

DOI: 10.3901/JME.2023.01.267

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*

王磊磊¹ 吕飞阅¹ 高转妮¹ 虞文军² 高川云² 占小红¹

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院 南京 211106;
2. 成都飞机工业(集团)有限责任公司 成都 610073)

摘要: 电弧增材制造具有材料利用率高、制造效率高、制造成本低等优势, 适合制造大型复杂航空薄壁构件。目前, 交叉桁条结构电弧增材制造的路径规划、成形形貌控制、组织性能差异性等方面缺乏系统研究。针对交叉桁条结构提出了一种新的分层切片及路径规划方法, 解决了桁条交叉区域余高过大导致的制造精度不足问题。开展了电弧增材制造 2319 铝合金交叉桁条不同区域的晶粒形态、元素分布、拉伸性能、断口形貌等检测与分析, 结果表明, 电弧增材制造 2319 铝合金交叉桁条结构不同区域的晶粒形态及尺寸呈现明显差异, 致使桁条顶部的平均抗拉强度值与中部、底部相比高出 20% 左右。在拉伸断口的韧窝中存在大量 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 颗粒相, 该非共格析出相增大了晶格畸变能并且提升位错阻力, 使晶体滑移难以进行, 最终材料的强度显著提高。

关键词: 电弧增材制造; 交叉桁条结构; 微观组织; 元素分布; 拉伸性能

中图分类号: TG401

Microstructure and Tensile Properties of Wire Arc Additive Manufactured 2319 Aluminum Alloy Cross-stringer Structure

WANG Leilei¹ LÜ Feiyue¹ GAO Zhuanni¹ YU Wenjun²
GAO Chuanyun² ZHAN Xiaohong¹

(1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106;
2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610073)

Abstract: Wire arc additive manufacturing (WAAM) has the advantages of high material utilization rate, high manufacturing efficiency, and low manufacturing cost. It is suitable for the fabrication of large and complex aviation thin-walled components. There is a lack of systematic investigation on scanning path planning, shape control, microstructure and performance difference of WAAM of cross-stringer structure. A novel layer slicing and path planning method is proposed to solve the problem of insufficient manufacturing accuracy caused by excessive reinforcement in the cross area of stringers. The grain morphology, element distribution, tensile properties, and fracture morphology in different 2319 aluminum alloy WAAMed cross stringer areas are detected and analyzed. The results indicated that the grain morphology and size in different areas of 2319 aluminum alloy WAAMed cross stringer structure are obviously different. The average tensile strength at the top of the WAAM sample is about 20% higher than that at the middle and bottom of it. There are a large number of dimples in the tensile fracture $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ particle phase. The incoherent precipitation phase increases the lattice distortion energy and enhances the dislocation resistance, which makes the crystal sliding difficult. Therefore, the strength of the material is significantly improved.

* 国防基础科研计划(JCKY2020605C006)和江苏省自然科学基金青年基金(BK20200431)资助项目。20220215 收到初稿, 20221110 收到修改稿

Key words: wire arc additive manufacturing; cross-stringer structure; microstructure; element distribution; tensile properties

0 前言

航空关键构件日趋于大型化、整体化、复杂化,传统的制造方法很难兼顾加工精度、成本、效率^[1-7]。电弧熔丝增材制造以电弧为热源,以金属焊丝为原料,熔化金属焊丝逐道逐层沉积形成金属结构件,再通过少量机械加工满足使用要求^[8]。电弧熔丝增材制造具有材料利用率高、制造效率高、工艺适应性强、制造成本低等优势,适合生产大型薄壁航空构件,如起落架肋、襟翼肋、机翼肋或加强筋等结构的制造^[9-11]。

航空铝合金框梁结构内部分布多组桁条,由于增材过程中的每次起弧、灭弧都会产生结瘤,使得起弧端高、熄弧端低,从而影响桁条宏观成形形貌。因此,大多数学者通过改变增材制造过程工艺来控制构件成形质量。朱贝贝等^[12]提出了电弧填丝增材制造弧压检测与成形质量控制方法,解决了交叉结构件成形稳定性差和堆积路径交叉处产生严重凸起的难题。高炼玲等^[13]研究了电弧熔丝增材制造 5356 铝合金运载火箭过渡端框工艺,改变底部支撑圆环增材制造的起弧位置,且环-扇形组采用对称分块成形,以减小构件变形,提高成形精度。杨壮等^[14]针对带有内孔等特征的厚壁结构件在成形过程中焊缝边缘下塌现象,对层间焊接轨迹进行合理规划,最终可提高预制件的表面成形质量。王天琪等^[15-16]研究了悬空特征结构件、复杂结构薄壁件等的电弧增材制造成形方法,通过优化算法实现焊枪位姿自动调整,并设计试验对成形方法进行验证,有效改善该构件表面成形质量。韩文涛等^[17]通过探索电弧增材制造过程中沉积件内部的热-力演变行为,揭示了层间停留时间对构件质量的影响。

电弧增材制造复杂结构过程中,由于扫描路径差异,不同位置热循环过程导致构件不同区域的存在显微组织不均匀性。因此,大多数学者针对电弧增材制造微观组织不均匀性现象开展了深入研究。ZHANG 等^[18]基于晶粒尺寸和形状将电弧增材制造 2024 铝合金可分为三个不同区域,即熔化区、熔池边界区和热影响区。SU 等^[19]研究了电弧增材制造 5356 铝合金沉积层间与层内组织差异性。结果表明,电弧增材制造铝合金沉积层间显微组织主要由细小的柱状晶和等轴晶组成而沉积层内的大部分晶粒为粗大等轴晶,试样显微组织具有明显的尺寸及

形态不均匀性。CHAKKRAVARTHY 等^[20]认为电弧增材制造 4043 铝合金试样不同区域晶粒形态具有显著差异。增材件表层具有细小的等轴晶,同时沿沉积方向有柱状枝晶形成。每道沉积层之间的重叠区域具有粗大的晶粒和不规则的织构,但试样的显微硬度相对于织构方向没有明显的变化。LIN 等^[21]发现,在电弧增材制造过程中存在非均相带组织,由等轴晶和柱状晶交替分布。

电弧增材制造试件在沉积层内部不同区域显微组织尺寸、取向等具有显著差异性,将会直接导致材料力学性能的不均匀性。因此,大多数学者目前进一步探索了电弧增材制造微观组织不均匀性对力学性能差异性的影响规律。MAIDER 等^[22]发现电弧增材制造过程中无层间停留时间可导致最佳的温度梯度,并确保了 WAAM 零件沿高度方向具有均匀分布的等轴组织,力学性能各向异性削弱。GENG 等^[23]研究了 5356 铝合金电弧增材制造试件组织差异性对力学性能非均匀性的影响。结果表明:电弧增材制造试样中部区域的非均匀组织和粗晶可显著降低其抗拉强度,但试样外侧区域晶粒尺寸相对均匀,此时材料显微硬度及强度较高。LI 等^[24]通过调整热输入量来进一步调控组织及性能不均匀性。随着热输入的增加,电弧增材制造 4220 铝合金试样内部的二次枝晶臂间距逐渐增大,Fe 相逐渐粗化。GU 等^[25]探索了电弧增材制造 2319 铝合金试样非均匀性组织与裂纹扩展之间的关系,研究发现试样凝固开裂主要发生在等轴晶和柱状晶之间的晶间区域,或两者的混合晶粒之间。李权等^[26]认为电弧增材制造 2219 铝合金层间和层内组织元素分布的不均匀性导致共晶相的分布不均匀,最终导致力学性能的各向异性。

