

不同工艺参数对电子束熔丝沉积 304 不锈钢力学性能及显微组织研究

黄星光^{1,2}, 孙宝福^{1*}

(1. 桂林理工大学机械与控制工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林狮达技术股份有限公司, 广西 桂林 541004)

摘 要:采用直径为 1 mm 的 304 不锈钢丝材为材料, 以电子束熔丝沉积技术(EBF³)制备 304 不锈钢试样, 并进行力学性能及显微组织分析。设计了 9 组试验方案进行单因素试验, 分别改变束流强度、送丝速度以及基板进给速度三个参数进行打印。结果表明, 9 组试件的抗拉强度和屈服强度均表现优异, 但断后伸长率表现一般, 其中当束流为 26 mA、送丝速度为 1 400 mm/min、进给速度为 400 mm/min 时, 试件各项特征表现最好, 拉伸强度为 1 328.92 MPa, 屈服强度为 711.60 MPa, 断后伸长率为 34.45%。通过综合分析可知, 改变送丝速度对试件的塑性影响最大, 改变进给速度对试件的强度影响最大。此外, 改变束流与进给速度的试件内部金相组织基体由奥氏体组成, 改变送丝速度的试件显微组织则多为奥氏体转变和过程析出的组织为组成部分; 改变束流和送丝速度的试件中以组织的构成变化为主, 改变进给速度的试件中以晶粒度的变化为主, 最终形成了不同拉伸性能间的差异。在进行扫描电镜断口分析中可以发现, 试件在拉伸试验中均发生脆性断裂。

关键词:电子束熔丝沉积; 304 不锈钢; 送丝速度; 束流强度; 进给速度; 显微组织; 拉伸性能

中图分类号: TF76, TG665

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)03-0162-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.03.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Research on the influence of various process parameters on the properties of 304 stainless steel prototypes by electron beam free form fabrication

Huang Xingguang^{1,2}, Sun Baofu^{1*}

(1. College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. Guilin Shida Technology Co., Ltd., Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: 304 stainless steel wire with a diameter of 1 mm was used as the material to prepare 304 stainless steel samples using electron beam fusion deposition technology (EBF³) for mechanical properties and microstructure analysis. Nine sets of experimental were designed for single factor experiments, where the beam intensity, wire feeding speed, and substrate feeding speed were changed for printing. The results showed that the tensile strength and yield strength of 9 groups of specimens were excellent, but their elongations were average. Among them, when the beam current was 26 mA, the wire feeding speed was 1 400 mm/min, and the feed speed was 400 mm/min, the characteristics of the specimens

收稿日期: 2023-06-10

基金项目: 广西创新驱动发展专项资金资助项目(桂科 AA18242046)。

作者简介: 黄星光, 1999 年出生, 男, 广西钦州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 电子束工艺, E-mail: 1144329017@qq.com;

*通讯作者: 孙宝福, 1970 年出生, 男, 山东枣庄人, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 电子束工艺, E-mail: 18593299591@163.com。

were the best, with a maximum tensile strength of 1 328.92 MPa, a maximum yield strength of 711.60 MPa, and a fracture elongation of 34.45%. Through the comprehensive analysis, it can be concluded that changing the wire feeding speed has the greatest impact on the plasticity of 304 stainless steel tensile parts, and changing the moving speed has the greatest impact on the strength of 304 stainless steel specimens. In addition, the microstructure of 304 stainless steel specimens with varying beam and feeding rates was composed of austenite. While, the microstructure of specimens with varying wire feeding rates was mostly composed of austenitic transformation phases precipitates; The changes in beam flow and wire feeding speed were mainly due to changes in the composition of the microstructure, while the changes in feed speed were mainly due to changes in grain size, ultimately resulting in the properties variation of different tensile parts. During the fracture analysis by scanning electron microscopy, it was found that brittle fracture occurred in all specimens during the tensile tests.

