

挤压与拉拔

等通道转角挤压对真空吸铸成形纯铝力学性能及 微观组织的影响

李 健, 何 涛, 贾东昇, 霍元明, 张俊杰, 陈细林

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 探究了等通道转角挤压 (Equal Channel Angular Pressing, ECAP) 对真空吸铸成形纯铝的力学性能和微观组织影响, 利用显微硬度测试、室温拉伸实验和光学显微镜, 研究了真空吸铸成形纯铝经 ECAP 前后的力学性能和微观组织形貌。结果表明: 经过等通道转角挤压后, 真空吸铸成形纯铝使变形前的细小晶粒继续被拉长细化, 平均晶粒尺寸由 31 μm 细化为 24 μm , 并且晶粒细化更加均匀; 真空吸铸成形纯铝的硬度和抗拉强度分别为 26.6 HV 和 72.1 MPa, 经 ECAP 强化后达到了 41.6 HV 和 113.2 MPa, 分别提升了 56.5% 和 57.0%, 且综合力学性能更优。

关键词: 真空吸铸; 等通道转角挤压; 纯铝; 力学性能; 微观组织

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.11.010

中图分类号: TG376

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 11-0060-07

Influence of equal channel angular pressing on mechanical properties and microstructure for pure aluminum formed by vacuum suction casting

Li Jian, He Tao, Jia Dongsheng, Huo Yuanming, Zhang Junjie, Chen Xilin

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to explore the influences of equal channel angular pressing (ECAP) on the mechanical properties and microstructure of pure aluminum formed by vacuum suction casting, the mechanical properties and microstructure morphology of pure aluminum formed by vacuum suction casting before and after ECAP were studied by microhardness testing, room temperature tensile testing and optical microscope. The results show that after ECAP, the vacuum suction casting make the fine grain of pure aluminum continue to be elongated and refined. The average grain size is refined from 31 μm to 24 μm , and the grain refinement is more uniform. The hardness and tensile strength of pure aluminum formed by vacuum suction casting are 26.6 HV and 72.1 MPa respectively, and after ECAP strengthening, they reach 41.6 HV and 113.2 MPa, which are increased by 56.5% and 57.0% respectively. Moreover, the comprehensive mechanical properties are better.

Key words: vacuum suction casting; equal channel angular pressing; pure aluminum; mechanical properties; microstructure

轻量化是各个行业中一个经久不衰的话题, 因为它可以降低生产和运营成本以及减少二氧化碳的排放, 这有助于实现碳达峰和碳中和的目标^[1]。铝及其合金由于其重量轻而被广泛用于不同的行业, 如汽车和飞机工业^[2-3]。考虑到纯铝低强度的问题, 限制了其在工业领域的进一步推广^[4]。为了提高纯

铝的强度, 使用合适的加工工艺, 在保证其化学成分不变的基础上, 利用微观结构发生的变化使其力学性能显著提升, 以表现出细晶材料所具有的性能, 已成为必要的途径^[5]。同时, 传统铸造纯铝存在铸造温度高、冷却速率慢等问题, 导致其产生较多的晶粒偏析, 影响了材料的塑性和强度^[6]; 因此, 在进行变形强化前, 通常需要将铸造成形的材料固溶处理, 即在某一温度下保温数小时或数十小时, 使材料内部的化学元素扩散, 从而消除枝晶偏析。

真空吸铸作为真空铸造成形的一种, 具有优良的充型效果, 特别是在成形薄壁零件以及形状复杂零件的过程中, 具有高冷却速率、可调节生产条件

收稿日期: 2023-07-06; 修订日期: 2023-10-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52275350); 上海市自然科学基金资助项目 (20ZR1422100)

作者简介: 李 健 (1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1304036481@qq.com

