

加速电压对电子束熔丝沉积 304 不锈钢组织与静力学性能的影响*

EFFECT OF ACCELERATING VOLTAGE ON MICROSTRUCTURE AND STATICS PROPERTIES OF SS304 DEPOSITED BY ELECTRON BEAM FUSE

陈家琪**^{1,2} 孙宝福***¹ 宁薇^{1,2} 冯美荣³

(1. 桂林理工大学机械与控制工程学院, 桂林 541006)

(2. 桂林狮达技术股份有限公司, 桂林 541004)

(3. 桂林市永福县计量检定测量所, 桂林 541800)

CHEN JiaQi^{1,2} SUN BaoFu¹ NING Wei^{1,2} FENG MeiRong³

(1. College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

(2. Guilin Shida Technology Co., Ltd., Guilin 541004, China)

(3. Guilin Yongfu County Metrology Verification Survey Institute, Guilin 541800, China)

摘要 电子束熔丝沉积(Electron Beam Fuse Deposition, EBFD)是近年来发展较为迅速的金属 3D 打印技术。采用 EBFD 技术针对 304 不锈钢材料进行打印,比较电子束熔丝沉积过程中不同加速电压对成形产品宏观形貌、致密度、显微组织和力学性能的影响。结果表明,加速电压为 50 kV 时,微观组织中奥氏体晶粒较少,加速电压增加至 60 kV 时,奥氏体晶界完全形成,并随着加速电压增加而持续生长;当加速电压为 60 kV 时,综合力学性能表现最佳,各向异性表现最弱,断口也表现为韧性断裂。

关键词 电子束熔丝沉积 304 不锈钢 加速电压 各向异性

中图分类号 TG456.3

Abstract Electron beam fuse deposition (EBFD) is a rapidly developed metal 3D printing technology in recent years. The EBFD technology was used to print 304 stainless steel materials. The effects of different accelerating voltages in the process of EBFD on the morphology, density, microstructure and mechanical properties of the forming products were compared. The results show that when the accelerating voltage is 50 kV, there are a few austenite grains in the microstructure. When the accelerating voltage is increased to 60 kV, the austenite grain boundary is completely formed, and the growth continues with the increase of the accelerating voltage. When the accelerating voltage is 60 kV, the comprehensive mechanical properties are the best, the anisotropy is the weakest, and the fracture is ductile fracture.

Key words Electron beam fuse deposition; SS304; Accelerating voltage; Anisotropy

Corresponding author: SUN BaoFu, E-mail: 1204605467@qq.com

The project supported by the Guangxi Innovation-Driven Development Special Fund Project (No. AA18242046).

Manuscript received 20220926, in revised form 20221203.

0 引言

电子束熔丝沉积(Electron Beam Fuse Deposition, EBFD)技术是航空航天工业、生物医学工程等领域中制造金属部件的一种具有广阔应用前景的技术,其具

有直接成形复杂零件,减少加工时间,缩短工期等优势,并且生产和材料成本低,材料利用率接近 100%。与激光增材制造技术相比,EBFD 的能量效率有明显优势,能够达到 95%^[1-4]。

EBFD 逐层成形的特点导致材料成形过程中各个

* 20220926 收到初稿, 20221203 收到修改稿。广西创新驱动发展专项资金项目(AA18242046)资助。

** 陈家琪, 男, 1998 年生, 江苏宿迁人, 汉族, 桂林理工大学机械与控制工程学院硕士研究生, 主要研究方向为电子束增材制造。

*** 孙宝福(通信作者), 男, 1970 年生, 山东枣庄人, 汉族, 桂林理工大学机械与控制工程学院副教授, 主要研究方向为材料塑性成形、增材制造。

方向上热量传递不均匀,进而使成形产品的力学性能存在明显的各向异性。近年来,金属增材制造材料的各向异性引起人们广泛关注,机械性能各向异性存在于不同材料的零件中,包括钛合金^[5-7]、不锈钢^[8-9]、镍基超级合金^[10-11]、铝合金^[12-13]等。304 不锈钢是目前应用最广泛的奥氏体不锈钢,强度高,耐磨损、耐腐蚀,表面光泽度好,具有良好的综合性能和焊接性能,常见于薄壁结构的应用场合(如工业建筑墙体、化学容器、船舶壳体等)。

目前对于 EBFD 的研究主要集中于束流强度、移动速度和送丝速度等。付贝贝^[14]在实验中发现 EBFD 成形产品层宽主要与束流强度有关,束流强度越大,层宽越大;层高主要与移动速度和送丝速度有关,移动速度和送丝速度越大,层高越大。树西等^[15-16]认为由束流强度、移动速度和送丝速度三种因素确定的线能量会影响 EBFD 成形效果,过低或过高的线能量影响熔池边界的稳定性,进而降低产品力学性能。

除了上述三种因素,电子束加速电压也会对 EBFD 成形效果产生影响。加速电压是控制电子运动速度的关键因素,加速电压越高,电子束穿透力越强,熔池更深,能够达到层间结合更加紧密的效果,但同时会造成热量累计,微观晶粒长大,对力学性能造成影响。美国航天局兰利研究中心的研究人员^[17-18]认为低加速电压(<15 kV)能够降低电子束能量源的辐射影响;王廷等^[19]在低压条件下对 Ti6Al4V 进行 EBFD 实验,证明低压 EBFD 可行,但是成形产品的性能并不理想。