综上所述,目前国内外大多数学者的研究主要集中在单道多层薄壁件与多道多层试块件不同区域的组织及性能差异化原因,对于交叉沉积的多层多道薄壁桁条结构等复杂空间结构件的组织分布及力学性能差异定量研究较少。另外,构件交叉区域的路径规划对宏观成形形貌的影响规律、对不同区域微观组织变化规律及不均匀性组织与性能形成的根本原因目前缺乏系统的研究。因此,本文提出了一种新的分层切片及路径规划方法,以解决交叉桁条交叉区域余高过大导致的制造精度不足的问题。同时,本文针对电弧增材制造 2319 铝合金交叉桁条结构,探究了不同区域的晶粒形态、元素分布、拉伸

性能、断口形貌等变化规律，定量分析了不同区域组织差异性，进而揭示了力学性能非均匀性机理。

1 材料与方

采用直径为 1.2 mm 的国产 2319 铝合金焊丝，以尺寸为 250 mm×160 mm×15 mm(长×宽×高)的轧制态 2219 铝合金为成形基板。该焊丝与基板具体化学成分如表 1 所示。进行电弧增材制造实验前，对基板上表面打磨，去除表面油污及氧化膜，然后利用丙酮对打磨后的基板表面进行擦拭，进一步去除表面杂质。采用 CMT 电弧增材制造系统进行 2319 铝合金交叉桁条结构增材，焊接电流为 131 A，电弧电压为 14.6 V，送丝速度为 6.5 m/min，扫描速度为 0.03 m/s。电弧增材制造系统主要由 TransPlus

表 1 2319 铝合金焊丝及 2219 铝合金基板化学成分表 (质量分数%)

元素	2319 焊丝	2219 基材
Cu	5.91	5.8~6.8
Si	0.048	≤0.20
Fe	0.063	≤0.30
Mn	0.252	0.20~0.40
Mg	0.014	≤0.02
Zn	0.016	≤0.10
Ti	0.015	0.02~0.10
Cr	0.004 6	—
Zr	0.111	0.10~0.25
V	0.07	0.05~0.15
Al	其余	其余

Synergic 4000 CMT 焊机、VR1500 4R/F+ROBOTER 送丝机构、KUKA KR10R 1420 焊接机器人、KR C4 机器人控制系统四大部分组成，如图 1 所示。另外，为防止电弧增材制造过程中杂质气体进入熔池导致气孔缺陷，采用纯度为 99.99 % 的氩气进行局部保护，保护气流量设定为 22 L/min。

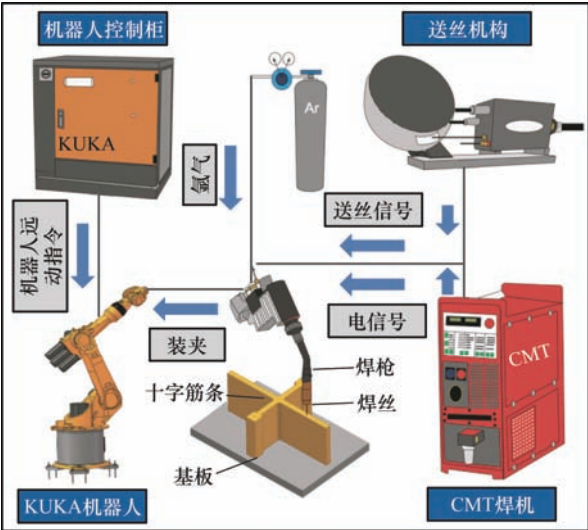


图 1 电弧增材制造系统示意图

电弧增材制造交叉桁条过程中，焊枪采用摆动扫描的方法。为防止桁条侧面由于热累积现象导致塌陷，采用逐层循环变化起/收弧点的方法，每 4 层为 1 个循环周期，如图 2 所示。另外，通过桁条两端添加支撑块的方法也可以防止桁条两端塌陷，长桁条两端添加 15 mm×15 mm 大小的支撑块，短桁条两端添加 25 mm×25 mm 大小的支撑块。焊枪在支撑块上的扫描路径采用水平与竖直方向交叉的方式，为避免支撑块侧表面塌陷。

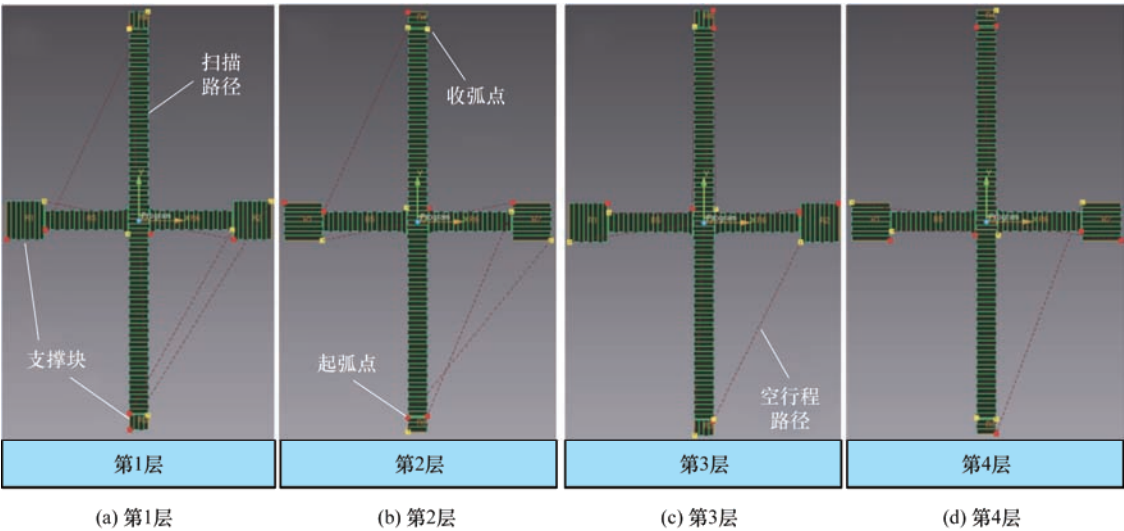


图 2 电弧增材制造交叉桁条每 1 个循环周期扫描路径

电弧增材制造交叉桁条具体尺寸如图 3a 所示。该桁条的厚度为 15 mm, 高度为 80 mm, 两根桁条相交的位置为交叉区域。通过该交叉区域, 在沿着短桁条方向取拉伸件若干, 具体取样位置如图 3b 所示。在距离基板为 30 mm、45 mm、60 mm 高的不同区域分别取 6 个拉伸件, 用砂纸打磨所有拉伸件表面, 以去除表面上的所有加工痕迹。在拉伸试验机上以 2 mm/min 的加载速度进行拉伸试验。测试拉伸试样, 以确定交叉桁条不同区域的拉伸强度、伸长率和断面收缩率, 然后用金相显微镜及扫描电镜观察拉伸试样的断口形貌。

