

不同取向激光增材制造 GH4169 合金 电子束焊接头组织和性能

刘奋成¹, 陈悦¹, 徐洋², 李春雨¹, 刘丰刚¹, 李秋歌²

(1. 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063)

(2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 对具有不同晶体取向 (0°、45°和 90°) 的激光增材制造 GH4169 合金进行真空电子束对接焊接实验, 分析了两侧母材不同晶体取向差情况下的焊缝金属组织和力学性能。结果表明: GH4169 合金电子束焊缝组织的枝晶有明显择优取向, 焊缝组织依托母材晶体连续生长, 焊缝枝晶择优取向随母材晶体取向的变化而变化, 0°和 90°取向差焊缝组织呈从母材外延连续生长特征, 而 45°取向差焊缝枝晶组织出现取向转变。随两侧母材晶体取向差的增大, 在焊缝中心区域和熔合线附近大角度晶界含量都呈现出先增大后减小的趋势。拉伸测试结果表明, 焊接接头的抗拉强度随两侧母材晶体取向差增大而降低, 分别为 721.8、720.7 和 702 MPa, 均低于母材 737.2 MPa 的抗拉强度。两侧母材不同取向差的焊缝区 HV 硬度值均在 2650 MPa 上下小幅波动。焊缝金属的塑性变形受焊缝各区域晶体取向影响, 它的变化与大角度晶界含量有关, 组织中软取向含量越多, 金属组织变形量越大。焊缝中心线和熔合线在变形过程中的弯曲程度越大, 焊接接头塑性越强。

关键词: GH4169 合金; 激光增材制造; 电子束焊接; 晶体取向

中图分类号: TG132.3⁺3; TG146.1⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)04-1283-13

GH4169 合金是一种镍铁基高温合金, 该合金具有良好的力学性能、耐高温腐蚀性和焊接性, 广泛应用于航空航天发动机、燃气轮机、石油管道、核反应堆结构件等领域^[1,2]。由于具有良好的焊接性和成形性能, GH4169 合金在激光增材制造领域被广泛研究, 被用于航空器高性能复杂结构件的快速、自由实体近净成形^[3,4]。

增材制造 (additive manufacturing, AM) 技术在近几年得到快速发展, 与传统热加工制造方法不同, 它可以在无模具情况下直接制造出高性能、形状复杂的零部件^[5,6]。目前, 增材制造技术在大尺寸零件上的应用尚不成熟, 一是成形过程中的变形问题难以解决, 再者是受设备限制, 要制造大尺寸零件则往往考虑将各个部分采用焊接方法连接起来。在各种焊接方法中, 真空电子束焊接技术 (vacuum electron beam welding, VEBW) 具有能量密度集中、熔池深/宽比大、热影响区小、成型效率高等优势^[7,8]。由于 GH4169 合金主要用于航空发动机热端部件的制造, 对焊缝质量要求高,

真空电子束焊接通常被认为是首选的焊接方法。基于此, 各国研究人员在 GH4169 合金的电子束焊接工艺方面展开了较多研究。例如, Gao 等^[9]研究了真空电子束焊接热连轧 Inconel 718 合金 12 mm 厚板焊接接头整体及各区域的显微组织和高温力学性能。结果表明, 焊缝中心上下区域为树枝晶, 中间区域为柱状晶。对焊接接头分区域切片后, 在 650 °C 的情况下, 力学性能上部区域最低, 下部区域最高。Kwon 等^[10]改进了锻造 Inconel 718 合金焊后热处理制度, 真空电子束焊缝组织使用这种改进后的热处理制度, 焊缝组织的夏比冲击韧性比母材提高 1.7 倍。Kwon 等^[11]同时研究了 10 mm 厚铸造和锻造 Inconel 718 高温合金电子束焊缝的组织 and 低温力学性能。研究发现, 2 种焊缝中 Laves 相颗粒为裂纹萌生和扩展提供有利条件, 在温度为 77 K 时, 夏比冲击韧性显著降低。Mei 等^[12]研究了 Inconel 718 高温合金晶粒大小和电子束焊接速度对焊缝组织及热影响区裂纹扩展的影响。研究表明, 随着母材晶粒尺寸增大, 焊缝轮廓从酒杯形变成钉头形,

收稿日期: 2020-04-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51865036, 51565041); 江西省自然科学基金 (20192ACBL21050); 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室开放课题 (GF201401002)

作者简介: 刘奋成, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063, 电话: 0791-83863028, E-mail: fencheng999@163.com

热影响区的裂纹敏感性与母材晶粒尺寸和焊接速度有关。从以上文献来看,关于 GH4169 合金电子束焊接的研究普遍针对传统的铸件、热轧或锻件合金,此类合金组织和力学性能为各向同性,因此在焊接时不需要考虑由于两侧晶体取向差异导致的焊缝组织和力学性能差异。

目前,大尺寸零件的激光增材制造因为仍无法直接成形,普遍采用的方法就是局部成形后再用激光或电子束焊接的方式进行连接,获得最终需要的尺寸和形状。而从材料角度来看,激光增材制造的局部小尺寸零件由于存在各向异性,在装配焊接时一定存在各成形部分晶体取向的匹配问题,即使是在焊接前经过了高温均匀化处理,材料的组织和性能仍表现出一定的各向异性,而被焊接材料的各向异性会对焊缝组织及其力学性能造成影响。而关于晶体取向对激光增材制造镍基合金电子束焊接焊缝组织和力学性能影响的研究鲜见报道。

基于以上分析,本实验以具有各向异性的激光增材制造 GH4169 合金为被焊接材料,模拟实际工件在焊接过程中可能出现的被焊接材料装配所引起的晶体取向差异,对两侧取向差分别为 0°、45°和 90°的 GH4169 合金进行真空电子束焊接,并研究两侧金属晶体取向差对焊缝金属组织、焊缝金属变形均匀性和力学性能的影响,为大型复杂结构件的增材制造与焊接提供借鉴和参考。

1 实验

实验所用母材为采用激光立体成形方法(激光增材制造的一种)制备的 GH4169 合金试样。即使用设备为 LSF-III 型激光立体成形系统,成形过程保护气体为 Ar 气氛,所用粉末为等离子旋转电极法制备的球形 GH4169 合金粉,载粉气体为 Ar 气,粉末尺寸为 80~150 μm。为去除粉末表面吸附的水气,成形前粉末经 150 °C 真空烘干处理 4 h,具体成形过程如文献 [13] 所述。表 1 为实验用激光增材制造 GH4169 合金的化学成分。采用线切割按图 1 所示在成形好的大块材料中切取尺寸为 30 mm×30 mm×6 mm 的板状方块试样,用铣床将组合好的焊接母材各焊缝对接面铣平,再用砂纸打磨平整,直至露出金属光泽,用乙醇棉球擦拭干净,吹风机吹干,保证对接面金属表面光滑平

整,洁净无杂质。将加工好的典型板状试样相互组合得到晶粒取向差为 0°、45°和 90°焊接母材,用夹具装配组合好焊接母材,尽量缩小焊缝对接面间隙。

采用 EBOCAM KS15PNI50KM 真空电子束设备进行焊接,接头装配方式如图 1 所示,图中 D_d 代表激光增材制造过程中的沉积方向,即试样生长方向,此方向大体与晶体[001]方向平行,焊缝位于焊接试样中间。真空电子束焊接设备真空室体积为 1.5 m³,工作室真空度为 7×10⁻⁴ Pa,所选用的焊接工艺参数如表 2 所示。

焊接完成后获得两侧母材不同晶体取向差(0°、45°和 90°)的焊缝试件,采用线切割将试件加工成图 2 所示的拉伸试样,并用砂纸打磨去除线切割痕迹,采用 WDW-E200D 型微机控制电子万能试验机在室温下以 0.5 mm/min 的应变速度进行抗拉性能测试。首先将拉伸试样全部拉断,记录试样变形量和抗拉强度,将 3 次重复试验后的数据取均值,作为测试结果。为观察变形过程中材料的组织变化,部分试样在变形量为 8% 时停止拉伸,将此拉伸试样作为焊接接头变形均匀性的观察用试样。