此外,较少存在针对加速电压对成形 304 不锈钢静力学性能各向异性的讨论。为此,本文通过改变加速电压的大小对 EBFD 304 不锈钢的力学性能各向异性进行研究,分析 EBFD 304 不锈钢力学性能各向异性原因及加速电压对各向异性影响的变化趋势。

1 试验设备、材料及方法

本次试验设备是桂林狮达技术股份有限公司自主研发的 THDW-12 型电子束快速成形设备(图 1),设备由电子枪、三级送丝系统、控制系统、观察系统、真空系统和三维五轴工作台(X 、 Y 、 Z 、 R_y 、 R_z)组成。在 X 、 Y 、 Z 三个方向平移的同时可以进行工作台旋转,实现更加复杂产品的成形。该设备送丝速度最高可以达到 6 m/min,加速电压最高为 85 kV,最大束流可达 140 mA,工作台移动速度为 0~5 000 mm/min。在真空度为 3×10^{-2} Pa 的真空状态下,电子束枪、送丝系统与三维工作台通过控制系统协调控制工作,符合自动化操作要求,能够保证打印过程稳定进行。

304 不锈钢是目前使用最为广泛的一种奥氏体不锈钢,凭借其较好的耐腐蚀性、耐高温性,较高的强度和韧性,在汽车、建筑、化工等重要领域广泛应用。本次试验采用直径为 1 mm 的 304 不锈钢丝材。为避免打印过程中基板受热变形,选用 200 mm×200 mm×30 mm 不锈钢板为基板。试验前对丝材和基板进行打磨去除氧化皮,用丙酮清洗并擦拭干净。试验参数由多次单道试验中得出宏观形貌最佳的工艺参数得出,具体参数见表 1。



图 1 电子束熔丝沉积设备
Fig. 1 EBFD equipment

表 1 不同加速电压下 EBFD 薄壁结构工艺参数

Tab. 1 Process parameters of EBFD thin-wall structure at different acceleration voltages

束流强度 Beam intensity I/mA	加速电压 Accelerating voltage U/kV	送丝速度 Wire feed speed $V_a/(\text{mm}/\text{min})$	移动速度 Movement speed $V_b/(\text{mm}/\text{min})$
22	50、60、70	1 500	250

成形出 70 mm×9 mm×30 mm 的产品,拉伸样品分别从成形产品的水平方向(X 方向)和竖直方向(Z 方向)取样,如图 2 所示。拉伸设备采用 WDW-100 型微机控制电子万能试验机,拉伸速率为 5 mm/min。用 SEM-4800 型扫描电子显微镜进行断口观察。

2 试验结果与分析

2.1 宏观形貌

图 3 所示是不同加速电压下 304 不锈钢薄壁结构侧视的宏观形貌。由图 3(a)可见,当加速电压为 50 kV 时,整体呈现为直壁式,各层和各道次之间的特征清晰可见,部分区域有明显结合不充分现象。当加

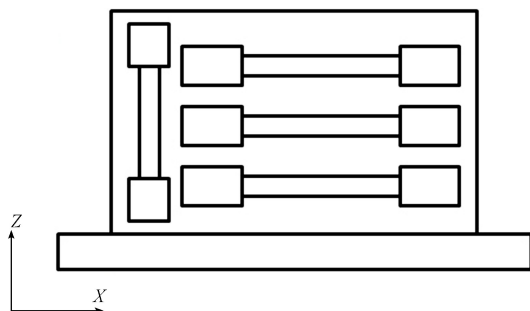


图 2 拉伸样品截取位置示意图

Fig. 2 Interception position diagram of the tensile sample



图 3 不同加速电压下侧视宏观形貌

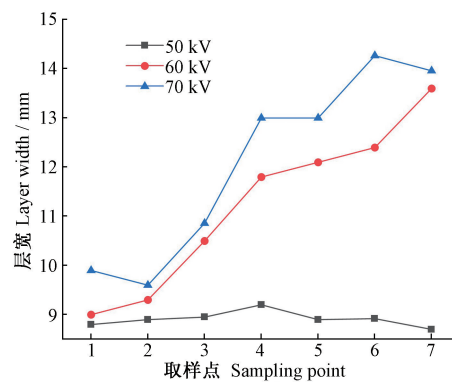
Fig. 3 Side-view macroscopic morphology under different accelerating voltages

速电压为 60 kV 时,两侧轮廓呈现倒“V”字,各层和各道次之间的特征依然明显,没有明显宏观缺陷。当加速电压增加至 70 kV 时,随着热输入量持续增加,两侧轮廓同样呈现出下窄上宽的倒“V”字形,但同层各道次之间的特征消失,各层之间的特征减弱。