通信作者: 何 涛 (1979-), 男, 博士, 教授

E-mail: hetao@sues.edu.cn

和减少铸造缺陷等优点^[7]。王建国等^[8]通过数值分析的方法, 对比分析了多种铸造工艺, 结果发现真空吸铸能够大幅提高充填效果, 且过程平稳, 是小型薄壁铸件的理想成形方法。姚婷婷等^[9]利用真空吸铸方法探究了 Si 和 Mn 对 Al-4.5Cu 合金组织和力学性能的影响, 并通过实验证明了 Si 和 Mn 的含量对复合材料的力学性能有显著影响。王香等^[10]利用真空吸铸制备了 (HA+ β -TCP)/Mg-3Zn 相互渗透复合材料, 并通过对比实验证明了真空吸铸能够显著提高材料的力学性能, 而且力学性能的大小还能通过改变原料的比例进行调节。Aranda V A 等^[7]证明了真空吸铸成形对 Al 基合金的组织 and 性能具有积极影响。然而, 在实际操作过程中, 由于环境因素的影响, 真空吸铸得到的样件往往会伴有缩孔、缩松等铸造缺陷, 导致样件的力学性能无法达到预期目标^[11]。因此, 需要一种强化工艺, 对真空吸铸得到的样件进行强化处理, 在弥补铸造缺陷的同时, 进一步提高样件的力学性能, 使其达到理想的性能参数。

剧烈塑性变形 (Severe Plastic Deformation, SPD) 技术是近几年来发展极为迅速的超细晶金属材料制备方法之一, 通过外加载荷使材料产生剧烈的塑性变形进而实现晶粒细化的方式, 能够制备出性能优异的超细晶或纳米晶材料^[12-13]。等通道转角挤压 (Equal Channel Angular Pressing, ECAP) 技术作为剧烈塑性变形工艺的一种, 加工过程中同时发生细晶强化和位错强化, 能够使材料的力学性能大幅提升, 再加上挤压前后材料的直径不发生变化, 使 ECAP 成为了应用前景最为广阔的强化工艺, 与其他工艺相比, 其具有变形稳定、多次加工和可生产大块细晶金属材料的优点^[14-15]。李姣等^[16]通过对纯铝进行 ECAP 实验, 证明 ECAP 能够显著细化晶粒, 并且能使材料的力学性能得到较大提升。Zha M 等^[17]研究发现, Al-7Mg 合金经 3 道次 ECAP 成形后, 屈服强度从 133 MPa 增加至 446 MPa, 提升了两倍以上。

综上所述, 真空吸铸和 ECAP 均可以通过细化晶粒尺寸来提高材料的力学性能。但是将二者结合起来的 research 还未见报道。因此, 为进一步提升纯铝的力学性能, 本文将分别对比真空吸铸成形纯铝棒和普通铸造成形纯铝棒以及 ECAP 后两者的微观组织和力学性能。分析讨论真空吸铸和 ECAP 对材料的强化效果。

1 实验材料和实验方法

1.1 材料的制备

1.1.1 真空吸铸

真空吸铸的原料为纯铝颗粒 (纯度为 99.8%), 将其置于真空吸铸设备中, 经过电弧熔炼、磁搅拌、吸铸等步骤, 获得成形样件。其中吸铸用的石墨嘴口径为 $\Phi 1.90$ mm, 电弧电流为 150 A, 真空吸铸设备如图 1 所示。



图 1 真空吸铸设备

Fig. 1 Equipment of vacuum suction casting

1.1.2 ECAP 工艺

ECAP 模具及原理如图 2 所示。材料由竖直通道放入, 在冲头挤压力的作用下经过转角, 材料横截面保持不变, 发生近似纯剪切变形, 积累等效应变, 以实现强化材料。使用 DK7735 电火花线切割机将样件切割成直径为 $\Phi 10$ mm、长度为 40 mm 的小棒。在常温下通过内角 φ 为 120° 和外角 ψ 为 30° 的模具分别对加工后的真空吸铸纯铝圆棒和普通铸造成形纯铝棒进行挤压, 根据 Iwahashi Y 等^[18]提出的等效应变公式, 本模具单次 ECAP 的等效应变为 0.62。为了提高实验的安全性, 设置挤压速度为 $3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 并在挤压前用二硫化钼对试样进行润滑处理。

1.2 拉伸及硬度实验

将普通铸造成形纯铝棒、真空吸铸成形纯铝棒以及 ECAP 后的纯铝棒分别使用电火花线切割加工, 制成拉伸骨形件, 如图 3 所示。使用 JYJ-200S 电子万能材料实验机对标准骨形件进行抗拉强度和断裂伸长率测试, 设置速度为 $3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。将 ECAP 前后的不同铸造工艺纯铝棒分别制成如图 3 所示的硬度测试件, 使用 600#、800#、1000#、1200#、1500#、2000# 和 3000# 的水磨砂纸对其进行打磨,

