

Al-Si焊丝对冷金属过渡焊接PBF-LB/M AlSi10Mg合金接头组织与力学性能的影响

乔久通¹, 武德凡¹, 崔丽^{1,2}, 马利霞¹, 吴旭¹, 郭星晔¹, 贺定勇^{1,2}

(1. 北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124)

(2. 北京工业大学 材料循环低碳再生全国重点实验室, 北京 100124)

摘要: 采用ER4043 (Al-Si5) 和ER4047 (Al-Si12) 2种焊丝对激光粉末床熔融 (powder bed fusion laser beam/metal, PBF-LB/M) 成形AlSi10Mg合金薄板进行冷金属过渡 (cold metal transfer, CMT) 对接焊接试验, 研究了2种Al-Si焊丝对焊缝成形、气孔特征、微观结构和接头力学性能的影响。结果表明, 添加ER4043焊丝可降低焊缝气孔率并减小气孔尺寸, 而添加ER4047焊丝则表现出更优异的接头力学性能, 其接头的抗拉强度达211.7 MPa, 较ER4043焊丝提升了6.7%, 且焊缝的平均显微硬度 (76.8 HV) 较ER4043焊丝焊缝提升了15.5%, 表明高Si含量的ER4047焊丝更有利于获得综合性能优异的焊接接头。微观组织分析表明, 添加ER4047焊丝接头强度的提升机制主要在于焊缝的固溶强化、细晶强化、织构强化、Si相的析出强化以及共晶Si网的承载效应对接头强度的贡献。

关键词: PBF-LB/M AlSi10Mg合金; CMT焊接; ER4043; ER4047; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG456.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)08-2017-11

1 引言

激光粉末床熔融 (powder bed fusion laser beam/metal, PBF-LB/M) 是增材制造 (additive manufacturing, AM) 技术之一, 能够制造复杂的三维结构零件^[1-2], 并获得高性能、高致密度的金属零件^[3]。PBF-LB/M技术具有极强的发展前景, 在机械、生物医疗和航天航空等领域, 发挥着越来越重要的作用^[4]。然而, PBF-LB/M成形件的尺寸受到成形腔室的限制, 无法直接一次成形大尺寸结构件。同时, 由于原料粉末的使用量较大, 导致一次成形成本较高^[5]。此外, PBF-LB/M工艺中的残余应力较大, 且随着成形件尺寸的增大, 残余应力显著增加, 导致构件变形甚至开裂^[6]。因此, 采用焊接技术将PBF-LB/M件连接以满足大尺寸结构件的应用成为必然需求。此外, 采用焊接技术进行有效修复, 恢复使用性能, 可以显著节省成本和时间^[7]。

AlSi10Mg合金属Al-Si合金系, 广泛应用于航空航天和车辆工程等领域关键零部件的生产制造^[8-9]。目前, 已有的一些尝试使用熔焊工艺连接PBF-LB/M Al-Si合金的研究表明^[10-11], AlSi10Mg合金存在突出焊缝气孔敏感性的问题^[12]。这是由于有着较高氢含量的PBF-LB/M AlSi10Mg母材在焊接过程中进入熔池^[13], 而

焊接过程中冷速较快, 熔池中产生的氢气泡无法及时逸出而产生大量气孔。为抑制气孔的产生, 减小焊缝的稀释率降低熔池中氢含量是关键。除了调整焊接参数外, 使用适当的填充金属来改性焊缝金属的化学成分, 也是降低气孔率的有效手段之一。

在焊接过程中, 热输入对母材的熔化量具有重要影响。冷金属过渡 (cold metal transfer, CMT) 焊接是一种改进的熔化极惰性气体保护电弧焊 (metal inert gas welding, MIG), 与传统的MIG焊相比, 具有低热输入、低飞溅、低稀释率和良好的间隙适应性等特点^[6-7]。此外, 使用填充焊丝可以改变焊缝的成分和微观组织结构^[14]。在铝合金焊接中, Al-Si焊丝应用广泛, 具有高强度、良好塑性和优异的耐腐蚀性能^[15], 且其拥有较好的流动性, 可以降低铝合金焊接热裂纹的敏感性^[16]。

本研究选用了铝合金焊接应用广泛的ER4043 (Al-Si5) 和ER4047 (Al-Si12) 2种Al-Si焊丝, 进行了PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金薄板CMT对接焊接试验, 重点探究了2种焊丝不同Si含量对焊缝成形、气孔特征、微观组织及接头力学性能的影响规律, 旨在为PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金CMT焊接技术的工程应用提供理论基础。

收稿日期: 2025-08-21

基金项目: 国家自然科学基金 (52271018)

作者简介: 乔久通, 男, 1999年生, 硕士, 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124, E-mail: qiao2@emails.bjut.edu.cn

2 实验

焊接试验的母材为PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金,其尺寸规格为50 mm×30 mm×3 mm。PBF-LB/M成形过程在惰性氩气保护下进行,氧含量保持在200 μL/L以下,粉末床温度预热至150 °C。在PBF-LB/M成形过程中,每一层的激光扫描路径与前一层旋转67°。使用Image-Pro Plus软件,通过金相法计算样品的相对密度。优化后PBF-LB/M工艺参数:激光功率为300 W,扫描速度为1.0 m/s,扫描间距为0.13 mm,层厚为40 μm。CMT焊接用的ER4043和ER4047 2种Al-Si焊丝直径均为1.2 mm。母材及焊丝的化学成分如表1所示。

焊接前对PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金试样表面进行机械打磨,在机械打磨后进行化学清洗,以去除表面氧化层。化学清洗是采用8%~10%(质量分数)的氢氧化钠溶液在60 °C下清洗6~8 min,再用35%~45%(体积分数)的硝酸溶液在室温下清洗4~6 min。

焊接采用TransSynergic 5000型CMT焊机与ABB IRB 4600机械手构成的焊接系统。CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金示意图如图1所示。其中,接头采用对接形式,坡口角度为30°,坡口间隙为1 mm。基于初步焊接工艺参数试验,获得了全熔透接头的优化焊接工艺参数:焊接电流为80 A,焊接电压为12.5 V,送丝速度为5.6 m/min,焊接速度为8 mm/s。

焊接后,接头经线切割与冷镶处理,随后通过机械研磨、抛光及Keller试剂(HF:HCl:HNO₃:H₂O=1:1.5:2.5:95,

表1 母材及焊丝化学成分

Table 1 Chemical composition of the base metal (BM) and filler wires (wt%)

Material	Si	Mg	Fe	Mn	Ti	Zn	Al
PBF-LB/M AlSi10Mg	10.51	0.39	0.15	0.02	0.14	0.01	Bal.
ER4043	5.11	0.09	0.35	0.06	0.02	0.03	Bal.
ER4047	12.31	0.04	0.41	0.07	0.03	0.04	Bal.

