

● 焊接技术 ●

典型 TC4 框类结构 TIG 电弧增材制造工艺研究

马倩¹, 马树元¹, 刘长猛¹, 陈广森²

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100089; 2. 中国人民解放军军械工程学院, 河北 石家庄 050003)

摘要: 电弧增材制造技术以其成形效率高、成本低的优势为钛合金薄壁框类结构件提供了新的成形方法。采用 TIG 电弧增材制造技术, 研究典型 TC4 框类结构件的成形。首先, 通过控制变量法研究工艺参数对单道宏观形貌的影响规律, 获得了单道稳定成形的工艺参数范围。在此基础上, 成形方框结构时, 将焊枪和送丝杆整体旋转 10°, 实现了各向同性的稳定成形。之后, 对典型“田”字形框类结构进行了路径规划, 十字交叉位置采用圆弧搭接的路径, 获得了表面质量良好的框类零件。

关键词: 框类结构; “田”字形; TIG 电弧增材制造; 各向异性; 路径规划

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.01.049

中图分类号: TG455; TG444*.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2018)01-0189-06

Study on TIG Arc Additive Manufacturing Process of Typical TC4 Frame Structure

MA Qian¹, MA Shuyuan¹, LIU Changmeng¹, CHEN Guangshen²

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100089, China; 2. People's Liberation Army Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Arc additive manufacturing process provides a new forming method for titanium alloy thin-wall frame structures due to its advantages of high efficiency and low costs. The forming of typical TC4 frame structure was studied by using TIG arc additive manufacturing process. Firstly, the effects of process parameters on the macroscopic morphologies of single track were investigated by using variable control method, and the process parameters range for single-track stable deposition was obtained. Based on this, when depositing square column structure, stable deposition in any direction was realized by rotating the welding torch and wire feeding rod 10°. Based on the above study, path planning of typical “田” section frame structure was explored. The frame component with good surface was obtained by adopting circular overlapping in the cross position.

Key words: frame structure; “田” section; TIG arc additive manufacturing; anisotropy; path planning

TC4 因其较高的比强度、优良的高温性能及耐腐蚀性能被广泛用于制造航空和航天领域大型薄壁框类结构件^[1], 如十字形结构、加筋板、翼肋等。框类结构件, 传统采用高效切削或铸造的加工方法制造, 但是钛合金切削加工性能差, 属于典型的难加工材料^[2], 且切削加工的材料去除量大, 导致材料利用率

低, 成本高。采用铸造成形的零件内部容易形成疏松、缩孔等缺陷, 零件强度达不到要求, 且铸造成形需要模具。增材制造是无模具的直接近净成形技术, 可以提高设计柔度, 提高材料利用率, 节约成本^[3]。增材制造按热源可分为激光、电弧、电子束三类。电弧增材制造不同于激光及电子束等高能束制造方法, 具有制造成本低、沉积效率高、成形零件尺寸受限制少等优点^[4], 适合成形形状不太复杂的大尺寸结构件。为提高航空航天领域钛合金大型薄壁框类结构件的加工质量和加工效率, 降低加工成本, 对典型 TC4 框类结构件电弧增材制造技术进行研究具有十分重要的意义。

近年来, 国内外大量研究机构开展钛合金电弧增材制造相关技术的研究。在 MIG 焊成形过程中, 钛合金易受到电弧游移的影响, 造成表面粗糙度较

收稿日期: 2016-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51505033); 北京市自然科学基金项目(316 2027); 北京理工大学优秀青年教师资助计划项目(2015YG 0302)

作者简介: 马倩(1989-), 女, 河南开封人, 硕士, 主要研究方向: 钛合金电弧增材制造成形工艺; 电话: 15313259162;

E-mail: maqian9162@163.com

通讯作者: 刘长猛(1988-), 男, 山东临沂人, 博士, 讲师, 主要研究方向: 大型金属构件电弧增材制造及基于增材制造的高性能新材料制备; 电话: 010-68915097; E-mail: liuchangmeng@bit.edu.cn

