

TIG 电弧增材 316L 不锈钢中的热行为对其组织演变的影响

肖笑^{1,2}, 尹玉祥^{1,2}, 李春风^{1,2}, 李晨星^{1,2}, 张柯柯^{1,2}

(1.河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023;

2.有色金属共性技术河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471023)

摘要:以钨极氩弧焊(TIG焊)为热源,采用 $\phi 1.0$ mm的316L不锈钢焊丝获得了单道多层的直壁构件,通过光学显微镜分析沉积层的微观组织形貌。结果表明,热累积非平衡状态的单层沉积层顶部组织多为骨架状枝晶和等轴晶,底部多为短枝晶;热累积平衡状态的单层沉积层顶部组织多为树枝晶和等轴晶,底部组织以短枝晶为主,存在少量长枝晶。单层沉积层在电弧的反复热作用下,发生微观组织的演变,从而形成最终的构件组织。在热累积非平衡状态的组织演变过程中,热累积增多使得凝固过程中过冷度改变,下层沉积层组织逐渐由骨架状铁素体转变为树枝晶;在热累积平衡状态的组织演变过程则以树枝晶转变为板条铁素体为主。

关键词:TIG增材; 不锈钢; 微观组织

中图分类号: TG142.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2020)06-0097-09

Influence of thermal behavior on microstructure evolution of TIG arc additive manufacture for 316L stainless steel

XIAO Xiao^{1,2}, YIN Yu-xiang^{1,2}, LI Chun-feng^{1,2}, LI Chen-xing^{1,2}, ZHANG Ke-ke^{1,2}

(1.School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

2.Generic Technology of Nonferrous Metals Henan Collaborative Innovation Center, Luoyang 471023, China)

Abstract:The single-pass multi-layer components were prepared by TIG arc additive manufacture method using 316L stainless steel wire with diameter of 1.0 mm as the filler materials. The results show that the top microstructure of the monolayer deposited layer in the heat accumulated non-equilibrium state is mostly skeleton-like dendrites and equiaxed grains, and the bottom is mostly short dendrites. The top microstructure of the monolayer deposited layer in the heat accumulated equilibrium state is mostly dendrites and equiaxed grains, and the bottom microstructure is mainly short dendrites, with a small amount of long dendrites. Under the repeated heat of the arc plasma, the microstructure of the monolayer deposit layer evolves, thus forming the final component structure. In the process of microstructure evolution in the heat accumulation non-equilibrium state, the degree of super-cooling changes during solidification due to the increase of heat accumulation, the microstructure of the bottom layer is gradually changed from skeleton-like ferrite to dendrite, while in the heat accumulation equilibrium state, the microstructure is changed from dendrite to lath ferrite.

Keywords:TIG additional manufacture; stainless steel; microstructure

增材制造技术诞生于20世纪80年代末期,是依靠建立CAD三维模型,按照预先成形路径“自下而上”的成形累加的制造方法,是一种新型制造方式^[1-3]。增材制造能够实现复杂结构零件的成形,且具有效率高、成本低、加工周期短等优势^[4]。金属增材制造中最常用的热源形式有激光,电子束及电弧。

激光增材制造成型精度高,成本也高;电子束增材制造具有能量密度高,工作环境要求比较苛刻;相比其他两种热源,电弧增材制造在大尺寸构件具有突出优势,虽然其成形精度低、组织性能差,但是弥补了大型制造领域的不足,并且电弧增材制造以其高增材速率、强适应性、低成本而受到低端制造行业的广泛使

收稿日期: 2019-11-19; **修订日期:** 2020-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(51705137);中国博士后面上项目(2018M070);河南省自然科学基金(162300410092)

作者简介: 肖笑(1985—),女,讲师,主要从事电弧焊基础研究,发表论文10余篇,E-mail: xiaoxiaonov@163.com。

引用格式: 肖笑,尹玉祥,李春风,等. TIG 电弧增材 316L 不锈钢中的热行为对其组织演变的影响[J].材料热处理学报,2020,41(6):97-106.

XIAO Xiao, YIN Yu-xiang, LI Chun-feng, et al. Influence of thermal behavior on microstructure evolution of TIG arc additive manufacture for 316L stainless steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(6):97-106.

用,受到了各行业的广泛关注。

电弧增材成形过程中熔池和热影响区的尺寸较大,并且在电弧热源的往复运动下,已成形构件将继续受到加热作用,使得成形过程中热累积较高。同时,随着成形高度的增加,基板的散热能力降低。因此,成形件各部分的热量分布发生了变化,即每一沉积层多经历的热循环有所相同。这样,WAAM成形件中各位置热量分布的差异使得成形件在组织、性能上存在各向异性^[5]。刘勇^[6]基于冷金属过渡(CMT)的方法进行了304不锈钢的增材制造,确定了工艺参数对微观组织形貌和枝晶间距会产生影响,分析了直壁构件的微观组织。本质影响是热输入不同引起的组织变化。贺立华^[7]以316L不锈钢焊丝为成形材料进行MAG增材快速成型,从冷却速度、过冷度等方面分析了316L不锈钢构件的凝固模式,并研究了搭接率、成形路径和层间温度等对不锈钢微观组织及力学性能的影响。Bai等^[8]研究了不同热输入条件MIG焊电弧增材304不锈钢构件的微观结构。研究表明随着热量输入的逐渐减少,相同特征区域的晶粒在不同过程中逐渐细化,显微硬度随着热量输入的减少而增加。对比上面学者可以得出热量不仅对组织形貌产生影响,而且对组织性能也有着至关重要的作用。以上学者的研究表明成形过程中构件所经历的热变化对构件组织形貌起着较大影响。