Key words: EBF³, 304 stainless steel, wire feed speed, beam intensity, wire feeding speed, microstructure, tensile property

0 引言

增材制造技术(AM)俗称3D打印,是近些年来得到快速发展的一门成型技术。目前,金属增材制造技术主要分为电子束熔丝沉积技术(electron beam free form fabrication, EBF³)、激光选区熔化技术(selective laser melting, SLM)、激光熔融沉积技术(laser metal deposition, LMD)、电子束选区熔化技术(selective electron beam melting, SEBM)等^[1]。EBF³是一种以丝状金属作为原材料,以高能电子束流为热源,熔化的丝材按预设的轨迹层层堆积,从而完成沉积打印件的先进新型制造技术^[2],经过近20年的发展,已成为金属增材制造技术的重要分支,具有成形精度高、成形材料范围广,成形件致密性好等特点,是未来增材制造业发展的主要方向^[3]。

Taminger^[4]等研究了EBF³技术快速成形设备中不同参数对铝合金成形及微观组织的影响,提出了三个因素对其的影响关系:①送丝速度与沉积高度成正比,与晶粒增大成反比;②移动速度与沉积高度成反比,与晶粒增大成反比;③同时增大束流大小与送丝速度会使得熔池变大,晶粒粗大,熔池存在侧漏的危险。Matz J E^[5]等人对EBF³成形718合金过程建立数学模型分析碳化物生长情况,发现EBF³技术能够有效抑制碳化物的生长,并促使其由无规律的形状改变为规则的几何形状。Wanjara P^[6]等通过EBF³技术对347不锈钢金属丝沉积成形,研究发现沉积的高度与沉积的层数存在线性关系,其力学性能、抗腐蚀性与熔丝沉积前相当;而沉积速度及层数决定沉积体的质量。Węglowski^[7]等通过改变工艺参数研究了不锈钢加强筋成形质量,

试验发现,当束流密度过小时沉积不稳定,同层沉积各方向不均匀,若束流密度过大,则容易击穿基板;送丝速度增大时,单层堆叠的高度增加,宽度变小;打印速度增大时,单层堆叠的高、宽均变小。Polonsky^[8]等利用EBF³设备制备Al-Si 304奥氏体不锈钢,对经过处理后的试样微观组织进行观察,发现其具有明显的各向异性,晶粒多为粗大型柱状,枝晶多为板条状和蠕虫状 δ -铁素体,而经过热处理后304试样内 δ -铁素体体积分数降低,各向异性也随之降低。Bush^[9]等在使用EBF³技术制造钛合金工艺中分别测试了高温状态下的拉伸性能,结果表明,EBF³技术成形试样与锻造成形试样的高温性能相当,合适的工艺参数配合可以制备性能优异的合金试样。

目前对于304不锈钢增材制造研究主要集中于EBM和SLM工艺,较少针对EBF³成形过程进行讨论,为此笔者针对电子束熔丝沉积304不锈钢在不同参数下的成形性能差异进行研究,对未来EBF³技术成形304不锈钢提供参考。

1 试样制备与试验方法

试验原材料选用直径为1.0 mm的304不锈钢丝材,试验前将丝材酸洗烘干后装入送丝系统;基板也选用不锈钢,其尺寸大小为200 mm×200 mm×30 mm,在使用前需将基板表面的氧化层除去,使用砂轮机对其表面打磨抛光后,再分别使用无水乙醇和清水进行擦拭,静置晾干后方可使用。304不锈钢密度为7.93 g/cm³,该材料有着良好的韧性、焊接性能及耐腐蚀性,广泛应用于工业、食品以及医疗等行业领域。304不锈钢丝材及基板的元素含量如表1所示,其母材微观组织如图1所示。

表 1 304 不锈钢丝材及基板的化学成分
Table 1 Chemical compositions of 304 stainless steel wire and substrate

%

材料	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Fe
丝材	0.06	0.7	1.2	0.014	0.03	18	8	0.18	Bal.
基板	0.12	0.17	0.5	0.027	0.028				Bal.

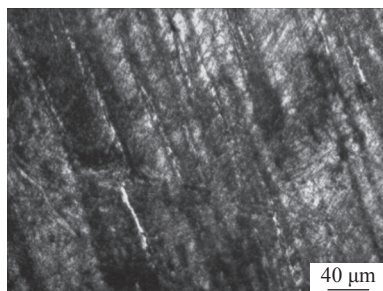


图 1 304 不锈钢母材金相组织

Fig. 1 Microstructure of 304 stainless steel

在 EBF³ 快速成形技术中,存在如式(1)所示关系。

$$q = \frac{60 \cdot U \cdot I}{V} \quad (1)$$

其中, q 为电子束输入热量, J/mm; U 为加速电压, kV; I 为束流大小, mA; v 为基板进给速度, mm/min。因此试验设置束流强度、送丝速度和基板进给速度三个工艺参数,以此探究电子束熔融沉积 304 不锈钢的组织特征及力学性能影响机制,工艺参数如表 2 所示。