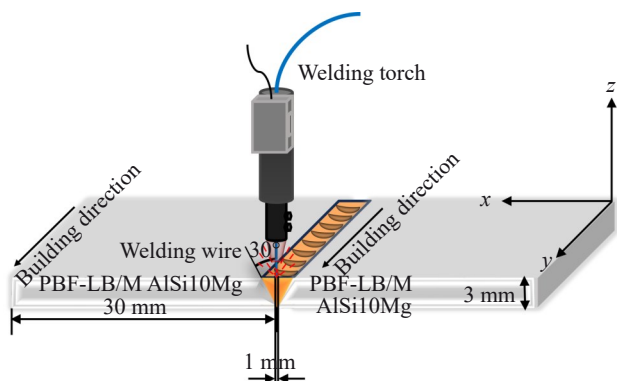


图1 CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金示意图

Fig.1 Schematic diagram of CMT welding process of PBF-LB/M AlSi10Mg alloy

腐蚀时间约25 s)腐蚀,制备金相试样。使用奥林巴斯LEXT OLS4100激光共聚焦显微镜与QUANTA FEG 650扫描电镜(scanning electron microscope, SEM),对接头微观组织及拉伸断口形貌进行详细观察。采用QUANTA FEG 650 SEM结合OXFORD NordlysNano EBSD系统,在20 kV加速电压下扫描分析,以揭示试样选区的精细组织结构。电子背散射衍射(electron backscatter diffraction, EBSD)样品经Leica RES102设备离子刻蚀(刻蚀电压为6.5 kV,角度10°)制备,数据由Channel 5软件处理。使用D8 Advance X射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)分析焊缝物相,采用能谱仪(energy dispersive spectroscopy, EDS)对焊缝中主要合金元素种类、分布及含量进行分析。

使用Image-Pro Plus图形软件测量焊缝中气孔率与气孔尺寸,并计算不同尺寸气孔的相对含量。采用面积法计算气孔率,气孔总面积与焊缝总面积的比值作为气孔率。为了准确表征焊缝气孔率,分别观察了焊缝横截面和纵截面的气孔特征,并通过3个焊缝截面的平均气孔率来表征每个气孔率的数值。

采用HVS-1000显微硬度仪对接头不同区域的显微硬度进行测试,其中显微硬度仪所用载荷为100 gf,加载时间10 s。焊接接头的拉伸测试及试样制备均根据美国材料与试验协会标准《ASTM E08-21 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials》进行。

3 结果与讨论

3.1 接头宏观形貌及气孔特性

3.1.1 接头的宏观形貌

图2为添加ER4043和ER4047焊丝CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金接头的横截面形貌。在优化工艺参数下,添加ER4043和ER4047焊丝接头均获得了全熔透焊缝,焊缝均呈“X”形。ER4043和ER4047焊丝的焊缝面积及稀释率分别为20.6 mm²、34.1%和19.9 mm²、31.3%。可见,添加ER4047焊丝焊缝的稀释率较低。此外,熔合线附近组织与母材并无显著差异,未见热影响区(heat-affected zone, HAZ)。然而,在高倍SEM下可观察到此区域的富Si相和α-Al相与母材区域的组织存在明显差异(见3.2.3和3.2.4),表明接头存在HAZ。此外,两焊缝均未产生裂纹,但焊缝中产生了大量球形气孔缺陷,这与国内外PBF-LB/M成形Al-Si合金的熔焊的研究结果一致^[7-17]。

3.1.2 焊接气孔特征

如图3所示,添加ER4043和ER4047焊丝的焊缝在不同区域的气孔形貌存在显著差异。添加ER4043和ER4047焊丝焊缝的最大气孔尺寸分别为591.4和689.1 μm,后者要略大于前者。两焊缝的上部均存在尺寸在400 μm以上

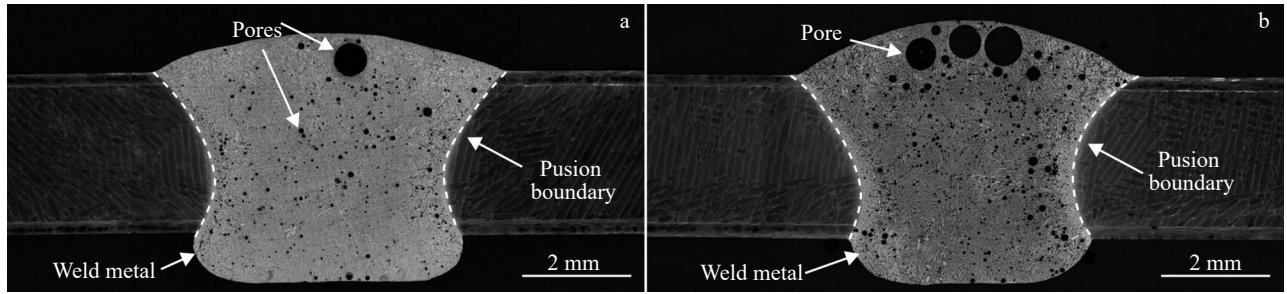


图2 添加Al-Si焊丝CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金接头横截面形貌

Fig.2 Cross-section morphologies of the welded joints of PBF-LB/M AlSi10Mg alloys produced by CMT welding with Al-Si wires: (a) ER4043 and (b) ER4047

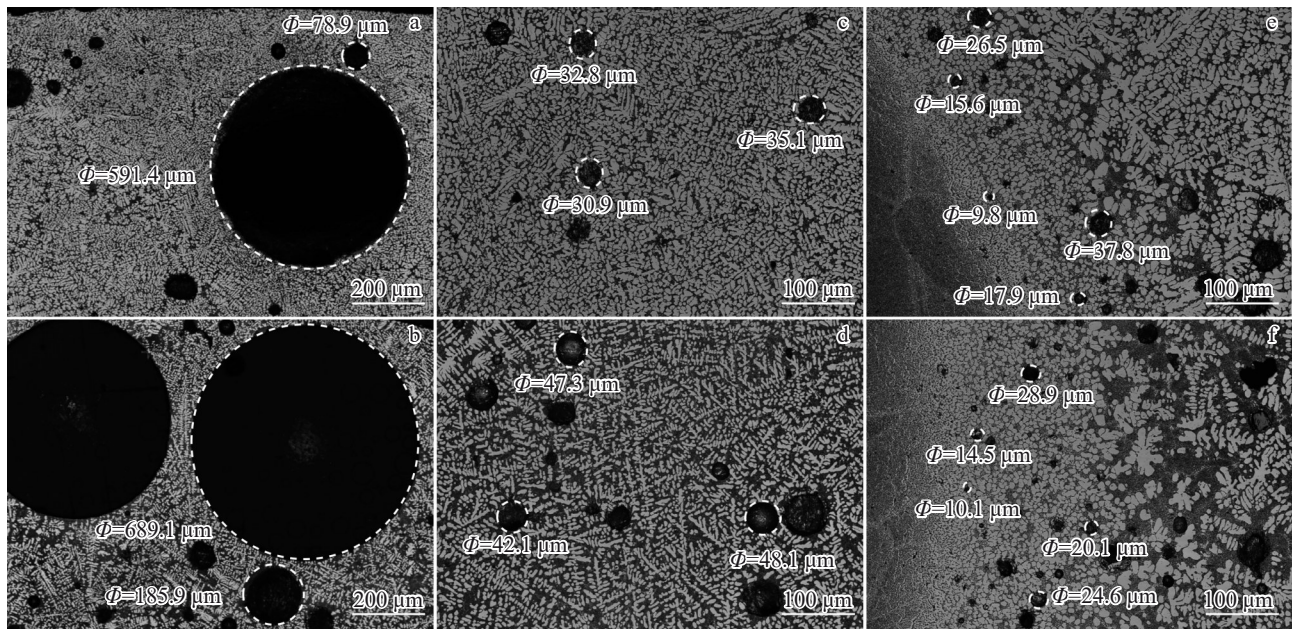


图3 添加Al-Si焊丝CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金焊缝气孔形貌

Fig.3 Morphologies of pore in the weld metal of PBF-LB/M AlSi10Mg alloys produced by CMT welding with ER4043 (a, c, e) and ER4047 (b, d, f) wires: (a-b) upper part of the weld metal; (c-d) lower part of the weld metal; (e-f) near the fusion boundary