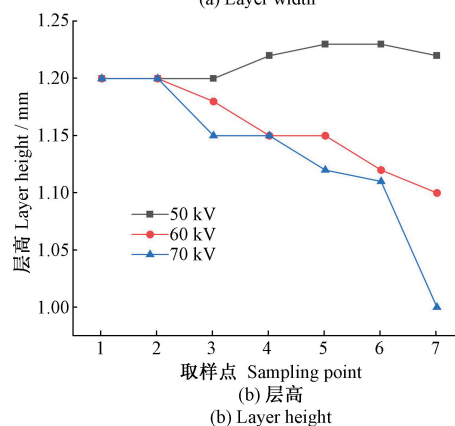
成形过程中,每间隔 6 层根据数控系统中数据记录对应单层层高,成形完成后通过成形高度测量与之一对应层的层宽。各薄壁结构由高到低的层高和层宽如图 4 所示。由图 4 可以看出,随着成形高度增加,层宽与层高之间表现出负相关,层宽逐渐增加,层高逐渐降低。加速电压为 50 kV 时,层宽、层高变化无明显变化,这是由于加速电压为 50 kV 时,热输入量较小,冷却速度快,金属液流动性较差。当加速电压逐渐增加,电子束穿透能力增强,对已成形部分进行反复熔化,导致层间特征逐渐消失。

2.2 加速电压对 304 不锈钢成形致密度的影响

致密度是评价 EBFD 304 不锈钢成形性能的重要指标,其致密化程度直接影响着 304 不锈钢产品的力学性能。成形产品的致密度受到工艺参数等多个方面的影响,不同工艺参数下成形出的试样,其致密度也不相同,图 5 所示为不同电子束加速电压下 EBFD 成形 304 不锈钢试样的致密度分布。



(a) 层宽



(b) 层高

图 4 薄壁结构层宽与层高

Fig. 4 Layer width and height of the thin wall structure

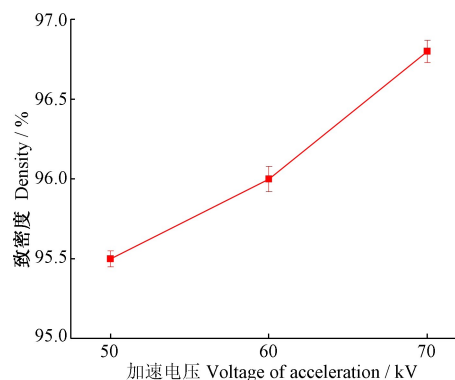


图 5 不同加速电压下 304 不锈钢成形样品致密度分布

Fig. 5 Density distribution of 304 stainless steel forming sample under different accelerating voltages

由图 5 可以看出,产品致密度随加速电压 U 的增大而逐渐增加。当加速电压为 50 kV 时,产品的致密度为 95.5%;加速电压为 60 kV 时,产品致密度为 96%;随着加速电压增加到 70 kV 时,产品致密度最高,为 96.8%。产品致密度差异主要是由热输入量不同,金属丝材熔化后凝固速度变化所致。加速电压是影响电子束能量密度 E_v 变化的主要因素,与能量密度 E_v 成正比,因此随着加速电压增加,单位金属丝材所受能量增加,冷却速度降低,金属以液体状态存在时间更久,能够与熔池充分结合。此外,与束流强度相比,更高的加速电压具有更强的穿透力,在逐层成形过程

中,能够使基体内的杂质及气孔逃逸出来。可见,加速电压增大能够提高产品的致密度。

2.3 加速电压对 304 不锈钢显微组织的影响

304 奥氏体不锈钢焊缝组织与合金元素含量极为相关,不同的合金成分决定了不同的初始析出相和凝固模式^[20]。本文的材料 Cr/Ni 含量比为 2.25,大于凝固初始相的分界线值 1.5,因此本文中焊缝金属的凝固模式为 FA,即铁素体为初始析出相。该材料的固态相变过程尤为重要,因为在室温下大部分的铁素体组织最终会转变为奥氏体组织。在扩散充分的平衡凝固条件下,304 不锈钢的组织主要由 γ 奥氏体组成。然而,在类似于 EBF 过程的非平衡快速凝固条件下,较快的冷却速度会导致高温 δ 铁素体向 γ 奥氏体的转变不能完全进行,最终亚稳态 δ -Fe 不可避免地保留下来^[21]。

图 6 所示为不同加速电压下成形产品的显微组织。由图 6 可以看出,EBFD 成形 304 不锈钢产品的显微组织以奥氏体和马氏体为主。当加速电压为

50 kV 时,如图 6(a)所示,柱状晶都按照从上到下的方向生长且相互平行,在柱状晶和奥氏体中分布着大量马氏体(深色部分)和部分骨架状铁素体。其原因是在奥氏体组织的形成、生长过程中,铁素体含量逐渐降低,由于热输入量不足,冷却速度过快,部分铁素体没有完全转变成奥氏体而以类似于骨架状的富 Cr 铁素体残留于内部。随着加速电压增大,奥氏体晶界处发生晶间腐蚀,这是 304 不锈钢易出现的“敏化现象”^[22],在成形过程中长时间停留在 550~800 °C 或从高温状态下缓慢冷却时极易发生“敏化现象”。其原因是碳化铬在结晶粒界上析出,与其临近的结晶粒界上铬含量降低,碳化物附近含铬量降低至临界含铬量以下,不能保持耐腐蚀性,就会发生晶间腐蚀。由图 6(b)可以看出,当加速电压为 60 kV 时,晶间腐蚀最为严重并有大量点蚀坑出现。由图 6(c)可看出,加速电压为 70 kV 时,虽然有晶间腐蚀现象出现,但是晶间腐蚀较少且没有产生明显被腐蚀的缺陷,说明该加速电压下成形的产品耐腐蚀性没有发生明显变化。