表 2 电子束熔丝沉积成形 304 不锈钢工艺参数
Table 2 Process parameters of 304 stainless steel formed by EBF³

试样 编号	束流强 度/mA	送丝速度/ (mm·min ⁻¹)	进给速度/ (mm·min ⁻¹)	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	断后伸 长率/%
A1	18	1 400	500			
A2	22	1 400	500	1 347.91	593.77	34.90
A3	26	1 400	500	1 142.94	938.06	31.54
B1	26	1 200	500	1 137.74	511.67	24.63
B2	26	1 500	500	893.27	453.41	20.61
B3	26	1 800	500	1 240.80	880.00	35.67
C1	26	1 400	200	1 228.25	600.43	29.13
C2	26	1 400	400	1 328.92	711.60	34.45
C3	26	1 400	600	1 213.10	546.42	28.07

沉积成形后,通过电火花线切割、车床精加工的机加工处理工艺制备 304 不锈钢拉伸件,后对其进行分组试验,采用线切割法在成形试样断裂处截取厚度为 3 mm 的金相试样,经打磨抛光,用金相腐蚀液腐蚀后,在 DMI LM 型倒置光学显微镜(OM)和 Hitachi S-4800 型扫描电镜(SEM)下观察显微组

织。按照金属拉伸试验试样标准(GB 6397-1986),采用 WDW-100 型电子万能试验机对不同成形试样进行室温拉伸试验,试样标距部分尺寸为 Ø5 mm×50 mm,拉伸速度为 3 mm/s,拉伸试验结束后采用 Hitachi S-4800 型扫描电镜观察拉伸断口形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 对显微组织的影响

在 18 mA 时,304 不锈钢沉积不成形,因此,仅对 22 mA 及 26 mA 束流强度的 304 不锈钢拉伸件进行性能分析。观察图 2 发现,试样的微观组织都以奥氏体为主,22 mA 试样中奥氏体更多表现出等轴状,但分布不集中;26 mA 试样多表现为柱状奥氏体,排布密集,较为均匀。束流强度过高导致等轴奥氏体拉长生成柱状奥氏体,等轴状奥氏体阻碍位错滑移能力更强,表现出更优的抗拉强度。该试样还存在少量的渗碳体,这是由于电子束温度较高,沉积件的温度连续下降至室温时奥氏体过冷产生渗碳体。

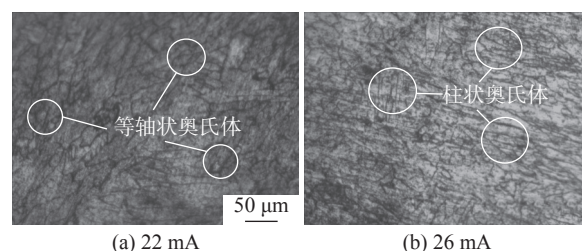


图 2 不同束流强度的 304 不锈钢金相组织

Fig. 2 Metallographic analysis of 304 stainless steel formed by different beam intensity

对送丝速度分别为 1 200、1 500、1 800 mm/min 的拉伸件金相组织进行分析,结果见图 3。图 3(a)中晶界不明显,可能由于送入丝材较少,热量累积严重,在反复加热过程中奥氏体晶界溶入奥氏体基体中;图 3(b)存在明显奥氏体晶界,但有点蚀现象,可能是电子束熔融丝材过程中,丝束出现了不稳定现象,导致试件成形不均匀,发生敏化,产生晶间腐蚀开裂^[10];图 3(c)的金相组织明显不同,黑色部分为奥氏体转变成的马氏体,残存着未完全转变的奥氏体,并且存在明显的晶界。