的气孔,但添加ER4047焊丝的焊缝上部大尺寸气孔数量明显多于添加ER4043焊丝的焊缝(图3a、3b)。

由图3c、3d可见,与焊缝上部相比,两焊缝下部气孔尺寸明显减小,尺寸范围为30.9~48.1 μm之间。这与铝合金焊接研究中,焊缝上部气孔尺寸大于下部的现象一致^[17]。在熔合线附近,焊缝存在尺寸为9.8~37.8 μm的小气孔(3e、3f),气孔尺寸明显小于焊缝其他区域。经统计,添加ER4043和ER4047焊丝的焊缝气孔率分别为5.9%和9.2%。尽管添加ER4043焊丝的焊缝稀释率较高,但其气孔率却较低^[18-19]。结合焊丝成分,推测可能是由于Si相可作为气泡的形核基底,而高Si含量的焊丝会通过增加焊缝中Si相的含量,促进气孔的形成。

为了准确观察氢气孔特征,进一步研究了接头纵截面的焊缝气孔形貌及分布,添加ER4043和ER4047焊丝的焊缝纵截面气孔形貌如图4所示。可见,添加ER4047

焊丝的焊缝气孔数量明显多于添加ER4043焊丝的焊缝,气孔率分别为6.1%和9.8%,这与焊缝横截面统计结果基本一致。此外,大尺寸气孔主要集中于两焊缝的上部,气孔尺寸在413.2~956.4 μm之间,气孔尺寸明显大于焊缝下部的气孔,且添加ER4047焊丝的焊缝上部大气孔数量更多。

图4c定量分析了添加ER4043与ER4047焊丝的焊缝的气孔率、最大气孔尺寸及其尺寸分布。根据气孔尺寸的不同,将其划分为3类:小于50 μm、介于50~100 μm以及大于100 μm的。分析结果表明,两种焊缝中均以小于50 μm的微小气孔为主,添加ER4043焊丝与ER4047焊丝的焊缝中小于50 μm气孔的占比分别达到71.8%和68.9%。进一步分析发现,在添加ER4043焊丝焊缝与添加ER4047焊丝焊缝中,大于100 μm气孔的比例分别为2.9%和3.5%。因此,采用低Si含量焊丝(ER4043)有助

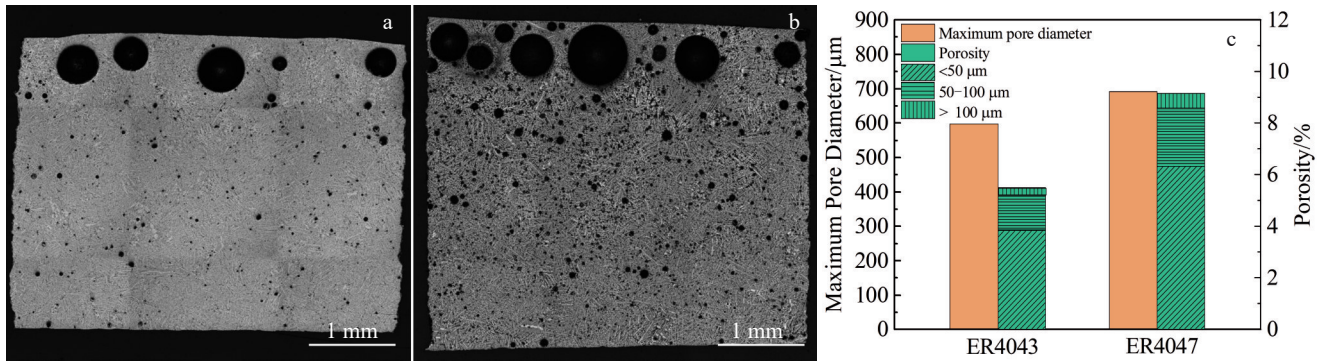


图4 添加Al-Si焊丝CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金焊缝纵截面氢气孔形貌与尺寸分布

Fig.4 Longitudinal-section morphologies (a–b) and size distribution (c) of the hydrogen pores of the weld metal in PBF-LB/M AlSi10Mg alloys produced by CMT welding with Al-Si wires: (a) ER4043 and (b) ER4047

于降低焊缝气孔率,减少最大气孔尺寸。

3.2 不同焊丝对接头的微观组织的影响

3.2.1 焊缝区金相组织

图5为添加ER4043和ER4047焊丝接头的焊缝金相组织。两焊缝近熔合线处和焊缝中心区域的组织均为胞状枝晶,但焊缝中心区域的组织枝晶结构更加发达。两焊缝中心区域组织的枝晶间距分别约为1.7和3.6 μm。具体而言,添加ER4047焊丝的焊缝枝晶相对于添加ER4043焊丝的焊缝枝晶在熔合线附近更为发达。因此,不同Si含量的ER4043和ER4047焊丝对焊缝中枝晶形态和枝晶尺寸有显著影响^[20-21]。

图6为添加Al-Si焊丝CMT焊接PBF-LB/M成形

AlSi10Mg合金焊缝BSE照片及EDS元素面扫描。对图6d、6h中呈现的亮白色相进行元素分析,其结果汇总于表2。结果表明,A至D各点的Fe元素含量均显著超过焊丝及母材中Fe的常规含量阈值(小于0.5%),表明这些亮白色相富含Fe元素,初步推断该亮白色相可能为富Fe相。在Al-Si-Fe-(Mg)合金体系中,富Fe相常以α-Fe相(如α-Al₈Fe₂Si或α-Al₁₂Fe₃Si₂)、β-Fe相(β-Al₅FeSi)以及π-Fe相(π-Al₈Mg₃FeSi₆)3种形式存在^[22],且呈现出不同的形态特征,其中α-Fe相与π-Fe相通常为块状、棒状及鱼骨状结构,而β-Fe相则倾向于长针状结构,后者因其形态特性对力学性能的负面影响尤为显著^[23]。

由图6g、6h可见,亮白色富Fe相主要呈现块状与短

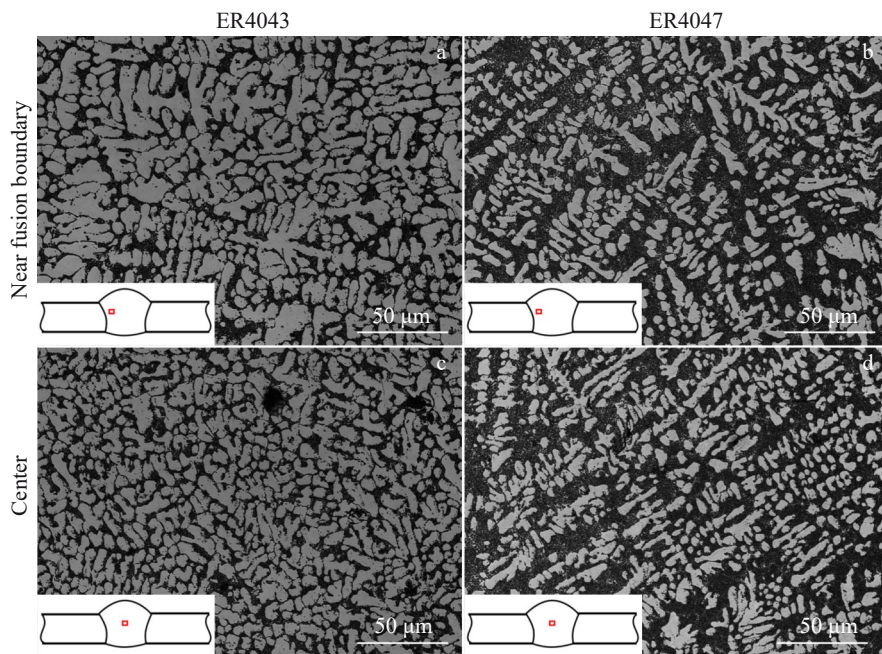


图5 添加Al-Si焊丝CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金接头的焊缝金相组织

Fig.5 Microstructures of different regions of the welded joints in PBF-LB/M AlSi10Mg alloys produced by CMT welding with ER4043 (a, c) and ER4047 (b, d) wires: (a–b) near fusion boundary; (c–d) center