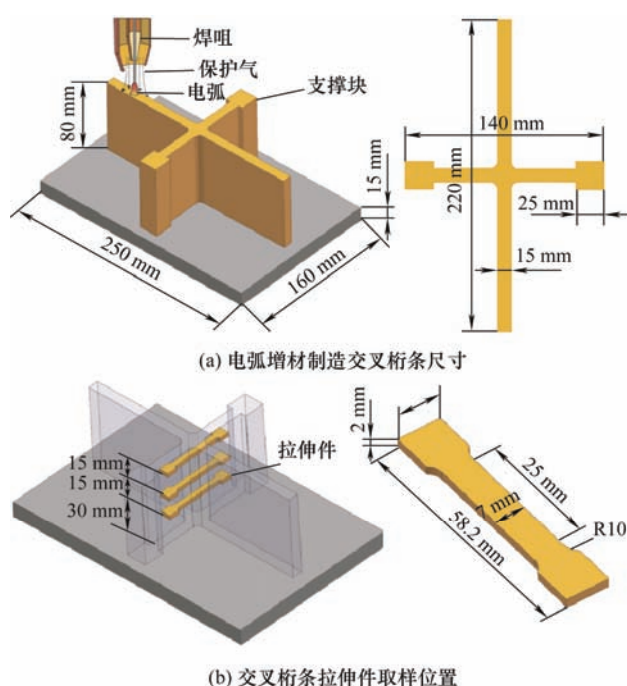


图3 交叉桁条尺寸及拉伸件选取示意图

采用线切割分别在桁条顶部、中部、底部切取金相试样(5 mm×5 mm×2 mm)及 EBSD 测试试样(8 mm×3 mm×2 mm)若干。金相试样采用 1.5 mL HCl+1.0 mL HF+2.5 mL HNO₃+95 mL H₂O 的 Keller

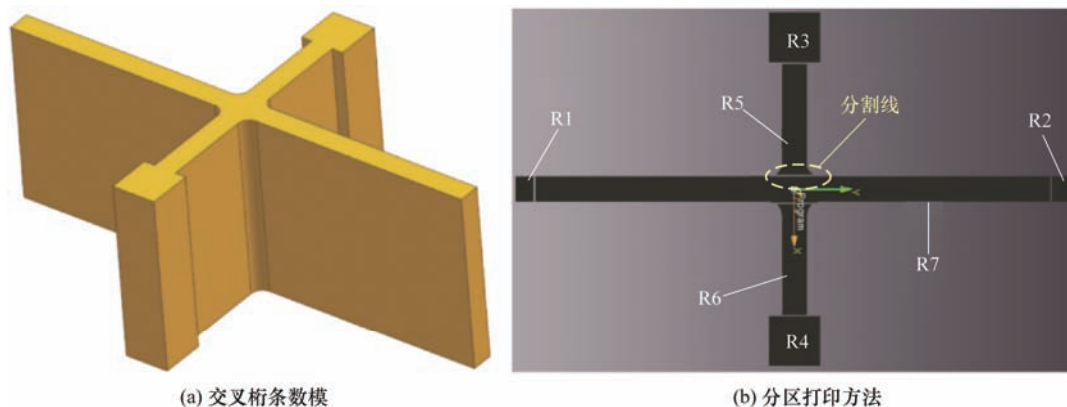
试剂进行腐蚀, 之后在光学显微镜(OM)上进行组织观察。使用电解抛光溶液(70%高氯酸和 30%无水乙醇, 按照体积分数混合)在 16 V 电压下对 EBSD 测试试样进行 20 s 的电解抛光, 并用扫描电子显微镜对试样的晶粒形貌及晶体学取向进行拍摄与记录。该 EBSD 测试试样在拍摄前应用液氮浸泡 20 s, 以去除试样表面残余应力, 降低 EBSD 拍摄过程的噪声。EBSD 测试数据以 0.5 μm 范围内的步长获取, 然后通过 MTEX 开源工具包对该数据进行优化处理^[25]。

采用能谱(EDS)测试各个区域的晶内基体相、晶界网状析出相和晶内颗粒状析出相进行成分分析。采用透射电子显微镜(TEM)对基体相及析出相的晶体结构进行观测, 判定析出相种类及获取相应晶格参数, 最终可定量计算第二相析出所产生的晶格畸变能。

2 结果分析与讨论

2.1 电弧增材制造交叉桁条不同区域组织不均匀性分析

电弧增材制造交叉桁条过程中, 交叉区域由于重复沉积导致余高较大。为了避免该现象, 对短桁条与长桁条相交部位进行分割, 分割线的宽度为 0.1 mm, 如图 4b 所示。同时, 支撑块与桁条相接处也采用该分割方法, 因此交叉桁条被分割为 7 个区域, R1~R4 为支撑块, 短桁条被长桁条分割为 R5 与 R6 两个区域, R7 为长桁条。通过图 4c 可以看出, 通过该分割方法打印出来的桁条成形良好, 无明显塌陷现象, 尤其是桁条两端区域。对交叉桁条的交叉区进行放大可以看到, 分割线的位置虽有凹陷现象, 但冶金结合良好, 表面无明显裂纹、气孔等缺陷。



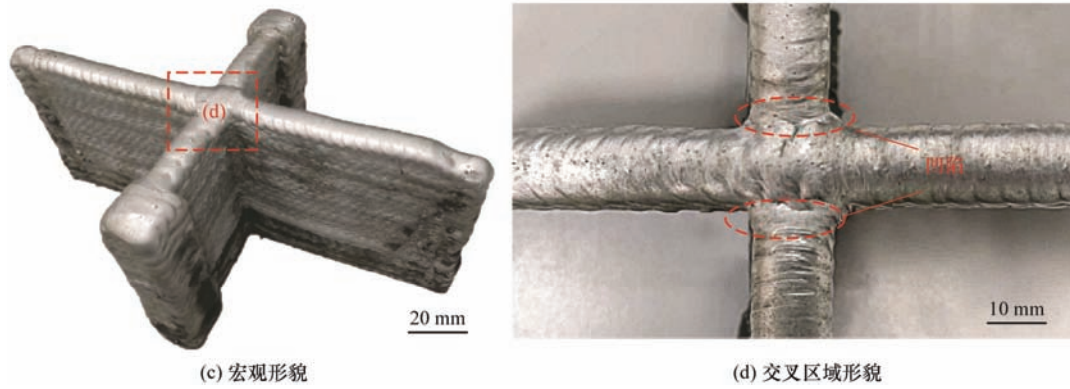


图 4 电弧增材制造交叉桁条宏观形貌图

图 5 展示了桁条顶部、中部、底部的微观组织形貌。从图 5a 中可以看出, 电弧增材制造桁条顶部区域正面由大量等轴晶与等轴枝晶组成, 侧面及顶面以等轴晶为主。进一步放大可以看出, 顶面等轴晶粒尺寸较为均匀, 而侧面晶粒尺寸大小不均等, 甚至有部分晶粒呈扁长状, 如图 5b 与 5d 所示。由于电弧增材制造过程持续热输入导致严重的热累积现象, 桁条顶部区域实际温度梯度较小, 合金元素扩散速率较高, 导致各区域的溶质成分差异较大, 最终

形成较宽的成分过冷区间。形成成分过冷的表达式如下所示

$$\frac{G}{R} \leq \frac{mC_0}{D} \frac{1-k_0}{k_0} \quad (1)$$

式中, G 为固液界面前沿液相中的实际温度梯度; R 为结晶速度; m 为液相线斜率; k_0 为分配系数; D 为液相中溶质的扩散系数。由于桁条顶部区域成分过冷区域较大, 则固液界面易呈树枝晶生长, 如图 5c 所示。