利用背散射电子衍射(EBSD)系统分别对无变形和变形量 8% 的焊缝试样进行大角晶界和晶体取向定量分析。其中,EBSD 分析步长设置为 2.5 μm。将抛光好的试样用腐蚀剂腐蚀焊缝表面,所用腐蚀剂配比为 C₂H₅OH: HCl: FeCl₃=100 mL:20 mL:5 g。用 MR5000 型金相显微镜观察拉断的焊接接头纵截面显微组织,

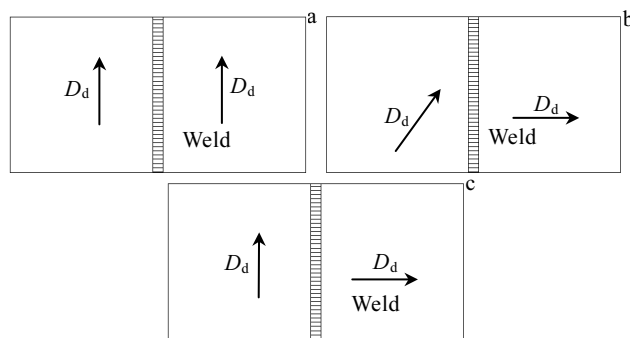


图 1 电子束焊接不同取向母材示意图

Fig.1 Schematic diagrams of base metal with different orientation differences: (a) 0°, (b) 45°, and (c) 90°

表 1 激光增材制造 GH4169 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of GH4169 alloy fabricated by laser additive manufacturing (ω/%)

Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Si	Mn	C	S	P	B	Fe
51.75	19.68	4.91	3.18	0.97	0.63	0.23	0.11	0.034	0.001	0.004	<0.006	Bal.

表 2 真空电子束焊接工艺参数

Table 2 Processing parameters of vacuum electron beam welding

Parameter	Value
Working distance, H/mm	275
Accelerating voltage, U/kV	60
Welding speed/ $mm \cdot min^{-1}$	900
Focusing current, I_f/mA	502
Electron beam current, I_b/mA	35

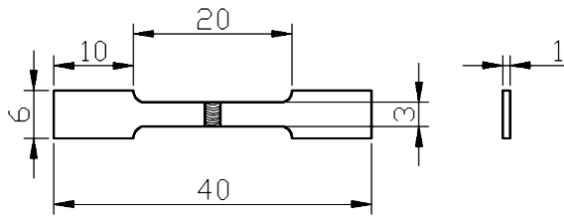


图 2 板状拉伸试样尺寸

Fig. 2 Dimension of plate tensile specimen

利用日立 S-3400N 型扫描电子显微镜对无变形焊缝组织试样中析出物进行观察，配合 EDS 能谱分析确定析出物的相组成。采用 QnessQ10A+显微硬度计对焊缝两侧母材晶体取向差为 0° 、 45° 和 90° 的焊缝进行硬度测量，载荷为 1.98 N，保压时间 10 s。

2 结果与分析

2.1 激光增材制造 GH4169 合金电子束焊焊缝及母材组织

图 3 所示为激光增材制造 GH4169 合金三维立体截面的沉积态金相组织。沿沉积方向连续生长的柱状晶组织是激光增材制造 GH4169 合金的显著特征。对比垂直于激光扫描方向截面（图 3a）和平行于激光扫描方向截面（图 3b）组织发现，粗大柱状晶在整个沉积区域连续生长，可穿越多个沉积层。观察发现，柱状晶生长方向并非严格垂直向上，而是略微偏向激光扫描方向。与激光增材制造过程中熔池凝固时的热量扩散方向有关，激光熔池液态金属凝固时热量通过基材和已形成部分散热的特点使得晶体取向发生一定的倾斜。从柱状晶组织来看，合金具有明显的定向凝固晶体取向关系，择优生长取向明显，与铸件和锻件等普遍存在的细小等轴晶组织明显不同。

图 4 为两侧母材不同晶体取向差激光增材制造 GH4169 合金电子束焊接焊缝截面宏观金相。从图中可看出，两侧母材在激光增材制造过程中的沉积方向具有明显的择优取向。从各图可以看出，焊缝成型良好，焊缝金属组织致密，无明显冶金缺陷存在，焊缝金属致密度明显好于两侧母材。焊缝宏观金相观察发

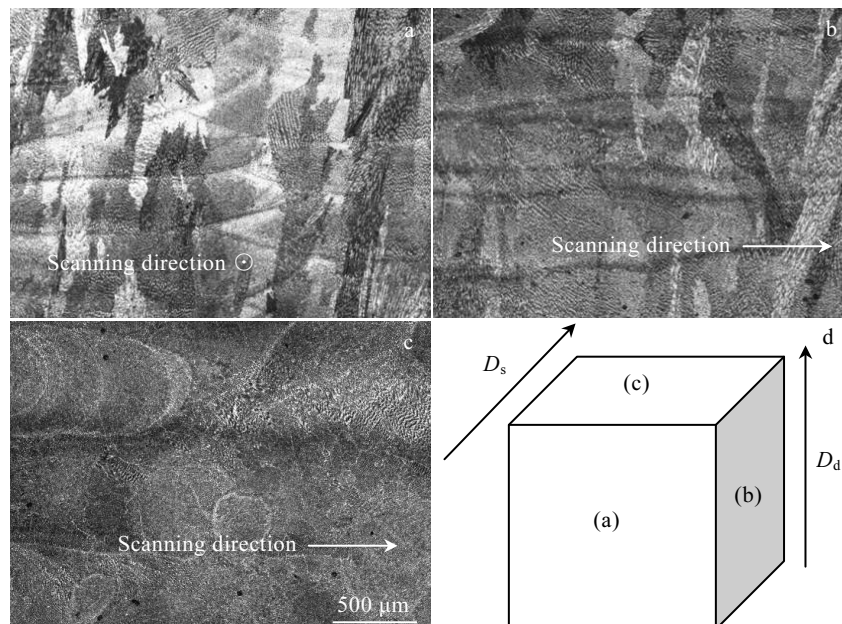


图 3 激光增材制造 GH4169 合金沉积态金相组织

Fig.3 OM microstructures of as-deposited LSF GH4169 superalloy: (a) a section vertical to the laser scanning direction; (b) a section parallel to the laser scanning direction; (c) a section vertical to the deposition direction, as shown in the sketch program (d) (D_s is the laser scanning direction, and D_d is the deposition direction)

现,不同晶体取向差电子束焊接接头中、下 3 个部位组织分布特点明显,焊缝上部轮廓均呈现酒杯状,中部轮廓较规则,下部轮廓呈现尖钉状。焊缝金属与两侧母材间显微组织差别明显,且焊缝上部晶体取向与焊缝中、下部明显不同。除焊缝两侧母材可观察到明显不同的择优取向,焊缝各部位组织分布也不尽相同。为更清楚地观察焊缝上、中、下 3 个部分的组织特征,其焊缝显微组织特征观察结果如图 5~7 所示。

图 5 为激光增材制造 GH4169 合金电子束焊接焊缝上部显微组织。观察可知,焊缝上部主要由柱状晶组成,组织致密,粗大的柱状晶又由许多细小柱状树枝晶组成。图 5a 所示的两侧母材晶体取向差 0° 时有少量显微气孔出现,尺寸在 $20\ \mu\text{m}$ 以下。焊缝金属中柱状晶的生长方向主要与散热方向有关。从焊缝上部轮廓来看,类似酒杯状,由于散热方向垂直于轮廓线并指向母材内部,导致焊缝上部柱状晶取向斜向上指向焊缝中心。比较图 5a、5b 和 5c 中不同晶体取向差焊缝上部组织,可知各试样显微组织相差不大,特征

基本一致。

图 6 为激光增材制造 GH4169 合金电子束焊接焊缝中部显微组织。此部分属于电子束焊接过程中的匙孔位置。由于电子束高能量密度的特点,此处热量散失方向仍垂直于熔合线并指向两侧母材,即大体沿水平方向向两侧母材扩散,这导致此部分液态金属凝固后显微组织中树枝晶大体呈水平方向从两侧母材向焊缝中心生长,如图 6 所示。在熔池金属凝固时,枝晶从熔合线处依托母材晶粒开始形核,利用真空电子束焊接冷却速度快的特点,获得较大过冷度从而快速生长。

