



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.01

## 电弧增材制造2319铝合金的动态力学性能

郭一鸣<sup>1</sup>, 宋世达<sup>2</sup>, 钱美霞<sup>2</sup>, 肖铭堃<sup>1</sup>, 王克鸿<sup>2</sup>

1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094

2. 南京理工大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210094

**摘要:** 由于铝合金结构件在实际服役过程中受到复杂载荷的作用, 需要研究其在不同应变速率下的力学行为, 对其静态力学性能进行研究。采用电弧增材制造技术制备了2319铝合金薄壁样件, 并通过准静态压缩试验和分离式霍普金森压杆试验分别研究了其在准静态和不同应变速率下动态的压缩力学性能。研究表明, 沉积态的2319铝合金表现出明显的应变速率强化效应, 与静态曲线相比, 动态曲线上移。试样的屈服强度和最大流动应力均随着应变速率的增大而增大, 但应变硬化率却表现出相反的变化趋势, 并且屈服强度和最大流动应力的增幅也逐渐减小, 这可能是由应变速率引起的硬化效应和由绝热温升引起的热软化效应相互竞争的结果。同时, 随着应变速率的增大, 竖直方向试样的柱状晶粒逐渐向垂直压缩载荷的方向发生更大的伸长变形, 原有的沿<001>方向(沉积方向)的织构强度逐渐减弱, 核平均取向差也逐渐增大, 小角度晶界所占的比例略有下降。

**关键词:** 2319 铝合金; 电弧增材制造; 动态力学性能; 变形组织

中图分类号: TG457.14 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)04-0001-07

## Dynamic Mechanical Properties of 2319 Aluminum Alloy Fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing

GUO Yiming<sup>1</sup>, SONG Shida<sup>2</sup>, QIAN Meixia<sup>2</sup>, XIAO Mingkun<sup>1</sup>, WANG Kehong<sup>2</sup>

1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

2. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

**Abstract:** Aluminum alloy structural components are subjected to complex loads during their service life, necessitating an investigation into their mechanical behavior under various strain rates to understand both their static and dynamic mechanical properties. In this study, 2319 aluminum alloy thin-walled specimens were fabricated using wire and arc additive manufacturing technology. Quasi-static compression tests and split Hopkinson pressure bar tests were employed to analyze their compressive mechanical properties under quasi-static conditions and at different strain rates. The findings reveal that the as-deposited 2319 aluminum alloy demonstrates a pronounced strain rate hardening effect, with the dynamic stress-strain curve shifting upwards relative to the static curve. Both the yield strength and the maximum flow stress of the specimens increase with the elevation of strain rate; however, the strain hardening rate exhibits an inverse trend. The increments in yield strength and maximum flow stress diminish progressively, likely due to the interplay between strain rate-induced hardening and adiabatic heating-induced softening effects. Additionally, as the strain rate increases, the columnar grains in the vertical direction of the specimens tend to elongate more towards the direction perpendicular to the compressive load. The texture strength

收稿日期: 2025-01-07

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(30923011008)

作者简介: 郭一鸣(1993—),男,讲师,博士,主要从事电弧增材制造方面的研究。E-mail: ymguo@njut.edu.cn。

along the <001> direction, which is the deposition direction, diminishes gradually, and the kernel average misorientation increases. There is also a slight decrease in the proportion of small-angle grain boundaries.

**Keywords:** 2319 aluminum alloy; wire arc additive manufacturing; dynamic mechanical properties; deformation structure

**引用格式:**郭一鸣,宋世达,钱美霞,等. 电弧增材制造 2319 铝合金的动态力学性能[J]. 电焊机,2025,55(4):1-7.

**Citation:**GUO Yiming, SONG Shida, QIAN Meixia, et al. Dynamic Mechanical Properties of 2319 Aluminum Alloy Fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 1-7.