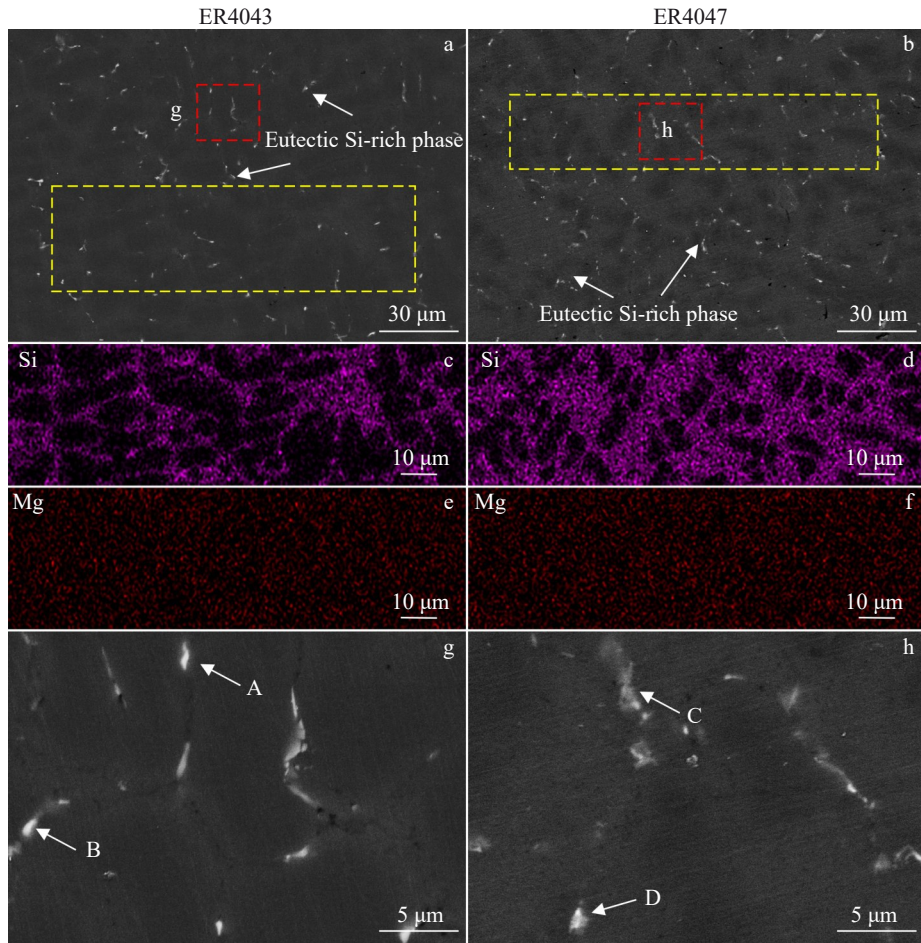


图6 添加Al-Si焊丝CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金焊缝BSE照片及EDS元素面扫描

Fig.6 Backscattered electron images (a–b, g–h) and EDS element mappings (c–f) of precipitates in the weld metal of PBF-LB/M AlSi10Mg alloys produced by CMT welding with ER4043 (a, c, e, g) and ER4047 (b, d, f, h) wires

棒状形态,以及少量长针状。结合EDS的元素分析结果,推测大部分亮白色相为 α -Fe和 π -Fe相。然而,由于Mg元素含量相对较低,仍不排除存在少量 β -Fe相的可能性。此外,对比图6a、6b可见,添加ER4047焊丝焊缝中富Fe相的数量相对于ER4043焊丝焊缝的数量更多,这些富Fe相可能会对焊缝的力学性能产生不利影响。

利用XRD技术对添加的2种Al-Si焊丝焊缝样品进行了物相鉴定,结果如图7所示。可见,2种Al-Si焊丝焊缝组织均由 α -Al相以及Si相组成。值得注意的是,相较于ER4043焊丝焊缝,添加ER4047焊丝焊缝中的Si相衍

射峰强度更高,这是由于ER4047焊丝中较高的Si含量。

3.2.2 焊缝中共晶Si组织特征

图8为添加ER4043和ER4047焊丝的焊缝组织的共晶Si相形貌。由图8a、8b可见,两焊缝组织中的共晶Si

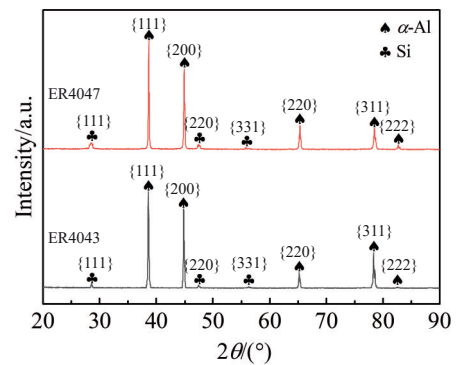


图7 添加Al-Si焊丝CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金焊缝XRD图谱

Fig.7 XRD patterns of the weld metal of PBF-LB/M AlSi10Mg alloys produced by CMT welding with Al-Si wires

表2 图6g、6h中标记点的EDS分析结果

Table 2 EDS analysis results of different points marked in Fig.6g and Fig.6h (at%)

Point	Al	Si	Mg	Fe	Possible phase
A	89.72	5.76	0.19	4.33	β -Fe
B	84.53	12.83	1.28	3.56	π -Fe, Si eutectic
C	80.34	15.63	1.23	2.80	π -Fe, Si eutectic
D	84.69	10.86	1.47	2.98	π -Fe, Si eutectic