当焊缝两侧母材晶体取向差为 0° 时,观察图 6a 焊缝两侧金属组织生长情况,可以看出焊缝组织沿焊缝中心线左右对称。激光增材制造的镍基高温合金主要为树枝晶,单晶生长择优取向一般为 $\langle 001 \rangle$ 方向^[14,15],而焊缝两侧母材组织枝晶间距小而细密,并在局部区域有单晶生长趋势,两条焊缝熔合线与焊缝中心线近似平行,焊缝中心区有等轴晶出现,如图 6a 右上角为相似区域 EBSD 附图,这些等轴晶出现在焊缝中心线

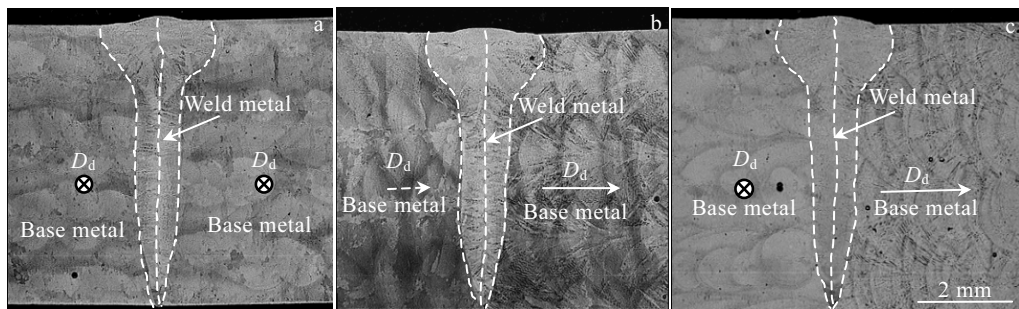


图 4 两侧母材不同晶体取向差激光增材制造 GH4169 合金电子束焊接焊缝截面宏观金相

Fig.4 Macro metallographs of the sections of electron beam welded joint for GH4169 alloy fabricated by laser additive manufacturing with different crystal orientation differences: (a) 0° , (b) 45° (the dotted arrow on the left side of the figure indicates that the D_d direction points into the paper surface with 45°), and (c) 90°

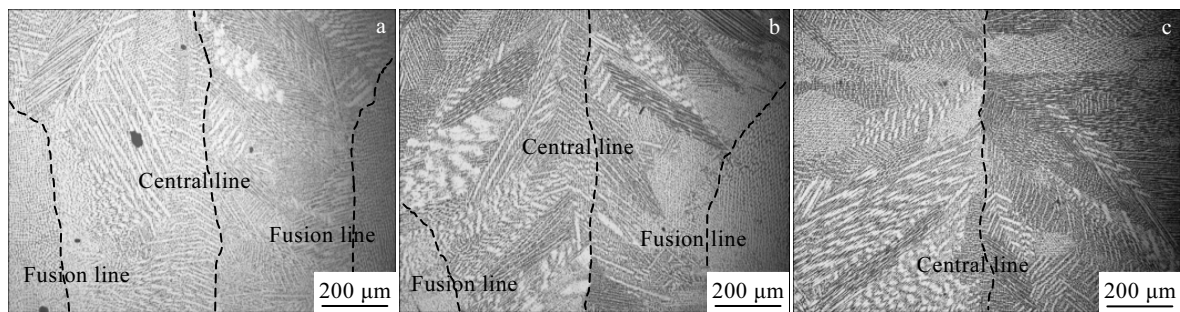


图 5 激光增材制造 GH4169 合金电子束焊接焊缝上部显微组织

Fig.5 Microstructures of the upper part of electron beam welded joint for GH4169 alloy fabricated by laser additive manufacturing with different orientation differences: (a) 0° , (b) 45° , and (c) 90°

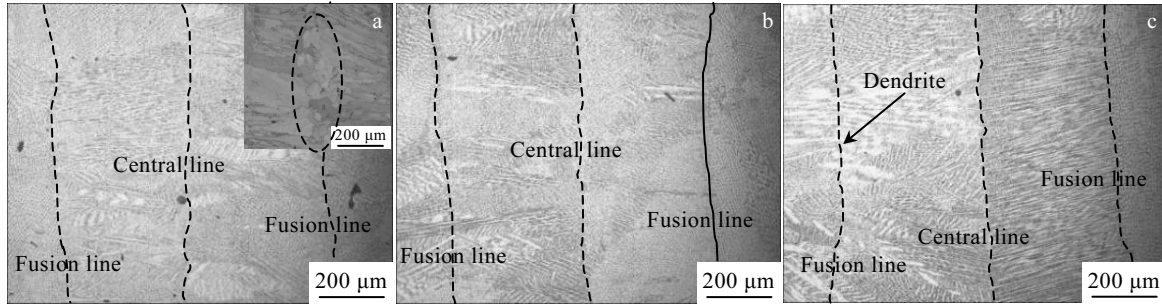


图6 激光增材制造 GH4169 合金电子束焊接焊缝中部显微组织

Fig.6 Microstructures of the middle part of electron beam welded joint for GH4169 alloy fabricated by laser additive manufacturing with different orientation differences: (a) 0° , (b) 45° , and (c) 90°

附近, 呈聚集状态。分析认为, 该区域出现少量等轴晶与焊缝熔池散热条件有关, 在真空电子束焊接过程中, 焊缝熔合线区域散热速度最快, 焊缝中心区域散热相对较慢, 所以焊缝中心区域温度梯度较小。但整个熔池又得到快速冷却, 获得了较大的过冷度, 因此当焊缝中心区域的温度降到结晶温度以下时, 温度梯度小和过冷度大 2 种因素促使焊缝中心区域有少量等轴晶出现。

当焊缝两侧母材晶体取向差为 45° 时, 从两侧焊缝金属的生长过程来看, 一侧的择优取向平行于散热方向, 而另一侧择优取向与散热方向成 45° 夹角, 这将导致两侧焊缝金属在显微结构上出现略微差别。如图 6b 所示, 左侧焊缝的枝晶间距稍大, 枝晶较粗大; 右侧焊缝枝晶间距较小, 枝晶比左侧细小。焊缝左右两侧组织特点出现上述差异, 这是由于晶体长大机制与固-液界面的微观结构有关。比较图 6b 左右两侧熔合线附近焊缝组织, 可明显看出在右侧组织择优取向连续, 此处熔合线较为平直, 熔合线两侧金属枝晶结构连续生长。而左侧熔合线两侧很多枝晶从母材一侧向焊缝内部生长过程中发生明显的晶体取向变化。分析认为, 这种晶体取向的变化产生于该位置不同取向柱状晶向焊缝金属生长时的竞争机制, 即在此过程中那些择优取向与散热方向更接近的枝晶优先得到生长, 这有利于两侧焊缝金属取向差的减小。

图 6c 给出了两侧母材存在 90° 取向差夹角时的电子束焊接焊缝组织。左侧焊缝组织择优取向与散热方向成 90° 夹角, 熔合线两侧金属枝晶呈现出明显的连续生长特征。右侧焊缝金属的择优取向与散热方向平行, 对于具有面心立方晶体结构的镍基高温合金而言, 两个成 90° 取向差的晶向属于同一个晶向族, 即从晶体学上来讲, 在作为形核基底时 2 个成 90° 取向差的

晶向结果是一致的。但是在具体的焊缝金属形核和长大中, 考虑到每个晶粒的晶体取向不同以及多晶晶界的存在等因素, 两者在具体的凝固过程中仍存在差异。观察图 6c, 可见左侧焊缝金属柱状晶尺寸相对较小, 具有典型的多晶和柱状晶特征, 而右侧焊缝金属中柱状晶晶粒尺寸粗大, 具有成片生长的粗大柱状晶趋势。

综上所述, 焊缝两侧不同母材晶体取向差, 可对焊缝组织生长取向产生一定影响。杨森^[16]等人对 DD2 单晶合金进行激光重熔, 研究了基材晶体取向对重熔区微观组织生长方向的影响, 结果表明, 基材晶体取向可对熔池微观组织产生强烈影响, 在枝晶生长过程中, 择优取向比热流的影响程度更大。类比本实验结果, 发现结论相符。