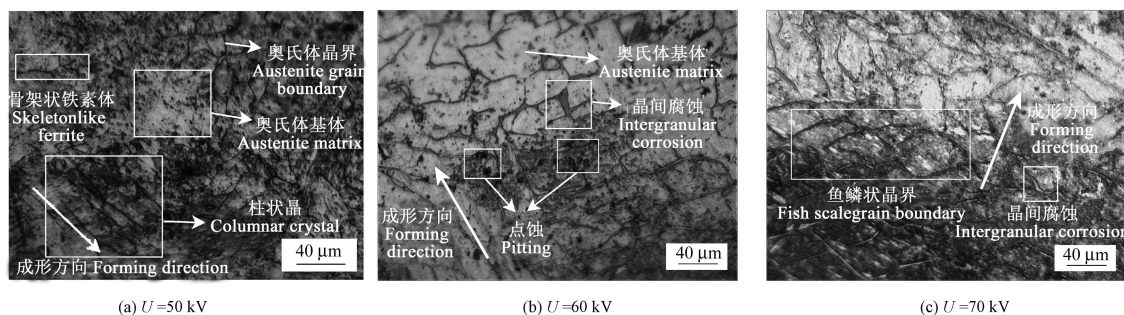


图 6 不同加速电压下成形试样显微组织

Fig. 6 Microstructure of formed samples under different accelerating voltages

对比三种成形工艺下的微观组织发现,三种成形工艺虽然都属于熔化成形过程,但是三种成形工艺下微观组织形态、数目和尺寸受到熔池凝固条件的不同影响。加速电压为 50 kV 时,热输入量小,冷却速度快,奥氏体晶界小而少;加速电压越大,温度梯度 G_T 增大,凝固速率 R 减小,奥氏体晶界表现得更加明显,晶粒尺寸也更大。

2.4 加速电压对 304 不锈钢力学性能的影响

对不同加速电压的 304 不锈钢成形样品进行拉伸测试,得到屈服强度、抗拉强度和延伸率如表 2 所示。不同加速电压下样品拉伸性能变化曲线如图 7 所示。由图 7(a)、图 7(b)可以看出,X 方向样品的抗拉强度和屈服强度随着电子束加速电压的增加而减小;Z 方向样品的抗拉强度和屈服强度随着电子束加速电压的增加呈现出先增大后减小的趋势。由图 7(c)可以看出,X、Z 方向上样品的延伸率都随着电子束加速电压增加表现为先增加后减小的趋势,加速电压为 60 kV

时,X 方向样品延伸率最大,达到 34.2%,接近铸造 304 不锈钢延伸率的 40%。造成样品拉伸性能差异的主要原因是其致密度和显微组织的不同。

为更好地评价打印产品的各向异性,对王振地等^[23]提出的各向异性计算式进行调整,调整后的计算式为

$$A = \frac{|R_z - R_x|}{(R_x + R_z)/2} \times 100\% \quad (1)$$

式中, R_x 、 R_z 分别为 X、Z 方向的抗拉强度或屈服强度值,单位为 MPa。式(1)的物理意义在于,分子 $|R_z - R_x|$ 代表 X、Z 方向力学性能的绝对差值,分母 $(R_x + R_z)/2$ 代表 X、Z 方向力学性能的平均值。当产品表现为各向同性时,A 值为 0;各向异性越明显,A 值越大。

通过式(1)对不同加速电压下 X、Z 方向力学性能各向异性进行计算,计算结果如表 3 所示。由表 3 可以看出,当加速电压为 50 kV 时,强度表现出明显的各

向异性,尤其是屈服强度各向异性指数达到 36%;当 60 kV 时,各向异性表现几乎消失。加速电压为 70 kV 时,各向异性减弱;加速电压为

表 2 不同加速电压下 X、Z 方向样品力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of samples in X and Z directions under different accelerating voltages

加速电压 Accelerating voltage/kV		抗拉强度 Tensile strength/MPa	屈服强度 Yield strength/MPa	延伸率 Elongation/%
50	X	1 122.5±15	1 110.4±12	24.7±0.5
	Z	984.4±10	771.9±11	20.5±0.6
60	X	1 092.2±12	1 081.4±14	34.2±0.4
	Z	1 099.3±8	1 035.5±13	21.3±0.3
70	X	1 003.1±8	450.7±13	20±0.5
	Z	923.3±12	414.8±8	14.8±0.5