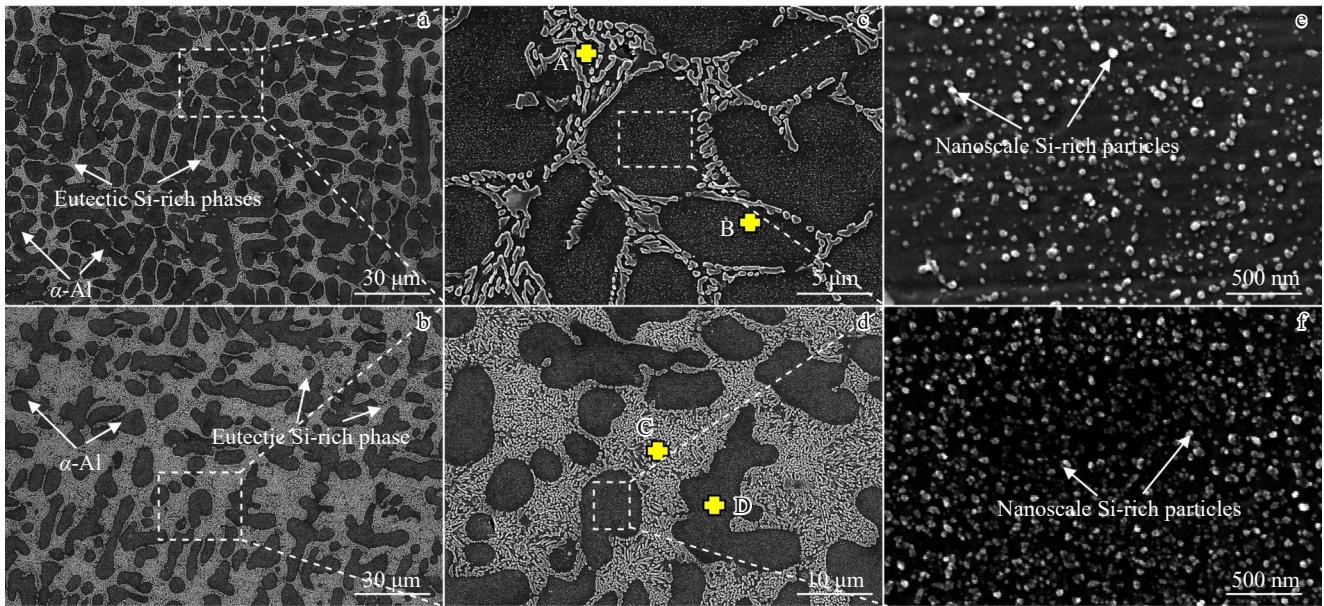


图8 添加Al-Si焊丝CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金焊缝Si相形貌

Fig.8 Morphologies of Si-rich phase of the weld metal of PBF-LB/M AlSi10Mg alloys produced by CMT welding with Al-Si wires: (a, c, e) ER4043 and (b, d, f) ER4047

相均呈连续网状分布于Al基体上,而 α -Al亚晶的尺寸差别不大。添加ER4043和ER4047焊丝焊缝的Si网厚度分别为1.0~2.5 μm 和1.8~6.1 μm 。可见,添加ER4047焊丝焊缝的共晶Si网更厚。添加ER4047焊丝焊缝组织中的共晶Si相的比率为23.1%,而添加ER4043焊丝的焊缝组织中的共晶Si相比率为10.2%。添加ER4047焊丝焊缝组织中的共晶Si相的比率更高,更高的共晶Si相比率可能会提高焊缝金属的显微硬度^[24]。

如图8e、8f所示,添加ER4043焊丝焊缝中的共晶Si相呈短棒状,而添加ER4047焊丝焊缝中的共晶Si相大多数为粒状。由表3可见,亚晶界区域的A点和C点的Si含量均大于25%,而基体上B点和D点的Si含量仅为2.59%和4.51%。基体中的Si含量远低于亚晶区域的Si含量,表明Si元素在亚晶界处发生了显著的偏析现象。而相比于母材基体中的Si含量(约10%),焊缝基体内部的Si固溶度降低,这表明导致Si在焊缝基体中的固溶强化效果减弱^[4]。此外,添加ER4047焊丝的焊缝基体中的Si元素含量明显高于添加ER4043焊丝的焊缝,表明前者焊缝基体有着更强的固溶强化效果。

3.2.3 HAZ中 α -Al的晶粒形态及尺寸

为了深入探讨焊接热循环对母材微观组织的影响,利用EBSD技术对PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金接头中距熔合线不同距离的HAZ的 α -Al晶粒特征进行了定性分析,结果如图9所示。母材的取向成像显微图(orientation imaging microscopy, OIM)清晰地呈现了等轴晶组织,并呈现出轨道状的微熔池形貌。然而,不同区域的晶粒尺寸不同,大致可分为3个区域:重熔区

表3 图8c、8d中标记点的EDS成分分析

Table 3 EDS analysis results of different points marked in Fig.8c and Fig.8d (at%)

Point	Al	Si	Mg
A	73.18	26.64	0.18
B	97.35	2.59	0.16
C	69.41	30.37	0.22
D	95.28	4.51	0.21

(remelting zone, RMZ)、HAZ的细小等轴晶区,以及熔池中心(molten pool center, MPC)的粗大等轴晶区。其中, MPC中的粗大等轴晶取向集中于 $\langle 001 \rangle // \text{ND}$ 附近,而细小等轴晶的取向则呈现随机分布。图9b展示了距熔合线4 mm处的HAZ的OIM图。该区域的晶粒大多为等轴晶,与母材的晶粒形态和分布特征基本一致。然而,仔细观察发现,尺寸极小的晶粒数量显著增加,这可能是由于该区域受到焊接热循环的影响,发生了部分再结晶。由图9c可见,距熔合线1 mm处的HAZ的晶粒特征发生了明显变化,轨道状的微熔池形貌完全消失,尺寸较大的晶粒分布均匀,同时尺寸更小晶粒的数量显著增加,这是由于此处距离熔合线更近,受到的热影响更大导致此处再结晶过程更明显,出现了更多细小的再结晶晶核。

3.2.4 HAZ微观组织

进一步观察了添加ER4047焊丝接头不同区域的Si相形态,如图10所示。接头不同区域富Si相始终以2种形式存在,分别为 α -Al亚晶界处的共晶Si相和 α -Al晶内析出的纳米Si颗粒。在母材中,共晶Si相以连续的胞状

网络在 α -Al基体存在,晶内析出直径小于40 nm的纳米Si颗粒。PBF-LB/M成形过程中极快的冷却速度使大量Si元素固溶在 α -Al基体中,形成过饱和固溶体^[7]。然而,由于焊接热循环的影响, α -Al基体中的过饱和Si再次析出并且显著长大,增加了粗大的纳米Si颗粒的数量。因

此,在距离熔合线4 mm处的 α -Al基体上纳米Si颗粒数量显著增多,尺寸增大到约为65 nm(图10b)。距离熔合线1 mm处,纳米Si颗粒在基体上弥散分布,如图10c所示,数量相对较少,但发生了粗化,尺寸长大约为150 nm,颗粒的间距也明显增大。根据Ostwald熟化机制,较大

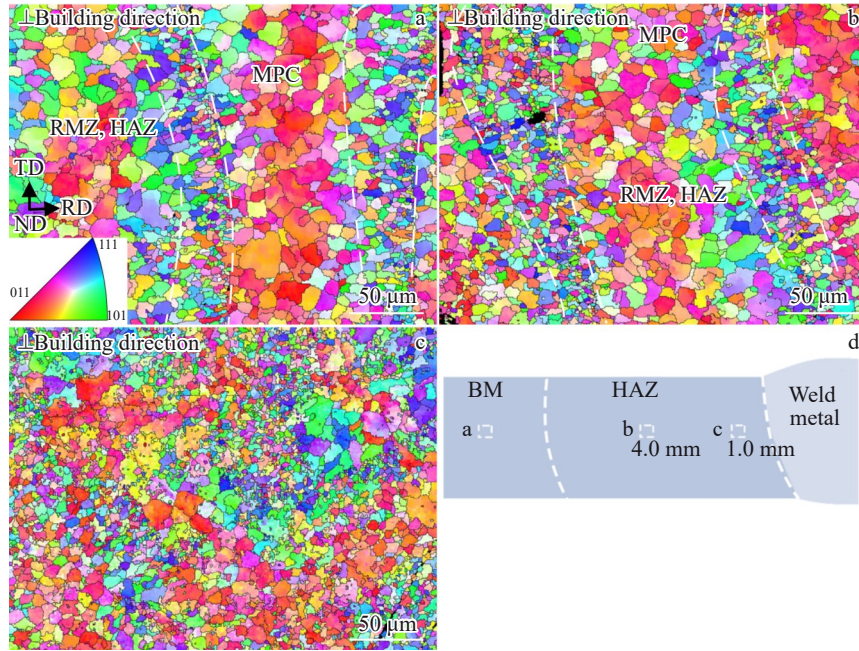


图9 添加ER4047焊丝CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金接头不同区域OIM图及接头不同位置示意图

