

# CMT 电弧增材 4043 铝合金层间变形与组织性能研究

杨 芙 李 美 何在培 鞠洪涛 贾 征

(沈阳大学机械工程学院, 沈阳 110003)

**摘 要** 研究了 4043 铝合金在冷金属过渡(CMT)电弧增材制造过程中不同层间锤击变形量对其组织和力学性能的影响,通过优化工艺参数,提高增材制造零件的综合性能。采用 4043 铝合金焊丝进行电弧增材制备薄壁件。通过组织观察、晶粒尺寸比较、显微硬度测量以及拉伸试验,分析变形量对材料组织及力学性能的影响。结果表明,未经锤击的试样晶粒较为粗大,变形量为 13% 的试样晶粒较为细小,而变形量为 21% 的试样晶粒最为细小。同时细小条状的 Al-Si 共晶条状结构在  $\alpha$  固溶体内呈一定方向分布,且分散程度随着与基板距离的增加而增加。此外,显微硬度测量和拉伸试验结果显示,未经锤击的试样抗拉强度为 160 MPa,硬度(HV)为 40.28~52.94;锤击变形量为 13% 的试样抗拉强度为 173 MPa,硬度(HV)为 54.38~55.50;锤击变形量为 21% 的试样抗拉强度为 182 MPa,硬度(HV)为 54.00~61.04,随锤击变形量增大,材料的力学性能有所提高。

**关键词** 4043 铝合金;CMT 增材;增材制造;电弧增材

中图分类号 TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250069

## Interlayer Deformation and Microstructure Properties of CMT Arc Additive 4043 Aluminum Alloy

YANG Fu, LI Mei, HE Zaipai, JU Hongtao, JIA Zheng

(School of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110003)

**Abstract:** The influence of different interlayer hammering deformation on the microstructure and mechanical properties of 4043 aluminum alloy during cold metal transition (CMT) arc additive manufacturing was investigated, and the process parameters were optimized to improve comprehensive performance of additive manufacturing parts. Thin-walled parts were prepared with welding wire of 4043 aluminum alloy. The influence of deformation amounts on the microstructure and mechanical properties of the material were analyzed by microstructure observation, grain size comparison, microhardness measurement, and tensile test. The results indicate that the grains of specimens without hammering are coarse, while those of ones with a deformation of 13% are finer, and those of ones with a deformation of 21% are the finest. Meanwhile, the fine strip Al-Si eutectic strip is distributed in a specific direction in  $\alpha$  solid solution, and the dispersion degree is increased with the increase of distance from the substrate. In addition, the microhardness measurement and tensile test results reveal that the tensile strength and hardness of specimens without hammering are 160 MPa and 40.28~52.94 HV, while those of ones with hammering deformation of 13% is 173 MPa and 54.38~55.50 HV, and those of ones with hammering deformation of 21% is 182 MPa and 54.00~61.04 HV, respectively. The mechanical properties of the alloy are improved with the increase of hammering deformation.

**Key Words:** 4043 Aluminum Alloy, CMT Additive, Additive Manufacturing, Arc Additive

近年来,随着能源危机的影响,各国相继推出了节能降耗和碳减排等环保政策<sup>[1-2]</sup>。在此背景下,铝及其合金因其密度低、比强度高,从而广泛应用于光伏电缆、航空、交通等领域<sup>[3-5]</sup>。4043 铝合金作为 Al-Si 系合金中,凭借其优良的性能,在工业生产中占据着重要

地位<sup>[6-9]</sup>。

增材制造技术的发展,不仅提高了生产效率、减少了材料损耗、缩短了生产周期,还对复杂精密构件的集成化进程起到了重要的推动作用<sup>[10-13]</sup>。冷金属过渡(CMT)增材制造技术通过焊接电源产生的小功率

收稿日期:2025-02-18;修订日期:2025-04-16

基金项目:辽宁省教育厅重点资助项目(LJKZ1171)

第一作者简介:杨芙,女,1977 年出生,副教授,E-mail:81226585@qq.com

通信作者:贾征,男,1982 年出生,教授,E-mail:81226585@qq.com

引用格式:杨芙,李美,何在培,等. CMT 电弧增材 4043 铝合金层间变形与组织性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(10):1 496-1 501.