不同的电弧增材方法也会影响成形件的热经历,从而改变成形件的组织及力学性能。Zhang等^[9]使用不同电弧模式的交流CMT电弧电源,增材制造了低孔隙率的Al-6Mg薄壁部件。研究结果表明VP-CMT方法成形的构件最大获得333 MPa的拉伸强度,强度超过Al-6Mg锻造合金。Zuo等^[10]采用TIG-MIG混合热源的方法增材制造了5356铝合金部件,分析了增材和热处理后零件的显微组织演变、力学性能和断裂形态。研究表明随着热处理温度的升高,晶粒尺寸变大。因此,增材构件沉积层的组织形貌与熔池的凝固模式紧密有关。Rodriguez等^[11]比较了CMT和TopTIG两种方法增材的不锈钢构件的适用性,分析了单位时间内优化材料沉积速率,提高成形速率。以上研究表明,不同的电弧增材方法对成形件的热量输入不同,使得构件的组织性能也存在一定的差异。MIG增材制造具有制造成本低、生产效率、形式灵活的优点,但是电弧能量加热范围大,热累积严重;CMT增材速度快,成形好,热输入小的优点;而TIG电弧增材适应性强,不仅热输入

小而且电弧稳定,适用于各种增材形式,易于实现成形过程的控制。

柏久阳等^[12]采用TIG增材制造的方法制造4043铝合金零件,并分析了增材构件的组织特征及力学性能。结果表明,沉积态4043铝合金组织中存在着大量的柱状树枝晶,晶粒生长方向垂直于焊缝,柱状树枝晶穿越层间条纹区域。张萍等^[13]采用TIG增材制造的方法成型TC4钛合金零件,并对成型件的力学性能特征及增材工艺参数对成型零件的力学性能的影响规律进行研究。研究表明成型零件的力学性能存在着各向异性,这是由于柱状晶定向生长造成的。曲扬等^[14]采用316L不锈钢在Q235 A基板上进行TIG填丝增材制造成形试验,研究不锈钢增材制造成形工艺,分析不锈钢增材制造成形件的显微组织。研究发现通过调整成形工艺参数,可以获得成形质量优良的不锈钢构件。不同的学者通过TIG电弧增材获得了铝合金、钛合金及不锈钢等材料的直壁构件,并对其组织性能进行了研究,得到了不同材料的组织成形特点。Ji^[15]基于TIG电弧增材研究了304 L不锈钢的力学性能和显微组织。研究表明随着沉积层增高,冷却速度变慢,沉积形态更稳定。黄丹等^[16]研究TIG增材5A06铝合金单层和多层成形时预热温度和电流对成形形貌的影响,分析成形件的微观组织及力学性能。研究发现随着沉积层增加单层沉积层高度逐渐降低,在8层后稳定。在电弧增材的构件成形过程中,由于不同沉积层散热条件的变化,以及电弧对成形沉积层的重复加热,造成了沉积层热的积累增加,导致各层构件经历不同的热循环过程,因此,对电弧增材构件的微观组织及力学性能具有较大的影响。然而,通过以上学者的研究分析可以看出,对TIG电弧增材316L不锈钢构件的组织形成过程及演变规律还未见报道。

本文采用TIG电弧作为增材热源,利用实验系统获取316L不锈钢直壁构件。对不锈钢构件进行热累积非平衡状态的各层沉积层微观组织及热累积平衡状态的各层沉积层微观组织分析,获取沉积构件的初始微观组织,进而对不锈钢构件的最终成形形貌进行分析,获得316L不锈钢直壁构件的组织演变过程。

1 实验材料与方法

TIG增材制造实验系统由机器人系统与增材系统组成,如图1所示。机器人系统由松下TA1400型

焊接机器人构成,用于固定焊枪并调整焊枪的角度;增材系统由 TIG 焊机、送丝机和二维移动平台构成,用于实现直壁构件的成形与移动。为保证直壁构件的良好成形,送丝方向采用前送丝,送丝角度为 30°,电弧长度 5 mm,焊枪与基板垂直,以纯氩气为保护气体,气体流量 15 L/min,根据各层沉积层环境,控制沉积层层间冷却时间为 1 min 左右。本次实验工艺参数为:增材电流 200 A,送丝速度 200 cm/min,增材速度为变量,初始增材速度 250 mm/min。本次实验增材工艺参数如表 1 所示。