## 0 引言

2 系铝合金作为一种 Al-Cu 合金,凭借其较高的强度、良好的耐腐蚀性能和良好的切削性能等广泛应用于航空航天、交通运输、建筑装饰等领域<sup>[1-2]</sup>。电弧增材制造技术(Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM)是一种利用电弧将金属丝材熔化,通过逐层熔覆的方式制造三维金属零件的定向能量沉积(Directed Energy Deposition, DED)技术。该技术具有广泛的金属材料兼容性,包括钛、铝、镍及钢合金等,并且具有沉积效率高、材料利用率高以及成本低等优点,在高端装备和大型构件制造领域具有广阔的应用前景<sup>[3-6]</sup>。

由于 2 系铝合金良好的焊接性,以及 WAAM 在制备大尺寸和复杂几何形状的铝合金构件方面的高成本效益,针对 2319 铝合金采用电弧增材制造技术的研究已成为众多学者关注的焦点<sup>[2-7]</sup>。ZHANG 等<sup>[4]</sup>采用冷金属转移(Cold Metal Transfer, CMT)-WAAM 工艺结合低频振动制备了 2319 铝合金,发现振动可以细化晶粒尺寸并且提升试样的延伸率;LI 等<sup>[5]</sup>发现与激光复合的 CMT-WAAM 工艺生产的 2319 铝合金的孔隙率降低,力学性能提升。但上述研究只涉及沉积态的 2319 铝合金的静态力学性能,而并未涉及其在高应变速率下的动态力学性能的研究。

在实际的生产和应用过程中,铝合金结构件除了承受静态载荷外,不可避免地需要承受各种不同的动态冲击载荷。为了提高铝合金在应用中的安全性,准确地计算其结构件在复杂载荷下的强度,有必要对其在高应变速率下的动力学行为进行研究。目前对 2 系铝合金动态力学性能的研究不多。YU 等<sup>[8]</sup>发现 2219-T6 铝合金在 2000 s<sup>-1</sup> 应变速率下的极限抗拉强度和延伸率相比于准静态拉伸

分别提高了 3.5% 和 98%。因此,本研究采用 CMT-WAAM 工艺制备了 2319 铝合金薄壁样件,然后分别开展了其在准静态条件和动态条件下的压缩试验,并表征了其在经历不同应变速率压缩变形后的微观结构,旨在为预测沉积态的 2319 铝合金结构件于动态载荷条件下的服役性能提供理论参考和试验依据。

## 1 试验材料与方法

试验选用的原料为直径 1.2 mm 的 2319 铝合金丝材,基板为尺寸 120 mm×120 mm×12 mm 的 6061 铝合金板,丝材和基板的化学成分如表 1 所示。采用 CMT-WAAM 系统,主要由 ABB IRB2600 六轴机器人、Fronius TransPuls Synergic 5000 CMT 焊机、焊枪以及一个二轴工作平台组成,如图 1 所示。采用该 CMT-WAAM 系统制备一个 2319 铝合金的单道多层薄壁样件,其宏观形貌如图 2 所示。在该薄壁样件沉积的过程中,采用了“Z”字形的增材路径,也即层间相邻焊道之间的沉积方向。使用的工艺参数如表 2 所示。由于 CMT 焊机为一元化焊机,沉积过程中的焊接电流和电压是由焊机根据送丝速度自动匹配的,因此未在表 2 中列出具体的数值。

表 1 丝材和基板的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of wire and substrate (wt. %)

| 牌号   | Cu   | Mn   | Fe    | Ti    | Si    | Zn    | Mg    | Cr   |
|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 2319 | 6.25 | 0.32 | 0.102 | 0.14  | 0.13  | 0.069 | 0.011 | —    |
| 6061 | 0.23 | 0.05 | 0.29  | 0.031 | 0.593 | 0.004 | 1.13  | 0.19 |

采用电火花线切割的方法沿薄壁样件的竖直和水平方向分别制取  $\varnothing 4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  的圆柱试样用于准静态和动态压缩试验。准静态压缩试验在 SANS-UTM5300H 电子万能试验机上以 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup> 的应变速率进行。动态压缩试验在分离式霍普金森压杆装

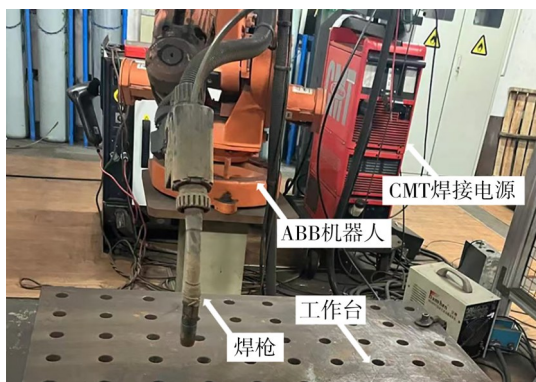


图1 CMT-WAAM系统

Fig. 1 CMT-WAAM system

置(SHPB)上进行,该装置主要由四个弹性杆(撞击杆、入射杆、透射杆、吸收杆)、两个应变片以及一个数据处理系统组成,如图3所示。在试验过程中,试样中产生的应变速率由撞击杆的速度控制,而撞击杆的速度由高压气枪的驱动气体压力控制<sup>[9]</sup>。通过设置4个不同的气压(0.1~0.4 MPa),使得水平和竖直试样分别进行了4个不同应变速率(1 000~4000 s<sup>-1</sup>)