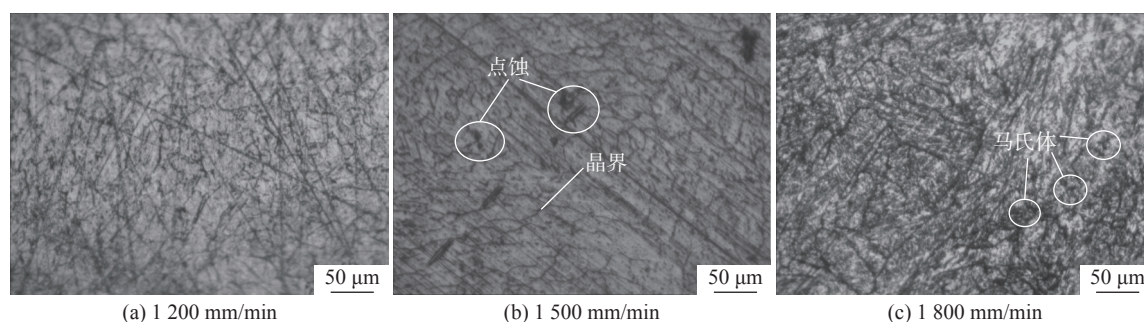


图3 不同送丝速度的 304 不锈钢金相组织

Fig. 3 Metallographic analysis of 304 stainless steel formed by different wire feeding speeds

对进给速度分别为 200、400、600 mm/min 的拉伸件进行金相组织观察, 结果见图 4。观察图 4 发现三种焊接速度的拉伸件金相组织全都呈现为单一的奥氏体。200 mm/min 的试件由于进给速度过慢导致热量堆积, 致使奥氏体晶界溶入基体(图 4(a)); 当速度为 600 mm/min 时, 试件冷却速度过快, 从而

导致晶粒粗化, 奥氏体晶界也没有完全形成, 呈现出未完全成形的奥氏体, 力学性能表现较差; 同时冷却速度过快, 堆积温度下降过快容易析出碳化物, 也造成了点蚀现象^[11](图 4(c))。图 4(b) 中 400 mm/min 则呈现出稳定的柱状奥氏体组织, 分布较为集中均匀, 奥氏体晶界明显, 性能表现较优^[12]。

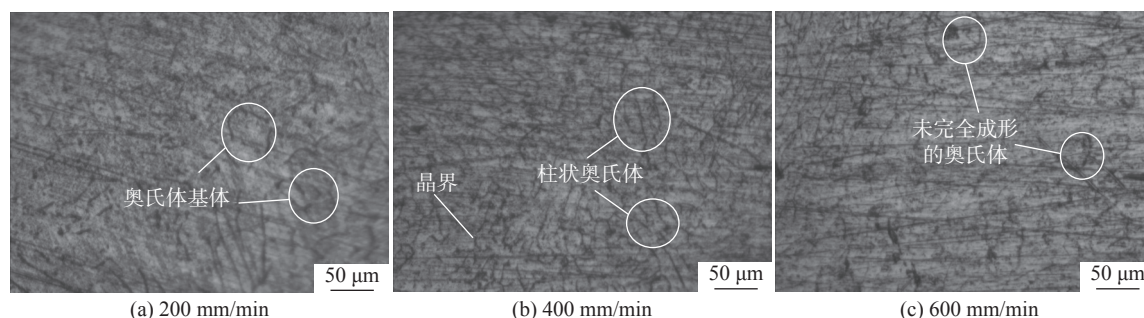


图4 不同进给速度的 304 不锈钢金相组织

Fig. 4 Metallographic analysis of 304 stainless steel formed by different feed rates

2.2 对拉伸性能的影响

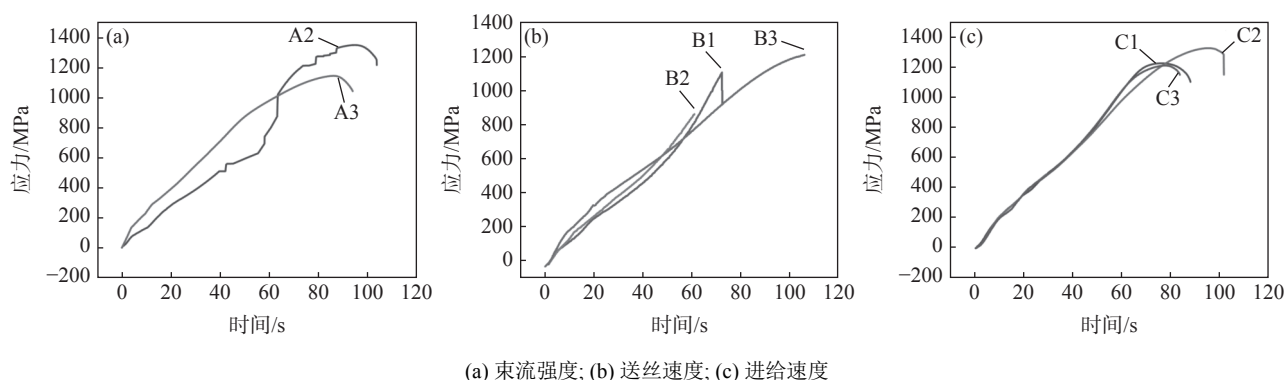
由表 2 可知, 不同束流强度制备的 304 不锈钢拉伸件存在较大差异, 其中束流强度为 22 mA 和 26 mA 试样的拉伸强度和屈服强度均达到了工业标准(拉伸强度 ≥ 520 MPa, 屈服强度 ≥ 205 MPa)。束流强度增大, 单位能量输入较大, 丝材得到充分熔化, 沉积件性能较优。拉伸件 A2 和 A3 的拉伸强度相差不大, 但拉伸件 A3 的屈服强度远大于 A2, 而 A2 的断裂伸长率却大于 A3。束流强度增大, 拉伸件会表现出高强度低塑性的特点。