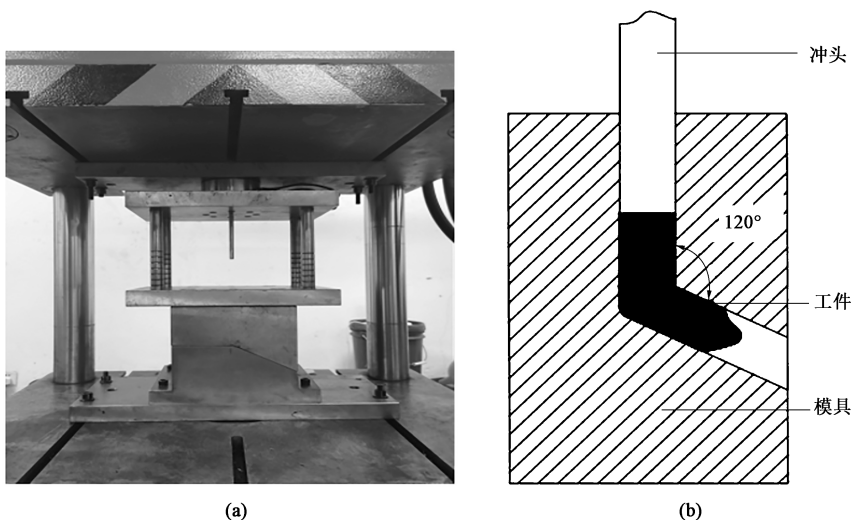


图 2 ECAP 模具 (a) 及原理图 (b)

Fig. 2 Mold (a) and principle diagram (b) of ECAP

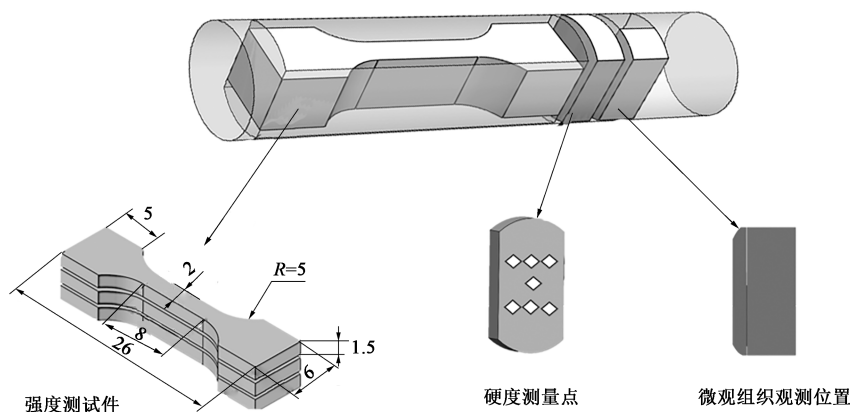


图 3 力学性能测试和微观组织表征用试样的位置和尺寸

Fig. 3 Location and dimensions of specimens for mechanical property test and microstructure characterization

之后在型号为 MP-2B 的抛光机上抛光, 抛光后将其放入酒精中利用超声波清洗器清洗, 使用吹风机吹干酒精, 使用型号为 MHVD-1000IS 的显微硬度计测量硬度测试件上 7 个点的硬度值, 位置如图 3 所示, 设置载荷为 300 g、保压 15 s, 取其平均值作为最终结果。

1.3 显微组织观测

使用电火花线切割机床分别将 ECAP 前、后的普通铸造成形纯铝棒、真空吸铸成形纯铝棒切割为合适的尺寸, 观测位置与大小如图 3 所示。为了防止高温对组织和性能的影响, 将样品进行冷镶嵌处理; 之后使用水磨砂纸进行研磨, 研磨完成后将其用 W2.5、W1.5 和 W1.0 的抛光膏依次进行抛光, 直至被测面为镜面, 然后将样品放入酒精中进行超声振动 1~2 min; 超声清洗后的样品用试剂 (5 mL HF+50 mL H₂O) 腐蚀后用型号为 4X-CIS 的光学显

微镜 (Optical Microscope, OM) 进行显微组织观察。

2 实验结果与分析

2.1 硬度分析

样件平均硬度值如图 4 所示, 从图 4 中可以看出, 真空吸铸样件的硬度值为 26.6 HV, 经过 ECAP 后真空吸铸样件的硬度值达到了 41.6 HV, 提升了 56.6%。这是由于: 真空吸铸工艺具有快速凝固的优点, 材料本身拥有细小和均匀的晶粒, 在经过 ECAP 强化后大量晶粒得到进一步的细化拉长, 材料得到了进一步的细晶强化, 使材料的力学性能得到大幅度提升。普通铸造纯铝棒的硬度为 21.3 HV, 低于真空吸铸样件的硬度值, 经 ECAP 强化后硬度值提升为 33.5 HV, 仅提升了 32.9%。这是由于:

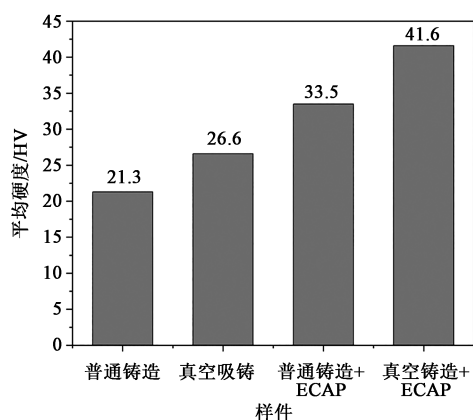


图 4 不同成形工艺纯铝的平均硬度

Fig. 4 Average hardness of pure aluminum by different forming processes

真空吸铸对比普通铸造工艺提高了合金液的充型能力,使其产生了较少的缩松、缩孔、夹杂等缺陷,提高了合金的力学性能。同时由于普通铸造成形纯铝的凝固速度较慢,造成晶粒尺寸较大,在经过 ECAP 强化时,变形抗力较小,细晶细化效果不明显。

图 5 为不同工艺流程下硬度不均匀性对比图,可以发现,ECAP 和真空吸铸对纯铝硬度分布的均匀性有着较大的影响。为了能够更加直观地表达 ECAP 对真空吸铸成形纯铝硬度均匀性的影响,本文引入硬度不均匀系数 η ,且定义为:

$$\eta = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\text{mean}}} \quad (1)$$

式中: η 为硬度不均匀系数,其数值越小表示硬度分布越均匀; H_{\max} 为最大硬度值; H_{\min} 为最小硬度值; H_{mean} 为平均硬度值。

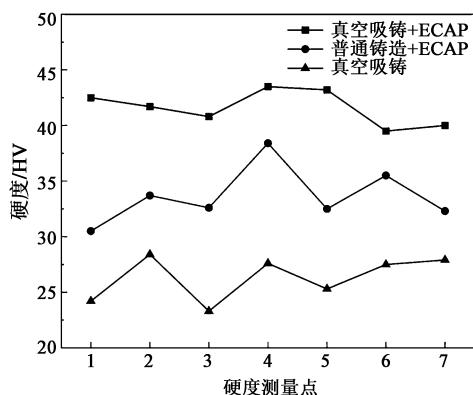


图 5 不同工艺流程下硬度不均匀性对比

Fig. 5 Comparison of hardness non-uniformity under different processes

经过计算,真空吸铸成形纯铝在经过 ECAP 强化后,其硬度不均匀系数为 0.096,而在 ECAP 强

化之前硬度不均匀系数为 0.157。可以得出结论: ECAP 可以使真空吸铸成形纯铝的硬度不均匀性明显降低。一方面为经过 ECAP 后真空吸铸成形样件产生的缩孔、缩松等铸造缺陷减少,改善了组织分布有关;另一方面为经过 ECAP 后,部分在吸铸时形成的较大晶粒得到细化,增加了力学性能的均匀性。普通铸造成形纯铝经 ECAP 强化后,其不同点硬度波动更加剧烈,硬度不均匀系数为 0.235,这显示出了真空吸铸工艺的优越性。值得注意的是,因为在 ECAP 过程中样件通过拐角时存在变形“死区”,所以仍会出现晶粒细化和拉长不均匀的情况^[19],导致样件硬度不均匀。

2.2 抗拉强度和伸长率分析

将 ECAP 前、后的普通铸造成形纯铝和真空吸铸成形纯铝制成的标准拉伸件分别进行测试,其平均抗拉强度和伸长率结果如图 6 所示。真空吸铸成形纯铝的平均抗拉强度为 72.1 MPa,经过 ECAP 强化后平均抗拉强度提升为 113.2 MPa,提升幅度为 57%,对比未经 ECAP 的真空吸铸纯铝棒,抗拉强度得到了明显提升。这是由于:真空吸铸成形材料过程中,金属在结晶时过冷度较大,产生的形核较多,使材料在单位体积内晶粒数目增多,在经过 ECAP 强化时,更多的晶粒参与变形,使细晶强化效果更加明显;同时在真空吸铸成形过程中,金属液在负压下进行冷却、凝固,凝固时间较短,晶粒十分细小,在经过 ECAP 强化后,晶粒在原本细小的基础上继续被拉长细化,使材料的力学性能得到大幅提高。真空吸铸成形纯铝的断裂伸长率为 26.5%,在经过 ECAP 后,其伸长率降低为 19.2%,这是由于:样件在经过 ECAP 后,晶界畸变和缺陷增多,易造成位错阻塞,不利于位错滑移,产生了加工硬化效果,