图3 SHPB装置

Fig. 3 SHPB device

## 2 试验结果与讨论

图4为采用CMT-WAAM工艺制备的2319铝合金薄壁样件的水平试样和竖直试样在经过不同应变速率动态压缩后得到的压缩真实应力应变曲线,图4a对应水平试样,图4b对应竖直试样。如前所述,在SHPB装置中,撞击杆的速度由气枪提供,撞击杆在获得速度之后会形成应力波向试样传播,在这个过程中,试样与杆之间不同的端面摩擦、应力波在试样和杆之间传播的相互影响等会导致即使设置相同的气压进行试验,试样中产生的应变速率的大小并不会完全保持一致,会形成一个小范围内的上下波动。因此,图4中水平和竖直试样对应

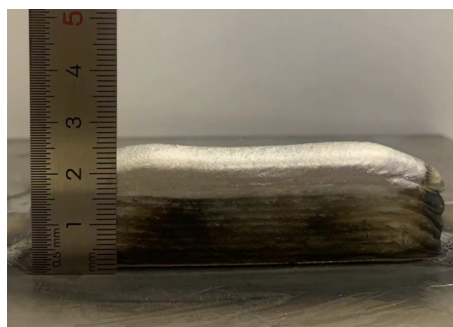


图2 2319铝合金薄壁样件

Fig. 2 2319 aluminum alloy thin-walled sample

表2 CMT-WAAM工艺参数

Table 2 CMT-WAAM process parameters

| CMT模式 | 导电嘴距<br>工件距离<br>/mm | 送丝速度<br>/(m·min <sup>-1</sup> ) | 焊枪移速<br>/(mm·s <sup>-1</sup> ) | 保护气<br>成分 | 气体流量<br>/(L·min <sup>-1</sup> ) |
|-------|---------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------|---------------------------------|
| CMT+P | 12                  | 6.5                             | 7                              | 99.99%Ar  | 20                              |

下的动态压缩试验,并且对应每个应变速率均进行了3次重复试验,以确保试验结果的准确性和可靠性。

的各应变速率稍有差别。

对比图4a、图4b中各应变速率下的压缩曲线可以发现,试样在水平和竖直两个方向之间的静态和动态压缩性能没有明显差异,这表明CMT-WAAM-2319铝合金在水平和竖直方向上的静动态压缩力学性能不具有各向异性。随着应变速率的增加,试样的流动应力和塑性应变都不断增加,展现出明显的应变速率强化效应。对于无明显屈服现象出现的金属材料,一般规定以产生0.2%残余变形的应力值作为其屈服极限,称为条件屈服极限或屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 。通过观察图4中各曲线的变化趋势可以发现,各曲线均为不具有明显的屈服平台,因此将条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 作为各曲线所对应试样的屈

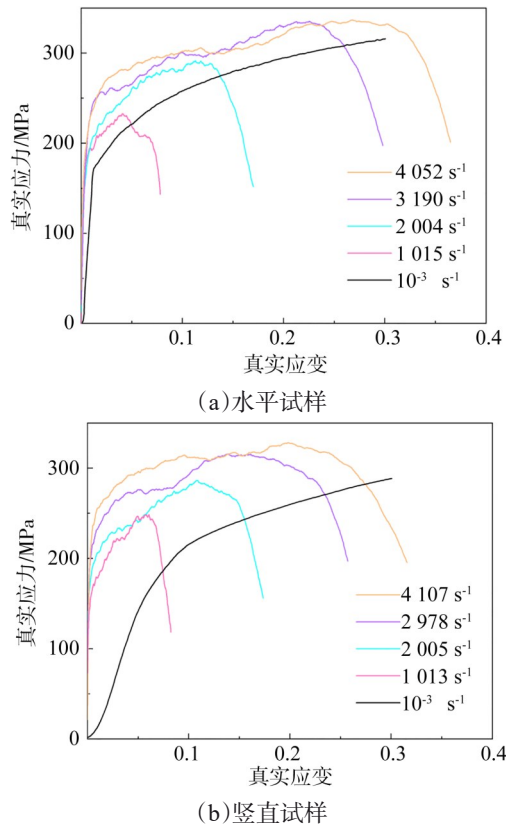


图4 2319-CMT-WAAM的准静态和动态压缩真实应力应变曲线

Fig. 4 Quasi-static and dynamical compressive true stress-strain curves of 2319-CMT-WAAM