图 7 为激光增材制造 GH4169 合金电子束焊接焊缝下部显微组织。与图 6 相比, 图 7 所示的各焊缝轮廓稍窄, 且组织分布形态更加杂乱。这是由于电子束流在焊缝下部能量衰减, 导致焊缝轮廓变窄, 焊缝两侧熔合线不再近似平行。比较图 7 不同取向显微组织可见, 两侧母材晶体取向夹角为 45° 时焊缝金属组织最为复杂。同时, 45° 取向差试样, 焊缝左侧明显可以看到部分枝晶生长方向发生偏转。而在图 7a 所示焊缝金属及图 7c 所示焊缝右侧所示的 0° 和 90° 取向差试样中可以看到近似 90° 取向差或在图 7c 所示焊缝左侧所示的连续生长的枝晶结构。分析认为, 3 种不同取向差焊缝散热方向在焊缝中部基本相同, 在 0° 和 90° 取向差试样中两侧母材 [001] 取向中总有一个与散热方向平行, 因此得到的组织规则连续。而在 45° 取向差试样中有一侧母材 [001] 取向与散热方向不平行, 且夹角较大, 因此这一侧焊缝金属凝固时势必会受到散热方向和晶体取向影响而发生晶体偏转。

为更详细观察焊缝金属中枝晶结构及沉淀相形

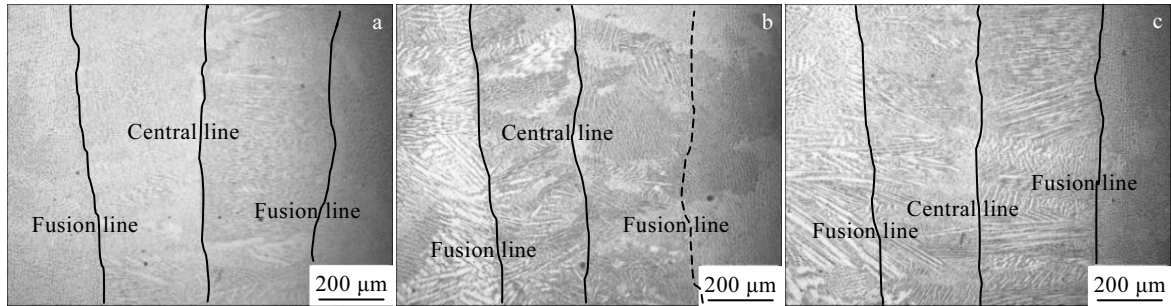


图 7 激光增材制造 GH4169 合金电子束焊接焊缝下部显微组织

Fig.7 Microstructures of the lower part of electron beam welded joint for GH4169 alloy fabricated by laser additive manufacturing with different orientation differences: (a) 0°, (b) 45°, and (c) 90°

貌，对各试样进行扫描电子显微观察，结果如图 8 所示。与激光增材制造 GH4169 合金沉积态显微组织类似，GH4169 合金电子束焊接试样焊缝金属同样是由树枝状 γ 相枝晶以及分布于枝晶间的 γ +Laves 共晶相组成。对枝晶间距进行统计，发现电子束焊接中 γ 枝晶间距仅有 4~7 μm ，明显小于激光增材制造中 γ 枝晶间距，这主要得益于电子束焊接过程中熔池液态金属的强烈对流以及快速的凝固和冷却过程。同时，枝晶间共晶 Laves 相的尺寸和分布也不同，呈颗粒状 (1~2 μm) 或长条状 (宽 1 μm ，长 10 μm 以内)。从 γ 枝晶尺寸和 Laves 相尺寸来看，各试样尺寸相差不大。

图 9 是图 8 中各沉淀相的 EDS 分析结果。由图 9b 中分析结果可以看出，规则的块状析出相有大量 Nb 元素偏聚，并有 C 元素存在，可以断定是碳化物。而图 9c 分析结果中，Nb 元素的原子分数大于 10%，同时还有较多的 Cr、Fe 和 Nb 等合金元素，推断条状析出物为 Laves 相，该结果与席明哲^[17]、卞宏友等^[18] 研究结果一致。图 9a 为激光增材制造 GH4169 合金电

子束焊缝中 Laves 相和碳化物放大图。在 GH4169 合金所含有的各种沉淀相中，Laves 相属于脆性相，常分布于枝晶间，是在熔池金属凝固的最后阶段 $L \rightarrow \gamma + \text{Laves}$ 共晶反应的结果^[19]。

2.2 激光增材制造 GH4169 合金电子束焊接焊缝晶体取向

图 10 所示为激光增材制造 GH4169 合金电子束焊接焊缝中心晶体取向 EBSD 分析欧拉图。在欧拉图中，黑色粗线代表晶界角 $>15^\circ$ 晶界，细线代表晶界角为 $2^\circ \sim 15^\circ$ 范围的晶界，通常定义 $2^\circ \sim 15^\circ$ 为小角晶界， 15° 以上为大角晶界^[20]。图中同一颜色代表同一晶粒取向，不同晶粒取向由不同的颜色表示。

对于焊缝两侧母材晶体取向差为 0° 的焊缝来说，焊缝两侧母材晶体取向平行，此时焊缝组织由于散热方向的影响，柱状晶生长方向与母材晶体取向近似垂直，因此焊缝组织柱状晶是从母材晶体轴向开始形核长大，焊缝组织左右两侧均有利于单晶生长，从而抑制大角度晶界形成。因此焊缝两侧母材 0° 取向差焊缝

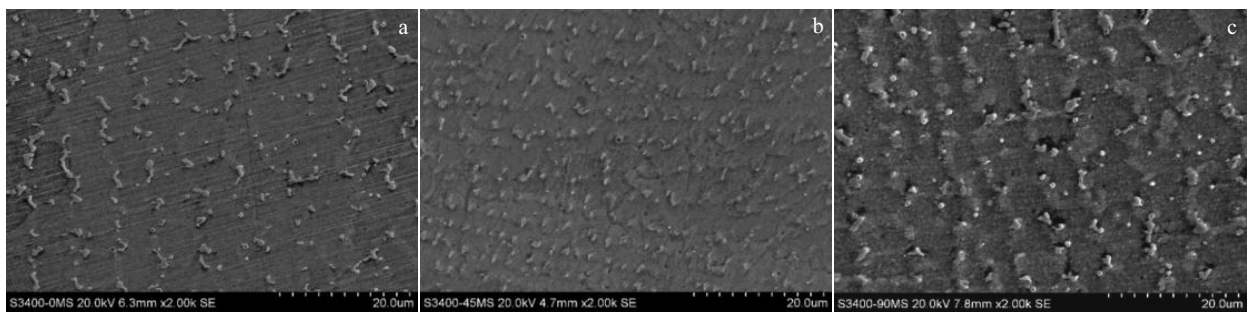


图 8 激光增材制造 GH4169 合金电子束焊接焊缝的 SEM 显微组织

Fig.8 SEM microstructures of electron beam welded joint of GH4169 alloy fabricated by laser additive manufacturing with different orientation differences: (a) 0°, (b) 45°, and (c) 90°

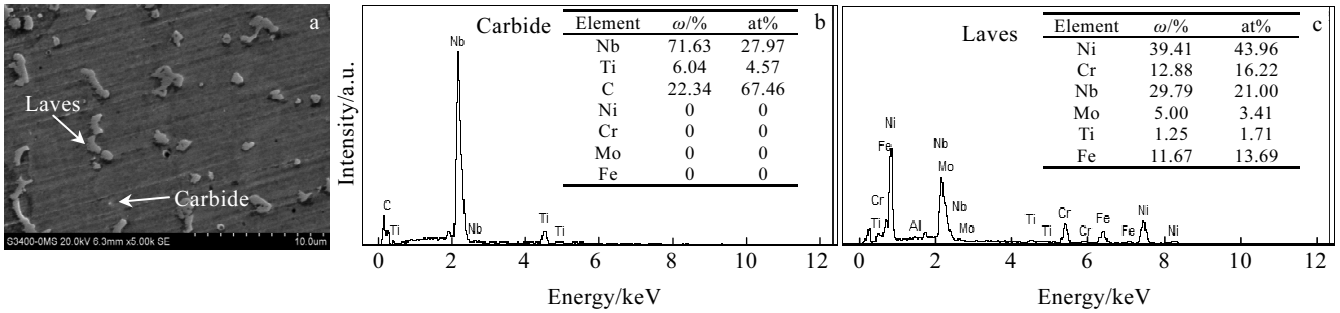


图 9 激光增材制造 GH4169 合金电子束焊接沉淀相 EDS 能谱

Fig.9 Morphology of carbides and Laves phase (a); EDS analysis results of carbide (b) and laves phase (c) of electron beam welded joint of GH4169 alloy fabricated by laser additive manufacturing