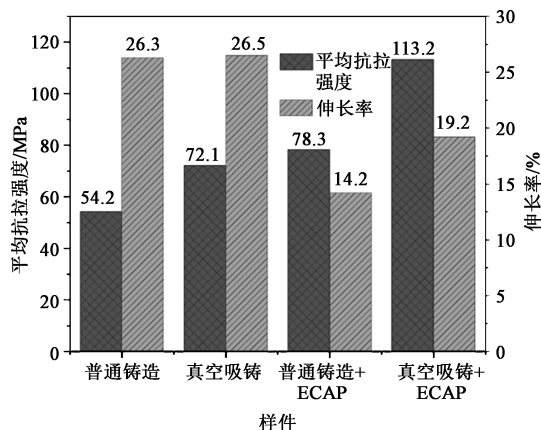


图 6 不同工艺流程下纯铝的平均抗拉强度与伸长率

Fig. 6 Average tensile strength and elongation of pure aluminum under different processes

导致伸长率下降^[20]。值得注意的是,普通铸造成形纯铝经 ECAP 后的伸长率由 26.3% 降低为 14.2%, 下降幅度为 46%, 明显高于真空吸铸成形纯铝伸长率的下降幅度 (27%)。

普通铸造成形纯铝在经过 ECAP 强化后, 平均抗拉强度由 54.2 MPa 提升为 78.3 MPa, 提升了 44.4%, 明显低于真空吸铸成形纯铝经 ECAP 强化后的 57% 的提升幅度。这是由于: 真空吸铸工艺快速凝固产生更加细小和均匀的晶粒, 提高了变形抗力, 在经过 ECAP 强化时, 晶粒变形更加剧烈, 使细晶强化效果更加明显。可见 ECAP 不仅能够大幅提高材料的抗拉强度, 并且对于真空吸铸成形的拥有细小晶粒的纯铝的抗拉强度提升更加明显。