随着送丝速度不断增加, 单位时间内送出的丝材量增加, 经过电子束熔融后, 其拉伸件抗拉强度随之增大, 1 800 mm/min 速度试样拉伸强度达到了最大值 1 240 MPa, 而拉伸件 B1 和 B2 的屈服强度相近, 拉伸件 B1 和 B3 的拉伸强度相对差别不大, 但均远大于拉伸件 B2, 树西^[13]发现是熔融沉积过程

中电子束功率不稳定造成误差产生。

观察发现, 不同焊接速度制备的试样拉伸性能存在差异较小, 拉伸件 C2 的屈服强度相比于拉伸件 C1 和 C3 相差较大, C1 和 C3 的屈服强度分别为 600、546 MPa, 拉伸件 C1、C2 和 C3 的拉伸强度相差不大, 此外 C2 的断后伸长率(34.45%)高于 C1(29.13%)和 C3(28.07%), 但均远低于工业锻造标准 40%。

图 5 给出了三种不同参数试样的时间-应力曲线, 发现束流强度为 26 mA(A3), 送丝速度为 1 800 mm/min(B3)及进给速度为 400 mm/min(C3) 3 个试样曲线表现比较平滑, 力学性能稳定。只改变进给速度对成形件的质量影响较小, 各参数下的曲线平滑, 强度优异; 束流强度与送丝速度参数对试件的影响较大, 在成形过程中可能导致内部质量不均匀, 从而表现出不稳定的时间-应力曲线。



(a) 束流强度; (b) 送丝速度; (c) 进给速度

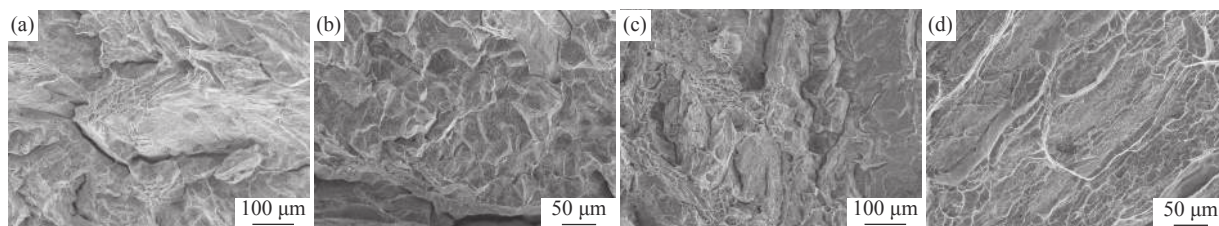
图5 不同参数试样的时间-应力曲线

Fig. 5 Time-stress curves of specimens with different parameters

2.3 对拉伸断口形貌的影响

图6为不同束流强度下试样的拉伸断口低倍及高倍微观形貌。图6(a)观察到22 mA试样存在明显的沿晶断裂,其大量表现为沿晶脆断和少量的沿晶韧断;放大后发现图6(b)存在沿晶断裂,且晶粒粗大,呈现出冰糖状的晶粒形貌,与拉伸试样发生了