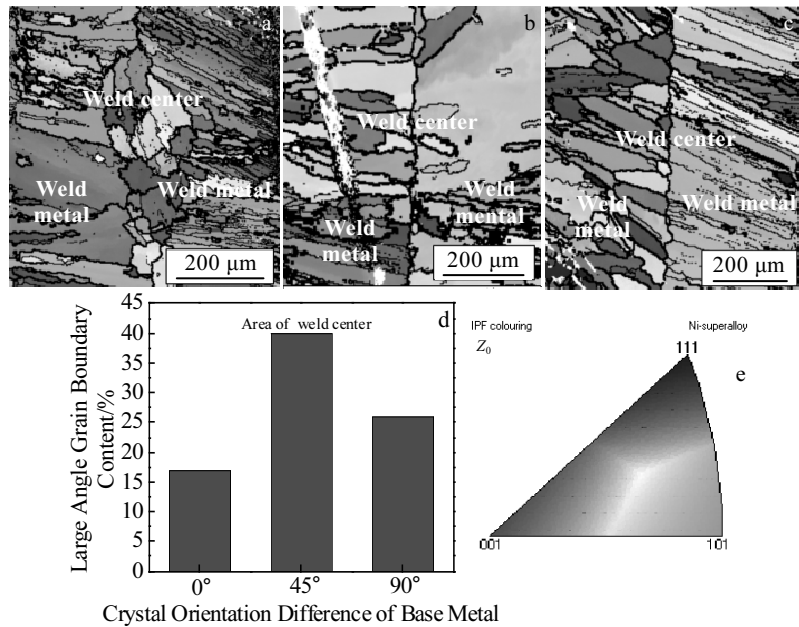


图 10 激光增材制造 GH4169 合金电子束焊接焊缝金属晶体取向 EBSD 分析

Fig.10 EBSD analysis of crystal orientation in electron beam welded joint of GH4169 alloy fabricated by laser additive manufacturing with orientation differences of 0° (a), 45° (b), 90° (c); (d) statistics of large angle grain boundary content in the weld; (e) color standard IPF diagram of sample in Z₀ direction

组织比 45°、90°焊接接头的大角度晶界含量低。

从图 10b 可知，焊缝两侧母材晶体取向差为 45°的焊接接头大角晶界含量最多。分析认为，这是焊缝两侧母材晶体取向差变化导致的。可以推断，焊缝两侧母材晶体取向差影响焊缝组织柱状晶生长取向，使焊缝中心区组织最复杂，因此大角晶界含量最多，使材料韧性比其他状态的焊接接头高。

同理，分析两侧母材晶体取向差为 90°焊缝，虽然焊缝两侧母材晶体取向差发生了变化，但焊缝两侧母材 90°取向差使两者晶体取向分布状态出现轻微差

别，在焊缝母材晶体取向为 0°~0°一侧时，焊缝组织柱状晶可以沿着母材柱状晶尖端形核长大，导致该侧焊缝组织呈现多晶生长。在焊缝母材晶体取向为 0°~90°一侧时，该侧焊缝组织柱状晶从母材晶体轴向开始形核长大，容易促进单晶生长，而多晶组织比单晶组织含有更多的晶界角，因此，两侧母材晶体取向差为 90°比 0°的整体焊缝组织形成更多的大角晶界。

图 11 为两侧母材不同晶体取向差焊缝熔合线处晶体取向 EBSD 分析结果。本扫描区关注焊接接头中焊缝-母材晶体取向为 0°~0°、0°~45°和 0°~90°一侧，

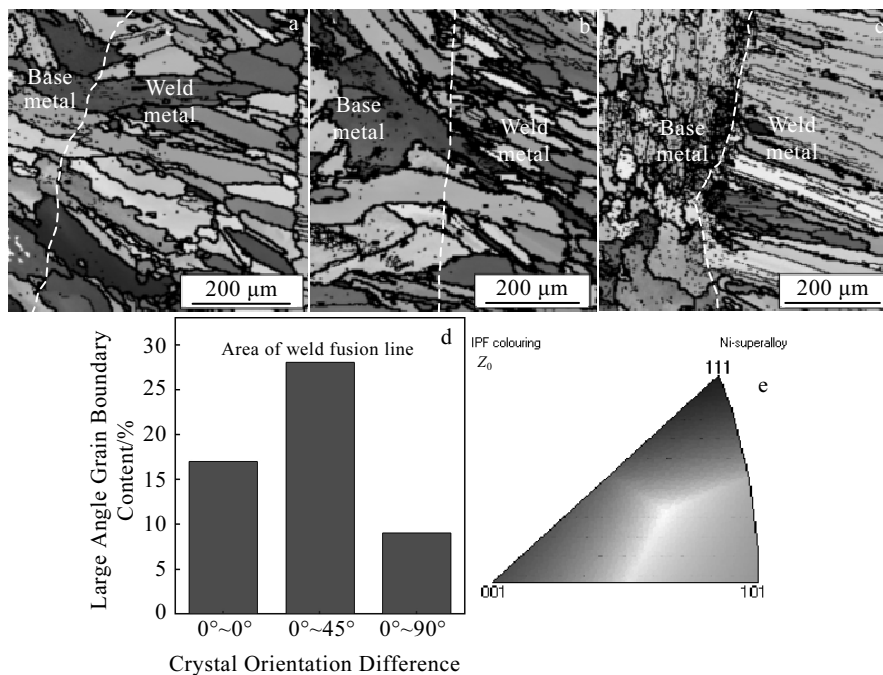


图 11 激光增材制造 GH4169 合金电子束焊缝熔合线处晶体取向 EBSD 分析

Fig.11 EBSD analysis of crystal orientation at the fusion line of electron beam welded joint for GH4169 alloy fabricated by laser additive manufacturing with orientation differences of 0° (a), 45° (b), 90° (c); (d) statistics of large angle grain boundary content; (e) color standard IPF diagram of sample in Z₀ direction

如图 11d 所示，在扫描区域内，大角晶界含量按 0°~90°，0°~0°和 0°~45°晶体取向差依次增高。

观察图 11a 焊缝熔合线区域晶体取向 0°~0°一侧，焊缝柱状晶在母材柱状晶尖端继续形核长大，观察图 11b 焊缝熔合线区域晶体取向 0°~45°一侧，焊缝柱状晶同样从母材晶体尖端形核长大。分析认为，这是母材和焊缝有 2 个不同的晶体择优取向导致的，母材与焊缝柱状晶本身具有取向差，促进更多大角度晶界形成。如图 11c 焊缝熔合线区域晶体取向 0°~90°一侧，焊缝组织柱状晶从母材晶体轴向形核长大，母材为焊缝组织单晶生长提供有利条件，从而使晶粒数量减少，晶界角数量也随之减少。因此，在扫描区域内，大角度晶界含量按 0°~90°，0°~0°，0°~45°晶体取向差依次增高。

2.3 两侧母材晶体取向对力学性能的影响

对母材和焊缝两侧母材不同晶体取向差的焊接态试样进行室温拉伸测试，所有试样的拉伸性能数据如表 3 所示。结果表明，母材及焊缝两侧母材晶体取向差为 0°、45°和 90°试样的抗拉强度依次降低，分别为 737.2、721.8、720.7 和 702 MPa，其中 0°和 45°晶体取向差试样抗拉强度比较接近。各拉伸试样的断裂位置如表 3 所列。

图 12 为激光增材制造 GH4169 合金不同取向差母材电子束焊接试样应力-应变曲线。结合表 3 中的拉伸性能数据，母材、0°晶体取向差、45°晶体取向差和 90°晶体取向差试样的抗拉强度值依次减小。主要原因是焊缝两侧激光增材制造 GH4169 合金母材晶体取向差的变化改变了金属组织的受力方向，而大角度晶界阻碍裂纹扩展，使材料韧性得以提高^[21]。聂文金等人^[22]根据晶体学取向分析认为，裂纹扩展主要受大角度晶界抑制，大角度晶界可通过增加裂纹扩展路径从而提高材料韧性。小角度晶界的晶体偏转角度小，使裂纹很容易沿着下一个晶界扩展从而降低材料韧性。通常认为对于激光增材制造 GH4169 合金，晶体取向平行于沉积方向抗拉能力最强，垂直于沉积方向抗拉能力最弱，因此随着两侧母材晶体取向差的增大，接头抗拉强度依次减小，但减小幅度不大。