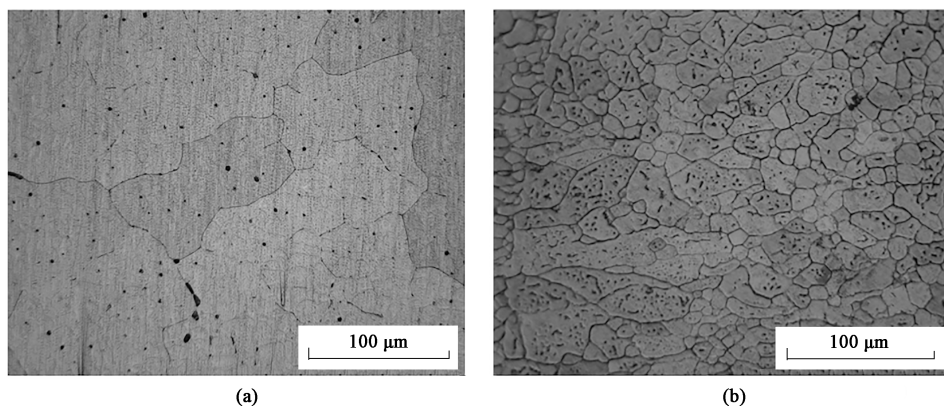


图 7 不同成形工艺纯铝的原始晶粒状态

(a) 普通铸造 (b) 真空吸铸

Fig. 7 Original grain states of pure aluminum by different forming processes

(a) General casting (b) Vacuum suction casting

图 8 显示了普通铸造成形的纯铝棒和真空吸铸成形的纯铝棒经过 ECAP 强化后的微观组织形貌。在图 8b 中可以明显地观察到大量被拉长和细化的晶粒, 随着晶粒的拉长细化, 晶粒和位错的密度也随之增大。当材料受到塑性变形时, 高密度的位错会堆积在晶粒内部及周围, 阻碍位错进一步运动, 从而达到提高力学性能的目的^[21], 实现了位错强化与细晶强化的结合。由于真空吸铸成形纯铝棒在未经过 ECAP 强化之前晶粒已经十分细小, 经过强化后晶粒细化效果并不明显, 平均晶粒尺寸由原本的 31 μm 减少为 24 μm 。但对比图 8a 与图 8b 可以发现, 经过塑性变形, 真空吸铸材料中的晶粒在剪切力的作用下会重新排列, 由原本的混乱分布变成朝向某一相同取向的均匀分布, 进而形成织构; 织构的形成对材料的力学性能具有较大的影响^[21-22]。同时, 在图 8b 中可以观察到明显的变形带, 变形带内的晶粒更加细小。对比图 7a 和图 8a 可以发现, 由

2.3 微观组织分析

图 7 为普通铸造成形纯铝棒和真空吸铸成形纯铝棒在相同部位处的微观组织。从图 7 中可以清晰地看出, 普通铸造成形的纯铝棒晶粒尺寸较大, 平均晶粒尺寸为 157 μm ; 而真空吸铸成形的纯铝棒晶粒具有更加精细的结构和更小的尺寸, 平均晶粒尺寸为 31 μm ; 这是由于: 在真空吸铸过程中, 结晶时过冷度较大产生的形核较多, 并且拥有较高的冷却速率, 晶粒无法长大, 材料具有十分细小且均匀的晶粒, 产生了细晶强化。同时, 晶粒尺寸的细化意味着产生更多的晶界, 起到增大变形抗力的作用, 反映在力学性能上便是提高了材料的硬度和强度。

于 ECAP 前普通铸造成形纯铝的晶粒尺寸较大, 在经过 ECAP 过程中的剪切力后, 晶粒发生了明显的细化, 其平均晶粒尺寸由原来的 157 μm 减少为 32 μm 。普通铸造成形的纯铝大致趋向于同一方向, 但其中包括不同取向的晶粒。这可能是因为: 在挤压过程中, 晶粒发生动态再结晶, 随着变形量的增加, 晶粒会逐渐旋转^[2]。但由于普通铸造成形纯铝的晶粒尺寸较大, 在变形过程中材料受力不均匀, 导致在旋转过程中出现一些较为无序的晶粒。

图 9 显示了普通铸造成形的纯铝棒和真空吸铸成形的铝棒经过 ECAP 强化后变形不均匀的微观组织形貌。从图 9a 中可以观察到多个变形不充分的大晶粒, 对比图 9b 可知, 真空吸铸成形纯铝经 ECAP 后变形不充分的晶粒较少, 这是由于: 真空吸铸成形的纯铝由于初始晶粒尺寸细小且均匀, 晶界较多, 本身具有较高的变形抗力, 在经过剪切变形时更加剧烈, 晶粒也会更加的细小和均匀^[23], 晶粒变形的

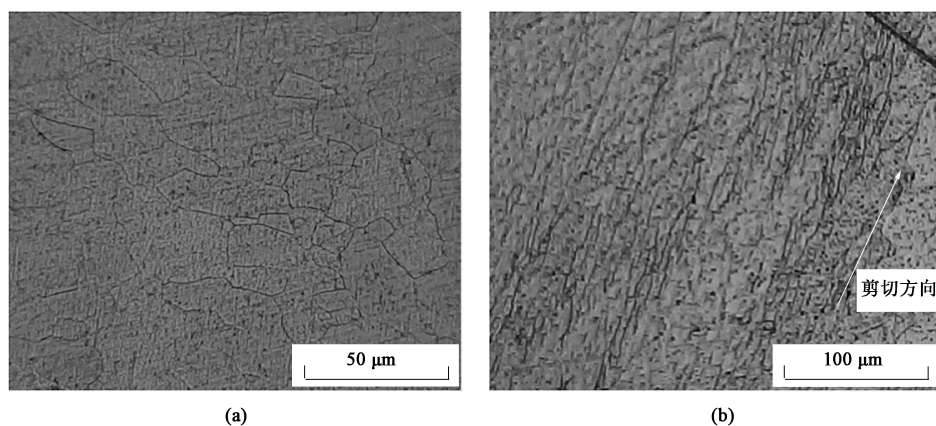


图 8 经 ECAP 后的再结晶组织
(a) 普通铸造+ECAP (b) 真空吸铸+ECAP

Fig. 8 Recrystallization structure after ECAP
(a) General casting+ECAP (b) Vacuum suction casting+ECAP