图 1 增材实验系统

Fig.1 Additive experimental system

表 1 不锈钢 TIG 增材构件工艺参数

Table 1 Process parameters of TIG stainless steel component

No.	Welding rate/ (mm/min)	Wire feed rate/ (mm/min)	Welding current/A	Cooling time/s
1-10	250	200	200	60

为了确保增材条件的一致性,实验获得的单道十层直壁构件采用分段式增材,第一层沉积层长度 18 cm,第二层 16 cm,以此每层递减 2 cm,第六层为 8 cm,第十层为 8 cm,如图 2 所示。实验所用基板为 304 不锈钢,尺寸为 200 mm×60 mm×4 mm,焊丝是直径为 1 mm 的 316L 不锈钢焊丝,其成分如表 2 所示。

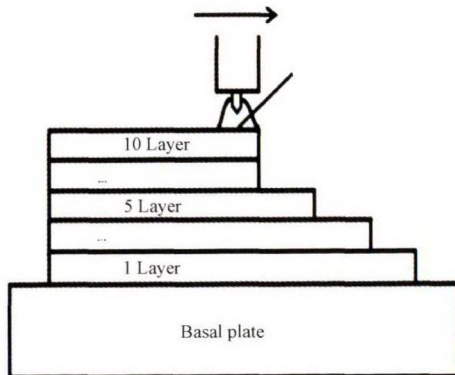


图 2 实验路径

Fig.2 Experimental approaches

表 2 316L 不锈钢焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Composition analysis of the 316L stainless steel wire (mass fraction, %)

C	Cr	Ni	Mn	P	S	Mo	Si	Fe
≤0.03	19	12.0	≤2.0	≤0.035	≤0.03	2.0-3.0	≤1.0	Bal.

2 316L 不锈钢 TIG 增材的组织演变分析

TIG 焊电弧作为增材的热源,对构件的往复热作用引起了沉积层的热量累积,从而造成了沉积层的重复预热及重熔等问题。因此,沉积层成形的组织演变也将变得更为复杂。沉积层热累积是指在一定时间内顶层沉积层因增材导致沉积层累积热量与沉积层冷却速率不平衡的热量差值。随着沉积层数增高,热量差值稳定在某一区间值即为沉积层热累积饱和。为了分析 316L 不锈钢 TIG 增材过程中的组织演变,首先分析增材过程中每层沉积层的微观组织特点,根据沉积层热累积是否达到平衡对沉积层组织分为两部分进行分析,即热累积非平衡状态的各层沉积层微观组织和热累积平衡状态的各层沉积层微观组织。再对比不同层数构件的微观组织,从而得到沉积构件的组织演变过程。

2.1 热累积非平衡状态的各层沉积层微观组织分析

热累积非平衡状态是指增材过程中构件散热条件的变化使得热量累积与散失不平衡,经过试验分析发现非平衡热累积一般出现在增材前 4 层。如图 3~5 是非热平衡状态下增材单层、增材 3 层、增材 4 层沉积层微观组织演变过程。

根据单层沉积层形貌可将单层沉积层分为 3 部分,分别是底部沉积层、中部沉积层和顶部沉积层。如图 3(a)所示,单层沉积层顶部组织为细小的短枝晶,由下到上枝晶组织逐渐密集,底部沉积层整体呈短而碎的枝晶形貌,部分枝晶无二次结晶,整体枝晶呈向上生长趋势,且枝晶界内存在少量铁素体。根据 316L 不锈钢成分得 $C_{req}/N_{ieq} = 15.7$,理论上 316L 不锈钢沉积层凝固形式应为 FA。而铁素体存在胞晶晶界和枝晶界为 AF 凝固模式,与实际成形结果不符。由此推测平衡凝固条件下,凝固速度和成分过冷度造成凝固模式的改变,熔池凝固模式从 FA 模式转化为 AF 模式。推测增材过程中部分母材被融化,导致 $(C_{req}/N_{ieq}) < 1.48$,凝固模式发生改变。在增材条件下,根据结晶规律,凝固时沉积层从下往上进行凝固,所以底部熔池中有足够的 Cr 偏聚在亚晶界