对于各试样的延伸率而言，0°取向差焊缝两侧含有等量的大角度晶界，而大角度晶界有利提高材料的韧塑性，因此，在试样拉伸过程中 0°晶体取向差的焊接试样塑性较好。焊缝两侧母材晶体取向差为 45°的焊缝，由于某一单侧区域的施密特因子为 0.5，最有利于滑移，焊缝的单侧塑韧性较好，从而导致整个焊接接头的延伸率相对较高。而晶体取向差为 90°的焊缝

表 3 不同晶体取向差激光增材制造 GH4169 合金电子束焊接头的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of electron beam welded joint of GH4169 alloy fabricated by laser additive manufacturing with different orientation differences

Sample type	Tensile strength/MPa	Fracture location	Deformation/%
Base metal	737.2	Base metal	8.5
0°	721.8	Weld center	10
45°	720.7	HAZ	10
90°	702	Weld center	8.6

左右两侧组织不对称, 一侧大角度晶界数量多, 而另一侧大角度晶界数量少, 小角度晶界数量多于大角度晶界数量。某一单侧大角度晶界含量最低, 有利于裂纹扩展, 因此延伸率较低。此时, 位于 γ 相枝晶间的 Laves 相由于其脆硬性, 大量位错塞积于晶界处, 造成应力集中, 容易导致晶界开裂, 在应力载荷作用下形成微裂纹并不断扩展, 最终造成整个焊接接头失效, 在拉伸过程中断裂。

图 13 为不同晶体取向的 GH4169 合金电子束焊接接头硬度分布。图中左上角插图给出了硬度测试位置。3 种晶体取向差的电子束焊接接头显微硬度接近, 其中焊缝区比母材区硬度低; 焊缝两侧母材区的显微硬度分布不规则, 硬度值相似; 而焊缝中部硬度比焊缝上部区域稍高。这与 Gao 等人^[9]的研究结果一致。分析认为, 相比于母材激光增材制造过程中的激光熔凝, 经过电子束熔凝过程焊缝金属具有更高的凝固和冷却速率, 焊缝显微组织更加致密。Sato 等^[23]认为, 显微硬度与晶粒大小之间成一定函数关系, 晶粒尺寸越小, 硬度值越大, 但实验结果与推导结论不符。Gao 等人^[9]研究发现, 真空电子束焊接 Inconel 718 合金的焊接接

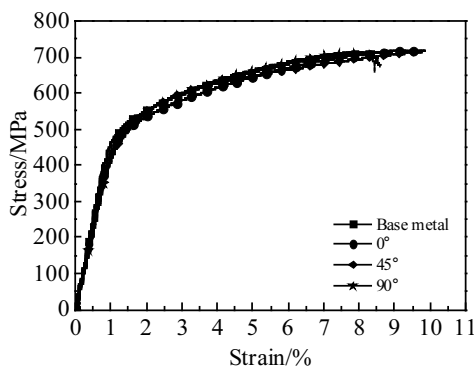


图 12 激光增材制造 GH4169 合金不同取向差母材电子束焊接试样应力-应变曲线

Fig.12 Stress-strain curves of electron beam welded joint of GH4169 alloy fabricated by laser additive manufacturing with different orientation differences

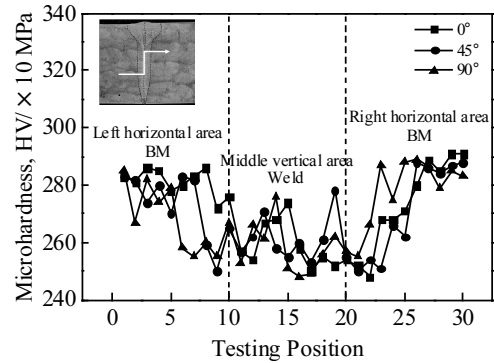


图 13 激光增材制造 GH4169 合金不同取向差母材电子束焊接接头显微硬度分布

Fig.13 Microhardness variations of electron beam welded joint of GH4169 alloy fabricated by laser additive manufacturing with different orientation differences

头晶间析出相 (δ 相) 的化学成分为 Ni_3Nb , 与晶内析出相 (γ'' 相) 的化学成分一致。同时, Nb 元素被 δ 相 (Ni_3Nb)、 γ'' 相 (Ni_3Nb) 和 γ' 相 ($Ni_3(Al, Ti, Nb)$) 共同吸收。材料中 Nb 元素含量不变, 一旦其中任何一个强化相增加, 其他相就会减少, 而焊缝中心的晶间析出 (δ 相) 大于热影响区和母材, 说明焊缝中心的晶内析出相 (γ'' 相和 γ' 相) 小于热影响区和母材。所以热影响区和母材的析出强度远优于焊缝中心的析出强度, 使热影响区和母材的显微硬度较高。焊缝中心区域比焊缝上部的硬度大, 分析认为, 根据焊缝酒杯状轮廓, 熔池金属凝固时, 焊缝上部熔融金属比焊缝中部多, 因此散热较慢, 导致晶粒较粗大, 导致显微硬度较低。

为探究焊缝两侧母材晶体取向差对焊缝受载变形过程的影响, 对拉伸变形的各焊接接头进行显微组织分析, 金相组织如图 14 所示。从图 14a~14c 中观察到, 焊缝组织柱状晶生长和母材取向差有关。观察图 14a 焊缝母材取向差 $0^\circ \sim 0^\circ$ 一侧, 该区域没有出现微裂纹或其他缺陷, 焊缝熔合线竖直, 说明此区域变形均匀性较好, 几乎所有晶体取向分布一致, 在拉伸过程中, 同时扭转使组织开始塑性变形。

观察图 14b 焊缝母材晶体取向差 $0^\circ \sim 45^\circ$ 一侧, 发现图 14b 母材柱状晶组织与图 14a 相比呈现明显 45° 取向差, 进而导致焊缝组织柱状晶也略微呈一定倾斜角度生长, 焊缝组织无缺陷。图 14b 中, 枝晶变细长, 这是因为焊接接头在拉伸过程中, 母材组织柱状晶择优取向与轴向拉力成 45° 角, 此时母材组织为软取向分布, 最有利于滑移发生, 而焊缝组织枝晶处于硬取

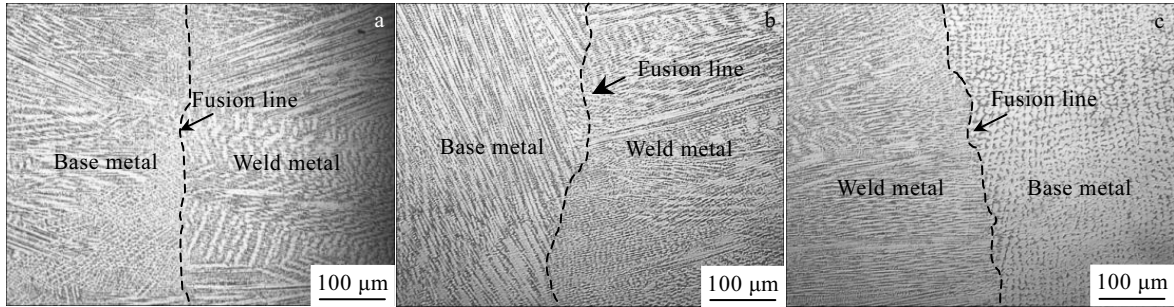


图 14 激光增材制造 GH4169 合金不同取向差母材电子束焊缝熔合线区域拉伸变形的金相组织

Fig.14 OM microstructures during tensile deformation near the fusion line in electron beam welded joint of GH4169 alloy fabricated by laser additive manufacturing with different orientation differences: (a) 0°~0° side, (b) 0°~45° side, and (c) 0°~90° side