Fig.9 OIM images (a–c) and schematic diagram of different locations (d) in different regions of the welded joints in PBF-LB/M AlSi10Mg alloys produced by CMT welding with ER4047 wire: (a) BM, (b) 4.0 mm, and (c) 1.0 mm

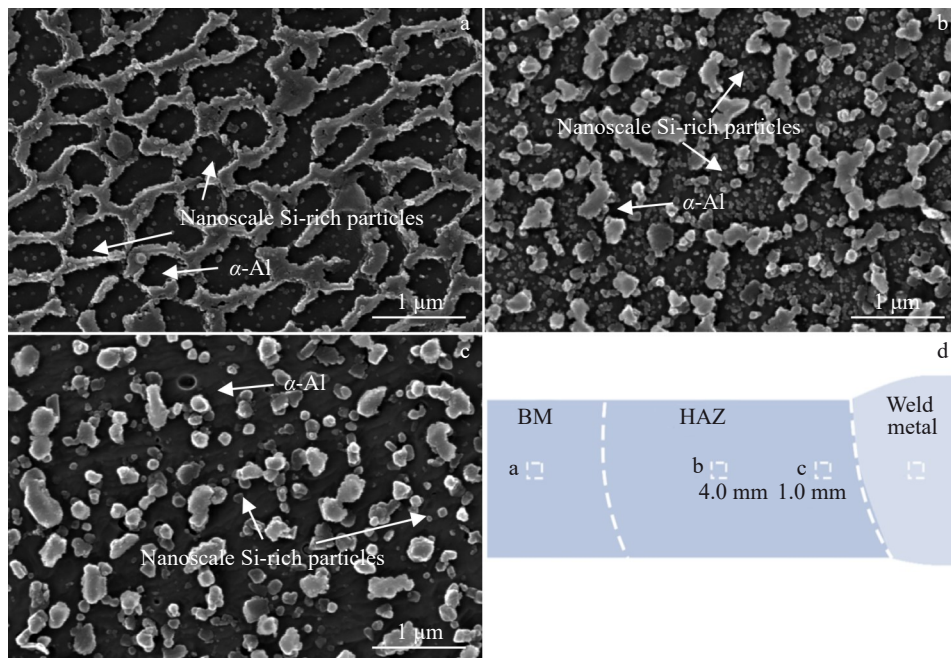


图10 添加ER4047焊丝CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金接头Si形貌及接头不同位置示意图

Fig.10 Si morphologies (a–c) and schematic diagram of the different locations (d) in different regions of the welded joint in PBF-LB/M AlSi10Mg alloys produced by CMT welding with ER4047 wire: (a) BM, (b) 4.0 mm, and (c) 1.0 mm

的共晶Si相和纳米Si相在受热长大时,将吸收周围的纳米Si颗粒,使其数量减少^[25]。接头不同区域的共晶Si相形态和尺寸有较大差异,其演变规律与热处理过程中组织变化相似,这证实了HAZ的形成。

图 11 为 PBF-LB/M AlSi10Mg 合金中添加 ER4047 丝接头不同区域的显微组织演变示意图。由图 11a 可见,富 Si 共晶网络和超细 α -Al 晶胞均匀分布在母材基体上。此外,PBF-LB/M 加工过程中的本征热处理效应使 α -Al 晶胞内析出了少量纳米级 Si 颗粒。对于 HAZ,由于焊接热循环的影响,母材中共晶 Si 网的边缘和棱角处发生扩散溶解,转变为块状富 Si 相,亚晶结构消失,如图 11b 所示。而在更靠近熔合线的 1 mm 处,由于热影响更加显著,Si 网完全破裂,如图 11c 所示。由图 11d 可见,焊缝中的 α -Al 亚晶粗大,亚晶界由棒状或粒状共晶 Si 相组成,但尺寸明显大于其他区域。

3.3 接头的力学性能

3.3.1 接头显微硬度分布

母材 PBF-LB/M 成形 AlSi10Mg 合金平均显微硬度约 129 HV。添加 ER4043 与添加 ER4047 焊丝 CMT 接头横截面的显微硬度分布如图 12 所示,两焊缝的平均显微硬度分别为 66.5 HV (ER4043) 及 76.8 HV (ER4047),均显著低于母材。这表明添加 Al-Si 焊丝的 CMT 焊接 PBF-LB/M 成形 AlSi10Mg 合金焊缝出现了严重的软化现象,但添加 ER4047 焊丝的焊缝显微硬度较添加 ER4043 焊丝提高了约 15.5%。

焊缝硬度受到多种因素的共同作用,包括固溶体中合金元素的含量、析出相的体积分数、析出相的形态与尺寸,以及晶粒尺寸^[12]。深入分析 2 种焊丝焊缝的微观组织后发现,ER4047 焊丝焊缝表现出较高硬度的 3 个原因:(1)焊缝中形成了更高比率的共晶 Si 相,共晶 Si 相硬

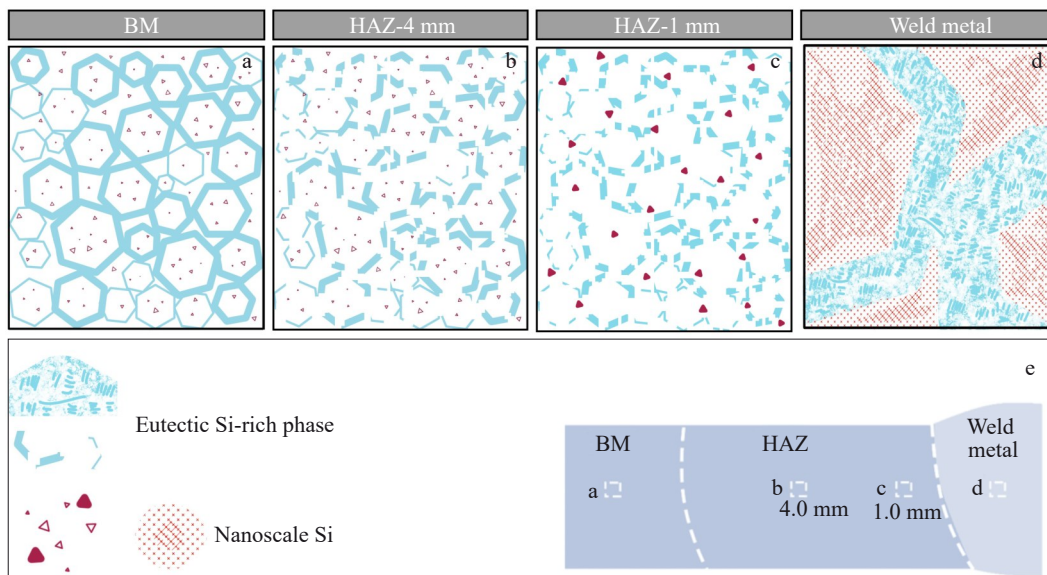


图 11 添加 ER4047 焊丝 CMT 焊接 PBF-LB/M AlSi10Mg 合金接头不同区域显微组织演变及接头不同位置的示意图

Fig.11 Microstructural evolution of different regions of the welded joint of PBF-LB/M AlSi10Mg alloys with ER4047 wire (a–d) and schematic diagram of the different locations (e)