YANG F, LI M, HE Z P, et al. Interlayer deformation and microstructure properties of CMT arc additive 4043 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(10):1 496-1 501.

电弧熔化焊丝,逐层堆积材料于工件表面,最终实现增材成形<sup>[14-16]</sup>。该技术具有热影响区小、成形速度快、焊缝成形好、无飞溅等特点,尤其适用于复杂几何形状零件的生产<sup>[17]</sup>,因此被广泛应用于航空航天、汽车制造、建筑结构、医疗设备等行业<sup>[18]</sup>。唐作富等<sup>[19]</sup>采用 CMT 增材制造技术制备 5087 铝合金,研究了单道多层成形工艺对其组织结构及力学性能的影响。发现铝合金组织晶粒形态呈现柱状晶特征,树枝状和胞状共同存在于晶粒内部。试样抗拉强度为 200~230 MPa,屈服强度为 100~120 MPa,伸长率为 6%~12%,电弧增材铝合金内部气孔对试样力学性能造成了严重影响。FERENC G V 等<sup>[20]</sup>采用 3 种不同的电弧工艺分别对 5A56 铝合金进行增材制造试验,研究其微观结构和力学性能。发现 CMT-VP 试样的显微组织由更细、更均匀的等轴晶组成,力学性能优于 CMT 和 CMT-P 工艺,显微硬度(HV)达到 86.01,抗拉强度为 344.68 MPa。WEI Y H 等<sup>[21]</sup>采用冷金属过渡金属丝电弧增材制造工艺制造 2319 铝合金,研究了不同电弧振荡模式下 2319 铝合金的力学性能。结果表明,电弧振荡提高了垂直方向的抗拉强度和塑性,但对水平方向的抗拉强度影响不明显。经固溶时效处理后,螺旋弧振荡条件下试样的抗拉强度提高到 277 MPa,截面

减小了 3.6%。

虽然 CMT 增材制造技术的发展已经较为成熟,但仍可能出现形貌和尺寸精度等问题<sup>[22]</sup>,这会对结构件的组织及力学性能产生影响<sup>[23-25]</sup>。本研究以 4043 铝合金为对象,利用 CMT 增材制造工艺制备 4043 铝合金薄壁件,并设置 3 组对照组,研究在 CMT 增材制造过程中不同的锤击变形量对金属堆积层中组织和性能的影响,旨在为铝合金增材制造的应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本试验所用焊丝是直径为 1.2 mm 的 4043 铝合金焊丝,基板为 6061 铝合金,其尺寸为 200 mm×100 mm×10 mm。焊接前需要对基板进行清理,去除表面的氧化层和杂质,然后将清理好的基板固定在工作台上。基板和焊丝的成分见表 1,基板及母材性能见表 2。试验所用设备为 TransPuls Synergic 3200 CMT 焊机,该系统由工作平台、控制器和电动执行器组成,能够在焊接过程中实时监控焊丝的回抽、熔滴的过渡和电流的变化,具有零飞溅的特点。

表 1 6061 铝合金和 4043 铝合金焊丝的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 6061 aluminum alloy and 4043 aluminum alloy wires %

| 牌号   | $w_B$     |           |           |       |       |           |       |       | %  |
|------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|----|
|      | Cu        | Si        | Mg        | Mn    | Zn    | Cr        | Fe    | Ti    |    |
| 4043 | ≤0.30     | 4.50~6.00 | ≤0.05     | ≤0.05 | ≤0.10 | ≤0.05     | ≤0.80 | ≤0.20 | 余量 |
| 6061 | 0.15~0.40 | 0.40~0.80 | 0.80~1.20 | 0.15  | 0.25  | 0.04~0.35 | 0.70  | 0.15  | 余量 |

表 2 试验材料的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of materials

| 铝合金牌号 | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 伸长率/% |
|-------|----------|----------|-------|
| 6061  | 205      | 110      | 16    |
| 4043  | 200      | 120      | 5~15  |