脆性断裂的特征相符。图6(c)观察到26 mA试样断口整体存在大量的沿晶韧断,部分区域出现沿晶二次断裂;图6(d)可以看到放大断口呈现准解理平台,明显存在解理台阶,线条展现出了河流花样,断口微观形貌均表现出了典型的脆性断裂特征,与拉伸试样的力学性能表现相符合。



(a) 22 mA,低倍; (b) 22 mA,高倍; (c) 26 mA,低倍; (d) 26 mA,高倍

图6 不同束流强度下试样的拉伸断口微观形貌

Fig. 6 Tensile fracture microscopic morphology of specimens formed by different beam strengths

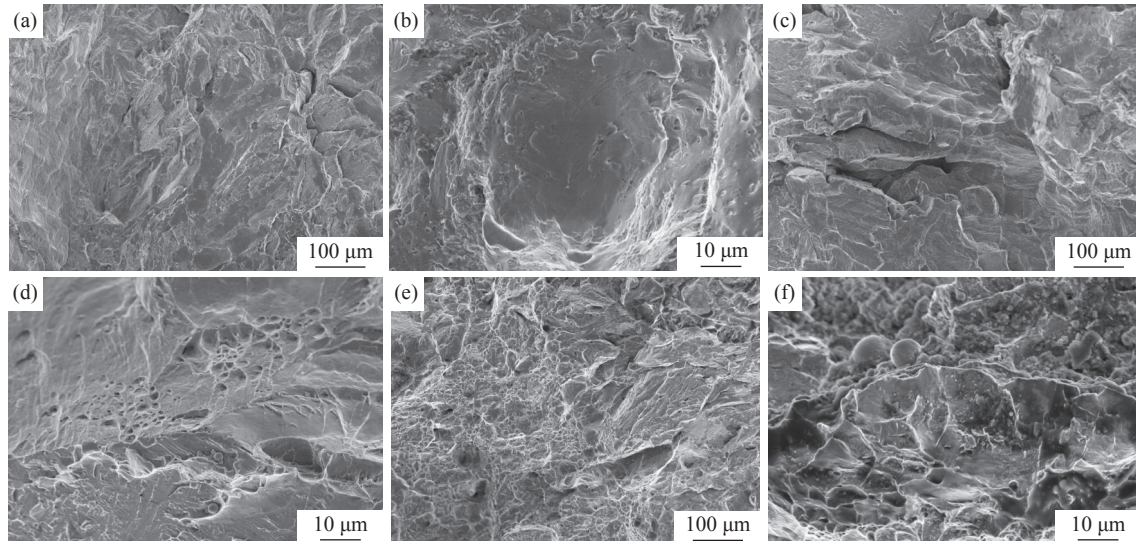
对不同送丝速度制备的304不锈钢拉伸试样进行微观断口形貌分析,如图7所示。观察图7(a)发现1200 mm/min速度下,断口发生了穿晶断裂和沿晶脆断,形貌呈解理台阶,可明显观察到众多河流花样;放大至图7(b),发现其中间部分为中心,呈扇形向外扩展,形成了解理扇形。当焊接速度为1500 mm/min(图7(c)),晶粒主要呈现多边形的岩土状,存在明显的沿晶断裂和穿晶断裂,形成了解理面,进而生成了解理台阶,其表面可以明显看到人字纹和河流花样;放大至图7(d)观察到舌状花样和河流花样,断口还存在少量的韧窝,出现了准解理面,各隐藏裂纹连接时发生较大塑性变形,形成了撕裂棱,进一步观察可以发现河流花样台阶形成于第二相粒子和夹杂处,符合其低塑性的拉伸特征。当速度提升到1500 mm/min时,拉伸试验中表现出高强度,低塑性,观察图7(e)发现其中间存在明显的分界线,右侧晶粒全为岩土或冰糖状,可观察到由穿晶断裂形成的解理面,解理面上分布众多河流花样,同

时还有沿晶断裂及二次裂纹的产生;左侧存在大量的韧窝及沿晶断裂形成的空洞形核,可判断其为准解理断裂,通过塑性撕裂后形成了韧窝带^[14];观察图7(f)发现此处高度落差较大,可见众多舌状花样,解理台阶自高向低处层层分布连接。