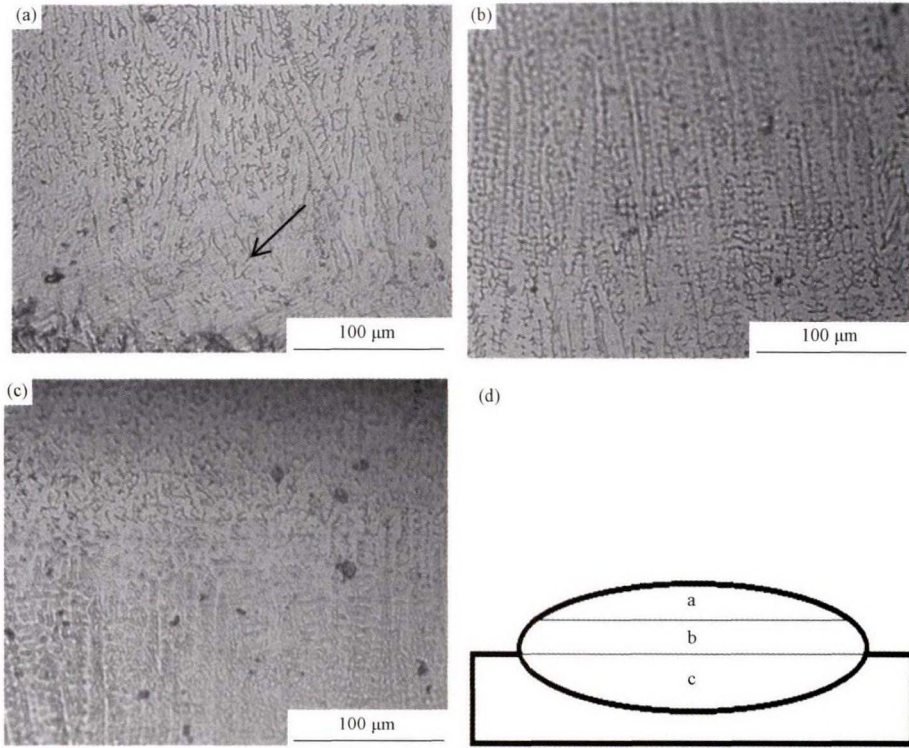


图 3 单层增材微观组织 (a) 顶部微观组织; (b) 中部微观组织; (c) 底部微观组织; (d) 单层示意图
 Fig.3 Microstructure of single layer (a) top microstructure; (b) middle microstructure;
 (c) bottom microstructure; (d) single layer weld diagram

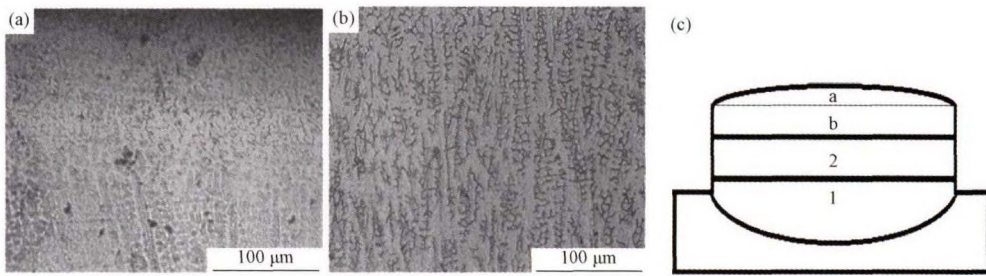


图 4 增材 3 层顶层微观组织 (a) 顶部微观组织; (b) 底部微观组织; (c) 3 层示意图
 Fig.4 Top layer microstructure of three-layer (a) top microstructure of top layer;
 (b) bottom microstructure of top layer; (c) three-layer weld diagram

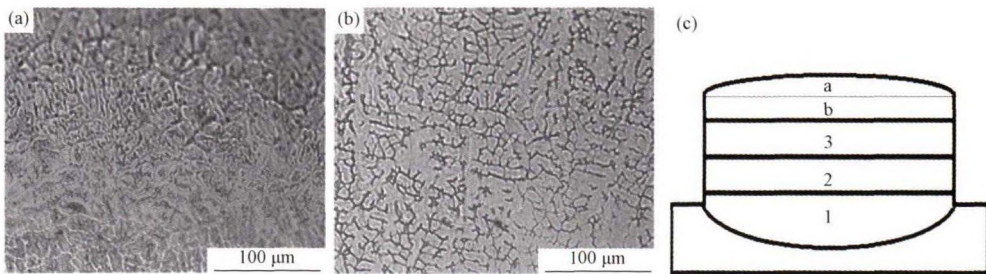


图 5 增材 4 层顶层微观组织 (a) 顶部微观组织; (b) 底部微观组织; (c) 4 层示意图
 Fig.5 Top layer microstructure of four-layer (a) top microstructure of top layer;
 (b) bottom microstructure of top layer; (c) four-layer weld diagram