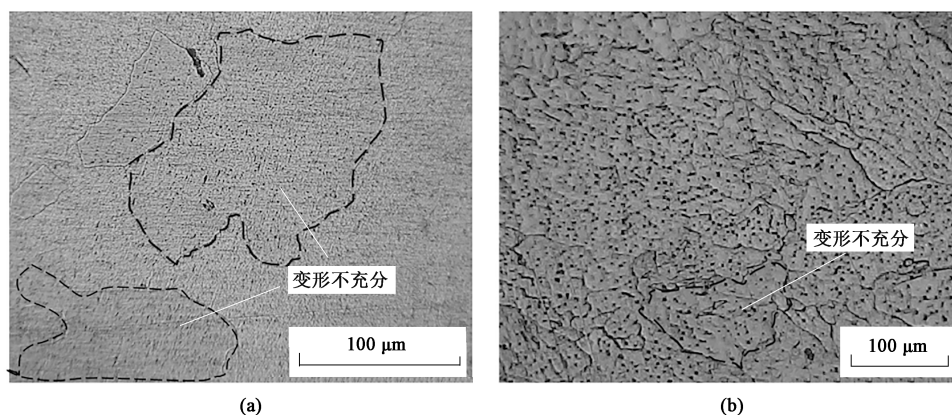


图 9 经 ECAP 后的晶粒变形不均匀性的组织形貌
(a) 普通铸造+ECAP (b) 真空吸铸+ECAP

Fig. 9 Morphologies of grain deformation non-uniformity after ECAP
(a) General casting+ECAP (b) Vacuum suction casting+ECAP

不均匀性也明显降低。而普通铸造成形纯铝晶粒尺寸较大，晶界较少，在发生塑性变形时材料的抗力较低，因此在 ECAP 过程中存在部分较大晶粒未被充分拉长细化的情况。同时，由于在 ECAP 过程中，金属发生塑性变形时材料因流动性导致受力不均匀和模具拐角处存在“死区”，导致材料在经过 1 道次时不可避免地出现了晶粒细化不均匀的情况。

3 结论

(1) 真空吸铸成形纯铝的平均晶粒尺寸为 $31\ \mu\text{m}$ ，远小于普通铸造成形的 $157\ \mu\text{m}$ ；经过 ECAP 后的平均晶粒尺寸进一步细化为 $24\ \mu\text{m}$ 。

(2) 真空吸铸成形纯铝的硬度值和抗拉强度分别为 $26.6\ \text{HV}$ 和 $72.1\ \text{MPa}$ ；经过 ECAP 强化后，硬度值和抗拉强度分别提升为 $41.6\ \text{HV}$ 和 $113.2\ \text{MPa}$ ，提升幅度分别为 56.6% 和 57.0% 。