1.2 试验方法

在本次试验中,保持其他参数不变,只改变锤击变形量,来探究变形量对合金组织及力学性能的影响。制备 3 组试样,焊接参数见表 3,其中,变形量为 0 的试样为对照组,其余两组为试验组。在增材制造过程中,需严格控制电流电压。前 4 层堆焊电流为 130 A、电压为 15 V,后续降低至 110 A、12 V,并保持其他参数不变。每层制备后需等温度降至 100 ℃以下才能继续下一层的制备,其中两组试验需层间锤击以增加变形量,由于焊枪抬高高度固定,根据焊道高度差来判断锤击力大小,并通过计算平均值减小锤击变形量误差。层间高度差见表 4。

表 3 焊接参数

Tab.3 Welding parameters

| 变形量/% | 前 4 层电流/A | 前 4 层电压/V | 后堆叠层电流/A | 后堆叠层电压/V | 焊接速度/(mm·min <sup>-1</sup> ) |
|-------|-----------|-----------|----------|----------|------------------------------|
| 0     | 130       | 15        | 110      | 12       | 500                          |
| 13    | 130       | 15        | 110      | 12       | 500                          |
| 21    | 130       | 15        | 110      | 12       | 500                          |

表 4 增材各组高度差

Tab.4 Height difference of each additive group

| 组别    | 变形量/% | 层高/mm | 与无锤击高度差/mm |
|-------|-------|-------|------------|
| 参照组   | 0     | 2.21  | 0          |
| 试验组 1 | 13    | 1.93  | 0.28       |
| 试验组 2 | 21    | 1.75  | 0.46       |

在试验过程中,首先需对基板进行清理,再使用清理过的基板利用 CMT 设备进行增材制造,在此过程中,对每层都要进行锤击,两组锤击变形量不同,一组无锤击。逐层叠加,完成对增材试样的焊接。然后利用线切割设备对试样进行切割。金相试样进行打磨和

抛光后,用Kroll试剂(HF、HNO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O体积分数为1:3:96)腐蚀3~4 s,随后用无水乙醇冲洗并吹干,再使用BX53型金相显微镜观察其显微组织。使用Image J软件测量并对比枝晶臂尺寸。显微硬度测量采用TH702显微维氏硬度计,测量范围(HV)为1~2 967,测量载荷为25 N,保载时间为25 s。每个试样测量5次,取平均值,并对数据进行统计和分析。拉伸试样和金相试样在相同高度位置进行截取,拉伸试样尺寸见图1,并使用WDW-100B型微型万能电子试验机进行拉伸试验,拉伸速率为5 mm/min。通过计算材料的强度和伸长率,分析得出材料的力学性能,并观察增材组织的变化,并通过Image J测量试样枝晶臂尺寸。

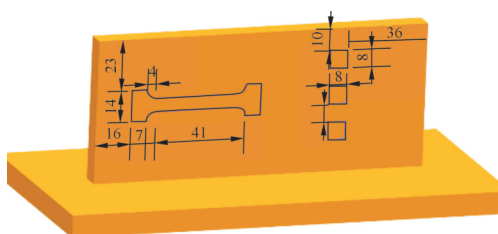


图1 金相试样及拉伸试样取样位置

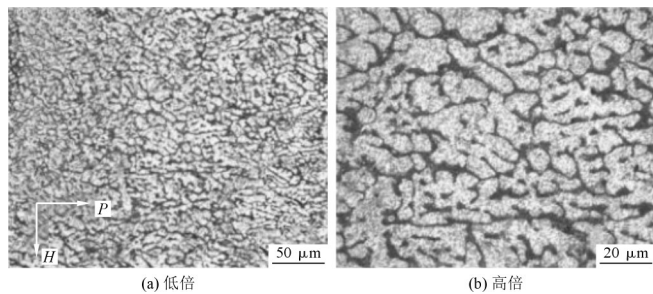
Fig.1 Sampling position of metallographic and tensile specimens

## 2 试验结果与分析

### 2.1 组织观察

从3组试样中分别选取了由基板距离远到近的3组金相试样进行组织观察,见图2~图4。根据图2~图4可知,在增材制造过程中,由于底层温度较低,金相组织中的枝晶臂分布较为杂乱。随着温度升高和层高增加,下层焊道受到上层焊道加热,导致晶粒变粗大。前几层的沉积试样由于散热条件良好,冷却速率快,晶粒的粗化速率会降低,其微观组织主要为 $\alpha$ -Al相和 $\beta$ -Al<sub>3.21</sub>Si<sub>0.47</sub>相, $\beta$ 相主要分布在晶界处,部分存在于 $\alpha$ 相中,呈现细小条状或块状。图中白色枝晶部分为 $\alpha$ 相,晶界处黑色组织为 $\beta$ 相, $P$ 为打印方向, $H$ 为锤击方向。