向分布，不利于启动滑移系，因此，焊缝熔合线弯曲程度较大，母材组织的变形协调性较好，但整个焊接接头的变形均匀性较差。

观察图 14c 焊缝母材晶体取向差 0°~90°侧，发现焊缝组织明显比母材组织更细密，焊缝组织枝晶变细长，焊缝组织择优取向与轴向拉力平行，而母材组织择优取向与轴向拉力垂直。分析认为，这是由于枝晶轴向比横向的抗拉性能好导致。在拉伸过程中，2 种取向的晶体没有同时发生扭转变形，焊缝和母材晶体呈现硬取向分布，难以启动滑移系，因此焊缝熔合线会发生略微弯曲。建立图 15 所示的晶体取向与塑性变形关系示意图来解释实验结果。如图 15 所示，设置截面积为 A 的圆柱体为多晶体，受轴向拉力 F ， F' 作用，其中以截面 B 为界，上部母材晶体择优取向为 OT ，

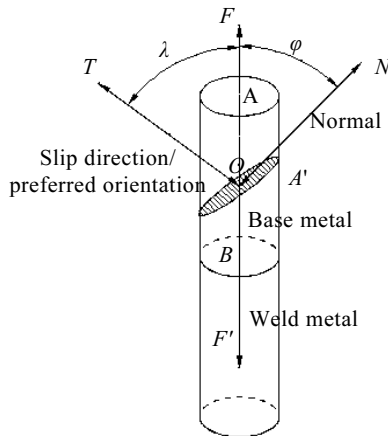


图 15 晶体取向与塑性变形关系

Fig.15 Diagram of relationship between crystal orientation and plastic deformation^[24]

下部焊缝晶体择优取向为 OF' 固定不变，拉伸轴 (FF') 与滑移面 (A') 及滑移方向 (OT) 的夹角分别为 φ 和 λ ，其中 φ 为母材与焊缝的晶体取向差。

将焊接接头拉伸试样近似为圆柱体，拉伸载荷 F 在滑移方向的分应力为 $F \cos \lambda$ ，滑移面的面积为 $A / \cos \varphi$ ，则 F 在滑移方向上的切分应力为：

$$\tau = \frac{F \cos \lambda}{A / \cos \varphi} = \frac{F}{A} \cos \varphi \cos \lambda = \sigma_0 \cos \varphi \cos \lambda \quad (1)$$

外载荷 F 一定，当 $\sigma_0 = \sigma_s$ 时，晶面开始滑移，此时滑移面的分切应力为临界分切应力

$$\tau_k = \sigma_s \cos \varphi \cos \lambda \quad (2)$$

令 $m = \cos \varphi \cos \lambda$ ， m 称为施密特因子， m 越大，切分应力越大，越有利于滑移，其中：当 $\varphi = 45^\circ$ 时， $m = \cos \varphi \cos(90^\circ - \varphi) = \frac{1}{2} \sin^2 \varphi = 0.5$ 最大；当 $\varphi = 0^\circ$ 或 90° 时， $m = \cos \varphi \cos(90^\circ - \varphi) = \frac{1}{2} \sin^2 \varphi = 0$ 最小。

根据上述焊缝晶体取向分析内容，当滑移面法线、滑移方向与外力轴共处同一平面时，则 $\varphi = 45^\circ$ ，此时施密特因子 $m = 0.5$ ，为最大，晶体取向最有利于滑移，金属组织大角晶界数量最多，称为软取向。当外力与滑移面平行 ($\varphi = 90^\circ$) 或垂直 ($\varphi = 0^\circ$) 时，施密特因子 $m = 0$ ，为最小，晶体无法滑移，金属组织大角晶界数量最少，这种晶体取向称为硬取向。

综上所述，焊缝两侧母材的晶体取向能够影响焊缝组织柱状晶的分布状态，进而使焊缝两侧母材不同晶体取向差的焊接接头的力学性能产生差异。不仅如此，根据焊缝母材组织的晶体取向分布状态，还能够确定焊接接头在拉伸过程中的断裂位置，如图 16 焊缝两侧母材不同取向差焊接接头断裂金相图。

图 16 所示为两侧母材不同晶体取向差焊接试样室温拉伸断裂试样纵截面显微组织。从图 16a~16c 中可以看出, 焊缝熔合线和焊缝中心线均呈弯折状, 与拉伸前的平直形状对比明显, 这说明焊接接头在拉伸过程中焊缝各微小区域的变形并不是协调一致的。如上所述, 焊缝两侧母材晶体取向差影响焊缝柱状晶组织分布状态, 焊缝组织各个区域晶体取向不是绝对一致, 这就导致焊缝组织在给定外力作用下, 各区域不能同时变形。在拉伸变形过程中, 有利于塑性变形的晶粒, 当其切分应力最先达到临界切分应力时, 首先发生变形, 而处于硬取向的各晶粒, 由于晶粒取向不利于滑移的发生, 塑性变形难以发生。因此, 在整个焊缝组织拉断后, 晶体取向越复杂, 焊缝中心线和熔合线的弯曲程度越大。

观察图 16a 所示的两侧母材 0° 晶体取向差焊缝断后纵截面, 发现此时试样断裂发生在焊缝中心区域, 分析认为, 这与焊缝组织中晶体取向分布状态有关。

当 $\varphi=90^\circ$ 时, 与本实验焊缝两侧 0° 晶体取向差的情况相符, 此时 $m=0$, 焊缝两侧母材晶体均为硬取向分布, 而焊缝中心区域组织在熔池金属凝固过程中,

受温度梯度分布不均、电子束流搅拌的影响, 导致晶体取向呈现软取向的趋势, 有利于滑移发生, 对于全部焊缝区域而言, 在同等载荷作用下, 焊缝中心区域首先发生断裂, 如图 16a 所示。

同理, 当焊缝两侧母材为 45° 晶体取向差时, 在焊缝母材晶体取向差为 0°~45° 一侧的母材区, 施密特因子相比焊缝其他任意区域都大, $\varphi=45^\circ$, $m=0.5$, 母材处晶体为软取向分布, 最有利于滑移产生; 而在焊缝两侧母材晶体取向差 0°~90° 一侧, 母材处晶体取向为硬取向, $\varphi=90^\circ$, $m=0$, 晶体难以滑移, 在同等载荷作用下, 焊接接头断裂发生在母材处, 如图 16b 所示。

当焊缝两侧母材为 90° 晶体取向差时, 在焊缝母材晶体取向差 0°~0° 一侧, $\varphi=0^\circ$, $m=0$, 母材处晶体取向为硬取向, 无法滑移; 在焊缝母材晶体取向差为 0°~90° 一侧, $\varphi=90^\circ$, $m=0$, 母材晶体取向也为硬取向, 无法滑移, 而焊缝中心区晶体相比两侧会呈现软取向分布趋势, 在同等载荷下, 断裂发生在焊缝中心区域, 如图 16c 所示。

图 17 所示为两侧母材不同晶体取向差焊缝室温

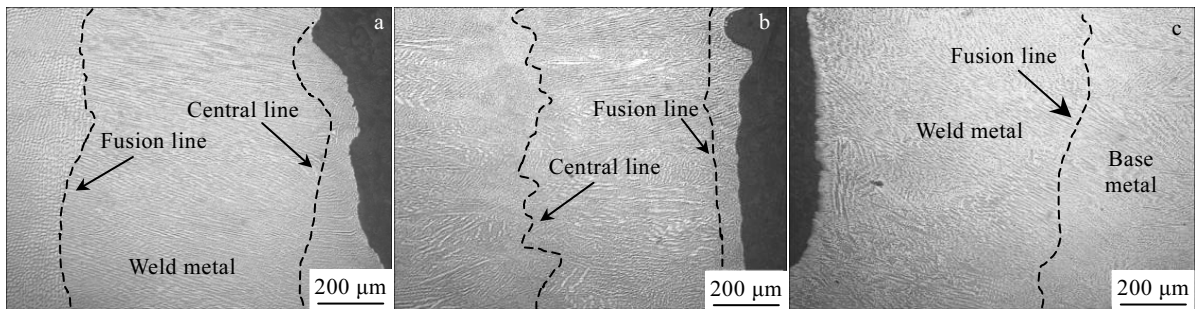


图 16 焊缝两侧母材不同取向差焊接接头断口纵截面组织

Fig.16 Fracture section microstructures of welded joint with different orientation differences of base metal on both sides of the weld: (a) 0°, (b) 45°, and (c) 90°