图8展现了不同焊接速度制备的304不锈钢拉伸试样断口形貌。焊接速度较低时,图8(a)存在大量的韧窝,是因为断裂过程中隐藏裂纹发生了较大塑性变形,并形成了撕裂棱;放大至图8(b),发现左右两侧存在高度差,其中右侧位于底部,应为断裂面表面,其裂纹走势呈现为“鱼骨状”花样,该花样由裂纹和李晶相互作用形成,该花样多出现在准解理表面^[15]。当焊接速度为400 mm/min时,发现图8(c)晶粒轮廓大多为多边形,较为粗大;该断口出现了穿晶断裂和沿晶断裂,解理面上只存在少量河流花样和舌状花样,符合其高强度拉伸性能特征;图8(d)各层晶体间的解理台阶明显,存在高度差,图中右下部分为准解理面撕裂形成的韧窝,中部解理面存在

一条拥有众多分支的河流花样,同时还伴随着少量的舌状花样。当焊接速度增加至 600 mm/min,发现图 8(e)中晶粒粗大呈冰糖状,断口呈现出穿晶断裂和沿晶断裂,部分地方还存在二次断裂,解理面上存

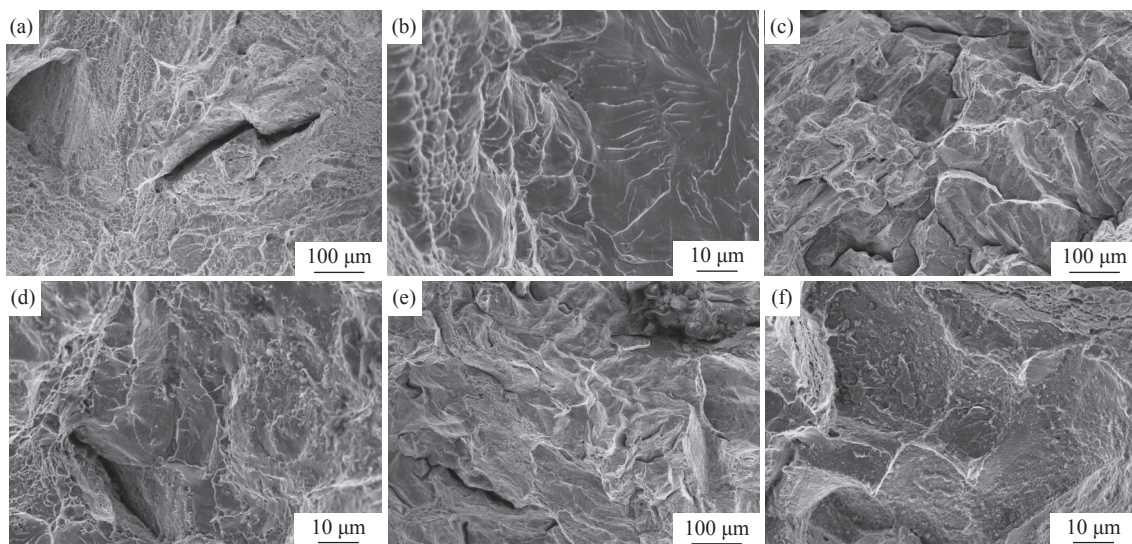
在众多的河流花样、撕裂棱,存在少量韧窝及孔洞;图 8(f)发现该断口表面析出了大量的杂质,存在许多颗粒状细小晶体附着于晶界上,此类断口对应其屈服强度较低,呈脆性断裂,与拉伸结果相符。



(a) 1 200 mm/min, 低倍; (b) 1 200 mm/min, 高倍; (c) 1 500 mm/min, 低倍; (d) 1 500 mm/min, 高倍;
(e) 1 800 mm/min, 低倍; (f) 1 800 mm/min, 高倍

图 7 不同送丝速度下试样的拉伸断口微观形貌

Fig. 7 Tensile fracture microscopic morphology of specimens formed by different wire feeding speed



(a) 200 mm/min, 低倍; (b) 200 mm/min, 高倍; (c) 400 mm/min, 低倍; (d) 400 mm/min, 高倍; (e) 600 mm/min, 低倍; (f) 600 mm/min, 高倍

图 8 不同焊接速度下试样的拉伸断口微观形貌

Fig. 8 Tensile fracture microscopic morphology of specimens formed by different feeding rates

3 结论

1) 18 mA 的束流不能支撑 304 不锈钢丝材的熔融沉积, 试样不成形; 随着束流强度由 22 mA 增大到 26 mA, 试样的抗拉强度降低约 200 MPa, 屈服