屈服强度。在图4a中,水平试样在准静态条件下(对应 $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的应变速率)的屈服强度为172 MPa,然后增大到 $4.052 \text{ s}^{-1}$ 应变速率的203.9 MPa。在图4b中,竖直试样在准静态条件下(对应 $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的应变速率)的屈服强度为189 MPa,然后增大到 $4.052 \text{ s}^{-1}$ 应变速率的210 MPa。

对图4b中各竖直试样对应的真实压缩应力应变曲线的塑性阶段进行线性拟合,拟合直线的斜率即可作为试样的应变硬化模量,也即应变硬化率。另外,由于本研究中的各试样在进行动态压缩试验后并未被破碎,只是发生不同程度的沿径向的伸长变形,并且应变速率越大,试样被压缩得越扁,直径越大。因此,图4各曲线中的最大流动应力值并不能对应试样的抗压强度。各竖直试样在不同应变速率下的屈服强度( $\sigma_{0.2}$ )、最大流动应力和应变硬化模量如图5所示。由图5可知,当应变速率从 $1.015 \text{ s}^{-1}$ 增加到 $4.107 \text{ s}^{-1}$ 时,屈服强度从146 MPa增

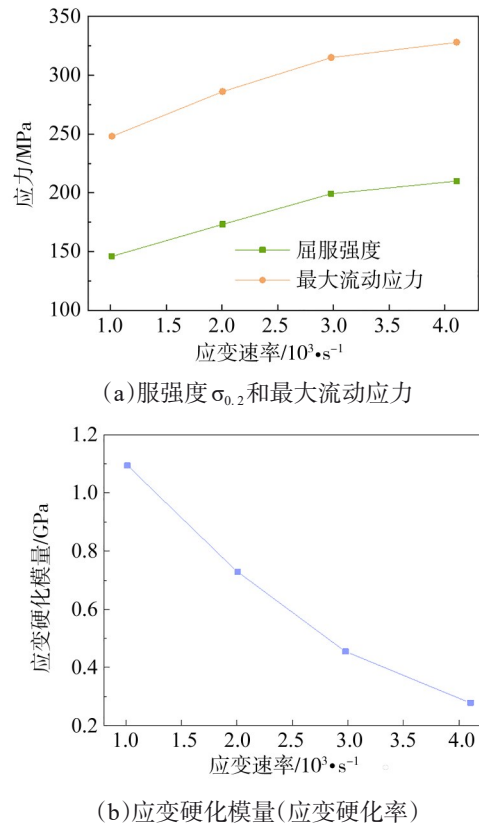


图5 应变速率和力学行为的关系

Fig. 5 Relationship between strain rate and mechanical behavior

大到210 MPa,最大流动应力从248 MPa增大到328 MPa,而应变硬化率却从1.094 GPa减小到0.277 6 GPa。这表明CMT-WAAM-2319铝合金在动态压缩下的屈服强度也表现出对应变速率的依赖性,随应变速率的增大而增大,而应变硬化率却随着应变速率的增大而降低。经分析,这可能与试样动态变形过程中的绝热温升有关<sup>[10-12]</sup>,绝热温升一般通过将塑性变形功转换为生热来估算,计算公式如下所示:

$$\eta \Delta W \approx \Delta Q \quad (1)$$

$$\eta \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon = \rho C_v \Delta T \quad (2)$$

$$\Delta T(\epsilon) = \eta / \rho C_v \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (3)$$

式中  $\eta$  为功热转化系数(通常为0.9); $\Delta W$ 为塑性功; $\Delta Q$ 为转化的热量; $\sigma$ 为真实应力; $\epsilon$ 为真实应变; $\rho$ 为密度(2319铝合金为 $2.81 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ); $C_v$ 为定容比热容(2319铝合金为 $900 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ); $\Delta T$ 为由绝热温升产生的温度的变化值。