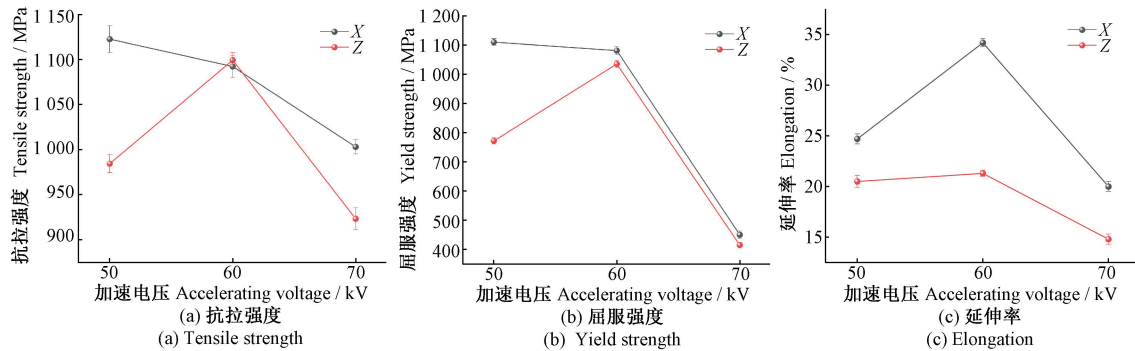


图 7 不同加速电压下成形样品拉伸性能变化曲线

Fig. 7 Variation curves of tensile properties of formed samples under different accelerating voltages

表 3 不同加速电压下力学性能各向异性指数

Tab. 3 Anisotropy index of mechanical properties under different accelerating voltages

加速电压 Accelerating voltage/kV	各向异性指数 Anisotropy index/%	
	抗拉强度 Tensile strength	屈服强度 Yield strength
50	13.1	36
60	0.6	4.3
70	8.3	8.3

当加速电压为 50 kV 时,电子束粒子速度较慢,能量较弱,304 不锈钢丝材在单位时间内获得能量较小,晶粒生长缓慢。在拉伸过程中,凭借晶界阻碍位错滑移^[24-25],从显微组织中可以看到部分沿着成形方向生长的柱状晶,沿着成形方向的晶界数量比水平方向的晶界少,因此,Z 方向的拉伸强度和屈服强度低于 X 方向的强度。

当加速电压为 60 kV 时,金属液进入熔池时温度升高,晶粒充分生长,从微观组织中可以看出,奥氏体晶粒明显变多且更加均匀,X、Z 方向上的晶界数量相当,因此其拉伸强度和屈服强度差距较小,表现出良好的各向同性。

当加速电压持续增加至 70 kV 时,熔池温度进一步升高,奥氏体晶粒继续生长,并且有二次再结晶趋势,平均晶粒尺寸从 13 μm 增加至约 75 μm,因此抗拉

强度和屈服强度与加速电压为 50 kV 和 60 kV 的样品相比,存在明显下降。由于熔池散热的不均匀性,奥氏体晶粒以鱼鳞状的形状存在,沿着成形方向更容易发生位错,因此 Z 方向抗拉强度和屈服强度略低于 X 方向。

为了更深入地研究不同成形工艺参数下成形样品拉伸性能的变化规律及拉伸断裂机制,对不同加速电压下 X 方向成形样品和延伸率最好的加速电压(60 kV)下 Z 方向成形样品的拉伸断口进行分析,如图 8、图 9 所示。以断口表面的变形量为依据,拉伸断口一般分为脆性断口、韧性断口、脆-韧混合型断口^[26]。根据裂纹的扩展路径,金属多晶体断裂一般分为沿晶断裂和穿晶断裂。沿晶断裂是裂纹沿着晶界扩展的一种断裂方式;当裂纹穿过晶粒内部扩展时发生的是穿晶断裂,在宏观上,穿晶断裂既可以是塑性断裂,又可以是脆性断裂。

由图 8(a)可以看出,当加速电压为 50 kV 时,断口没有剪切唇区,并且存在明显台阶,裂纹从台阶处向外扩展,放大至 2 000 倍,主要表现为准解理面,韧窝特征较差并且附着大量未完全熔化的碳化物,表现为延伸率较差。加速电压增加至 60 kV 时,3 区所示剪切唇区占比增加,靠近剪切唇区的 4 区有一大片集中分布的撕裂棱,根据金属拉伸断口三要素^[27],纤维区和剪切唇区越大,材料塑性越好。高倍观察下,断口形