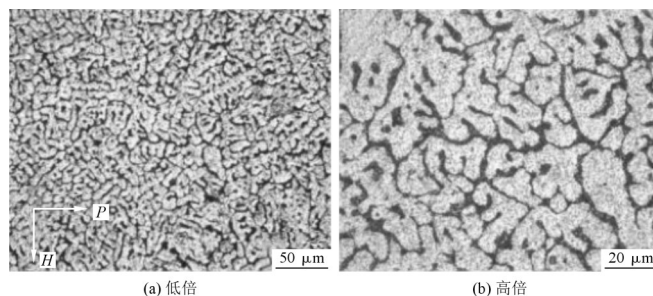
变形量为0时试样的枝晶臂尺寸见表5。



(a) 低倍 (b) 高倍

图2 变形量为0时试样的上部组织

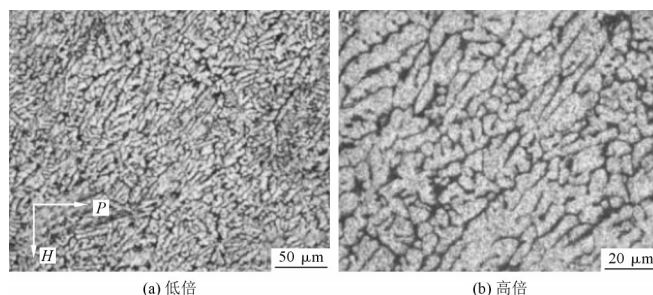
Fig.2 Microstructure of the upper part with 0 deformation



(a) 低倍 (b) 高倍

图3 变形量为0时试样的中部组织

Fig.3 Microstructure of the middle part with 0 deformation



(a) 低倍 (b) 高倍

图4 变形量为0时试样的下部组织

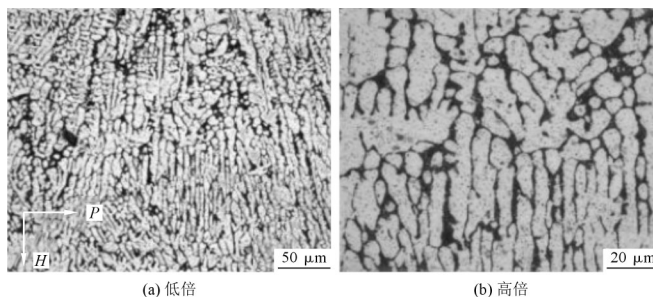
Fig.4 Microstructure of the lower part with 0 deformation

表5 变形量为0时试样的枝晶臂尺寸

Tab.5 Dendrite arm dimension with 0 deformation  $\mu\text{m}$

| 位置 | 枝晶臂尺寸 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 均值   |
|----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 下部 | 6.61  | 5.56 | 4.69 | 4.76 | 3.39 | 4.32 | 6.61 | 5.44 | 4.12 | 6.57 | 5.81 | 5.26 |
| 中部 | 6.33  | 5.75 | 5.17 | 5.00 | 5.24 | 5.94 | 5.20 | 3.49 | 3.18 | 5.65 | 4.25 | 5.02 |
| 上部 | 4.89  | 5.15 | 3.61 | 4.04 | 3.50 | 3.85 | 3.86 | 3.68 | 3.48 | 4.55 | 5.11 | 4.15 |

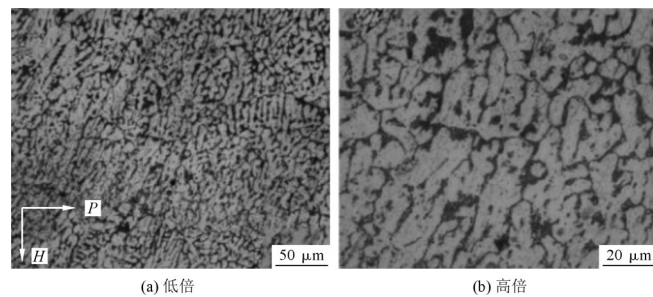
图5~图7为在增材过程中,层间施加13%的变形量后得到的金相组织。对比可知,经过锤击过