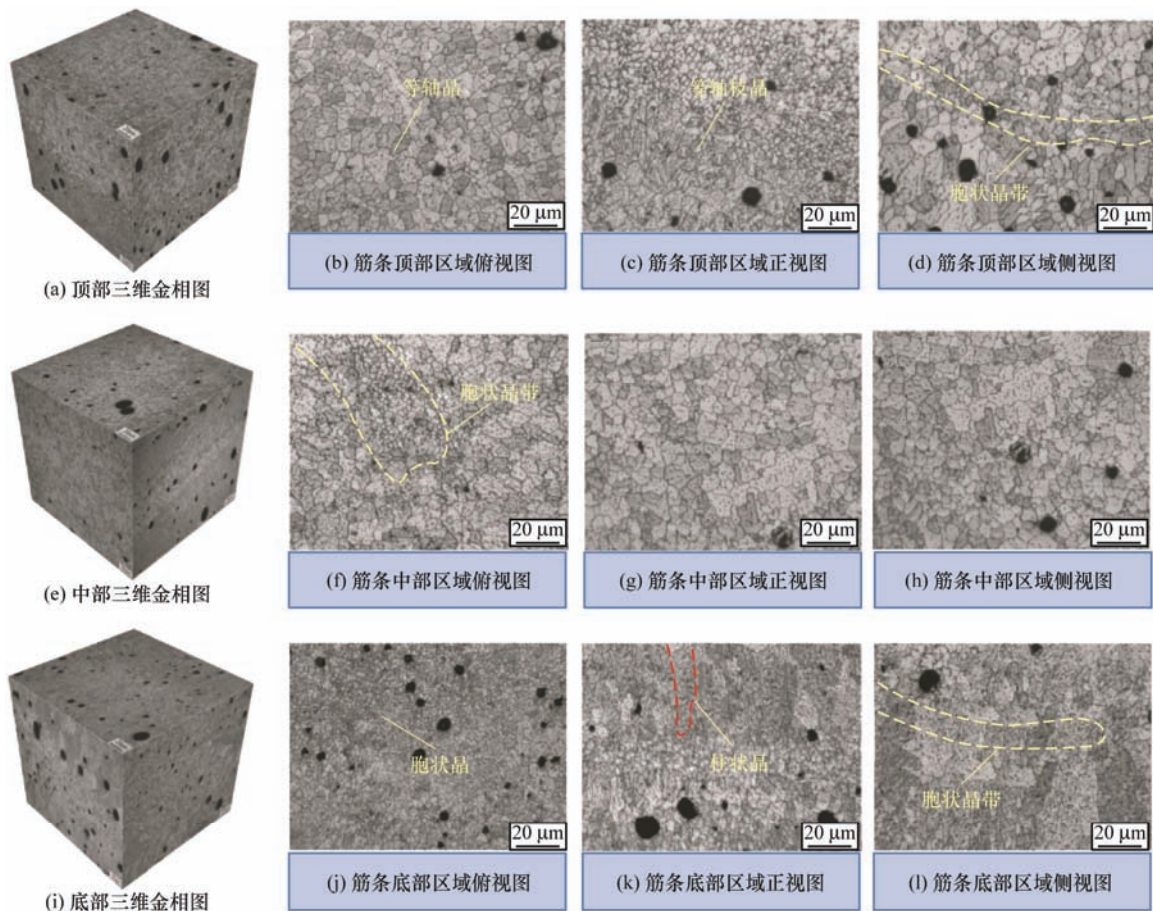


图 5 电弧增材制造交叉桁条不同区域微观组织形貌

在桁条中部区域顶面、正面及侧面均可观察到均匀细小的胞状晶,如图5e所示。进一步放大观察顶面有近100 μm 宽度的胞状晶带,晶粒尺寸在7 μm 左右,这是由于该区域处于熔池边界,温度梯度较大,不易发生成分过冷现象,因此固液界面以胞状生长,如图5f所示。试样正面及侧面均为等轴晶,该晶粒尺寸大约为30 μm ,如图5g与5f所示。通过图5g还可以发现,在桁条底部区域有明显的柱状晶形成。由于桁条底部靠近基板的位置温度梯度较大,熔池边界的胞状晶及等轴晶进行外延生长形成柱状晶,且向沉积层中心方向生长,如图5k与5l所示。但试样顶面仍为胞状晶及等轴晶共存的晶体类型,对比图5j与5f发现,桁条底部胞状晶及等轴晶的晶粒尺寸明显小于中部,这是由于桁条底部

过冷度大于桁条中部。

为了描述电弧增材制造交叉桁条不同区域的晶粒几何特性,对EBSD数据进行进一步处理,实现二维晶粒形貌重构。之后采用截距法对晶粒尺寸进行定量表征,并根据重构的晶粒形貌计算其晶粒长宽比及晶体学取向^[26]。晶粒长宽比的定义为最长轴和最短轴之间的商,用于测量椭圆与完整圆形之间的差异。从图6a和6d中可以看出,电弧增材制造交叉桁条顶部及中部的大部分晶粒平均长宽比在1~2范围内,证明该区域大部分晶粒均为等轴晶。但在桁条底部区域,大量晶粒具有较高的长宽比,长宽比最大可达4,如图6g所示,这说明该区域易形成柱状晶,与通过图5得出的结论一致。