上而生成铁素体,这种沿边界形成的铁素体,由于已经富集了铁素体的生成元素,所以是稳定的,在随后的固态相变中不易转变为奥氏体,所以靠近基板二次枝晶较少。

图4和图5分别为增材3层和4层的顶层沉积层组织,图4(a)、图5(a)为顶层沉积层顶部形貌,图4(b)、图5(b)为顶层沉积层底部形貌。由图可知单层沉积层中部与增材3层底部沉积层微观组织相似,其组织枝晶排列规律,呈骨架状形貌,多为二次枝晶,枝晶生长方向明显朝上;增材4层底部沉积层生长着大量树枝晶,分布均匀,生长方向略朝上。增材4层图5(b)明显与单层图3(b)和3层图4(b)不同。根据 C_{req}/N_{ieq} 当量比以及上图形貌可知这两部分转化模式为FA。熔池凝固过程中,在沉积层融化边界处,温度梯度 G 大,结晶速度 R 又较小,故成分过冷接近于零。随着远离融化边界向沉积层中心过渡时,温度梯度 G 逐渐变小,结晶速度逐渐增大,结晶形态将向柱状晶和等轴晶发展,最终中部沉积层生成大量骨架状铁素体,所以中部沉积层为FA转化模式。根据此规律,图4(b)、图5(b)在成形过程中虽然部分下层沉积层发生重熔,但是熔池成分没有发生大的变化,所以第3、第4层底部沉积层与单层中部沉积层结晶模式同为FA。因为单层中部沉积层和第3层底部沉积层均为骨架状铁素体,符合其规律,但第4层底部沉积层为树枝晶,与其他不同,而沉积层过冷度不同微观组织也会不同。由此分析,相比单层和3层沉积层凝固,4层沉积层过冷度发生明显改变,因为随着增材层数增高,沉积层整体温度升高,沉积层凝固环境发生改变,致使增材4层沉积层过冷度变小,使得4层(图5b)微观组织不是骨架状铁素体而是树枝晶。

增材3层和增材4层的顶部沉积层组织分布均匀而致密,组织均为等轴晶奥氏体,组织排列无规则,无明显方向性。根据微观组织可知,顶部沉积层凝固模式为AF。因为中部沉积层生成大量骨架状铁素体,顶部熔池富Cr而贫Ni,所以 $(C_{req}/N_{ieq}) < 1.48$,凝固模式由FA转化为AF,又因为沉积层从下到上过冷度逐渐增加,沉积层冷却速度增加将会抑制第二相的产生,所以奥氏体作为初始相被生成,致使上部沉积层为等轴晶。比较图3(a)、图4(a)、图5(a)发现随着层数增加,等轴晶逐渐变大,等轴晶越来越明显,顶部等轴晶区域增大,说明随着层数增加沉积层顶部等轴晶反应逐渐充分,等轴晶生长逐渐变大,等轴晶区域也变大,而等轴晶的生长与熔池的过冷度有关。

由上分析可知随着增材层数增加沉积层微观组织在4层发生了明显改变,在增材参数不变情况下,沉积层形貌逐渐改变,沉积层过冷度逐渐发生改变。而随着增材层数增加唯一改变的是沉积层整体温度升高,即沉积层热累积逐渐增加,由此导致热累积的不平衡,随着增材层数增加,沉积层热累积逐渐增加,热累积影响着熔池内过冷度,最终导致沉积层的微观组织发生改变。正是沉积层形貌的改变说明沉积层热累积正处于一个变化的状态,即热累积不平衡。

2.2 热累积平衡状态的各层沉积层微观组织分析

随着增材层数增加沉积层热量的产生和散失逐渐达到平衡,沉积层热累积趋于饱和,所以热累积平衡状态一般发生在高层沉积层。以增材5层、10层沉积层微观组织变化为例分析说明热平衡状态的沉积层组织演变过程,其微观组织如图6~7所示。

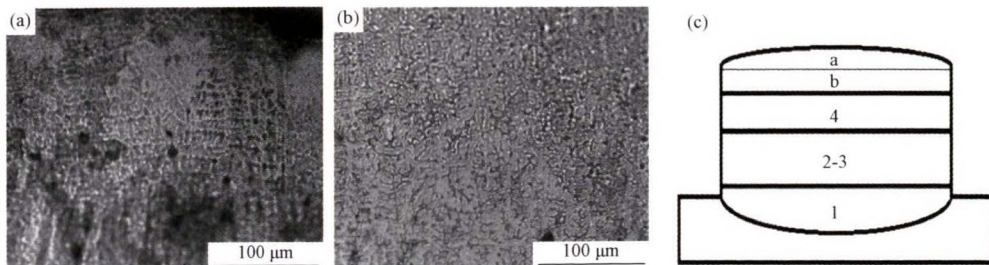


图6 增材5层顶层微观组织 (a) 顶部微观组织; (b) 底部微观组织; (c) 5层示意图

Fig.6 Top layer microstructure of five-layer (a) top microstructure of top layer; (b) bottom microstructure of top layer; (c) five-layer weld diagram

随着增材层数增加,沉积层的整体温度增加,沉积层的过冷度也会改变。由于客观环境限制,沉积层

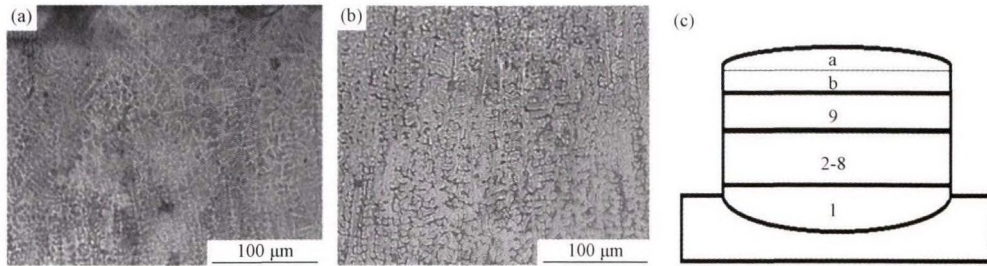


图7 增材10层顶层微观组织 (a) 顶部微观组织; (b) 底部微观组织; (c) 10层示意图

Fig.7 Top layer microstructure of ten-layer (a) top microstructure of top layer; (b) bottom microstructure of top layer; (c) ten-layer weld diagram