(3) 真空吸铸成形纯铝经 ECAP 后硬度的不均匀性得到了明显改善，其硬度不均匀系数由 0.157 降低为 0.096 ，下降幅度为 38.8% 。

(4) 真空吸铸成形纯铝对比普通铸造成形纯铝，在经过塑性变形后，晶粒由原本的无序分布变为朝向剪切方向相同取向的均匀分布，且晶粒细化更加均匀。

参考文献：

[1] Cui L Y, Zhang Z, Chen X G. Development of lightweight Al-

- based entropy alloys for elevated temperature applications [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 938 (4): 168619.
- [2] El-Danaf E A, Soliman M S, Almajid A A, et al. Enhancement of mechanical properties and grain size refinement of commercial purity aluminum 1050 processed by ECAP [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 458 (1-2): 226-234.
- [3] Mahallawy N E, Shehata F A, Hameed M A E, et al. Effect of Cu content and number of passes on evolution of microstructure and mechanical properties of ECAPed Al/Cu alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 517 (1-2): 46-50.
- [4] 郑立静, 陈昌麒, 周铁涛, 等. ECAP 细晶机制及对纯铝显微组织和力学性能的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2004, (12): 1325-1328.
- Zheng L J, Chen C Q, Zhou T T, et al. Grain-refining mechanism of ECAP and its effect on microstructures and mechanical properties of pure Al [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2004, (12): 1325-1328.
- [5] 张清龙, 王军丽, 章震威, 等. 挤压速度对等通道转角挤压 6061 铝合金力学性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2018, 47 (1): 33-37.
- Zhang Q L, Wang J L, Zhang Z W, et al. Influence of extrusion speed on mechanical properties of 6061 aluminum alloy extruded by equal channel angular pressing [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47 (1): 33-37.
- [6] Ferreira A F, Chrisóstimo W B, Sales R C, et al. Effect of pouring temperature on microstructure and microsegregation of as-cast aluminum alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104: 957-965.
- [7] Aranda V A, Figueroa I A, González G, et al. Study of the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Fe with additions of chromium by suction casting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 853: 157155.
- [8] 王建国, 周中波, 王一川, 等. TiAl 合金铸造工艺数值模拟及分析 [J]. *铸造技术*, 2009, 30 (8): 1054-1057.
- Wang J G, Zhou Z B, Wang Y C, et al. Numerical simulation and analysis on casting process of TiAl alloy [J]. *Foundry Technology*, 2009, 30 (8): 1054-1057.
- [9] 姚婷婷, 何涛, 王京, 等. SiC 纳米颗粒表面处理方式对增强铝基复合材料组织和性能的影响 [J]. *现代制造工程*, 2020, (12): 1-5, 63.
- Yao T T, He T, Wang J, et al. Effect of surface treatment of SiC particles on microstructure and properties of aluminum matrix composites reinforced by nanoparticles [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2020, (12): 1-5, 63.
- [10] 王香, 聂其东, 李竞涛, 等. 真空吸铸法制备 (HA + β -TCP)/Mg-3Zn 相互渗透复合材料的组织和性能 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47 (10): 3080-3087.
- Wang X, Nie Q D, Li J T, et al. Microstructure and properties of interpenetrating (HA + β -TCP)/Mg-3Zn composites fabricated by suction casting [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47 (10): 3080-3087.
- [11] 李新雷, 夏瑾, 郝启堂. 离心真空吸铸成形叶轮件凝固组织与性能研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47 (4): 1319-1324.
- Li X L, Xia J, Hao Q T. Solidification microstructure and properties of aluminum alloy impeller produced by centrifugal counter-gravity casting [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47 (4): 1319-1324.
- [12] Injor O M, Daramola O O, Adewuyi B O, et al. Grain refinement of Al-Zn-Mg alloy during equal channel angular pressing (ECAP) [J]. *Results in Engineering*, 2022, 16 (299): 100739.
- [13] Jia D S, He T, Song M, et al. Effects of equal channel angular pressing and further cold upsetting process to the kinetics of precipitation during aging of 7050 aluminum alloy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26 (1): 5126-5140.
- [14] Klu E E, Song D, Li C, et al. Achieving ultra-fine grains and high strength of Mg-9Li alloy via room-temperature ECAP and post rolling [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 833: 142371.
- [15] Yang Z W, Li H, Zhang Y H, et al. ECAP based regulation mechanism of shape memory properties of NiTiNb alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 897: 163184.
- [16] 李姣, 杨刚. 挤压道次对航空用工业纯铝 ECAP 组织和性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2019, 48 (3): 176-178.
- Li J, Yang G. Effect of extrusion pass on microstructure and properties of ECAP pure aluminum for aviation [J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48 (3): 176-178.
- [17] 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.
- [18] Iwahashi Y, Wang J T, Horita Z J, et al. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials [J]. *Scripta Materialia*, 1996, 35 (2): 143-146.
- [19] Zou D L, He L F, Xiao D W, et al. Microstructure and mechanical properties of fine grained uranium prepared by ECAP and subsequent intermediate heat treatment [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30 (10): 2749-2756.
- [20] Luo L, Yang B H, Yang X R, et al. Effect of room temperature multi-pass ECAP deformation on mechanical properties and precipitation phase distribution of 7075 aluminium alloy [J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30 (2): 374-386.
- [21] Cardoso K R, Travessa D N, Botta W J, et al. High Strength AA7050 Al alloy processed by ECAP: Microstructure and mechanical properties [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528 (18): 5804-5811.
- [22] Zheng L J, Li H X, Hashmi M F, et al. Evolution of microstructure and strengthening of 7050 Al alloy by ECAP combined with heat-treatment [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 171 (1): 100-107.
- [23] Qiang M, Yang X R, Liu X Y, et al. Effects of initial grain size on microstructure and properties of pure Ti processed by ECAP [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51 (6): 1949-1956.