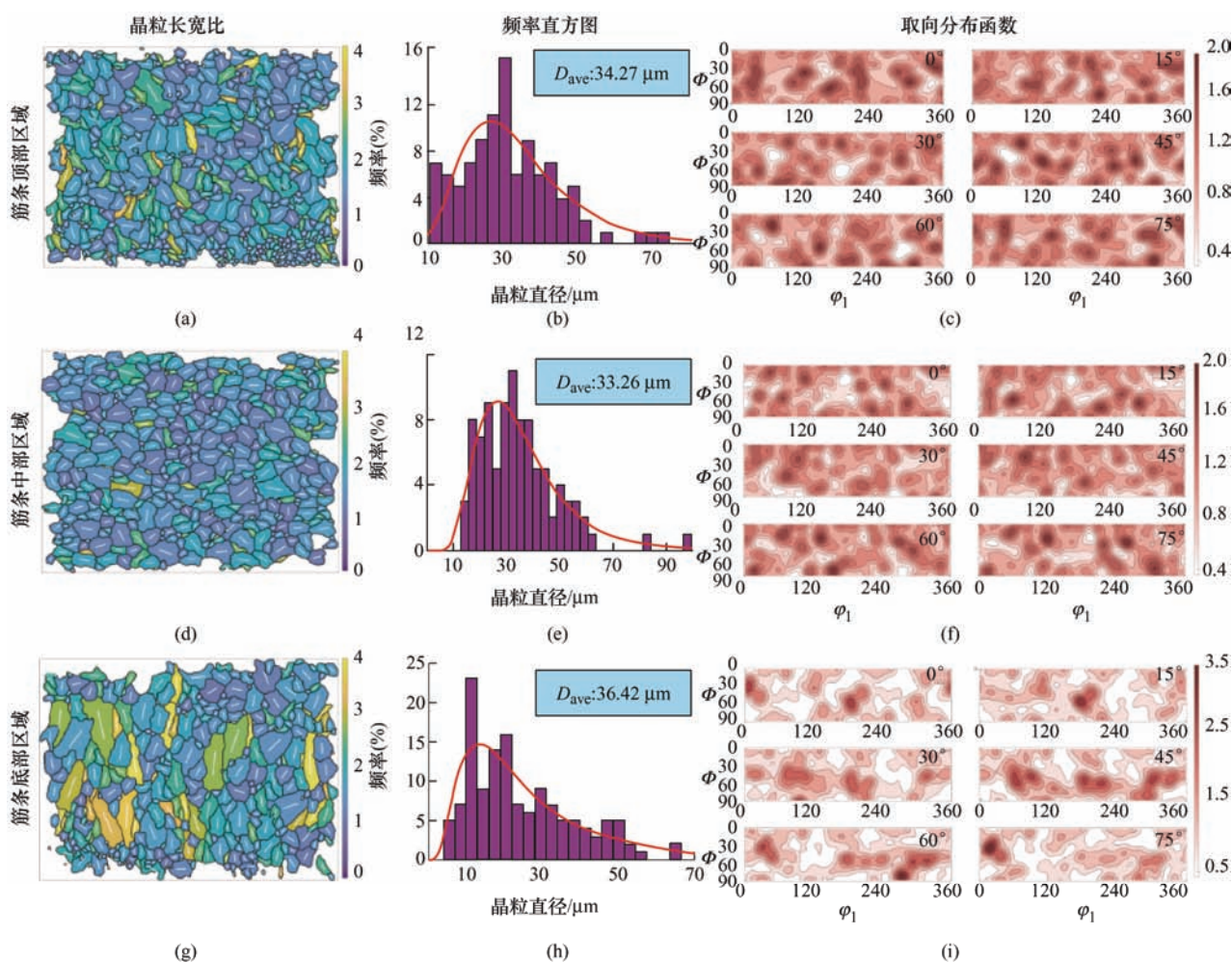


图6 电弧增材制造交叉桁条不同区域晶粒尺寸及取向分布图

由于电弧增材制造过程中交叉桁条底部冷却速度与温度梯度较大,易形成柱状晶,且晶粒生长速率较大,则该区域平均晶粒尺寸(D_{ave})大于36 μm ,如图6h所示。桁条顶部为晶粒形貌为细

小的等轴晶,这是因为在该区域增材过程中上表面具有较小的温度梯度与冷却速度,合金元素扩散速度较大,成分过冷程度较高,致使晶体形核率越高,平均晶粒尺寸降低至34 μm 左右,如

图 6b 所示。增材至桁条顶部后, 桁条中部已经凝固, 此时固体导热较快, 原子扩散的温度和时间条件不能达到晶粒长大的要求, 因此该区域晶粒尺寸与顶部相近, 如图 6e 所示。

从图 6c 和 6f 中可以看出, 在晶粒取向分布函数图上的最大取向密度值为 2, 同时在桁条顶部及中部取向密度分布均匀, 这意味着该区域以等轴晶为主导, 力学性能趋于各向同性。但在桁条底部最大取向密度值增加至 3.5, 该区域有大量柱状晶形成, 导致取向密度分布不均匀。桁条底部区域晶粒取向主要为(280, 80, 60)与(20, 40, 65), 如图 6i 所示, 由于该区域组织具有不均匀性, 可进一步导致力学性能的各向异性。

2.2 电弧增材制造交叉桁条元素分布不均匀性分析

图 7 显示了电弧增材制造交叉桁条沉积层内微观组织形貌及元素分布。通过观察可以发现大量的第二相分布在铝基体上, 有沿晶界分布的网状共晶组织, 同时在晶粒内部有细小颗粒状的第二相出现, 如图 7a 与 7b 所示。对该区域进行 EDS 成分分析, 可以发现 Al 元素占主要地位, 主要分布在晶粒内部, 而在晶界处含量较少, 形成贫 Al 区, 如图 7c 所示。但 Cu 元素则集中分布在晶界上, 在晶粒内部则主要富集于颗粒状第二相处, 如图 7d 所示。Mg 与 Ti 元素在晶界及晶内均匀分布, 无明显偏析现象, 如图 7e 与 7f 所示。

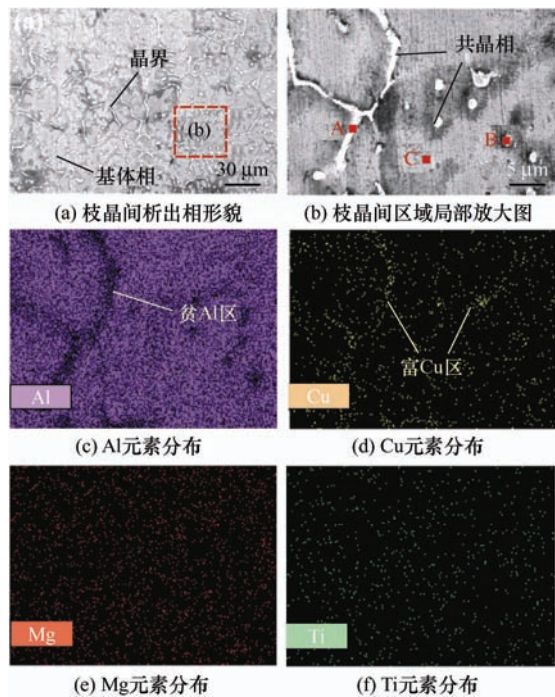


图 7 电弧增材制造交叉桁条析出相形貌及元素分布图

对晶内基体相、晶界网状析出相和晶内颗粒状析出相进行进一步成分分析, 可知 A 位置的析出相

铝铜原子比接近 5:1, 因此可以确定晶界处的网状组织为 $\alpha\text{-Al}+\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 共晶组织。另外, B 位置的析出相铝铜原子比接近 3:1, 因此晶内颗粒相也为 $\alpha\text{-Al}+\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 共晶组织, 如表 2 所示。B 位置析出相的含 Cu 量较高, 质量分数高达 38.20%, 而 A 位置析出相的含 Cu 量较少, 质量分数仅 29.66%, 因此可以得出 Cu 元素的在晶界与晶内共晶相中的分布是不均匀的。对基体相进行 EDS 能谱扫描(C 位置), 可知基体相中 Al 元素占主导, 质量分数高达 90.33%, 其中有极少量的 Cu 元素, 质量分数仅 3.36%。在电弧增材制造过程中, 因为循环加热导致的热累积现象, 合金的冷却速度急剧降低, Cu 元素没有充足的时间进行均匀扩散, 导致大量的 Cu 元素在晶界与晶内偏析形成共晶相。

表 2 电弧增材制造交叉桁条沉积层内部能谱扫描结果 (质量分数%)

元素种类	晶界析出相	晶内析出相	基体相
Al	80.97	73.84	94.91
Cu	15.57	21.60	1.50
Zn	0.71	0.97	0.89
Mg	1.32	0.76	0.50
Zr	0.26	0.36	0.46
Fe	0.35	1.24	1.00
Mn	0.30	0.52	0.30
V	0.20	0.32	0.17
Ti	0.16	0.22	0.23

通过 TEM 与 XRD 检测方法进一步验证析出相类型。结果发现, 晶内有大量的黑色颗粒析出, 如图 8a 所示。对析出物及其周围区域进行放大, 并根据该析出相的衍射斑点图和元素分布图可以得出, 黑色颗粒物的晶格结构为体心立方, 且该析出物内部富集 Cu 元素, 如图 8e 和 8f 所示。结合物相分析结果发现, 电弧增材制造铝合金试样内部主要有 $\alpha\text{-Al}$ 相与 θ 相, 可判定该黑色颗粒为 θ 相, 如图 8c 所示。通过基体相的衍射斑点结果可以看出该相为面心立方结构, 同时结合图 8f 中 Al 元素在视野中均匀分布, 因此可判定该相为 $\alpha\text{-Al}$ 相。