经计算,各个应变速率下的绝热温升值如表3所示。由表3可知,应变速率越大,引起的绝热温升越高,由其造成的热软化效应也就越强,在其与由应变速率引起的硬化效应竞争的过程中使得试样的应变硬化率逐渐降低,同时,在图5a中也可以发现屈服强度和最大流动应力的增加值也越来越小。

为进一步观察各竖直试样在经历不同应变速率的压缩变形后微观结构的演变,对未经压缩变形以及经动态压缩变形后的各竖直试样进行了EBSD表征,表征结果如图6所示。从图6a中未经压缩变形试样的反极图(Inverse Pole Figure, IPF)可以发

表3 绝热温升的计算结果

Table 3 Calculation results of adiabatic temperature rise

| 应变速度/ $s^{-1}$ | $\Delta T/^{\circ}C$ |
|----------------|----------------------|
| 1 013          | 7.15                 |
| 2 005          | 9.23                 |
| 2 978          | 10.61                |
| 4 107          | 11.30                |

现,经由CMT-WAAM工艺制备的2319铝合金呈现为主要由柱状晶粒组成的微观形貌,并且这些柱状晶具有沿<001>方向(沉积方向)的织构倾向,这是由WAAM工艺的定向凝固特性所决定的,是金属材料在采用WAAM工艺制备时常见的微观组织形