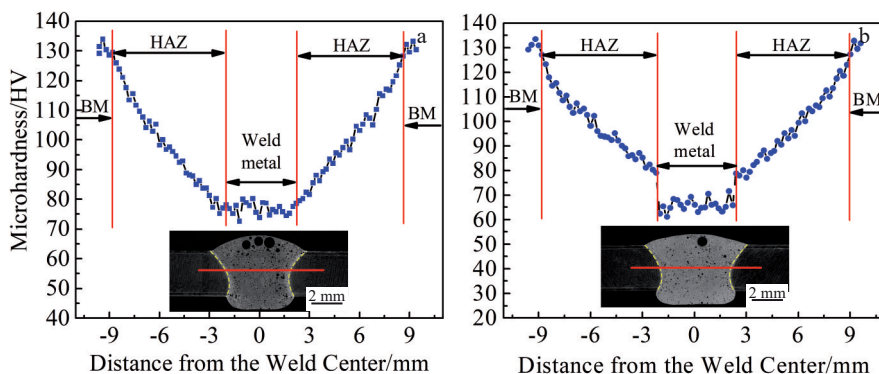


图 12 添加 Al-Si 焊丝 CMT 焊接 PBF-LB/M 成形 AlSi10Mg 合金接头显微硬度

Fig.12 Microhardness of welded joints in PBF-LB/M AlSi10Mg alloys produced by CMT welding with Al-Si wires: (a) ER4043 and (b) ER4047

度高于 α -Al基体^[26]; (2)ER4047焊丝焊缝的 α -Al基体中固溶了更多Si元素,具有更强的固溶强化效果^[4]; (3)焊缝中分布更多的纳米级Si颗粒,并在 α -Al基体上形成了有效的析出相,这些微小颗粒的存在进一步提升了焊缝的硬度。而在两接头中出现的HAZ软化现象,推测可能与HAZ处富Si相形态的变化相关。

3.3.2 接头的拉伸性断裂行为

图13为母材添加不同Al-Si焊丝的CMT焊接接头的工程应力-工程应变曲线。由表4可知,母材的抗拉强度为423.6 MPa,断裂总延伸率为12.6%。添加两Al-Si焊丝的CMT接头的强度系数分别为46.8%(ER4043)和49.9%(ER4047),抗拉强度及断裂总延伸率相对于母材均大大降低,表明CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金接头出现了显著的软化现象。然而,添加ER4047焊丝(211.7 MPa)相对于添加ER4043焊丝(198.4 MPa)的接头抗拉强度提高了6.7%,这表明虽然添加ER4047焊丝的焊缝气孔较高,但焊缝组织的改善,包括共晶Si相比率更高、固溶强化效果更强及晶胞内纳米Si相粒子更

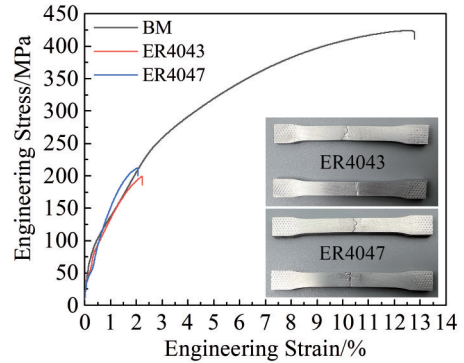


图13 母材及添加Al-Si焊丝CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金接头的工程应力-工程应变曲线

Fig.13 Engineering stress-engineering strain curves of the BM and welded joints of PBF-LB/M AlSi10Mg alloys produced by CMT welding with Al-Si wires

多等使其强度更高。图14为添加不同Al-Si焊丝接头的拉伸断裂位置和断口形貌。由图4可见,2接头的断裂均发生在靠近熔合线的焊缝区域且断裂路径曲折,表明断

表4 母材及添加Al-Si焊丝CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金接头拉伸性能

Table 4 Tensile properties of the BM and welded joints of PBF-LB/M AlSi10Mg alloys produced by CMT welding with Al-Si wires

	Tensile strength/MPa	Total elongation at fracture/%	Fracture location	Strength coefficient/%
BM	423.6	12.6	-	-
Welded joint with ER4043	198.4	2.2	Weld metal	46.8
Welded joint with ER4047	211.7	1.9	Weld metal	49.9

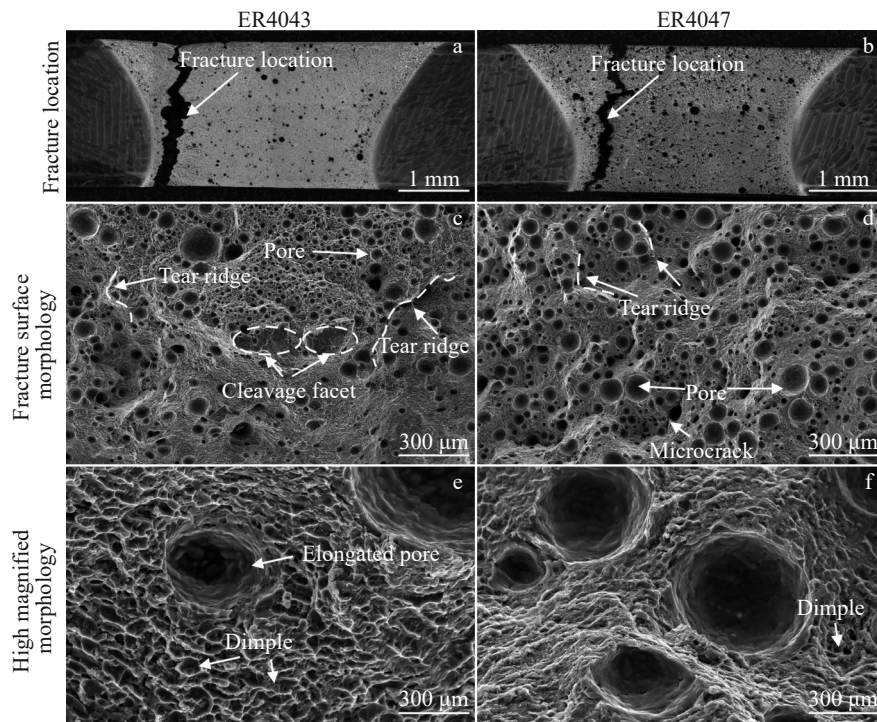


图14 添加Al-Si焊丝CMT焊接PBF-LB/M成形AlSi10Mg合金接头拉伸断裂位置和断口表面

Fig.14 Fracture locations (a-b) and fracture morphologies (c-f) of welded joints of PBF-LB/M AlSi10Mg alloys produced by CMT welding with ER4043 (a, c, e) and ER4047 (b, d, f) wires

裂过程中存在一定的抗力。然而,接头并未出现明显的颈缩现象,这表明焊接接头断裂时塑性变形有限,这与工程应力-工程应变曲线中较低的应变值相对应,断裂路径经过密集的气孔缺陷区域。添加 ER4043 和 ER4047 焊丝的接头断裂形貌如图 14c、14d 所示。由图可见,拉伸断裂表面存在大量尺寸在 19~200 μm 之间的气孔,气孔率均超过 20%,显著高于焊缝横截面气孔率。大量的氢气孔可能为裂纹的来源,促进了裂纹的扩展,导致接头在均匀塑性变形初期即发生断裂,同时显著减少了接头的有效承载面积,从而显著降低了抗拉强度。拉伸断口表面的气孔呈球形,并没有出现明显的变形,这表明拉伸过程中裂纹是沿基体扩展。除了氢气孔缺陷,拉伸断口还有少量的撕裂棱及位于气孔周围的微裂纹。撕裂棱的存在表明在拉伸过程中出现了微量的塑性变形,且气孔周围出现的微裂纹表明了气孔作为拉伸过程中的应力集中位置促进了裂纹萌生。