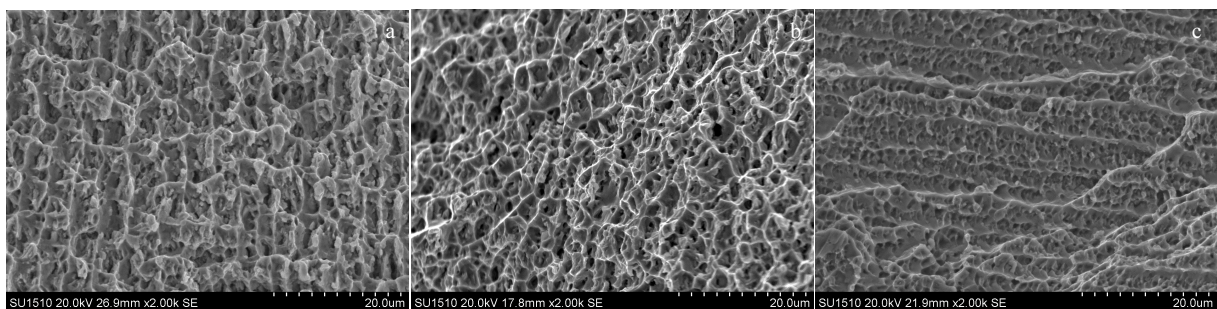


图 17 焊缝两侧母材不同取向差焊接接头断口形貌

Fig. 17 Fracture morphologies of welded joint with different orientation differences of base metal on both sides of the weld: (a) 0°, (b) 45°, and (c) 90°

拉伸试样断裂形貌。如图 17a 所示, 韧窝和撕裂棱呈明显的取向性排列, 并分布在接头的整个断口表面, 断口形貌呈明显的韧性断裂特征。虽然焊缝枝晶取向和受力方向近似平行, 但是局部仍能看到规则排列的韧窝形貌。从图 17b 发现, 因为 45°晶体取向差焊缝试样断裂在母材热影响区 (HAZ) 附近, 母材具有均匀的晶粒尺寸, 且没有焊缝组织中脆性 Laves 相的存在, 此时韧窝尺寸均匀, 无明显取向分布特征。图 17c 显示此时试样断口韧窝取向更加明显, 并具有解理断裂特征, 韧窝小且浅, 这与其较低的塑性对应。

综上所述, 焊缝两侧母材晶体取向差不仅影响焊缝枝晶分布状态, 在应力载荷作用下, 还决定断口发生位置和断口形貌。

3 结 论

1) 真空电子束焊接激光增材制造的 GH4169 合金, 焊缝组织主要由枝晶和少量等轴晶组成。GH4169 合金电子束焊缝组织的枝晶有明显择优取向, 焊缝组织依托母材晶体连续生长, 焊缝枝晶择优取向随母材晶体取向的变化而变化。0°、45°和 90°3 种母材晶体取向差的焊缝中心区和焊缝熔合线区 (0°~0°、0°~45°和 0°~90°) 的大角度晶界均先增多后减少。

2) 3 种母材晶体取向差的焊接接头拉伸性能按 0°、45°和 90°依次降低, 抗拉强度分别为 721.8、720.7 和 702 MPa, 而母材抗拉强度最好, 为 732.7 MPa。3 种母材晶体取向差的焊缝组织 HV 硬度值相似, 均在 2650 MPa 上下小幅波动。

3) 焊接接头拉伸变形均匀性和断裂位置均与焊缝两侧母材晶体取向差有关, 3 种母材晶体取向差的焊接接头变形均匀性按 0°、45°和 90°依次降低, 施密特因子越大的区域, 越容易导致断裂, 断裂位置依次为焊缝区、母材区和焊缝区。

参考文献 References

- [1] Liu Fencheng(刘奋成), Lin Xin(林 鑫), Zhao Weiwei(赵卫东) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(9): 1519
- [2] Gu Y F, Zhu L, Xu Z F. *Materials Letters*[J], 2018, 217(15): 159
- [3] Lin Xin(林 鑫), Huang Weidong(黄卫东). *Materials China*(中国材料进展)[J], 2015, 34(9): 684
- [4] Huang Weidong(黄卫东). *Laser Solid Forming*(激光立体成形)[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 15
- [5] Griffiths V, Scanlan J P, Eres M H *et al. European Journal of Operational Research*[J], 2019, 273(1): 132
- [6] Hideki K, Toshi T I. *Journal of the Japan Society of Powder & Powder Metallurgy*[J], 2019, 66(2): 89
- [7] Sang S, Dong L, Chaoran W *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2019, 768(10): 31
- [8] Sujai S, Devendranath R K. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 54(1): 111
- [9] Gao Peng, Zhang Kaifeng, Zhang Binggang *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21(S2): 315
- [10] Kwon S I, Do J H, Chang Y *et al. Journal of Korean Institute of Metal and Materials*[J], 2016, 54(1): 29
- [11] Kwon S I, Bae S H, Do J H *et al. A Physical Metallurgy and Materials Science*[J], 2016, 47A(2): 777
- [12] Mei Yunpeng, Liu Yongchang, Liu Chenxi *et al. Materials & Design*[J], 2016, 89(1): 964
- [13] Liu F C, Lyu F Y, Lin F G *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2020, 9(5): 9753
- [14] Yang Chubin, Liu Lin, Zhao Xinbao *et al. Progress in Natural Science: Materials International*[J], 2012, 22(5): 407
- [15] Zhang Jun(张 军), Huang Taiwen(黄太文), Liu Lin(刘 林) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2015, 51(10): 1163
- [16] Yang Sen(杨 森), Hang Weidong(黄卫东), Liu Wenjin(刘文今) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2001, 37(6): 571
- [17] Xi Mingzhe(席明哲), Zhou Wei(周 玮), Shang Junying(尚俊英) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2017, 53(2): 239
- [18] Bian Hongyou(卞宏友), Zhao Xiangpeng(赵翔鹏), Qu Shen(曲 伸) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2016, 43(1): 93
- [19] Guo Zhanying(郭占英), Liu Yongjun(刘拥军), Fang Haipeng(方海鹏). *Materials Science and Technology*(材料科学与工程)[J], 2019(12): 17
- [20] Jia Shujun(贾书君), Liu Qingyou(刘清友), Li Ba(李 拔). *Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2016, 41(4): 197
- [21] Ma Cong(马 聪), Liu Feng(刘 峰), Lian Jingbao(连景宝) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2015, 40(10): 49
- [22] Nie Wenjin(聂文金), Shang Chengjia(尚成嘉), You Yang(由洋) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2012, 48(7): 797
- [23] Sato Yutaka S, Mitsunori Urata, Hiroyuki Kokawa *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2003, 354(10): 361
- [24] Liu Zhien(刘智恩). *Fundamentals of Materials Science*(材料科学基础)[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2013: 218

Microstructure and Mechanical Property of Electron Beam Welded Joint of GH4169 Alloy with Different Crystal Orientations Fabricated by Laser Additive Manufacturing

Liu Fencheng¹, Chen Yue¹, Xu Yang², Li Chunyu¹, Liu Fenggang¹, Li Qiuge²

(1. National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Electron beam welding experiments of laser additive manufactured GH4169 alloy with different crystal orientation differences (0° , 45° , and 90°) were conducted, and the microstructure and mechanical properties of the weld metal under different crystal orientations of the parent metals on both sides were analyzed. The results show that the dendrites of weld structure have obvious preferential orientation, and the weld structure continuously grows based on the base metal crystal. With the increase of the crystal orientation difference (0° , 45° , and 90°), the content of the large-angle grain boundary in the central area of the weld and the fusion line area of the weld increases first and then decreases. The tensile test results show that the tensile strength of the welded joint decreases as the crystal orientation difference increases, which are 721.8, 720.7 and 702 MPa respectively, and they are all lower than that of the base metal (737.2 MPa). The HV hardness values of the weld areas with different orientation differences (0° , 45° and 90°) fluctuate slightly at 2650 MPa. The plastic deformation of the weld metal is affected by the crystal orientation of each region of the weld. It has the same distribution trend as the large-angle grain boundary content. The more the soft-oriented crystal content in the structure, the greater the metal structure deformation. The greater the degree of bending of the central line and the fusion line of the weld metal, the stronger the plasticity of the welded joint.

Key words: GH4169 alloy; laser additive manufacturing; electron beam welding; crystal orientation

Corresponding author: Liu Fencheng, Ph. D., Associate Professor, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, Tel: 0086-791-83863028, E-mail: fencheng999@163.com