的温度会在某层趋于稳定,即沉积层微观组织结构不在改变。如图6(b)、图7(b)为第5、10层顶层沉积层的底部形貌,这两层沉积层底部形貌与第4层底部沉积层均为树枝晶,但是增材第5和10层组织更加紧密,有明显朝上生长趋势。图6(a)、图7(a)顶部沉积层组织无论等轴晶大小、形貌以及等轴晶区域面积基本相似。由上可知,增材5层和增材10层组织结构相同,因为影响沉积层凝固行为是由熔池过冷度决定的,由此推断第5、10层熔池凝固过冷度相似,即沉积层过冷度稳定。因此,沉积层过冷度由沉积层热累积决定,沉积层热累积在5层达到饱和。

2.3 增材构件组织演变过程分析

热量累积不仅影响熔池的凝固行为,同时也会对组织的固态相变产生影响。组织观察发现增材1层构件、2层构件和3层构件微观组织由下到上均呈短枝晶、长枝晶和等轴晶组织结构,微观组织相似。从增材4层构件顶层沉积层等轴晶下方开始出现树枝晶,继续增材顶层沉积层微观组织不变。在此基础上我们假定顶层沉积层除重熔外(因为等轴晶区域相对较小,在此默认上层沉积层全部重熔等轴晶区)不对下层沉积层产生影响,并以此作出增材十层构件组织示意图和实际组织示意图,如图8。

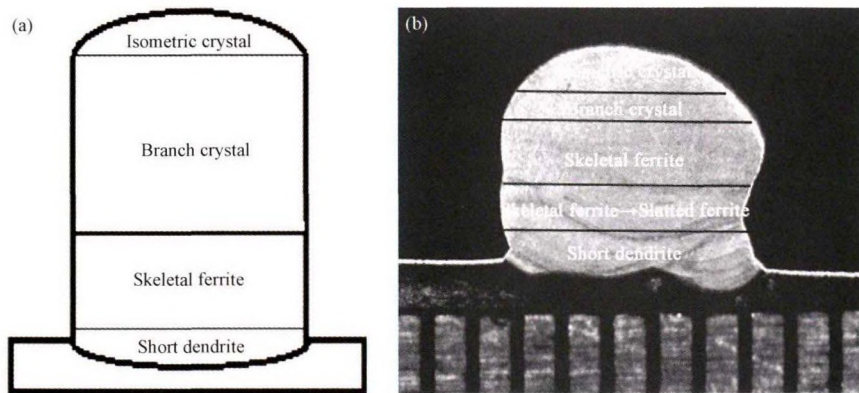


图8 增材4层以上组织示意图 (a) 理论增材组织示意图; (b) 实际增材组织示意图

Fig.8 Schematic diagram of microstructure of the additive above 4 layers (a) theoretical microstructure diagram of the additive; (b) actual microstructure diagram of the additive

2.3.1 非稳态下的增材微观组织

根据不同增材层数的微观组织图,增材构件的微观组织在4层发生两种变化:①靠近母材的底层沉积层枝晶随着增材层数增加逐渐连续,在四层以后基本不再发生改变,如图9所示;②下层沉积层开始出现板条铁素体,随着增材层数增加,下层沉积层组织逐渐由树枝晶转变为板条形状。

沉积层热累积对下层沉积层必定产生热影响作

用,而组织的固态相变需要达到一定的热才会产生变化,根据图9可以看出底层沉积层在增材3层(图9c)开始产生变化,沉积层微观组织由碎枝晶逐渐转变为长而连续枝晶。推测热累积随着增材层数增多而增加,底层沉积层在第3层达到固态相变温度。由于固态相变,底层部分短枝晶转变为长枝晶,枝晶长度增加,继续增材,长枝晶增多,增材4层后底层微观组织(图9d)不再变化。由于靠近基板位置沉积层