(a) 低倍 (b) 高倍

图5 变形量为13%时试样的上部组织

Fig.5 Microstructure of the upper part with 13% deformation



(a) 低倍 (b) 高倍

图6 变形量为13%时试样的中部组织

Fig.6 Microstructure of the middle part with 13% deformation

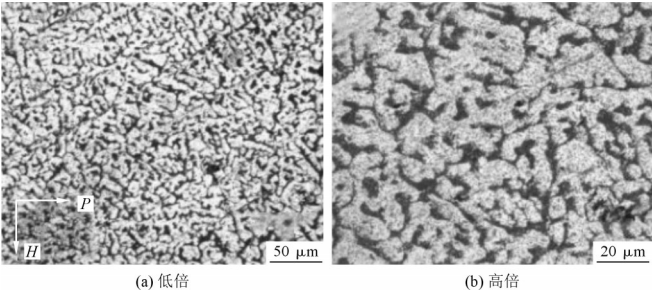


图 7 变形量为 13% 时试样的下部组织

Fig.7 Microstructure of the lower part with 13% deformation

后,组织间隙明显减小,枝晶臂在受到锤击力的作用下拉长。分析 3 个部位枝晶臂分布图可以发现,锤击后自下而上晶体结构变得更加密集。通过高倍图可以观察到,枝晶臂的尺寸逐渐变小。这表明锤击变形有助于改善组织的致密性和均匀性,使得微观结构更加紧凑,从而可能提高材料的力学性能。

变形量为 13% 时枝晶臂尺寸见表 6。

表 6 变形量 13% 枝晶臂尺寸  
Tab.6 Dendrite arm dimension with 13% deformation

| 位置 | 枝晶臂尺寸 |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      | 均值   | 置信区间(95%) |
|----|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-----------|
|    | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8     | 9    | 10   | 11   |      |           |
| 下部 | 4.55  | 5.12 | 4.82 | 4.35 | 5.92 | 4.36 | 4.74 | 5.71  | 5.75 | 4.69 | 4.19 | 4.93 | 4.52~5.34 |
| 中部 | 4.90  | 4.68 | 3.95 | 4.43 | 4.04 | 4.78 | 4.60 | 3.48  | 3.46 | 4.28 | 4.05 | 4.24 | 3.51~4.97 |
| 上部 | 3.78  | 5.35 | 3.82 | 3.83 | 3.18 | 4.91 | 3.59 | 3.278 | 3.32 | 3.11 | 4.39 | 3.87 | 3.38~4.36 |