大^[5]。与 MIG 焊相比, TIG 焊和等离子弧焊具有成形过程电弧稳定、无飞溅等优点, 因此, 钛合金目前多采用 TIG 或等离子电弧增材制造方法成形^[6]。B Baufeld 等人基于 TIG 电弧增材制造技术研究了 TC4 钛合金的堆焊成形工艺, 得到了简单的方框结构件, 如图 1(a) 所示, 并对堆焊件的微观组织和力学性能进行了研究^[7-8]。但是该课题组采用六自由度库卡机器人和二自由度转台操纵焊枪, 在成形过程中通过旋转转台使焊枪和送丝方向的相对位置保持恒定, 机器人旋转需要复杂的机器人程序来实现。Wang F 等人基于 TIG 电弧增材制造技术, 研究了工艺参数对 TC4 组织的影响及组织和力学性能之间的关系^[9-10], 基于等离子电弧增材制造采用七轴机器人系统, 成形了 1.2m 的 TC4 翼梁结构, 如图 1(b) 所示。但是设备同样采用机器人系统, 且用等离子弧成形, 设备贵, 编程复杂, 成形结构只涉及 T 形接头, 未涉及十字形结构。刘宁基于 TIG 电弧增材制造技术, 研究了成形过程中工艺参数对 TC4 成形尺寸及力学性能的影响规律^[11], 该课题组设计的成形设备, 焊枪固定不动, 平台移动成形, 通过变位机保持焊枪前端送丝, 只研究了单道工艺, 未涉及零件的成形。

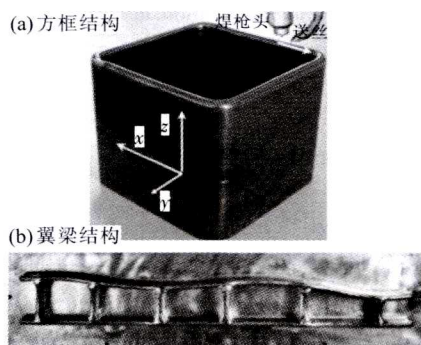


图 1 成形的 TC4 框类结构件

Fig.1 Deposited TC4 frame component

本文选取航空领域典型的“田”字形截面框类结构进行研究, 该结构特征包括 T 型接头、十字形结构, 方框截面涉及送丝方向性问题。此结构非常具有代表性。为了成形该结构, 首先基于 TIG 脉冲电弧增材制造技术, 研究成形工艺参数对熔道宏观形貌的影响, 获得表面质量较好且成形稳定的工艺参数范围, 进而研究方形框结构成形过程中的各向异性问题, 最后对“田”字形截面框进行路径规划。该典型框类结构的成形为电弧增材制造技术制备大尺寸钛合金框类结构奠定了基础, 并拓展了其在航空

航天领域的应用。

1 试验设备、材料及方案

试验设备包括 GTAW 焊机 (制造商: Miller; 型号: Dynasty 350), 送丝机 (型号: WF-007A), 三轴数控机床以及氩气保护设备。设备示意图如图 2(a) 所示^[12], 试验设备如图 2(b) 所示。焊枪被固定在机床的 x - z 轴上, 样件被固定在 y 轴上。试验采用尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的 TC4 板材作为基板, 采用直径为 1.2 mm 的 TC4 焊丝作为成形材料。

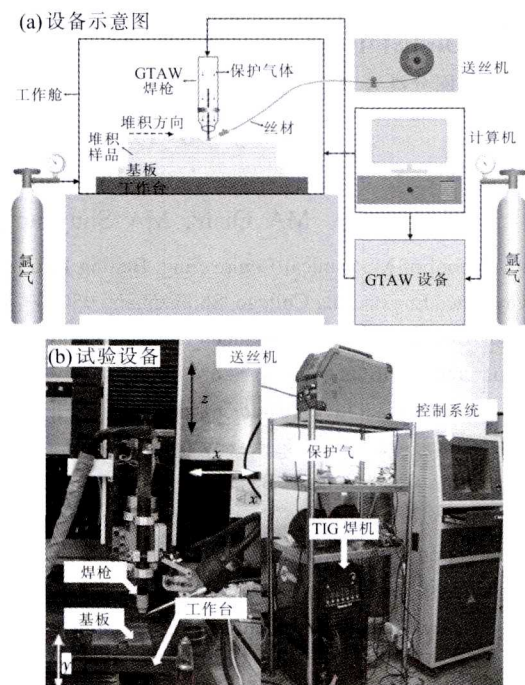


图 2 电弧增材制造设备

Fig.2 Wire and arc additive manufacturing equipment

成形工艺参数是影响零件成形尺寸的关键。为了探索工艺参数对 TC4 单道形貌的影响规律, 首先采用控制变量法进行单因素试验, 先结合前期研究初定一组工艺参数, 如表 1 中 m, 进行单道成形试验; 在此基础上, 逐一改变各工艺参数, 如表 1 中 a~l, 参数调整幅度较大, 目的是更加直观地掌握工艺参数对单道形貌的影响规律。然后, 通过试错法优化工艺获得单道稳定成形的工艺参数范围。在该范围内, 选取一组工艺参数, 研究方形框结构成形过程中各向异性问题, 通过旋转焊枪角度, 实现各向送丝的稳定成形。最后, 对典型的“田”字形框架结构研究成形路径的规划, 完成典型框类结构的制备。