另外, 根据 θ 相与 $\alpha\text{-Al}$ 相的衍射斑点发现, θ 相为非共格析出相, 此时由于析出相(θ 相)的体积和该相所在区域的母相($\alpha\text{-Al}$ 相)体积差异 ($\Delta V = V_\theta - V_{\alpha\text{-Al}}$)而引起材料内部产生应变。该析出

相从图 8d 看出是圆形, 圆形析出相引起的弹性应变能为

$$\Delta G_{st} = \frac{2}{3} G \frac{(\Delta V)^2}{V_{\alpha-Al}} f(c/a) \quad (2)$$

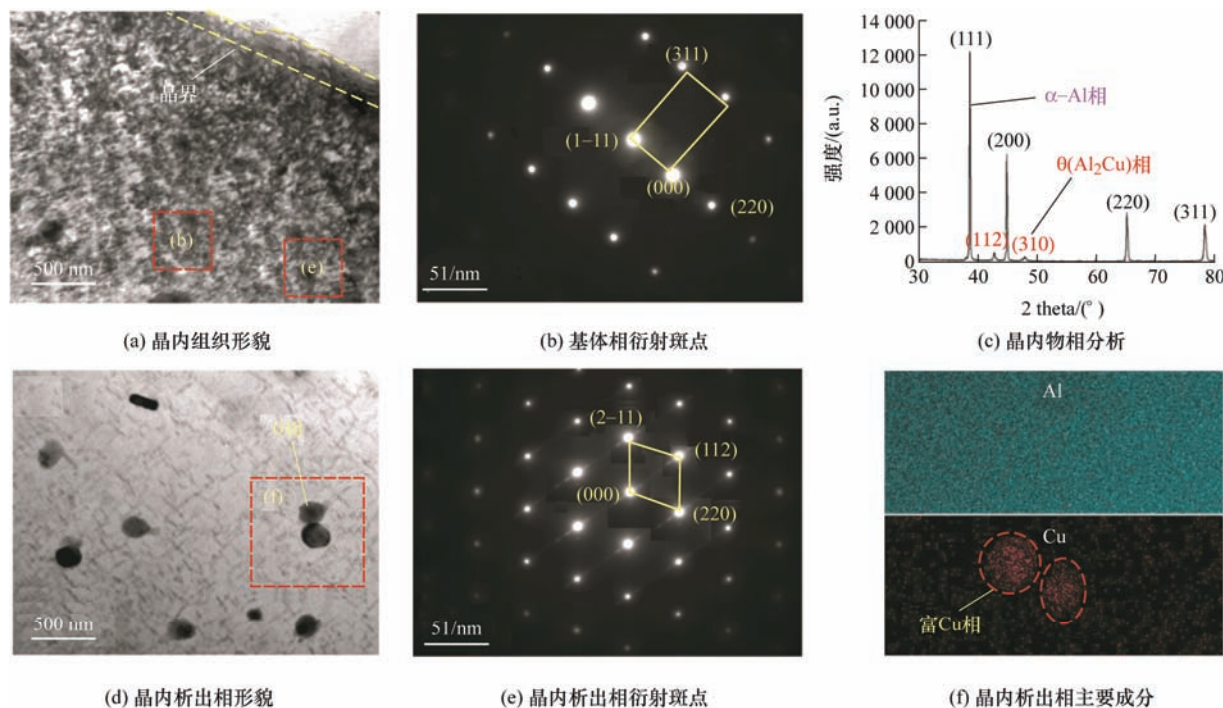


图 8 电弧增材制造交叉桁条晶内析出相形貌、结构与成分

式中, $f(c/a)$ 是考虑形状影响的因子, 析出相椭圆旋转轴为 c 轴, 另一轴为 a 轴, 但是由于新相(θ 相)为圆形球状, $c/a=1$, 则 $f(c/a)=1$, 因此式(2)可简化为

$$\Delta G_{st} = \frac{2}{3} G \frac{(\Delta V)^2}{V_{\alpha-Al}} \quad (3)$$

式中, G 为母相(α -Al 相)的切变模量, 该值为 27.42 GPa; V_θ 为 0.1795 nm^3 (θ 相晶格常数 $a=b=0.6067 \text{ nm}$ 且 $c=0.4877$); $V_{\alpha-Al}$ 为 0.0664 nm^3 (α -Al 相晶格常数 $a=0.4049 \text{ nm}$), 因此 ΔV 为 0.1131 nm^3 ; 最终得出一个母相晶胞周围析出一个非共格相晶胞引起的晶格畸变能 ΔG_{st} 为 $5.28 \times 10^{-18} \text{ J}$ 。析出相周围晶格畸变能的增大会对位错运动产生极大的阻力, 使其滑移难以进行, 从而使合金的强度有所提高, 但塑性及韧性会有所降低。

2.3 电弧增材制造交叉桁条力学性能不均匀性分析

图 9 反映了电弧增材制造交叉桁条不同区域力学性能差异及断口侧表面组织形貌。图 9a 为交叉桁条中部区域拉伸件断裂宏观形貌, 从中可以看出, 该拉伸件断裂位置随机, 2 个试样断裂于交叉区, 4

个试样断裂于单壁区。同样, 交叉桁条顶部与底部区域拉伸件断裂位置仍呈随机分布。通过交叉桁条不同区域拉伸件应力-应变曲线可以看出, 桁条顶部的试样抗拉强度最高, 桁条底部的试样断裂应变值最大, 如图 9b 所示。

对交叉桁条每个区域的 6 根拉伸试样的抗拉强度、伸长率及断面收缩率取平均值, 最终经统计发现桁条顶部的平均抗拉强度值与中部与底部相比高出 20% 左右, 如图 9c 所示。从图 9d 中可以看出, 桁条顶部具有大量细小的等轴晶与等轴枝晶, 根据 Hall-Petch 公式可知该区域晶粒细小致使强度显著提升。断口部位较为平滑, 也同样证明该试样硬度与强度值较高。桁条中部与底部晶粒明显粗化, 同时断口不平整, 证明该区域强度较低, 如图 9e 与 9f 所示。从图 9f 中还可以看出该区域拉伸试样颈缩现象明显, 结合图 9c 可以得出桁条底部随强度降低 7% 左右, 但伸长率与断面收缩率分别提升了 24.6% 与 29.4%。相比于桁条顶部细小晶粒来说, 桁条中部与底部具有较大晶粒尺寸, 晶界到位错源的距离也越大, 所造成的应力集中也越大, 激发相邻晶粒发生塑性变形的机会比小晶粒大的多, 因此该区域塑性较好。