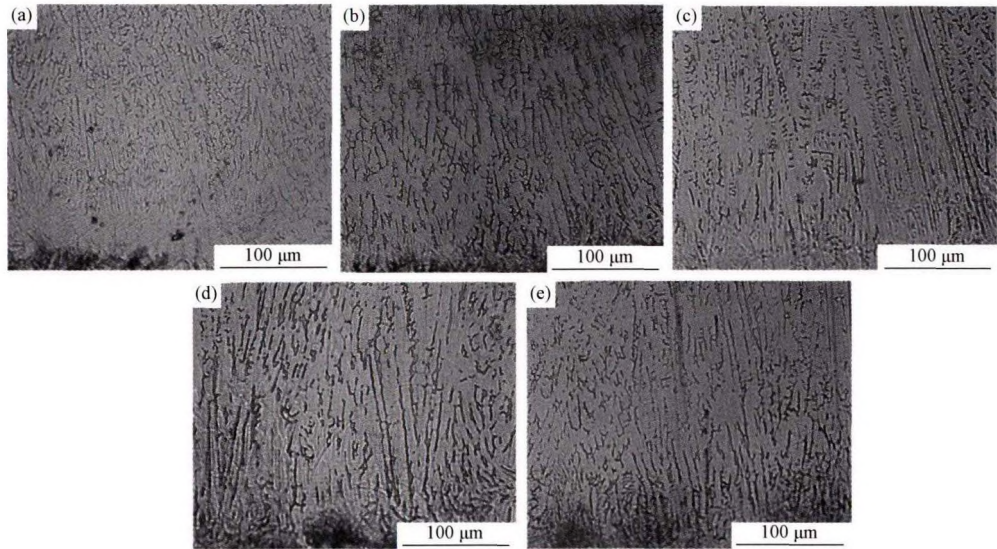


图 9 增材不同层数时靠近基板的底层微观组织 (a) 单层; (b) 双层; (c) 3 层; (d) 4 层; (e) 5 层

Fig.9 Microstructure of bottom layer which near the matrix with different additive layers

(a) single; (b) double; (c) three; (d) four; (e) five

组织最为稳定,由此推测上层沉积层对下层沉积层的影响大概为 3 层。

2.3.2 稳态下增材微观组织

不同增材层数构件微观组织因为热累积问题微

观组织发生改变,同构件的沉积层微观组织随着沉积层层数增加微观组织也在变化,如图 10 所示。

如图 10 是增材 10 层时不同中间层的微观组织,图 10(a)~10(d)是由下到上的微观组织变化,可以

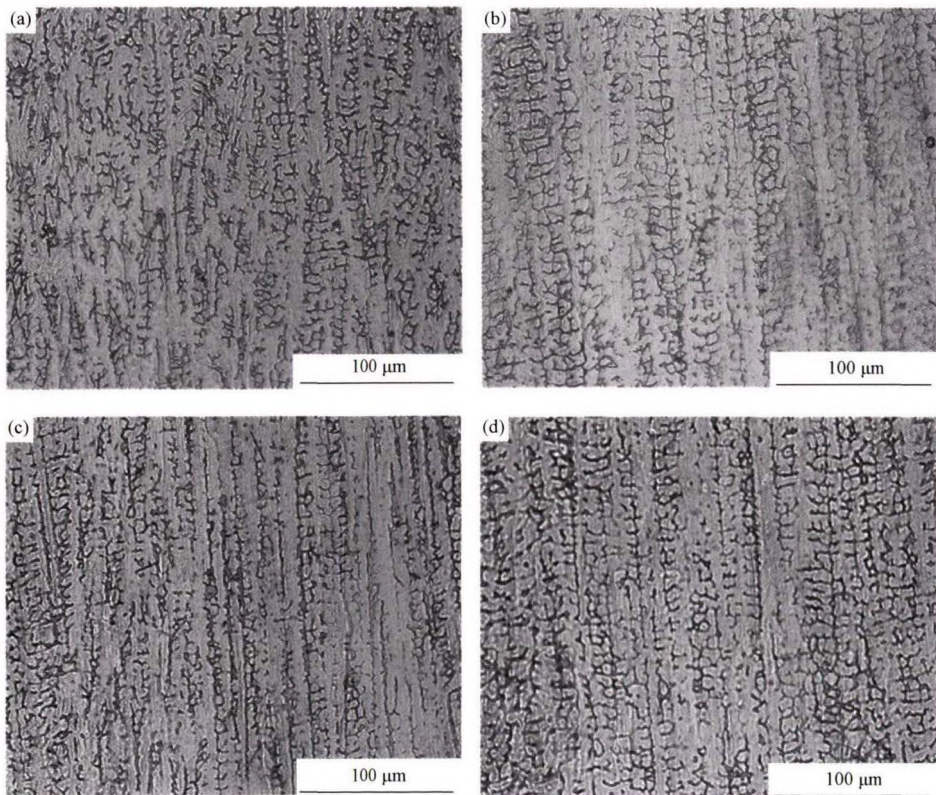


图 10 增材 10 层中间层微观组织 (a) 3 层; (b) 4 层; (c) 5 层; (d) 9 层

Fig.10 Microstructure of intermediate layer of ten-layer (a) three; (b) four; (c) five; (d) nine

发现随着增材构件层数增加,短枝晶逐渐转化为板条枝晶,直到全部转化为板条枝晶,继续增材,微观组织基本不在发生改变。由图 8 可知,在增材 4 层及 4 层以后,增材构件的顶层沉积层由树枝晶和等轴晶组成,理论上 4 层以上沉积层组织应都为树枝晶和顶层的等轴晶组成,而实际上下层树枝晶全部转化为板条枝晶,因为沉积层在 4 层左右时沉积层热累积就达到稳态,热累积和后热促使下层沉积层组织发生固态相变,使树枝晶转化为板条枝晶,随着沉积层增高,沉积层热累积不再改变,所以后续微观组织转变与此相同,最终得到如图 8(b) 成形形貌。