强度却增大约 400 MPa; 过大的束流使沉积时金属加热及冷却速率过快, 致使金相组织表现各异。

2) 送丝速度对拉伸件的塑性影响较大。送丝速度由 1 200 mm/min 增加至 1 800 mm/min 时, 单位

时间内金属熔融丝材越多,沉积后的成形件致密性高,拉伸强度更大,但表现为脆性断裂。

3)进给速度的改变对拉伸件的强度影响最大。进给速度过小时,堆积温度过高导致晶粒粗化;进给速度过大时,堆积温度下降过快容易析出碳化物;采用400 mm/min的进给速度可以沉积得到性能最优试样,拉伸强度为1 328.92 MPa,最大屈服强度为

711.60 MPa,断裂伸长率为34.45%。

4)观察断口形貌发现,EBF³制备的304不锈钢大多数都呈现脆性断裂的特征,只存在少量韧窝,大部分表现为河流花样、撕裂棱、解理台阶等。成形过程中温度骤升陡降,钢的金相转变不充分,导致制备的304不锈钢试样较脆。

参考文献

- [1] Huang Xingguang, Sun Baofu, Sun Guohui, *et al.* Study on the heat treatment performance of TC4 titanium alloy formed parts based on electron beam additive manufacturing[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(6): 102–108.
(黄星光, 孙宝福, 孙国辉, 等. 基于电子束增材制造的TC4钛合金成形件热处理性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(6): 102–108.)
- [2] Tang Huiping, Wang Jian, Lu Shenglun, *et al.* Research progress in selective electron beam melting[J]. Materials China, 2015, 34(3): 225–235.
(汤慧萍, 王建, 逄圣路, 等. 电子束选区熔化成形技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2015, 34(3): 225–235.)
- [3] Sun Baofu, Xu Bohan, Zhang Liping, *et al.* Research and optimization of the forming path for electron beam fusion additive manufacturing: Taking 304 stainless steel as an example[J]. Mechanical Strength, 2021, 43(3): 570–576.
(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.)
- [4] Taminger K M B, Hafley R A, Domack M S. Evolution and control of 2219 aluminium microstructural features through electron beam freeform fabrication[J]. Materials Science Forum, 2006, 519: 1297–1302.
- [5] Matz J E, Eagar T W. Carbide formation in alloy 718 during electron-beam solid freeform fabrication[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(8): 2559–2567.
- [6] Wanjara P, Brochu M, Jahazi M. Electron beam freeforming of stainless steel using solid wire feed[J]. Materials & Design, 2007, 28(8): 2278–2286.
- [7] Węglowski M S, Błacha S, Pilarczyk J, *et al.* Electron beam additive manufacturing with wire—analysis of the process [C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2018, 1960(1): 140015.
- [8] Polonsky A T, Lenthe W C, Echlin M L P, *et al.* Solidification-driven orientation gradients in additively manufactured stainless steel[J]. Acta Materialia, 2020, 183: 249–260.
- [9] Bush R W, Brice C A. Elevated temperature characterization of electron beam freeform fabricated Ti–6Al–4V and dispersion strengthened Ti–8Al–1Er[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 554: 12–21.
- [10] Dai Xiaoqin, Chen Hanning, Lei Jianbo, *et al.* Study on microstructure characteristics and properties of 304 stainless steel fabricated by laser additive[J]. Hot Working Process, 2017, 46(16): 83–86.
(戴晓琴, 陈瀚宁, 雷剑波, 等. 激光增材制造304不锈钢显微结构特征与性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(16): 83–86.)
- [11] He Yuanling. Microstructure characterization and properties investigation of welded joints of SUS304 stainless steel with welding [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2019.
(何远灵. SUS304不锈钢TIG焊接接头的组织表征与性能研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2019.)
- [12] Lippold J C, Kotecki J. Welding metallurgy and weldability of stainless steels [M]. John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [13] Shuxi. Study on the deposition process and stability of 304 stainless steel electron beam fusion wire[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
(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, 2017.)
- [14] Zhong Qunpeng, Zhao Zihua, Zhang Zheng. Development of “fractography” and research of fracture micromechanism[J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(3): 358–370.
(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.)
- [15] Li Hongying. Fracture analysis of metal tensile specimens[J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition), 2011, 27(1): 76–79.
(李红英. 金属拉伸试样的断口分析[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2011, 27(1): 76–79.)