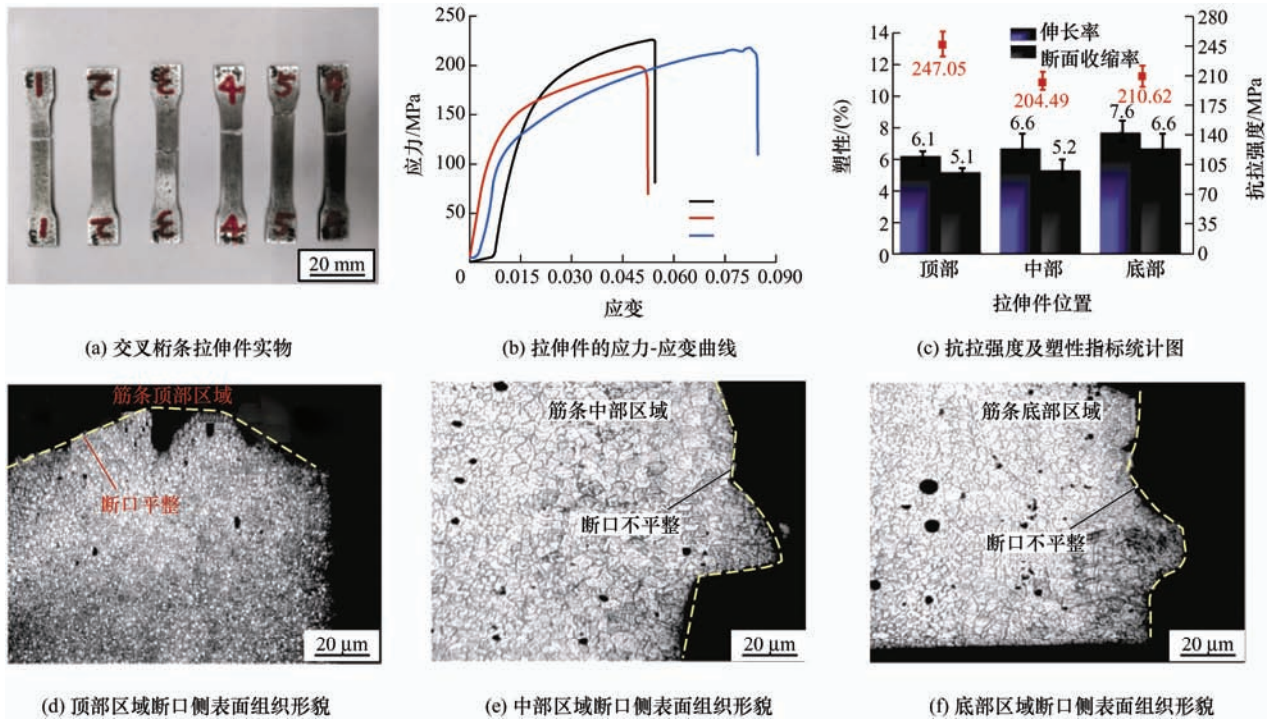


图9 交叉桁条力学性能测试及断口侧表面组织形貌

图 10a 为电弧增材制造交叉桁条顶部区域拉伸断口形貌, 该区域断口表面小气孔数量较多, 呈弥散分布, 这是由于顶部区域熔池快速凝固后气泡来不及溢出致使形成气孔。该区域断口较为平整, 这是由于该区域硬度及强度较高导致材料脆性较大, 宏观断口发现解理台阶与韧窝共存的现象, 因此该区域拉伸断裂模式为准解理断裂。对韧性断裂部位放大发现, 该区域韧窝尺寸不均匀, 且韧窝深度较浅, 这也意味着该区域试样塑性较差, 如图 10b 所示。另外, 在韧窝中心可发现颗粒物, 该颗粒相主要为 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相。该非共格析出相增大了晶格畸变能并且提升位错阻力, 使晶体滑移难以进行, 最终材料的强度显著提高。从图 10c 中可以看出, 电弧增材制造交叉桁条中部区域断口面气孔较少, 同时气孔尺寸与顶部区域相比有所减小。该区域宏观断口表面可明显看出晶粒形貌, 这意味着该区域断裂形式为沿晶断裂。这可能由于晶界附近脆性析出相较多, 且该析出相在晶界上呈连续性分布, 最终弱化晶界, 导致沿晶开裂, 材料抗拉强度显著降低。另外, 通过对桁条中部断口进行局部放大发现, 该区域韧窝尺寸较为均匀, 韧窝深度与桁条顶部相比较深, 因此塑性有所改善, 如图 10d 所示。同时, 在韧窝周围可观察到微裂纹, 这也意味着该区域析出相较多, 脆性较大, 在其脆性相附近应力场集中, 易萌生微裂纹, 致使材料强度严重受损。图 10e 为电弧增材制造交叉桁条底部区域拉伸断口形貌, 发现其断口表面平整度较低, 表面分布着大量尺寸不

均一的黑色孔洞, 其中包含一个尺寸为 0.5 mm 的大孔洞, 其余的黑色小孔洞均为尺寸大约在 10~50 μm 的小气孔, 呈弥散分布。试样左下角的黑色大孔洞内部包含有块状 $\alpha\text{-Al}$ 相, 这可能是由于刚开始增材时基板温度较低, 焊道没有完全铺展开导致层间未熔合现象。另外, 断面上分布有大小不均匀的等轴韧窝, 其深度较深且尺寸较大, 说明桁条该区域具有较为良好的塑性与韧性。另外, 在韧窝中心的析出相数量与其他两个区域相比明显减少, 这也意味着该区域试样强度较低但塑韧性较优, 如图 10f 所示。

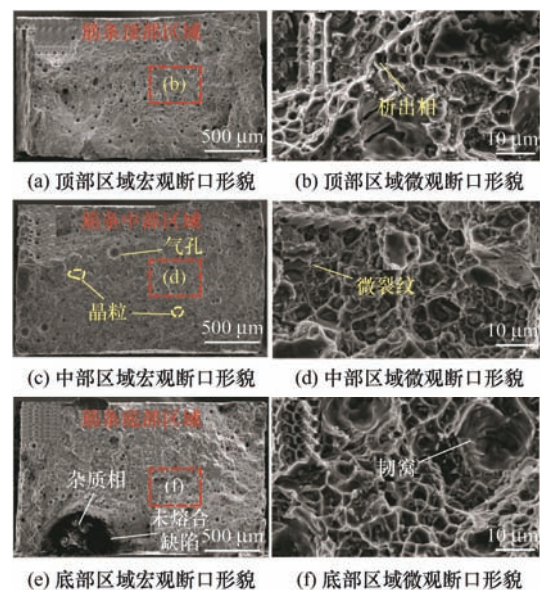


图10 电弧增材制造交叉桁条拉伸断口形貌

3 结 论

(1) 针对交叉桁条结构提出了一种新的分层切片及路径规划方法, 解决了桁条交叉区域余高过大导致的制造精度不足问题。电弧增材制造 2319 铝合金交叉桁条结构不同区域具有显著的组织不均匀性。交叉桁条顶部区域形成了大量的等轴枝晶, 桁条中部区域由细小的胞状晶与等轴晶组成, 桁条底部区域易形成的柱状晶组织。

(2) 电弧增材制造过程中 Cu 元素在晶界与晶内共晶相中的分布不均匀。晶内颗粒物的含 Cu 量较高, 质量分数高达 38.2%, 而晶界析出相的含 Cu 量仅为 29.6%。 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相在晶内以颗粒状均匀析出, 析出相周围晶格畸变能的增大可间接提高材料强度。

(3) 由于电弧增材制造交叉桁条顶部区域平均抗拉强度值与中部、底部相比高出 20 % 左右。在该区域宏观断口的韧窝中析出了大量 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 颗粒相, 可显著提高试样的抗拉强度。桁条底部区域拉伸断口中的韧窝深度较深且尺寸较大, 具有较为优异的塑韧性。