图 8~图 10 为在增材过程中施加 21% 变形量后获得的金相组织。通过对比可以明显观察到,随着变形量增加,枝晶臂尺寸逐渐变小,组织进一步的

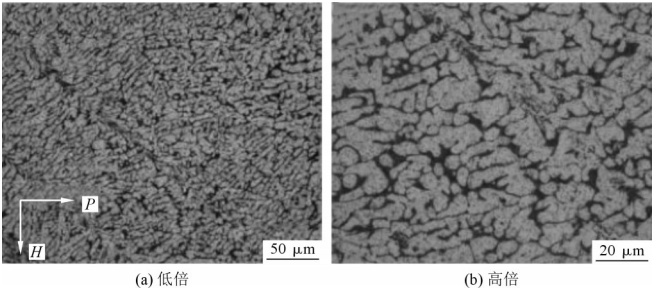


图 8 变形量为 21% 时试样的上部组织

Fig.8 Microstructure of the upper part with 21% deformation

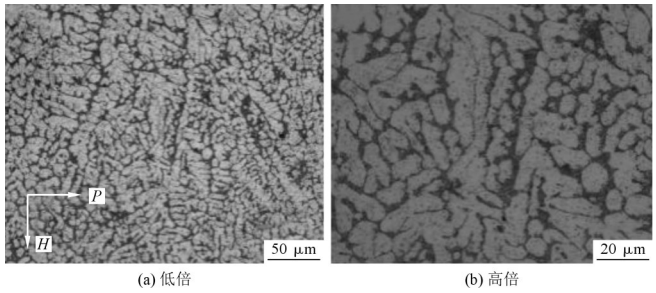


图 10 变形量为 21% 时试样的下部组织

Fig.10 Microstructure of the lower part with 21% deformation

细化。较小的晶粒尺寸通常会导致晶界数量增加,而晶界能够阻止位错的移动,这在一定程度上提升了材料的强度。这种变化表明,通过控制变形量能够有效调整材料的微观结构,从而优化其力学性能。

变形量为 21% 时枝晶臂尺寸见表 7。可以看出,未经过锤击处理的试样,其枝晶臂尺寸较为粗大;当锤击变形量为 13% 时,合金的晶粒枝晶臂尺寸明显减小;而锤击变形量为 21% 时,枝晶臂尺寸最为细小。这表明,随着锤击变形量增大,枝晶臂尺寸逐渐减小。锤击变形对组织细化效果显著,提高了材料的力学性能。

表 7 变形量 21% 枝晶臂尺寸  
Tab.7 Dendrite arm dimension with 21% deformation

| 位置 | 枝晶臂尺寸 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 均值   | 置信区间(95%) |
|----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
|    | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |      |           |
| 下部 | 4.36  | 3.43 | 3.60 | 4.77 | 3.92 | 5.30 | 5.48 | 3.68 | 6.41 | 5.10 | 5.34 | 4.67 | 4.03~5.31 |
| 中部 | 3.73  | 3.97 | 5.48 | 3.46 | 3.45 | 5.52 | 4.66 | 4.72 | 3.22 | 3.82 | 4.22 | 4.20 | 3.67~4.74 |
| 上部 | 3.40  | 3.06 | 3.92 | 4.26 | 3.88 | 3.03 | 4.28 | 3.32 | 3.55 | 4.98 | 3.73 | 3.76 | 3.37~4.15 |

2.2 显微硬度测量

在试验方案的设计中,选择纵向进行显微硬度测量,可以更清晰地反映增材试样不同位置的力学性能。

在使用显微硬度计时,需要保证试样底部齐平,以防止测量过程中试样晃动,避免出现打点滑移、重叠或者不准确的情况,这些都会影响测量结果的可靠性。硬度测量结果见表8。

表 8 各组试样硬度数据  
Tab.8 Hardness data for each group

| 变形量/% | 硬度(HV) |      |      |      |      |      |       |             |
|-------|--------|------|------|------|------|------|-------|-------------|
|       | 位置     | 位置1  | 位置2  | 位置3  | 位置4  | 位置5  | 平均值   | 置信区间(95%)   |
| 0     | 下部     | 38.2 | 40.6 | 42.0 | 37.6 | 43.0 | 40.28 | 37.37~43.19 |
|       | 中部     | 49.6 | 50.8 | 52.6 | 48.8 | 51.4 | 50.64 | 48.79~52.49 |
|       | 上部     | 53.8 | 51.5 | 53.8 | 53.4 | 52.2 | 52.94 | 51.65~54.23 |
| 13    | 下部     | 52.7 | 50.8 | 62.2 | 53.7 | 52.5 | 54.38 | 48.94~60.10 |
|       | 中部     | 53.4 | 54.3 | 56.6 | 56.9 | 56.1 | 55.46 | 53.56~57.36 |
|       | 上部     | 49.8 | 57.6 | 57.4 | 58.8 | 53.9 | 55.50 | 50.95~60.05 |
| 21    | 下部     | 65.2 | 58.1 | 57.8 | 65.0 | 59.1 | 61.04 | 56.41~65.67 |
|       | 中部     | 61.6 | 60.2 | 65.7 | 61.6 | 60.7 | 61.96 | 59.26~64.66 |
|       | 上部     | 63.7 | 68.8 | 64.6 | 62.0 | 65.9 | 65.00 | 61.84~68.16 |