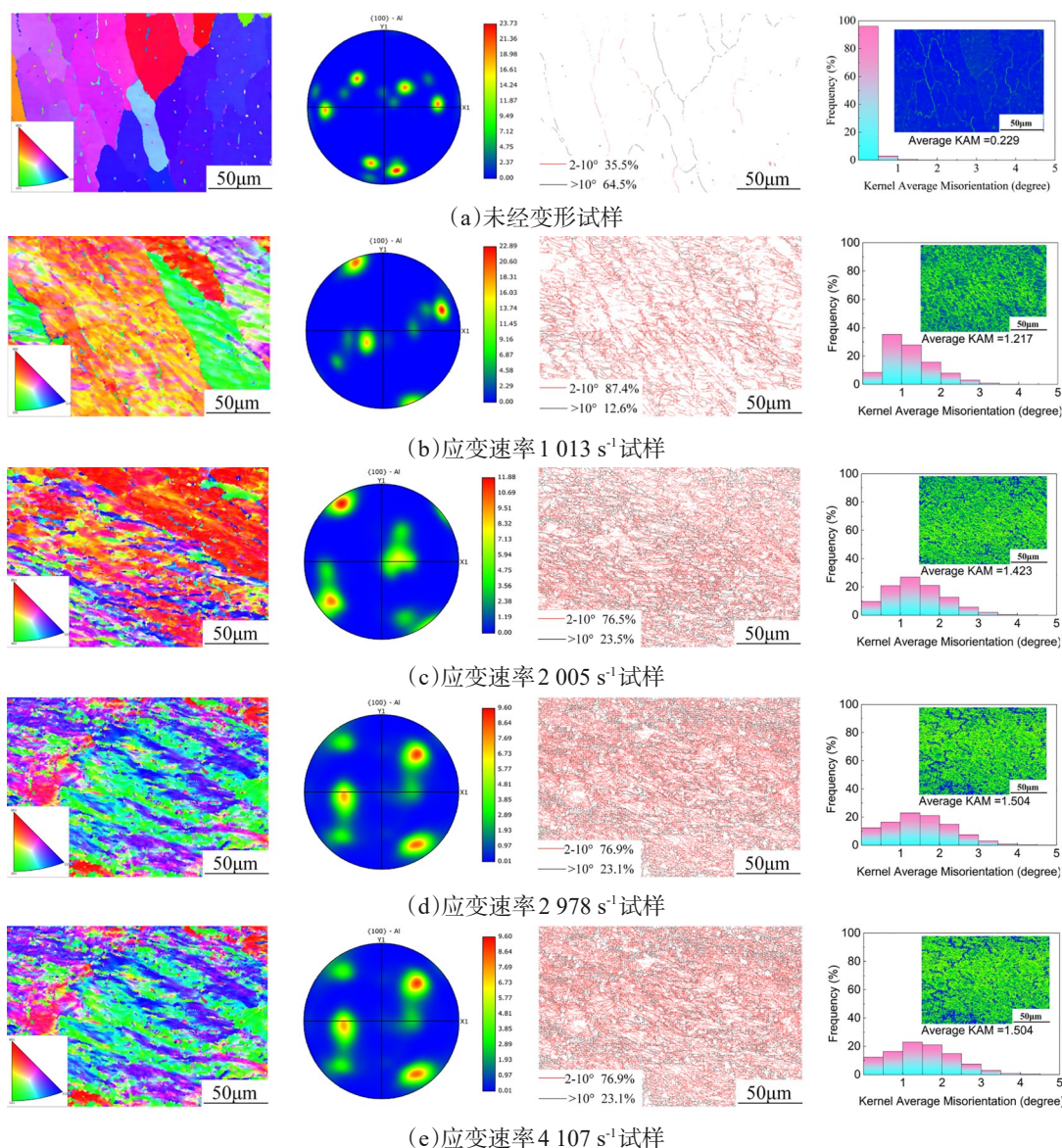


图6 未经变形和经动态压缩变形后竖直试样的EBSD结果

Fig. 6 EBSD results of vertical specimens without and with dynamic compression deformation

貌<sup>[3,9]</sup>。对比其与图 6b~6e 中经不同应变速率压缩变形后试样的 IPF 可以发现,试样在经过动态压缩变形后,柱状晶粒向垂直于压缩载荷的方向发生转动并且伸长,并且应变速率越大,晶粒向该方向发生的转动和伸长变形更大。此外,未经压缩变形的试样沿<001>方向的最大织构强度为 23.73,而当进行动态压缩变形后,织构强度减弱,并且随着应变速率的增大,织构强度从 23.73 逐渐减小到 9.60。经分析,认为这是由于在对竖直试样的两端施加载荷进行动态压缩变形时,晶粒的取向会向垂直于载荷的方向发生转变,而此时载荷的方向平行于沉积方向,因此其原有的沿<001>方向的织构强度会减弱,并且由于材料的宏观变形是靠内部各个晶粒的协同变形进行的,当外部宏观变形越大时则表明内部晶粒发生的变形也越大,而如前所述,应变速率越大时,试样被压得越扁,也即向径向发生的变形越大,这意味着更多晶粒的取向转变为平行于径向(垂直于加载方向),因此随着应变速率的增大,试样原有的平行于加载方向的织构强度逐渐减小。

对比图 6 中的晶界图(Grain Boundaries, GB)可以发现,试样在经动态压缩变形后,小角度晶界所占的比例显著增大,这是由于金属材料的变形主要是通过位错的运动和增殖完成的,因此试样在经动态压缩变形后,内部的位错密度剧增,而小角度晶界正可以看作是由一系列位错排列组成的,大量增殖的位错会互相缠结形成较多的小角度晶界,同时也不能排除部分晶粒会被相邻晶粒压碎形成亚结构<sup>[13-14]</sup>,这些都可能导导致小角度晶界比例的增加。 $2\,978\text{ s}^{-1}$ 和 $4\,107\text{ s}^{-1}$ 应变速率对应的小角度晶界所占的比例较 $1\,013\text{ s}^{-1}$ 和 $2\,005\text{ s}^{-1}$ 应变速率反而略有减小,经分析,这可能仍是由应变速率引起的硬化效应和由绝热温升引起的热软化效应竞争的结果。在应变速率增大的同时,绝热温升值也增大,由其所引起的热软化过程将使得更多位错发生湮灭,从而导致小角度晶界数量有所减少。

对比图 6 中的核平均取向差(Kernel Average Misorientation, KAM)图可以发现,试样的 KAM 在经动态压缩变形后同样显著增加,平均 KAM 首先从未经变形试样的 0.229 增大到 $1\,013\text{ s}^{-1}$ 应变速率的 1.217,而随着应变速率的增大,平均 KAM 又从

$1\,013\text{ s}^{-1}$ 应变速率的 1.207 增大到 $4\,107\text{ s}^{-1}$ 应变速率的 1.504,这意味着应变速率越大,试样内部的残余应力和局部应变更大,同时也意味着局部取向差较大,更多晶粒发生了旋转,与晶粒取向随应变速率的变化而改变相一致。通过对比 GB 图和 KAM 图还可以发现,小角度晶界处对应较高的 KAM,这是因为较高的 KAM 对应较高的局部应力集中,而应力集中则是通过位错的聚集实现的。

### 3 结论

采用 CMT-WAAM 工艺制备了 2319 铝合金薄壁样件,研究其在准静态和不同应变速率的动态压缩条件下的压缩力学性能,并对其微观结构的演变过程进行了表征。主要结论如下:

(1) 2319-CMT-WAAM 在水平和竖直方向上的静态压缩性能均不具有各向异性,并且与静态曲线相比,动态曲线上移。在动态压缩条件下,表现出明显的应变速率强化效应,屈服强度和最大流动应力均随着应变速率的增大而增大。

(2) 随着应变速率的增大,2319-CMT-WAAM 的屈服强度和最大流动应力增大,而应变硬化率减小,并且屈服强度和最大流动应力的增幅也在减小,这是由绝热温升引起的热软化效应引起和由应变速率引起的硬化效应互相竞争的结果。

(3) 未经变形的试样呈现出主要由柱状晶粒组成的微观形貌,并且具有一定的沿<001>方向(沉积方向)的织构倾向。经动态压缩变形后,竖直试样的晶粒向垂直于压缩载荷的方向发生伸长变形和取向转变,小角度晶界所占的比例和平均 KAM 显著增加。随着应变速率的增大,未经变形的试样原有的沿<001>方向的织构强度持续减小,平均 KAM 逐渐增大,而小角度晶界所占的比例略有下降。

### 参考文献:

- [1] Chang T, Fang X, Liu G, et al. Wire and arc additive manufacturing of dissimilar 2319 and 5B06 aluminum alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 124: 65-75.
- [2] 王磊磊,吕飞阅,高转妮,等. 电弧增材制造 2319 铝合金交叉桁条结构微观组织与拉伸性能研究[J]. 机械

- 工程学报,2023,59(1):267-277.
- WANG L L, LV F Y, GAO Z N, et al. Microstructure and Tensile Properties of Wire Arc Additive Manufactured 2319 Aluminum Alloy Cross-stringer Structure [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(1): 267-277.
- [3] Dai G Q, Xue M H, Guo Y H, et al. Gradient microstructure and strength-ductility synergy improvement of 2319 aluminum alloys by hybrid additive manufacturing [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 968:171781.
- [4] Zhang L, Wang S T, Wang H X, et al. Mechanical properties and microstructure evolution of vibration assisted wire arc additive manufacturing 2319 aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 885:145634.
- [5] Li R S, Wang R Z, Zhou X M, et al. Microstructure and mechanical properties of 2319 aluminum alloy deposited by laser and cold metal transfer hybrid additive manufacturing [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26:6342-6355.
- [6] 张加恒,黄祎,郭顺,等.超音频MIG辅助三丝电弧增材制造工艺研究[J].电焊机,2023,53(2):104-110.
- ZHANG J H, HUANG W, GUO S, et al. Research on Superaudio MIG Assisted Triple Wire Arc Additive Manufacturing Process [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(2):104-110.
- [7] Zhan X H, Lyu F Y, Wang L L, et al. Multi-regional microstructure control using ultrasonic-assisted directed energy deposition for Al-Cu alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 324:118269.
- [8] Yu H P, Lyu F, Jiang X, et al. Mechanical properties and microscopic mechanisms of 2219-T6 aluminum alloy under dynamic tension with cryogenic temperatures [J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 891: 145920.
- [9] Chen J, Wei H Y, Bao K, et al. Dynamic mechanical properties of 316L stainless steel fabricated by an additive manufacturing process [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11:170-179.
- [10] Zhu Z W, Lu Y S, Xie Q J, et al. Mechanical properties and dynamic constitutive model of 42CrMo steel [J]. Materials & Design, 2017, 119:171-179.
- [11] Ma S G, Jiao Z M, Qiao J W, et al. Strain rate effects on the dynamic mechanical properties of the AlCr-CuFeNi2 high-entropy alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 649:35-38.
- [12] Kopeck M, Liu X C, Gorniewicz D, et al. Mechanical response of 6061-T6 aluminium alloy subjected to dynamic testing at low temperature: Experiment and modelling [J]. International Journal of Impact Engineering, 2024, 185:104843.
- [13] 范霖康,马立,倪程,等.5A01铝合金薄板激光摆动焊接接头微观组织与力学性能[J].电焊机,2023,53(1):38-43.
- FAN J K, MA L, NI C, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 5A01 Aluminum Alloy Sheet Joint Welded by Laser Oscillation Welding [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(1):38-43.
- [14] Yu H P, Lyu F, Jiang X, et al. Mechanical properties and microscopic mechanisms of 2219-T6 aluminum alloy under dynamic tension with cryogenic temperatures [J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 891: 145920.