Invar 合金超声频脉冲电弧增材 修复界面组织特征



曾才有¹,于杰琳¹,张世伟²,万晓慧²,齐铂金¹,从保强¹ 1.北京航空航天大学,北京 100191 2.中国航空制造技术研究院 航空焊接与连接技术航空科技重点实验室,北京 100024

摘 要:为提高航空复合材料用 Invar合金模具修复再制造的质量,本文对比研究了超声频脉冲电弧和普通直流电弧对 Invar 合金电弧增材修复熔覆金属界面组织特征的影响。结果表明,通过引入超声频脉冲电流,可在更低的热输入量条件下获得 与常规直流电弧相当的熔深。重熔填充金属主要由柱状枝晶构成,重熔母材区主要由胞状晶构成。相比直流电弧,超声频 脉冲电弧作用下胞状晶柱状生长可被有效阻断,进而获得短棒状胞状晶。在直流电弧重熔金属区可观察到大量晶间微米尺 度热裂纹,而超声频脉冲电弧可有效抑制热裂纹等缺陷。

关键词:增材制造;模具修复; Invar合金; 脉冲电弧; 显微组织

中图分类号:TG 456.7 文献标识码:A

Invar合金(Fe-36wt.%Ni)具有与树脂基复合材料相近的低热膨胀系数(0.5~2.5/°C),可避免因膨胀系数差异所导致的型面超差与尺寸精度超差等问题,国内外航空制造领域已普遍采用Invar合金用于制造复合材料热压模具^[11]。在Invar合金成形模具实际使用过程中常出现磕碰伤以及气孔增加、裂纹、接触面磨损等缺陷,上述缺陷极易导致Invar合金成形模具自身精度达不到设计要求,进而使得模具寿命显著缩短,甚至报废。考虑到Invar合金成形模具的加工生产难度大并且成本高,为延长模具的使用寿命,降低模具生产成本,亟须针对不满足设计使用要求的Invar合金成形模具开展修复再制造技术的基础研究。

目前,针对 Invar 钢成形模具修复技术的研究相对较 少。而且公开报道的 Invar 钢成形模具修复方法是基于激 光粉末沉积的修复技术。南京航空航天大学占小红团队采 用激光熔化沉积技术开展了 Invar合金修复研究^[2]。结果表 明,随着热输入的提高,晶粒的平均尺寸增大,当达到一定 热积累水平后,沉积层晶粒组织转变为等轴晶。但是研究 过程中发现,在激光熔化沉积修复的 Invar 合金模具构件中 存在有孔隙缺陷,主要分为两类:一类是由未熔合导致的孔

DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2022.10.008

隙;另一类是由于保护气体未能逃逸形成的气孔。上海大 学Chen Chaoyue^[3]团队采用冷喷涂工艺进行Invar合金增材 制造试验。结果表明,在氮气保护氛围下采用冷喷涂制备 Invar合金可获得比传统铸造和激光增材制造更低的热膨 胀系数(25~200/°C,1.53×10⁻⁶/°C),采用相同工艺在氦气保 护氛围下,所制备的Invar合金表现为负热膨胀行为,并归 因于成形过程中引入的残余压应力(272MPa)。伯明翰大 学Qiu Chunlei等^[4]采用激光选区熔融制备了Invar合金,并 发现气孔和裂纹缺陷无法完全避免,且缺陷敏感性随着激 光功率增大而增强,显微组织结果表明,所制备的Invar合 金基体为粗大的γ柱状晶,晶界分布有α析出相。

由于激光粉末沉积采用金属粉末作为原材料,设备成本昂贵,成本相对较高;同时设备粉末沉积工作室需要惰性 气体保护氛围,从而大大限制了可修复成形模具的尺寸规 格^[5]。电弧熔丝增材修复再制造技术以焊接电弧作为热 源,丝材作为填充材料,通过层层堆积的方式实现对受损部 位的再修复,具有成本低廉、设备简单、沉积效率高、可修复 大尺寸构件等突出优点^[6]。近年来,对增材修复电弧进行 高频脉冲或超声能量的耦合,利用其独特的"高频效应"或