对硬度数据进行统计并绘制统计图,见图 11。

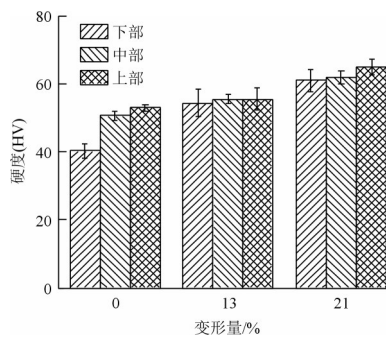


图 11 不同变形量下合金的显微硬度分布

Fig.11 Microhardness distribution of alloy with different deformation amounts

通过误差根的计算,可以有效地评估数据测量的浮动程度。从图 11 可知,在相同变形量的增材试样中,距离基板越近的位置,硬度越低。这可能是因为靠近基板的区域受到较锤击的影响较小,组织细化程度较低的缘故。

此外,在不同变形量的试样中,显微硬度随着变形量的增加而增加。这与之前观察到的枝晶臂尺寸随变形量减小的趋势一致,表明锤击变形量对材料微观结构和力学性能的显著影响。

2.3 拉伸试验结果

图 12 为不同锤击变形量下试样的拉伸应力-应变曲线。可以看出,随着层间锤击变形量的增加,试样的抗拉强度也随之提高。这与硬度测试结果一致。表明通过控制锤击变形量,可以有效优化增材制造成形件的力学性能。

表 9 为不同锤击变形量下合金的伸长率。可以看出,锤击变形量为 13% 的组别相比无锤击组的伸长率

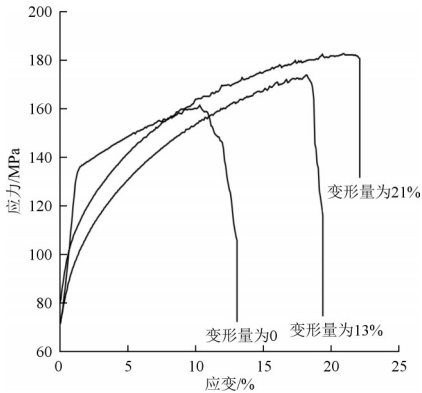


图 12 不同锤击变形量试样拉伸应力-应变曲线图

Fig.12 Tensile strength curves

表 9 不同锤击变形量下合金的伸长率

| 锤击变形量/% | 伸长率/% |
|---------|-------|
| 0       | 5.3   |
| 13      | 4.3   |
| 21      | 5.1   |

降低了 18.9%,而锤击变形量为 21% 的组别与无锤击组相比仅下降了 3.8%。这表明适度的锤击变形会在一定程度上降低材料的延展性,尤其是在 13% 变形量时表现得较为明显。这种现象可能与锤击引起的微观组织变化有关。适度变形处理可以细化晶粒,提高材料的强度和硬度,但同时可能会限制其延展性。材料处于塑性变形初期,位错快速增殖并形成缠结结构,导致加工硬化效应显著,延展性下降,而在较高变形量下动态再结晶可能部分抵消加工硬化效应,恢复延展性;共晶相的分散程度与晶粒取向的择优排列也可能协同影响裂纹扩展路径。这表明组织细化对力学性能的影响是多因素耦合的结果。

### 3 结 论

(1) 电弧增材制造 4043 铝合金板材中, 细小的 Al-Si 共晶沿着一定方向排列, 离基板越远, 其分布越分散, 锤击变形通过细化晶粒与降低孔隙率来显著改善组织致密性。

(2) 从试样底部到顶部, 显微硬度逐渐增加, 且锤击变形量越大, 硬度越高。无锤击组的硬度(HV)为 40.28~52.94, 锤击变形量为 13% 时为 54.38~55.50, 变形量为 21% 时为 54.00~61.04。

(3) 随锤击变形量增加, 电弧增材 4043 铝合金板材的力学性能提高。无锤击时抗拉强度为 160 MPa, 13% 锤击变形量时为 173 MPa, 21% 锤击变形量时为 182 MPa。

(4) 经 21% 变形量处理试样的抗拉强度较未锤击对照组提高 13.8%, 硬度(HV)提高了 22.4%~51.5%, 且两组伸长率相差不大, 经 21% 变形后的综合力学性能更为优异。