表1 单因素试验工艺参数
Tab.1 Process parameters of single factor experiments

编号	峰值电流 PI /A	占空比 τ (%)	基值电流占峰值电流比 BI (%)	脉冲频率 f /Hz	送丝速度 WT_s ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	焊枪移动速度 T_s ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
a	180	30	20	0.5	100	120
b	70	30	20	0.5	100	120
c	120	50	20	0.5	100	120
d	120	10	20	0.5	100	120
e	120	30	60	0.5	100	120
f	120	30	6	0.5	100	120
g	120	30	20	5	100	120
h	120	30	20	0.3	100	120
i	120	30	20	0.5	200	120
j	120	30	20	0.5	50	120
k	120	30	20	0.5	100	180
l	120	30	20	0.5	100	60
m	120	30	20	0.5	100	120

2 试验结果及讨论

2.1 工艺参数对单道宏观形貌的影响研究

图3为单因素单道试验的熔道形貌。与表1中m参数的熔道(图3(m))相比,分别增加峰值电流、占空比、基值电流,熔道的宽度增加,如图3(a)、(c)、(e)所示;相反,分别减小峰值电流、占空比、基值电流则会导致成形失败,如图3(b)、(d)、(f)所示。在TIG熔焊中,经常采用热输入 Q 衡量单位长度焊缝上的热输入量:

$$Q = \frac{\eta UI}{T_s} \quad (1)$$

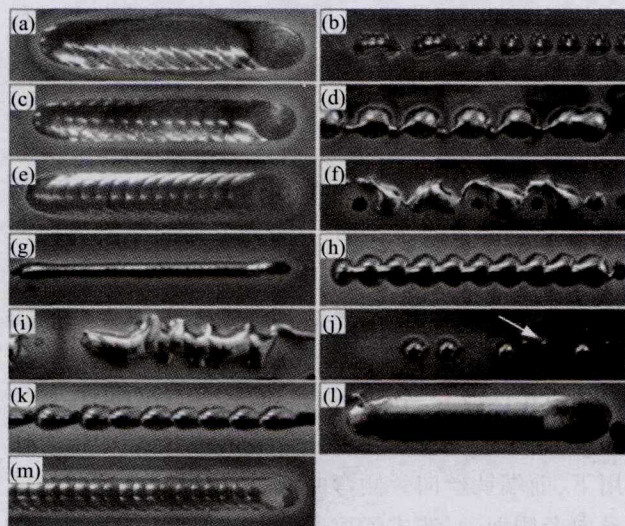


图3 单因素单道试验熔道形貌
Fig.3 Weld morphologies of single factor single pass experiments

式中: η 为热效率系数,其大小主要与焊接工艺相关,TIG焊的热效率系数一般取0.7^[13]; U 为焊接电压; I 为焊接电流; T_s 为焊枪移动速度。对于脉冲电流,电压 U 和电流 I 分别用平均值表示。根据热输入公式(1),增加峰值电流、占空比和基值电流,热输入 Q 增加,熔池温度增加。从界面理论的角度分析,液态的熔滴和固态的基板接触后,由于表面张力的作用,会存在一个夹角 θ ,如图4所示。

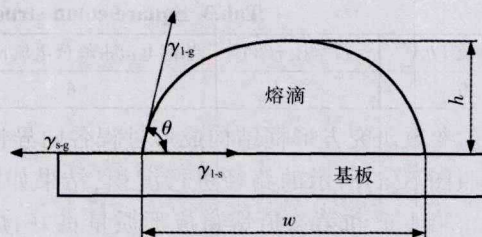


图4 熔滴与基板接触角示意图
Fig.4 Schematic diagram of contact angle between molten pool and substrate

根据杨氏方程, θ 角的大小可表示为:

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \quad (2)$$

式中: γ_{sg} 为固-气相界面张力; γ_{sl} 为液-固相界面张力, γ_{lg} 为液体表面张力。随着熔池温度升高,液体表面张力 γ_{lg} 减小,接触角 θ 会减小,熔池出现扩张,宏观上表现为熔道宽度会增加,高度降低。相反,热输入 Q 降低,熔滴过渡至基板后,一是接触角 θ 较大,二是会迅速凝固,因此出现了图3(b)、(d)、(f)中的球化现象。此外,减小占空比和基值电流与减小

峰值电流略有差别。减小占空比,峰值时间缩短,熔滴在单个脉冲内无法实现顺利过渡,如图3(d)所示,图中是两个脉冲实现一次熔滴过渡形成的熔道形貌,表现为熔道不连续,单个熔滴体积较大。而当基值电流过小时,基值阶段送进的金属丝无法完全熔化,会出现左右摆动,如图3(f)所示。

提高脉冲频率,熔道宽度较窄,如图3(g)所示;相反,降低脉冲频率,熔道不连续,呈波纹状,如图3(h)。在基值电流阶段,由于电流较小,金属丝熔化后形成的小熔滴会因为表面张力作用粘连在丝材上。随着时间的推移,小熔滴体积逐渐增大。当电流由基值转变为峰值的瞬间,电流急剧增加,电弧力随之增大,熔滴所受的重力、电弧力大于其所受的表面张力,熔滴实现过渡,在基板上形成熔池。因为提高脉冲频率,熔滴过渡的频率提高,基值电流持续时间变短,每次峰值来临时熔滴的体积减小,因此形成的熔道宽度较窄。相反,降低脉冲频率,熔滴过渡的频率降低,基值电流持续时间变长,至每次峰值时熔滴的体积较大,且两次熔滴过渡之间焊枪移动的距离较大,

因此出现了熔道不连续的现象。同理,当焊枪移动速度增加时,熔道不连续,如图3(k)所示。当焊枪移动速度减小时,熔道的表面波动会降低,且由公式(1)可知热输入 Q 增加,所以熔道宽度增加,如图3(l)所示。

提高送丝速度,熔道左右摆动,如图3(i)所示,相反,降低送丝速度,熔道无法成形,如图3(j)所示。因为送丝速度过快时,送进的金属丝材不能及时熔化,在后续送进丝材的推力作用下熔道对未熔丝材产生反推力,导致未熔丝材发生向旁侧弯曲,出现左右摆动,当至峰值电流时,丝材熔化位置偏离熔道。而当送丝速度过低时,每个脉冲周期内熔化的金属丝材量较少,当至峰值电流时,体积很小的熔滴会在电弧力的作用下形成小熔滴,甚至被吹飞,如图3(j)箭头所示。

基于上述规律采用试错法进行大量试验优化工艺,获得了成形稳定且熔道表面质量良好的工艺参数范围,如表2所示。

2.2 方形框结构成形过程各向异性问题研究

基于上述优化的工艺参数范围,选择如表3所

表2 优化后的工艺参数范围
Tab.2 Optimized process parameters range

峰值电流 PI/A	占空比 $\tau(\%)$	基值电流占峰值电流比 $BI/\%$	脉冲频率 f/Hz	送丝速度 $WTs/(cm \cdot s^{-1})$	焊枪移动速度 $Ts/(mm \cdot s^{-1})$
≥ 140	≥ 15	≥ 6	0.5~1.5	80~100	100~140

表3 方形框结构成形工艺参数
Tab.3 Square column structure forming process parameters range

峰值电流 PI/A	占空比 $\tau(\%)$	基值电流占峰值电流比 $BI/\%$	脉冲频率 f/Hz	送丝速度 $WTs/(cm \cdot s^{-1})$	焊枪移动速度 $Ts/(mm \cdot s^{-1})$
160	30	6	1.2	100	120

示的工艺参数研究方形框结构成形过程各向异性问题。按照图5(a)所示的路径进行沉积,结果如图5(b)所示,第1道和第2道熔道成形质量良好,熔道连续且表面波动较小。第3道熔道成形质量较差,熔滴孤立不连续,并伴有明显划痕,最终金属丝凝固在熔道中,导致无法继续成形。