收稿日期: 2022-04-10; 退修日期: 2022-05-19; 录用日期: 2022-06-30 基金项目: 航空科学基金 (20200011025002)

引用格式: Zeng Caiyou, Yu Jielin, Zhang Shiwei, et al. Interfacial microstructure of pulsed-arc deposited invar alloy[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(10):59-65. 曾才有, 于杰琳, 张世伟, 等. Invar 合金超声频脉冲电弧增材修复界面组织特征[J]. 航空科学技 术, 2022, 33(10):59-65.

超声振动作用于熔池流动及液态金属凝固的过程,进而获 得焊缝晶粒细化、组织均匀、缺陷减少的显著效果被广泛认 同^[7-8]。其为Invar合金成形模具低成本、高效高质修复提供 了新的选择。

本研究采用电弧增材修复工艺对Invar合金进行单层 单道熔覆试验,对比研究了超声频脉冲(UFP)电弧和普通 直流电弧对重熔界面的微观组织和显微硬度分布的影响, 为Invar合金成形模具高效高质电弧增材修复工艺开发提 供理论参考。

1 试验材料与方法

本研究所使用的 Invar 合金电弧熔丝修复系统平台主要包括:超声频脉冲 GTAW 电源(北京航空航天大学-HPVP 550)、TBi AT 420S 焊枪系统、ABB IRB1410 机器人、Fronius KD 7000 送丝系统和气体保护系统。采用直径3.2mm的钨极作为电极,保护气为纯度为99.9992%的高纯氩气,气体流量为20L/min。试验用基板为4J36 Invar 合金板,尺寸为300mm×300mm×24.5mm。使用前通过机械打磨以去除氧化层。填充金属选用直径为1.15mm的 Invar 36 丝材。基板与丝材的合金成分见表1(wt%为质量分数)。

表1 基板和丝材合金成分(wt%) Table 1 Composition of substrate and wire (wt%)

材料	С	Р	S	Mn	Ni	Fe
4J36	≤0.05	≤0.02	≤0.02	0.04	36.0	余量
基板						
Invar 36丝材	0.03	0.004	0.003	2.56	36.2	余量

本研究设置了两种不同电弧电流模式对比试验,分别 为超声频脉冲电弧模式和常规直流电弧模式,两组试验电弧 电流波形如图1所示。其中,超声频脉冲电弧熔覆工艺参数 为:基值电流 I_{b1} 为70A,峰值电流 I_{c2} 为258A,低频脉冲频率 f_{b} 为2Hz,超声频脉冲电流 I_{p} 为60A,超声频脉冲频率 f_{p} 为 40kHz,送丝速度 v_{f} 为3m/min,运动速度 v_{w} 为100mm/min。同 时,直流电弧试验作为对照组,直流电弧主要工艺参数为: 直流幅值I为225A,送丝速度 v_{f} 为3m/min,运动速度 v_{w} 为 100mm/min。电弧熔覆前采用电弧扫描方式对基板进行 预热,将基板温度控制在200°C左右,随后进行电弧熔丝沉 积。熔覆层长度为100mm。

采用线切割对电弧熔覆样品进行显微组织表征样品切 取,通过体式显微镜对电弧熔覆金属进行宏观形貌观察。 对电弧熔覆样品截面进行机械磨抛,然后采用10vol%(体



积分数)的硝酸酒精溶液对样品侵蚀2min。通过ZEISS Scope.A1光学显微镜和JEOL JSM 7100F场发射扫描电镜 (SEM)对重熔界面附近区域显微组织进行观察。使用 INNOVATEST FALCON 500型硬度计对焊接接头进行显微 维氏硬度测试,加载力1.96N,保载时间10s。

