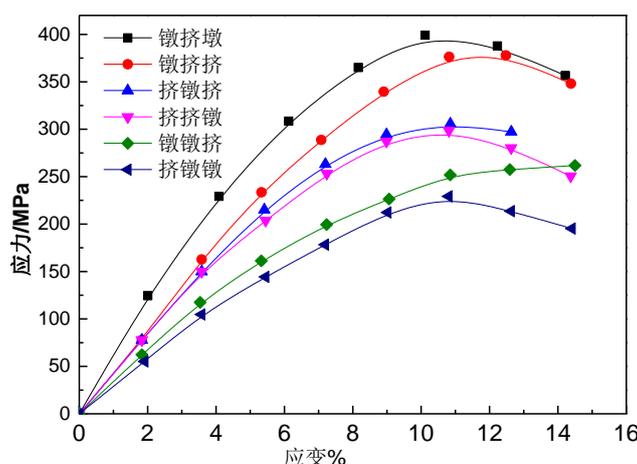


图 7 6063 铝合金在不同镦挤复合工艺下拉伸实验的应力-应变曲线图

## 3 结论

(1) 经过镦挤加工后的 6063 铝产生了第二相 Mg<sub>2</sub>Si, 具有较高的强度, 强化相 Mg<sub>2</sub>Si 的含量越高, 6063 铝合金的强度越大。

(2) 镦挤镦后 6063 铝合金的抗拉强度增加最高, 到达了 397.261 MPa, 而镦挤的抗拉强度只有 227.183 MPa, 镦挤镦的抗拉强度比挤挤镦增加了大约 170 MPa; 同时, 不同镦挤复合加工工艺下 6063 铝合金的伸长率比较相近, 其中挤挤镦, 镦挤镦的伸长率较大, 分别为 15.879%, 15.113%, 挤挤的伸长率最小, 为 13.374%。

#### [参考文献]

- [1] Yang D. Y., Park K., Kang Y. S. Integrated finite element simulation for the hot extrusion of complicated Al alloy profiles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001(1): 25-30.
- [2] 闫洪, 包忠诩. 铝型材挤压模 CAD/CAE/CAM 研究进展[J]. 轻合金加工技术, 1999(10): 1-4.
- [3] 黄珍媛, 李文芳, 吴锡坤, 等. Hyper Xtrude 在铝型材挤压成形仿真中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2010(27): 143-145.
- [4] Kayser T., Klusemann B., Lambers H. G., et al. Characterization of grain microstructure development in the aluminum alloy EN AW-6060 during extrusion[J]. Materials Science & Engineering A, 2010(25): 6568-6573.
- [5] 张士林, 任颂赞. 简明铝合金手册[D]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2000.
- [6] 计海涛, 于得资, 孙绍华. 6063-T5 铝合金建筑型材生产工艺优化[J]. 轻合金加工技术, 2002(8): 25-28.
- [7] 邦达列夫 B N, 那帕尔克夫 B N, 塔拉雷什金 B N, 王永海, 张发明, 高革译. 变形铝合金的细化处理[D]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
- [8] 韩行霖, 姜文辉. AlTiC 中间合金的制备及其晶粒细化性能[J]. 中国有色金属学报, 1998(2): 268-271.
- [9] 成卫兵. 热处理制度对 6063 铝合金导电管导电率及力学性能的影响[J]. 铝加工, 2012(5): 32-34.
- [10] 张新建, 高爱华. 热处理对 6063 铝合金组织性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011(10): 189-191.
- [11] 郭志斌, 杨素珍. Al-Mg-Si 系合金中 Mg<sub>2</sub>Si 含量及铸锭均匀化对挤压速度的影响[J]. 轻合金加工技术, 1996(3): 25-27.
- [12] 余珠华. 6063 铝合金热挤压工艺及其材料的组织与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [13] 刘丘林, 刘允中, 肖文华, 等. 挤压工艺对喷射成形 6061 铝合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2010(10): 969-973.
- [14] 顾振华. 反复镦挤法制备超细晶铝合金的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.
- [15] 罗许. 复合挤压制备超细晶铝合金及性能、组织演变的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- [16] 吴振杰. 等通道转角挤压 6000 系铝合金的时效特性、微观结构及其强韧性[D]. 镇江: 江苏大学, 2015.
- [17] M. H. Goodrzy, H. Arabi, M. A. Boutorabi, et al. The effects of room temperature ECAP and subsequent aging on mechanical properties of 2024 Al alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014(585): 753-759.
- [18] Horita Z., Fujinami T., Nemoto M., et al. Equal-channel angular pressing of commercial aluminum alloys: grain refinement, thermal stability and tensile properties[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, 31(3): 691-701.

作者简介: 李益生 (1985-), 毕业学校: 陕西理工学院; 现就职于宝钛集团有限公司工程师。