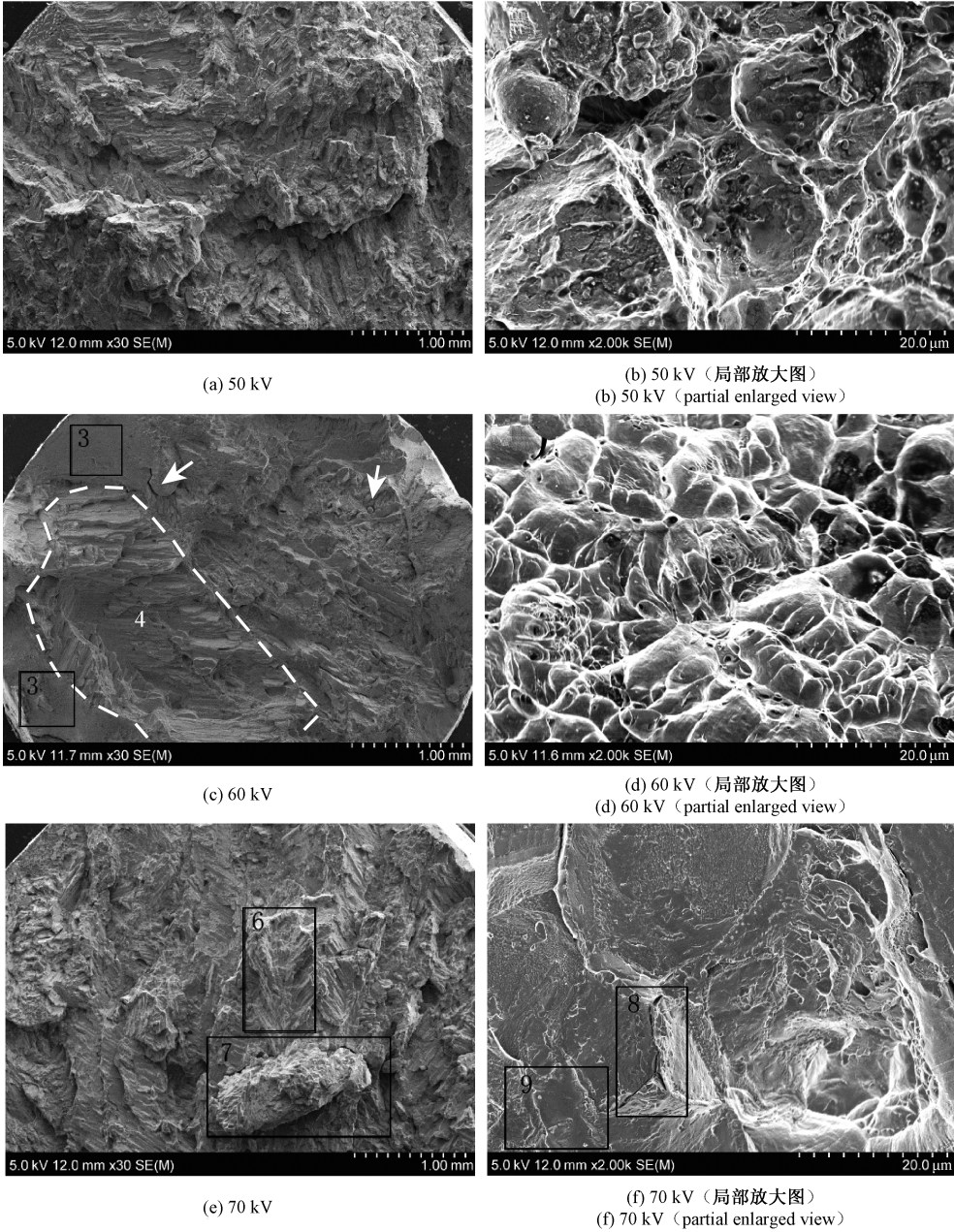


图 8 不同加速电压下 X 方向样品拉伸断口

Fig. 8 Tensile fracture of sample in X direction under different accelerating voltages

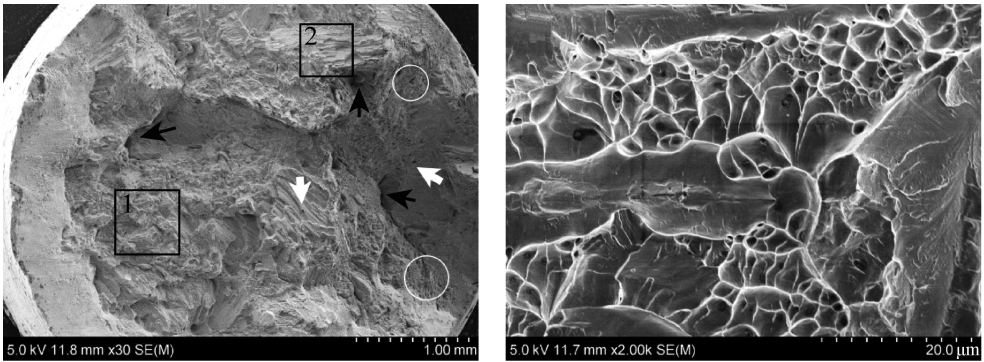


图 9 60 kV 加速电压下 Z 方向样品拉伸断口

Fig. 9 Tensile fracture of Z-direction sample under accelerating voltage 60 kV

貌由大量抛物线韧窝和少量等轴韧窝组成,表现出塑性较好,与拉伸结果一致。加速电压为70 kV时,几乎没有剪切唇区,微小气孔较少,这反映了成形样品的致密化程度较高。图8(e)中,7区是明显凸块,根部伴随明显裂纹,并且6区表现出“河流花样”和“人”形剪切纹,说明7区为主要裂纹源区。图8(f)表现出解理断裂特征,说明为脆性断裂。8区表现为二次沿晶断裂;同时9区平台处存在相互平行的束状特征,也表现为明显的脆性沿晶断裂^[28]。