参 考 文 献

- [1] 李权, 王福德, 王国庆, 等. 航空航天轻质金属材料电弧熔丝增材制造技术[J]. 航空制造技术, 2018, 61(3): 74-82.
- LI Quan, WANG Fude, WANG Guoqing, et al. Wire and arc additive manufacturing of lightweight metal components in aeronautics and astronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(3): 74-82.
- [2] SPENCER J D, DICKENS P M, WYKES C M. Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1998, 212(3): 175-182.
- [3] 杨建华, 张定华, 吴宝海. 考虑加工过程的复杂薄壁件加工综合误差补偿方法[J]. 航空学报, 2014, 35(11): 3174-3181.
- YANG Jianhua, ZHANG Dinghua, WU Baohai. A comprehensive error compensation approach considering machining process for complex thin-wall parts machining[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(11): 3174-3181.
- [4] 柏久阳, 王计辉, 林三宝, 等. 铝合金电弧增材制造焊道宽度尺寸预测[J]. 焊接学报, 2015, 36(9): 87-90.
- BAI Jiuyang, WANG Jihui, LIN Sanbao, et al. Width prediction of aluminium alloy weld additively manufactured by TIG arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(9): 87-90.
- [5] 张金田, 王任甫, 王杏华. 船用钢电弧增材制造的焊道尺寸预测[J]. 材料开发与应用, 2018, 33(2): 17-22.
- ZHANG Jintian, WANG Renfu, WANG Xinghua. The weld bead dimensional prediction of wire and arc additive manufacture for ship steel[J]. Development and Application of Materials, 2018, 33(2): 17-22.
- [6] FENG Jicai, ZHANG Hongtao, HE Peng. The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding[J]. Materials & Design, 2009, 30(5): 1850-1852.
- [7] LIU Haihua, CHEN Haojie, LIU Wenji, et al. Numerical analysis of flow-thermal coupling in micro-plasma welding pool of thin-wall part[J]. China Welding, 2018, 27(2): 13-18.
- [8] CUNNINGHAM C R, FLYNN J M, SHOKRANI A, et al. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 672-686.
- [9] DING Donghong, SHEN Chen, PAN Zengxi, et al. Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part[J]. Computer-Aided Design, 2016, 73: 66-75.
- [10] WILLIAMS S W, MARTINA F, ADDISON A C, et al. Wire + arc additive manufacturing[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(7): 641-647.
- [11] LOCKETT H, DING J, WILLIAMS S, et al. Design for wire + arc additive manufacture: Design rules and build orientation selection[J]. Journal of Engineering Design, 2017, 28(7-9): 568-598.
- [12] 朱贝贝, 熊俊. 交叉件 GTA 填丝增材制造弧压检测与成形控制[J]. 机械工程学报, 2019, 55(15): 17-23.
- ZHU Beibei, XIONG Jun. Arc voltage detection and forming control for crossing parts in GTA additive manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(15): 17-23.
- [13] 高炼玲, 余圣甫, 禹润缜, 等. 5356 铝合金过渡端框电弧增材制造及组织与性能[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 28-36.
- GAO Lianling, YU Shengfu, YU Renzhen, et al. Arc voltage detection and forming control for crossing parts in GTA additive manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 28-36.
- [14] 杨壮, 王天琪, 李亮玉, 等. 厚壁结构件电弧增材制

- 造成形方法及工艺[J]. 焊接学报, 2019, 40(10): 100-105.
- YANG Zhuang, WANG Tianqi, LI Liangyu, et al. Forming method and technology of arc additive manufacturing for thick wall structural parts[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(10): 100-105.
- [15] 王天琪, 杨壮, 李亮玉, 等. 悬空特征结构件电弧增材制造成形及算法优化[J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 78-83.
- WANG Tianqi, YANG Zhuang, LI Liangyu, et al. Research on forming and welding technology of thick wall structure arc added material manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 78-83.
- [16] 王天琪, 李天旭, 李亮玉, 等. 复杂结构薄壁件电弧增材制造离线编程技术[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 42-47.
- WANG Tianqi, LI Tianxu, LI Liangyu, et al. Off-line programming technology for arc additive manufacturing of thin-walled components with complex structures[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 42-47.
- [17] 韩文涛, 林健, 雷永平, 等. 不同层间停留时间下电弧增材制造 2Cr13 薄壁件热力学行为[J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 47-53.
- HAN Wentao, LIN Jian, LEI Yongping, et al. Thermal-stress analysis of wire-arc additive manufacturing 2Cr13 parts with different interlayer idle time[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 47-53.
- [18] ZHANG Xinxin, LV You, TAN Sihan, et al. Microstructure and corrosion behaviour of wire arc additive manufactured AA2024 alloy thin wall structure[J]. Corrosion Science, 2021, 186: 109453.
- [19] SU Chuanchu, CHEN Xizhang, GAO Chuang, et al. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM[J]. Applied Surface Science, 2019, 486: 431-440.
- [20] CHAKKRAVARTHY V, JEROME S. Fabrication of preferentially oriented Al4043 alloy and its wear anisotropy[J]. Materials Letters, 2020, 280: 128578.
- [21] ZHOU Yinghui, LIN Xin, KANG Nan, et al. The heterogeneous band microstructure and mechanical performance in a wire + arc additively manufactured 2219 Al alloy[J]. Additive Manufacturing, 2022, 49: 102486.
- [22] MAIDER A, ENEKO U, IKER R, ET al. Influence of deposition strategy and heat treatment on mechanical properties and microstructure of 2319 aluminium WAAM components[J]. Materials & Design, 2022, 221: 110974.
- [23] GENG Yanfei, PANCHENKO I, CHEN Xizhang, et al. Investigation of microstructure and fracture mechanism of Al-5.0Mg alloys fabricated by wire arc additive manufacturing[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(10): 7406-7416.
- [24] LI Chengde, GU Huimin, WANG Wei, et al. Effect of heat input on formability, microstructure, and properties of Al-7Si-0.6Mg alloys deposited by CMT-WAAM process[J]. Applied Sciences, 2020, 10 (1): 70.
- [25] GU Jianglong, BAI Jing, DING Jialuo, et al. Design and cracking susceptibility of additively manufactured Al-Cu-Mg alloys with tandem wires and pulsed arc[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262: 210-220.
- [26] 李权, 王国庆, 罗志伟, 等. 2219 铝合金电弧增材制造组织及力学性能的非均匀性[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49 (11): 3969-3976.
- LI Quan, WANG Guoqing, LUO Zhiwei, et al. Inhomogeneity of microstructures and mechanical properties of 2219 aluminum alloy by WAAM[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(11): 3969-3976.
- [27] BACHMANN F, HIELSCHER R, SCHAE BEN H. Texture analysis with MTEX – free and open source software toolbox[J]. Solid State Phenomena, 2010, 160: 63-68.
- [28] KRIL C E, BIRRINGER R. Estimating grain-size distributions in nanocrystalline materials from X-ray diffraction profile analysis[J]. Philosophical Magazine A, 1998, 77 (3): 621-640.

作者简介: 王磊磊, 男, 1989 年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为激光焊接与精准再制造。

E-mail: wangll@nuaa.edu.cn

占小红(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为激光焊接与精准再制造。

E-mail: xhzhan@nuaa.edu.cn