3 结论

1) 在非平衡热累积情况下,顶层熔池结晶形貌由骨架状枝晶和等轴晶组成,由于前期热累积不足,增材 3 层后靠近顶部沉积层组织才产生明显变化,骨架状铁素体转变为树枝晶;

2) 在平衡热累积环境下,顶层沉积层因为热累积饱和,熔池凝固过程中过冷度变小,顶层沉积层由树枝晶和等轴晶组成,沉积层热累积大概在 5 层左右达到饱和。

3) 底层沉积层组织在增材 3 层后发生改变,且在 4 层之后底部沉积层形貌不再变化,由此得出上层沉积层对底层沉积层影响为 3 层左右。

参 考 文 献

- [1] 李涤尘,田小永,王永信.增材制造技术的发展[J].电加工与模具,2012(S1):20-22.
LI Di-chen, TIAN Xiao-yong, WANG Yong-xin, et al. Developments of additive manufacturing technology[J]. Electromachining and Mould, 2012(S1):20-22.
- [2] 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
LU Bing-heng, LI Di-chen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. Machine Building and Automation, 2013, 42(4):1-4.
- [3] 田彩兰,陈济轮,董鹏,等.国外电弧增材制造技术的研究现状及展望[J].航天制造技术,2015(2):57-60.
TIAN Cai-lan, CHEN Ji-lun, DONG Peng, et al. Current state and future development of the wire arc additive manufacture technology abroad[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(2):57-60.
- [4] 王庭庭,张元彬,谢岳良.丝材电弧增材制造技术研究现状及展望[J].电焊机,2017,47(8):60-64.
WANG Ting-ting, ZHANG Yuan-bin, XIE Yue-liang, et al. Status and development prospects of the wire arc additive manufacture technology[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(8):60-64.
- [5] 杨海欧,王健,王冲,等.电弧增材制造 TC4 钛合金宏观晶粒演化规律[J].材料导报,2018,32(12):2028-2031.
YANG Hai-ou, WANG Jian, WANG Chong, et al. Macrostructure evolution of TC4 titanium alloy fabricated by wire and arc additive manufacturing[J]. Materials Review, 2018, 32(12):2028-2031.
- [6] 刘勇.CMT 电弧熔丝增材制造 304 不锈钢组织和性能研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2018.
LIU Yong. Research on the microstructure and mechanical property of 304 stainless steel produced by CMT wire arc additive manufacturing[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [7] 贺立华.焊接快速成形 316L 不锈钢的组织 and 性能研究[D].南昌:南昌航空大学,2015.
HE Li-hua. Microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel fabricated by welding rapid forming[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
- [8] Bai Y, Gao Q, Chen X, et al. Research on microstructure and properties of 304 stainless steel made by MIG filler additive manufacturing[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 2019, 237(3):32-96.
- [9] Zhang C, Li Y, Gao M, et al. Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 711:415-423.
- [10] Zuo W, Ma L, Lu Y, et al. Effects of solution treatment temperatures on microstructure and mechanical properties of TIG-MIG hybrid arc additive manufactured 5356 aluminum alloy[J]. Metals and Materials International, 2018, 24(6):1346-1358.
- [11] Rodriguez N, Vázquez L, Huarte I, et al. Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel[J]. Welding in the World, 2018, 62(5):1083-1096.

- [12] 柏久阳,王计辉,师建行,等.TIG增材制造4043铝合金薄壁零件组织及力学性能[J].焊接,2015(10):23-26.
BAI Jiu-yang, WANG Ji-hui, SHI Jian-hang, et al. Microstructure and mechanical properties of 4043 aluminum alloy thin-wall parts fabricated by TIG[J]. Welding and Joining, 2015(10):23-26.
- [13] 张萍,刘德波,师建行,等.TIG增材制造TC4钛合金力学性能及工艺参数的影响规律[J].焊接,2015(10):45-48.
ZHANG Ping, LIU De-bo, SHI Jian-hang, et al. Effects of mechanical properties and technological parameters on TC4 titanium alloy manufactured by TIG additive[J]. Welding and Joining, 2015(10):45-48.
- [14] 曲扬,杨可,郭博静,等.不锈钢电弧增材制造成形[J].电焊机,2018,48(1):15-18.
QU Yang, YANG Ke, GUO Bo-jing, et al. Wire and arc additive manufacturing of 316L stainless steel[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(1):15-18.
- [15] Ji L. Microstructure and mechanical properties of 304L steel fabricated by arc additive manufacturing[J]. EITCE 2017, Zhuhai, guangdong, China, 2017, 212-217.
- [16] 黄丹,朱志华,耿海滨,等.5A06铝合金TIG丝材-电弧增材制造工艺[J].材料工程,2017,45(3):66-72.
HUANG Dan, ZHU Zhi-hua, HENG Hai-bin, et al. TIG wire and arc additive manufacturing of 5A06 aluminum[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(3):66-72.