由图9可以看出,Z方向样品断口有明显的未熔合区以及裂纹现象(黑色箭头所示)和大量微小气孔(白色箭头所示),这是由于较小的热输入量,熔池冷却过快,这些孔隙在拉伸过程中,经常成为裂纹起源,降低样品的抗拉强度,同时气孔会在裂纹扩展过程中加快裂纹扩展速度,在一定程度上会降低样品的延伸率。断口主要由剪切唇区和纤维区组成,其中1区主要为沿晶断裂,2区为穿晶断裂,表现出复杂的脆性断裂和韧性断裂的综合特征。高倍观察下,分布大量韧窝,在韧窝中间有解理面特征,相对于X方向样品,其韧窝较少且分布不均匀,因此Z方向样品呈现出较小的延伸率。

3 结论

本文采用EBFD技术在不同的加速电压下成形了304不锈钢薄壁结构产品,研究了加速电压对成形产品的表面形貌、致密化程度、显微组织及不同方向拉伸性能的影响,并探讨了成形产品的拉伸断裂机制。得到结论如下:

1)成形产品的表面形貌与加速电压的大小有着密切的关系,加速电压越大,各层各道次之间的特征越模糊,致密度越大。加速电压的变化对成形产品的层宽、层高有一定影响。加速电压较低时,随着成形高度增加,层宽、层高几乎没有变化;加速电压增大,层宽逐渐增大,在尺寸收缩效应下,层高也相应降低。

2)成形产品的显微组织主要由奥氏体和马氏体组成。不同加速电压下,样品的组织形态有所不同。加速电压较低时,组织中部分铁素体没有完全转变成奥氏体,奥氏体晶界没有完全形成,有部分宽度较小的柱状晶平行于成形方向生长;随着加速电压增加,奥氏体晶界完全形成,马氏体在奥氏体晶界内生长,晶界处出现“敏化现象”;加速电压持续增加,奥氏体晶界长大并伴有二次结晶趋势。

3)EBFD法成形304不锈钢的力学性能具有各向异性。随着加速电压持续增大,产品X方向的抗拉强度和屈服强度逐渐降低,Z方向抗拉强度和屈服强度先增加后减小,在加速电压为60 kV时,X、Z方向抗拉

强度和屈服强度综合表现最优,并且此时各向异性表现最弱。通过样品拉伸断口发现加速电压为60 kV时,拉伸断口表现为韧性断裂。

参考文献(References)

- [1] DAVE V R, MATZ J E, EAGAR T W, et al. High energy electron beam(HEEB); solid interaction model for EB deposition and shock processing[J]. ASM International, 1995: 255-260.
- [2] DAVE V R, MATZ J E, EAGAR T W. Electron beam solid freeform fabrication of metal parts[C]//1995 International Solid Freeform Fabrication Symposium, 1995: 64-71.
- [3] TAMINGER K, HAFLEY R A. Electron beam freeform fabrication; a rapid metal deposition process[C]//Proceedings of the 3rd Annual Automotive Composites Conference, 2003: 9-17.
- [4] HUANG Z T, SUO H B, GONG S L, et al. Tensile properties and fracture characteristics of TC18 alloy by electron beam wire deposition[J]. Materials Technology, 2016, 31(2): 115-120.
- [5] KARTHIK G M, KIM H S. Heterogeneous aspects of additive manufactured metallic parts: a review[J]. Metals and Materials International, 2021, 27(1): 1-39.
- [6] JENKINS N M S, OULTON H T, HERNANDEZ-NAVA E, et al. Anisotropy in the mechanical behavior of Ti6Al4V electron beam melted lattices[J]. Mechanics Research Communications, 2019, 100: 103400.
- [7] 黄志涛, 锁红波, 杨光, 等. TC18 钛合金电子束熔丝成形送丝工艺与显微组织性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(3): 760-764.
- HUANG ZhiTao, SUO HongBo, YANG Guang, et al. Microstructure and tensile properties of TC18 alloys by electron beam rapid manufacturing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(3): 760-764(In Chinese).
- [8] ASTAFUROVA E G, PANCHENKO M Y, MOSKVINA V A, et al. Microstructure and grain growth inhomogeneity in austenitic steel produced by wire-feed electron beam melting; the effect of post-building solid-solution treatment[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(22): 1-14.
- [9] KUMAR D M, SHANKAR G, SUWAS S. Microstructural anisotropy in electron beam melted 316L stainless steels[C]//Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, F, 2021 IOP Publishing, 2021: 012049.
- [10] FERNANDEZ Z P, LEE Y, DRYEPONDT S, et al. Creep anisotropy modeling and uncertainty quantification of an additively manufactured Ni-based superalloy[J]. International Journal of Plasticity, 2022(prepublish): 103177.
- [11] VILARO T, COLIN C, BARTOUT J D, et al. Microstructural and mechanical approaches of the selective laser melting process applied to a nickel-base superalloy[J]. Materials Science & Engineering: A, 2012, 534: 446-451.
- [12] 于菁, 王继杰, 倪丁瑞, 等. 电子束熔丝沉积快速成形2319铝合金的微观组织与力学性能[J]. 金属学报, 2018, 54(12): 1725-1734.
- YU Jing, WANG JiJie, NI DingRui, et al. Microstructure and mechanical properties of additive manufactured 2319 alloy by electron beam freeform fabrication[J]. Acta Metallurgica Sinica,