### 参 考 文 献

- [1] 廉艳平, 王潘丁, 高杰, 等. 金属增材制造若干关键力学问题研究进展[J]. 力学进展, 2021, 51(3): 649-651.
- [2] 周禹阳. 电弧填丝增材制造成形控制及工艺优化研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- [3] 王红梅. 3D 打印: 先进制造领域的必争之地[J]. 杭州科技, 2013(5): 35-38.
- [4] 程俊廷, 常天瑞. 金属增材制造技术研究与应用现状及趋势[J]. 中图设备工程, 2018(10): 181-183.
- [5] DING D H, PAN Z X, CUIURI D, et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1-4): 465-481.
- [6] LIU D, LEE B, BABKIN A, et al. Research progress of arc additive manufacture technology[J]. Materials, 2021, 14(6): 1 415.
- [7] 赵昀. CMT 冷金属过渡铝合金增材制造研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- [8] 石展鹏. 基于 CMT 的 5087 铝合金电弧增材制造工艺与性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- [9] DUTTA D, PRINZ F B, ROSEN D, et al. Layered manufacturing: Current status and future trends [J]. Journal of Computing & Information Science in Engineering, 2001, 1(1): 60-71.
- [10] DAI P, LI A, ZHANG J X, et al. Research status and development trend of wire arc additive manufacturing technology for aluminum alloys[J]. Coatings, 2024, 14(9): 1 094.
- [11] FANG X W, ZHANG L J, CHEN G P, et al. Microstructure evolution of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy with interlayer hammering[J]. Materials Science and Engineering, 2021, A800: 140 168.
- [12] SAIFUL I, GI-JEONG S, MD R U A, et al. Investigation of micro-

structures, defects, and mechanical properties of titanium-zirconium-molybdenum alloy manufactured by wire arc additive manufacturing [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 110: 106 042.

- [13] 张衡, 杨可. 增材制造的现状与应用综述[J]. 包装工程, 2021, 42(16): 9-15.
- [14] 卢恒洲. 4043 铝合金 CMT 电弧增材制造技术及性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- [15] 周长平, 林枫, 杨浩, 等. 增材制造技术在船舶制造领域的应用进展[J]. 船舶工程, 2017, 39(2): 80-87.
- [16] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.
- [17] 何建斌, 许燕, 周建平, 等. 金属增材制造技术的研究进展[J]. 机床与液压, 2020, 48(2): 171-175.
- [18] KESARWANI S, YUVARAJ N, NIRANJAN S M. CMT-based WAAM: A comprehensive review of process parameters, their effects, challenges, and future scope [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2024, 46(12): 699.
- [19] 唐作富, 陈国瑞, 吴广辉. CMT 电弧增材制造 5087 铝合金组织与拉伸性能研究[J]. 金属加工(热加工), 2024(1): 105-109.
- [20] FERENC G V, DAVID C, TAMAS Z, et al. CMT Additive manufacturing parameters defining aluminium alloy object geometry and mechanical properties[J]. Materials, 2021, 14(6): 1 545.
- [21] WEI Y H, LIU F C, LIU F G, et al. Effect of arc oscillation on porosity and mechanical properties of 2319 aluminum alloy fabricated by CMT-wire arc additive manufacturing[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 3 477-3 490.
- [22] BOURLET C, ZIMMER S, PESCI R, et al. Microstructure and mechanical properties of high strength steel deposits obtained by wire-arc additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 285: 116 759.
- [23] 郜庆伟, 赵健, 舒凤远, 等. 铝合金增材制造技术研究进展[J]. 材料工程, 2019, 47(11): 32-42.
- [24] 侯旭儒, 徐东安, 王艳杰, 等. 脉冲对电弧增材制造 304 不锈钢构件组织与性能的影响[J]. 焊接技术, 2021, 50(8): 6-10, 105.
- [25] 李田雨. 基于 CMT 的铝合金电弧增材制造有限元分析与工艺研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.

(编辑: 栗万仲)

欢迎登陆期刊官网

投稿、查稿、审稿

2024 年起,《特种铸造及有色合金》杂志新版网站正式上线,期刊论文彩色版本均可在网站免费在线阅读或下载 pdf 文件,并可体验 AI 导读功能,网址: [www.special-cast.com](http://www.special-cast.com), 欢迎访问!