2 试验结果与讨论

2.1 宏观成形

不同模式电弧熔覆层截面宏观形貌如图2所示。两种电弧模式都可以获得平直且表面光滑平整的熔覆层金属。但从截面视图可以看出,采用超声频脉冲电弧获得的熔覆层更加规则对称。超声频脉冲有助于提高电弧形态和熔滴过渡的稳定性,因此,有利于成形过程稳定。熔覆金属可分为两个典型的重熔金属区域:其一是位于下部的重熔母材金属区,在预热过程中形成;其二是位于上部的重熔填充金属区,在熔覆过程中形成。因此,存在两个典型的界面:一是重熔母材金属与基板之间的界面,本文定义为重熔界面;二是重熔填充金属与重熔母材金属之间的熔合界面。

对熔覆金属的重熔区宽度w、余高h、润湿角θ、熔深d 的4个特征尺寸进行测量统计,各特征值测量依据如图2 (a)所示,统计值见表2。从结果可以看出,两种电弧模式获得的成形几何特征相差不大。熔深分别达到2.7mm和2.8mm。

电弧熔丝沉积热输入量Q可根据式(1)计算得到

$$Q = \eta \times \left(\overline{I} \times \frac{\overline{U}}{v_{w}} \right) \tag{1}$$

式中,热效率系数 η =0.6;平均电压 \overline{U} =11V; \overline{I} 为平均电流; 对于超声频脉冲电弧; \overline{I} 可根据式(2)计算得到

$$\bar{I} = \frac{I_{\rm b1}}{2} + \frac{I_{\rm b2}}{2} + \frac{I_{\rm p}}{2} \tag{2}$$

根据式(1)和式(2),超声频脉冲电弧和直流电弧熔丝 沉积热输入分别为768J/mm和891J/mm。以上结果说明, 通过引入超声频脉冲电流,可在更低的热输入量条件(降低)下获得与常规直流电弧相当的熔深。

表2 电弧熔覆金属特征尺寸 Table 2 Characteristic sizes of deposited metals

特征尺寸	d/mm	<i>h/</i> mm	w/mm	<i>θ/</i> (°)
超声频脉冲电弧	2.7	3.3	12.8	50.0
直流电弧	2.8	3.0	15.5	42.8



(a) 超声频脉冲电弧



(b) 直流电弧 图 2 电弧熔覆金属顶视图和截面视图

Fig. 2 Images showing top view and cross-section view of deposited metals

2.2 微观组织

Invar合金基板微观组织如图3所示。基板母材基体组 织为奥氏体γ(Fe,Ni)等轴晶,为典型的热-力加工态组织。



图 3 Invar 合金基板微观组织 Fig. 3 Microstructure of Invar substrate

奥氏体平均晶粒尺寸为42.5μm±18.9μm。金相结果中未观 察到明显的第二相组织。

超声频脉冲电弧熔覆层各区域微观组织如图4所示。 重熔填充金属中部区域为全柱状枝晶结构。枝晶主干呈长 条状,沿着最大温度梯度方向择优排列。二次枝晶臂之间 充满了晶间第二相(深色)。填充金属/重熔母材熔合界面 两侧区域都由胞状晶构成,胞状晶晶界处为连续的网状第 二相组织。重熔填充金属区胞状晶尺寸呈现梯度变化,即 靠近熔合界面为细晶,平均晶粒尺寸约5µm,随着熔合界面 距离增大,晶粒尺寸逐渐增大,并逐渐转变为短棒状。相较 而言,重熔母材区胞状结构形态更加均匀且更具有等轴特 征。重熔母材区大部分由胞状晶构成,平均晶粒尺寸为 12.6µm±3.5µm。位于重熔界面附近的重熔母材主要由短 棒状的胞状晶构成。受电弧热影响,靠近重熔界面的奥氏 体γ(Fe,Ni)晶粒发生显著粗化,平均晶粒尺寸约200μm。 距重熔界面距离逐渐增大,晶粒粗化程度逐渐降低,热影响 区晶粒为部分粗化的奥氏体晶粒和少量细晶。此时观察到 的组织结构与已报道的激光熔覆 Invar 合金的组织结构十 分相似[9-10]。