- 2018, 54(12): 1725-1734(In Chinese).
- [13] READ N, WANG W, ESSA K, et al. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: process optimisation and mechanical properties development [J]. *Materials and Design*, 2014, 65: 417-424.
- [14] 付贝贝. 电子束送丝系统及增材制造工艺研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017: 50-58.
- FU BeiBei. Research on electron beam wire feeding system and additive manufacturing technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017: 50-58(In Chinese).
- [15] 树 西. 304 不锈钢电子束熔丝沉积工艺及稳定性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 25-28.
- SHU Xi. Study on electron beam fuse deposition process and stability of 304 stainless steel [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 25-28(In Chinese).
- [16] 袁子凯. 电子束熔丝沉积增材制造 TZM 钼合金组织性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 30-50.
- YUAN ZiKai. Study on microstructure and properties of tzm molybdenum alloy fabricated by electron beam fuse deposition additive [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 30-50(In Chinese).
- [17] WATSON J K, TAMINGER K M, HAFLEY R A, et al. Development of a prototype low-voltage electron beam freeform fabrication system [C]//13th Solid Freeform Fabrication Symposium, 2002: 458-465.
- [18] TAMINGER K, HAFLEY R, DICUS D. Solid freeform fabrication: an enabling technology for future space missions [C]//2002 International Conference on Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing, 2002: 1-8.
- [19] 王 廷, 王一帆, 魏连峰, 等. TC4 钛合金低压电子束熔丝沉积层组织与性能 [J]. *焊接学报*, 2020, 41(10): 54-59.
- WANG Ting, WANG YiFan, WEI LianFeng, et al. Microstructure and properties of low voltage electron beam wire deposition layer of TC4 titanium alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(10): 54-59(In Chinese).
- [20] 陈 勇, 陆建华, 徐育焱, 等. 不同焊接工艺下 304 不锈钢薄壁管件纵缝微观组织及力学性能研究 [J]. *热加工工艺*, 2022, 51(11): 127-131.
- CHEN Yong, LU JianHua, XU YuLang, et al. Microstructures and mechanical properties of 304 stainless steel thin wall pipe longitudinal seam under different welding processes [J]. *Hot Working Technology*, 2022, 51(11): 127-131(In Chinese).
- [21] HÄNNINEN H, ROMU J, ILOLA R, et al. Effects of processing and manufacturing of high nitrogen-containing stainless steels on their mechanical, corrosion and wear properties [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 117(3): 424-430.
- [22] 桥本政哲. 不锈钢及其应用 [M]. 周连在, 赵文贤, 译. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 160-162.
- HASHIMOTO S. Stainless steel and its application [M]. ZHOU LianZai, ZHAO WenXian, Jr. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 160-162(In Chinese).
- [23] 王振地, 王 玲, 郭 杰, 等. 3D 打印水泥基材料制品的强度各向异性研究 [J]. *中国建材科技*, 2022, 31(2): 1-3.
- WANG ZhenDi, WANG Ling, GUO Jie, et al. The study on strength anisotropy of 3D printed cement-based materials product [J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2022, 31(2): 1-3(In Chinese).
- [24] 李小榕. 激光熔化沉积 TA15 钛合金组织与性能的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014: 30-45.
- LI XiaoRong. Study on microstructure and properties of TA15 titanium alloy by laser melting deposition [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014: 30-45(In Chinese).
- [25] 周 斌, 张 婷, 林 峰, 等. 电子束选区熔化成形 Ti6Al4V 和 316L 不锈钢叶轮体微观组织和力学性能的研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(1): 175-180.
- ZHOU Bin, ZHANG Ting, LIN Feng, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V and 316L stainless steel impeller body made by electron beam selective melting [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(1): 175-180(In Chinese).
- [26] 孙宝福, 徐博翰, 张莉萍, 等. 电子束熔丝增材制造成形路径的研究与优化: 以 304 不锈钢为例 [J]. *机械强度*, 2021, 43(3): 570-576.
- SUN BaoFu, XU BoHan, ZHANG LiPing, et al. Research and optimization of forming path for electron beam fuse additive manufacturing: a case of 304 stainless steel [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2021, 43(3): 570-576(In Chinese).
- [27] 钟群鹏, 赵子华, 张 峥. 断口学的发展及微观断裂机理研究 [J]. *机械强度*, 2005, 27(3): 358-370.
- ZHONG QunPeng, ZHAO ZiHua, ZHANG Zheng. Development of fractography and research of fracture micro mechanism [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2005, 27(3): 358-370(In Chinese).
- [28] 王 铭. 电子束增材制造钛合金组织与力学性能研究 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2019: 71-75.
- WANG Ming. Study on microstructure and mechanical properties of titanium alloy fabricated by electron beam additive [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2019: 71-75(In Chinese).