对拉伸断口表面进一步观察,如图 14e、14f 所示,ER4043 焊丝接头的断口展现出一定数量的浅韧窝,且气孔沿拉伸方向略微伸长,表明断裂前发生了一定程度的塑性变形。相比之下,ER4047 焊丝接头的断口韧窝更少且更浅,气孔几乎无变形,表明塑性变形极少。ER4047 焊丝焊缝中较高的共晶 Si 相含量虽然增强了硬度和强度,但也增加了脆性,裂纹易在脆性相周围萌生并扩展导致断裂^[27]。此外,ER4047 焊丝焊缝的高气孔率进一步降低了延伸率,这也解释了为什么其强度较高,但延伸率却低于 ER4043 焊丝接头。

4 结 论

1) 添加 ER4043 焊丝时,焊缝的气孔率为 5.9%,最大气孔尺寸为 591.4 μm ;而添加 ER4047 焊丝时,气孔率上升至 9.2%,最大气孔尺寸为 689.1 μm 。结果表明,较低 Si 含量的焊丝有利于焊缝气孔率的降低及最大气孔尺寸的减小。

2) 添加 ER4043 与 ER4047 焊丝焊缝均主要由 α -Al 相、共晶 Si 相及少量富 Fe 相构成。ER4047 焊丝焊缝中的共晶 Si 相比例显著高于 ER4043 焊丝焊缝, α -Al 基体中 Si 元素的固溶度更高,纳米级 Si 相颗粒分布更为密集。

3) 添加 ER4043 焊丝焊缝平均显微硬度为 66.5 HV,抗拉强度为 198.4 MPa;ER4047 焊丝焊缝的平均显微硬度为 76.8 HV,抗拉强度为 211.7 MPa。添加 ER4047 焊丝接头强度较 ER4043 焊丝提升了 6.7%,焊缝的硬度提升了 15.5%,表明高 Si 含量的 ER4047 焊丝更有利于获得综合性能优异的焊接接头。ER4047 焊丝接头强化的机制主要在于焊缝的固溶强化、细晶强化、织构强化、Si 相的析出强化以及共晶 Si 网的承载效应的贡献。

4) 随着距熔合线距离的缩短,焊缝组织中的富 Si 共

晶相形态由连续的胞状网络向离散球状颗粒转变,再结晶晶核数量增加。

参考文献 References

- [1] Wang L Z, Wang S, Hong X F. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2018, 35: 492
- [2] Sames W J, List F A, Pannala S et al. *International Materials Reviews*[J], 2016, 61(5): 315
- [3] Zhang Yingfeng, Majeed A, Muzamil M et al. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2021, 66: 269
- [4] Takata N, Liu M L, Kodaira H et al. *Additive Manufacturing*[J], 2020, 33: 101152
- [5] Schwarz A, Schleser M, Gerhards B et al. *South African Journal of Industrial Engineering*[J], 2021, 32: 99
- [6] Fang Z C, Wu Z L, Huang C G et al. *Optics & Laser Technology*[J], 2020, 129: 106283
- [7] Cui L, Peng Z B, Chang Y Q et al. *Optics & Laser Technology*[J], 2022, 150: 107952
- [8] Lv Hongwei(吕洪伟), Zhang Zhijie(张志杰), Luo Jingjie(罗金杰) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(3): 1087
- [9] Cui Xiaoming(崔晓明), Meng Chuang(孟闯), Shi Bo(石博) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(7): 2529
- [10] Du D F, Haley J C, Dong A P et al. *Materials & Design*[J], 2019, 181: 107923
- [11] Tang M, Pistorius P C. *International Journal of Fatigue*[J], 2017, 94: 192
- [12] Du Z L, Chen H C, Tan M Z et al. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2018, 36: 33
- [13] Chang Y Q, Cui L, He D Y et al. *Advanced Laser Processing and Manufacturing III*[J], 2019, 11183: 94
- [14] Singh V, Niranjana M S, Murtaza Q. *Journal of Process Mechanical Engineers*[J], 2026, 240(1): 660
- [15] Deng A L, Chen H, Zhang Y B et al. *Optics & Laser Technology*[J], 2023, 159: 109000
- [16] Fousov M, Dvorski D, Michalcov A et al. *Materials Characterization*[J], 2018, 137: 119
- [17] Mkikangas J, Rautio T, Mustakangas A et al. *Procedia Manufacturing*[J], 2019, 36: 88
- [18] Cui L, Wu D F, Chang Y Q et al. *Journal of Manufacturing Science and Technology*[J], 2023, 47: 228
- [19] Zhang C C, Bao Y F, Zhu H H et al. *Optics & Laser Technology* [J], 2019, 120: 105696
- [20] Li J C, Cui L, Wu D F et al. *Welding in the World*[J], 2024, 68: 2083
- [21] Cui L, Li X Y, He D Y et al. *Materials Characterization*[J], 2012, 71: 95
- [22] Qing Rong(秦榕). *Effect of Alloying Elements on Microstructure and Properties of Hypoeutectic Al-Si Alloy with Fe Contain*(合金元素对含铁亚共晶 Al-Si 合金显微组织及性能的影响)[D].

- Changchun: Jilin University, 2021
- [23] Cui L, Wu D F, Ma L X *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2025, 56: 840
- [24] Peng Z B, Cui L, He D Y *et al.* *Materials Characterization*[J], 2022, 190: 112070
- [25] Wang X, Li L Q, Qu J Y *et al.* *Materials Science and Technology* [J], 2019, 35: 2284
- [26] Takhti S, Reihanian M, Ashrafi A *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25: 1003
- [27] Shen Y H, Yu J M, Wang L *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2025, 34: 1029

Effect of Al-Si Filler Wires on the Microstructure and Mechanical Properties of Cold Metal Transfer Welded AlSi10Mg Alloy Joints Fabricated Using Powder Bed Fusion Laser Beam/Metal

Qiao Jiutong¹, Wu Defan¹, Cui Li^{1,2}, Ma Lixia¹, Wu Xu¹, Guo Xingye¹, He Dingyong^{1,2}

(1. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2. State Key Laboratory of Materials Low-Carbon Recycling, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The cold metal transfer (CMT) butt welding was conducted on AlSi10Mg alloy thin sheets prepared by the powder bed fusion laser beam/metal (PBF-LB/M) technique using two types of filler wires, including ER4043 (Al-Si5) and ER4047 (Al-Si12). The effects of the two wires on weld geometry, porosity, microstructure, and mechanical properties of the welded joints were evaluated. Results indicate that the adding ER4043 wire effectively reduces porosity rate and pore size of the weld metal. In contrast, the ER4047 wire exhibits improved mechanical performance. The ultimate tensile strength of joints welded with ER4047 wire reaches 211.7 MPa, representing a 6.7% increase compared to the 198.4 MPa achieved with ER4043 wire. The average microhardness of the ER4047 weld (76.8 HV) increases by 15.5% compared to that of ER4043 weld. These findings suggest that the higher Si content in ER4047 filler wire is more conducive to achieving superior joint properties. Microstructural analysis attributes this enhancement to a combination of solid solution strengthening, fine grain strengthening, texture strengthening, nanoscale Si precipitation, and the load-bearing contribution of the eutectic Si network.

Key words: PBF-LB/M AlSi10Mg; CMT welding; ER4043; ER4047; microstructure; mechanical property

Corresponding author: Cui Li, Ph. D., Professor, College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China, E-mail: cui.li@bjut.edu.cn