直流电弧熔覆金属各区域微观组织如图5所示。重熔 填充金属中部区域为全柱状枝晶结构。枝晶主干沿着最大 温度梯度方向择优排列。填充金属/重熔母材熔合界面两 侧区域都由胞状晶构成,重熔母材区胞状结构更具有等轴 特征。重熔母材区由胞状晶构成,胞状晶平均晶粒尺寸为 11.8µm±4.7µm,与超声频脉冲电弧获得的胞状晶尺寸相当。 在重熔界面附近,重熔母材区完全由长条的柱状晶构成。 相较而言,超声频脉冲电弧工艺在重熔界面附近区域可获 得更加细小的短棒状晶粒,说明超声频脉冲对重熔组织具 有抑制柱状晶凝固生长、细化晶粒的效果。直流电弧导致 热影响区由显著粗化的奥氏体晶粒组成,随着与母材距离 逐渐减小,奥氏体晶粒尺寸逐渐减小。



Fig. 5 Microstructure of deposited material via direct current arc

对超声频脉冲电弧重熔母材区的胞状结构进行扫描电镜 观察和能谱分析,结果如图6所示。根据能谱分析结果可知, 胞状组织存在较显著的Ni元素偏聚。胞状结构中网状分布的 晶界第二相为富Ni区,而胞状晶内部为贫Ni区。定量元素能 谱分析结果表明,胞状晶内部Ni元素质量分数仅为31wt%,晶 界第二相Ni元素含量高达39wt%。

由凝固原理可知,胞状晶的形成与成分过冷密切相关^[11]。 当平面状固液界面存在局部凸起部分,且溶质原子沿凸起前 沿方向扩散比向两侧扩散更快时,导致凸起两侧溶质原子浓 度更高,则将降低两侧平衡结晶温度,使两侧过冷度减小,固 液界面向两侧推进速度小于向凸起前沿方向推进速度,进而 导致局部凸起沿特定方向越长越大,两侧形成狭窄的高浓度 溶质原子区域(网状第二相),最终形成胞状晶结构。

不同电流模式下电弧熔覆金属重熔界面附近区域典型成 形缺陷如图7所示。超声频脉冲电弧重熔金属区粗大柱状 晶晶界结合良好,未观察到明显的成形缺陷。直流电弧导 致重熔金属区柱状晶晶界处可观察到大量微米尺度裂纹。 Invar合金热导率较低且液态金属流动性较差,易引发晶界



热裂纹等缺陷。有些学者针对 Invar 合金焊接热裂纹产生 原因进行了分析研究^[12-13]。Invar 钢焊缝区晶粒界面附近容 易聚集中低熔点的共晶组织,降低了晶界强度,提高了晶间 热裂纹倾向。在焊缝金属凝固后期,晶粒既会被连续的液 态薄膜分隔开,又存在固相网状结构的相互抵触作用,因而 在热应力的作用下极易产生热裂纹^[14]。

在获得相同熔覆效果的前提下,通过超声频脉冲电弧 可显著降低热输入,有利于抑制热裂纹的产生。另外,超声 频脉冲电弧可引发"高频超声"效应,有效促进熔池搅动,促 进溶质均匀分布,减少晶界共晶组织,进而抑制热裂纹或气 孔等缺陷产生。

2.3 显微硬度

电弧熔覆金属各区域显微硬度分布如图8所示。母材 平均显微硬度为HV(142±10)。电弧熔覆金属显微硬度较母 材有所降低。两种电弧电流模式下,重熔填充金属区的平均 硬度相当,平均硬度约为HV135。相比母材,重熔金属显微 硬度降低的主要原因有:首先,重熔金属经历了熔化+凝固过 程,相比母材热-力加工态组织,平均晶粒尺寸有所增大,尤 其是长条状柱状晶和枝晶,多柱或多枝平行排列,形成大面 积集束结构,且具有强烈的择优取向性;其次,重熔组织在凝 固过程中存在显著的元素偏析,导致大量第二相产生,降低 了奥氏体基体的元素固溶度程度,导致基体强度降低。



(a) 超音频脉冲电弧



(b) 直流电弧图 7 典型成形缺陷Fig. 7 Typical formation defects

直流电弧重熔母材区平均硬度达到HV(135±12),与重 熔填充金属区硬度相当。相较而言,超声频脉冲电弧制备 的重熔母材区硬度相对更低,平均硬度为HV(130±18)。从 微观组织表征结果可知,两种电弧模式导致重熔母材区都 由胞状晶构成,且胞状晶平均晶粒尺寸相当,可排除由晶粒 尺寸差异引发的硬度差异。据文献报道,Invar合金熔覆金 属中易产生γ'(Fe,Ni)相和FeNi₃等析出相,可强化基体,直 流电弧熔覆金属硬度值更高,可能由析出相含量更高引起。 但是,富Ni析出相的产生会消耗基体中的Ni元素,将对合 金Invar效应产生不利影响^[4]。



Fig. 8 Distribution of microhardness among different regions

3 结论

通过研究,可以得出以下结论:

(1)采用超声频脉冲电弧可获得良好的熔覆成形,熔深 达到2.7mm。与普通直流电弧相比,超声频脉冲电流热输 入降低123J/mm(约14%),可获得相当的熔深。

(2)两种电弧模式重熔填充金属中部区域为全柱状枝 晶结构;重熔母材区大部分由胞状晶构成,但在超声频脉冲 电弧作用下胞状晶柱状生长可被有效阻断,进而获得短棒 状胞状晶,证明了超声频脉冲对重熔组织具有抑制柱状晶 凝固生长、细化晶粒的效果。

(3)超声频脉冲电弧重熔金属区粗大柱状晶晶界结合 良好,未观察到明显的成形缺陷。直流电弧导致重熔金属 区柱状晶晶界处可观察到大量微米尺度裂纹。超声频脉冲 电弧可降低热输入,促进熔池搅动,有利于抑制热裂纹的产 生。

参考文献

[1] 王玉华,陈洁,占小红,等.复合材料Invar模具制造技术分析
 [J].航空制造技术,2014(11):93-95+99.

Wang Yuhua, Chen Jie, Zhan Xiaohong, et al. Manufacturing technology research on Invar composites mould [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(11): 93-95+99. (in Chinese)

- [2] Zhan Xiaohong, Meng Yao, Zhou Junjie, et al. Quantitative research on microstructure and thermal physical mechanism in laser melting deposition for Invar [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018(31): 221-231.
- [3] Chen Chaoyue, Xie Yingchun, Liu Longtao, et al. Cold spray additive manufacturing of Invar 36 alloy: Microstructure, thermal expansion and mechanical properties[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 72(13): 39-51.
- [4] Qiu Chunlei, Nicholas J E A, Moataz M A. Selective laser melting of Invar 36: Microstructure and properties [J]. Acta Materialia, 2016(103): 382-395.
- [5] 田天,崔丽,贺定勇,等.激光选区熔化成形TC4钛合金激光 焊接头组织与力学性能[J]. 航空科学技术, 2022, 33(4): 102-107.

Tian Tian, Cui Li, He Dingyong, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded TC4 titanium alloy by selective laser melting[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(4): 102-107 .(in Chinese)

[6] 武永,邓威,刘恺,等. 层间超声冲击对TIG电弧增材制造
 2219铝合金组织和力学性能的影响[J]. 航空科学技术, 2021,
 32(11): 80-86.

Wu Yong, Deng Wei, Liu Kai, et al. Effect of interlayer ultrasonic impact on microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy manufactured by TIG arc additive[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(11): 80-86. (in Chinese)

[7] 从保强,齐铂金,周兴国,等.超声频脉冲方波电流参数对
 2219铝合金焊缝组织和力学性能的影响[J].金属学报,2009,
 45(9):1057-1062.

Cong Baoqiang, Qi Bojin, Zhou Xingguo, et al. Influences of ultrasonic pulse square-ware current parameters on microstructures and mechanical properties of 2219 aluminum alloy weld joins[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(9): 1057-1062.(in Chinese)

[8] 王义朋,齐铂金,从保强,等.Al-Mg合金超高频脉冲VP-GTAW电流参数优化[J].稀有金属材料与工程,2018,47(11):

3522-3527.

Wang Yipeng, Qi Bojin, Cong Baoqiang, et al. Optimization of ultrahigh frequency pulsed VP-GTAW welding parameters for aluminum-magnisium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(11): 3522-3527.(in Chinese)

[9] 邹赟. INVAR 合金表面激光熔覆层的显微组织及性能研究
 [D]. 上海:上海工程技术大学, 2020.
 Zou Yun. Microstructure and mechanical properties of composite coatings on Invar alloy by laser cladding [D].

Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2020. (in Chinese)

- [10] Li Hang, Chen Bo, Tan Caiwang, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of laser metal deposition of Invar 36 alloy [J]. Optics and Laser Technology, 2020, 125: 106037.
- [11] 胡汉起.金属凝固原理[M].北京:机械工业出版社,2000.
 Hu Hanqi. Fundamentals of metal solidification [M]. Beijing: China Machine Press, 2000.(in Chinese)

- [12] 陈洁.基于热效应的复材成型 Invar钢模具焊接工艺与性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018.
 Chen Jie. Research on welding technology and properties of Invar steel mould based on thermal accumulation effect [D].
 Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.(in Chinese)
- [13] 葛瑞荣, 董向群, 林培辉, 等. 不锈钢—般钢异种金属氩弧焊 接工艺及性能分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(13): 201-202.
 Ge Ruirong, Dong Xiangqun, Lin Peihui, et al. Analysis on argon arc welding process and properties of dissimilar metal stainless steel-invar [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (13): 201-202.(in Chinese)
- [14] 王希靖, 柴廷玺, 赵青山, 等. 因瓦合金4J36等离子焊接工艺 及接头性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 19-23+114.
 Wang Xijing, Chai Tingxi, Zhao Qingshan, et al. Process and properties of plasma arc welded Invar alloy 4J36 [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(4): 19-23+114.(in Chinese)

Interfacial Microstructure of Pulsed-Arc Deposited Invar Alloy

Zeng Caiyou¹, Yu Jielin¹, Zhang Shiwei², Wan Xiaohui², Qi Bojin¹, Cong Baoqiang¹

1. Beihang University, Beijing 100191, China

2. Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China

Abstract: In order to improve the repair and remanufacturing quality of Invar alloy mold for aviation composites, this paper studies the effects of ultrasonic-pulsed arc and ordinary direct-current arc on the interfacial microstructure evolution behavior of Invar alloy arc deposited metal. The results show that by introducing ultrasonic pulse current, the fusion penetration equivalent to that of conventional direct-current arc can be obtained under the condition of lower heat input. The remelted filler metal is mainly composed of columnar dendrites, and the remelted base metal area is mainly composed of cellular crystals. Compared with direct-current arc, ultrasonic pulse arc can block the columnar growth of cellular crystals and obtain short rod cellular crystals. A large number of intergranular micron-scale thermal cracks are observed in the remelting metal zone by direct-current arc, and the ultrasonic pulse arc can effectively suppress thermal crack defects.

Key Words: additive manufacturing; mold repair; Invar alloy; pulsed arc; microstructure

Received: 2022-04-10; Revised: 2022-05-19; Accepted: 2022-06-30 Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20200011025002)