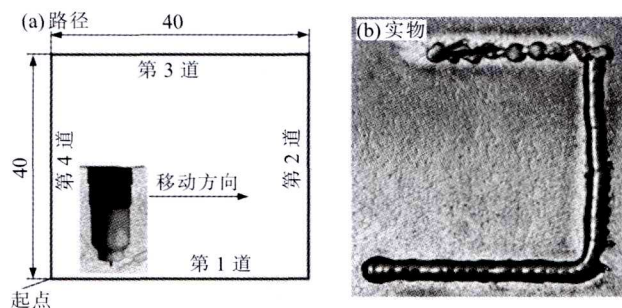


图5 方形框结构成形路径及实物
Fig.5 Deposition paths and the sample of square column structure

由于TIG焊成形采用旁侧送丝,焊枪和送丝杆不在同一轴线上,因此在成形过程中送丝方向和成形方向的相对关系会发生变化。第1道成型时,送丝杆在焊枪移动方向的前侧,称为前向送丝;第2道和第4道成型时,送丝杆在焊枪移动方向的旁侧,称为侧向送丝;第3道成型时,送丝杆在焊枪移动方向的后侧,称为后向送丝。后向送丝时,由于送丝杆在焊枪移动方向的后侧,当焊枪向前移动时,钛丝与电弧热源中心距离增大,钛丝无法获得足够的热量完全熔化成熔滴,而是软化下弯。同时,送丝杆仍在持续送丝,由于前端钛丝并未完全熔化,在送丝的推力作用下,前端钛丝向旁侧弯曲。焊枪的移动带动前端钛丝向旁侧划动,造成了熔道上面的划痕。随着热源的逐渐远离,未完全熔化的钛丝被凝固在焊道里面,导致成形无法继续进行。

针对成形过程的各向异性问题,采用旋转焊枪的方法,将焊枪及送丝杆整体旋转 10° 。为检验此方法的效果,成形了 15 层方形和圆形结构,结果如图 6 所示。使用此方法成形出的方柱和圆柱质量很好,

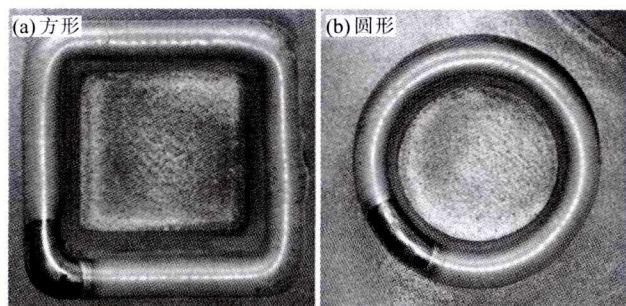


图 6 旋转焊枪后成形的方形和圆形结构
Fig.6 Deposited square and cylinder structures
after rotating welding torch

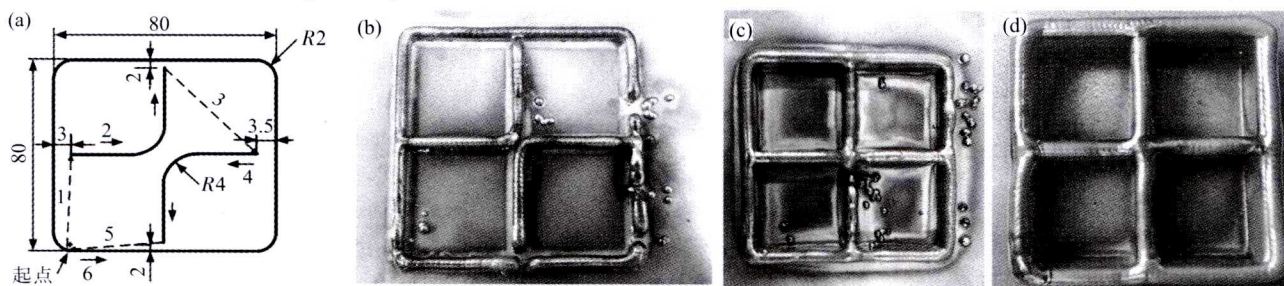


图 7 “田”字形框结构路径规划及样件实物(mm)
Fig.7 Path planning and the sample of “田” section frame structure (mm)

虚线箭头表示焊枪空走不起弧,只是从熄弧位置快速移动到下一个起弧位置,粗实线表示熔道。采用表 3 的工艺参数,成形 15 层熔道。

熔道宽度为 6mm,若十字交叉位置圆弧半径为 4.5mm,熔道 2 和 4 起弧位置、熄弧位置分别距离熔道 6 为 3mm,成形样件如图 7(b)所示。十字交叉位置熔道未搭接上,熔道 6 在与熔道 4 起弧的 T 字形接头偏后位置出现断点,熔道 6 在熔道 2 和熔道 4 熄弧的 T 字形接头位置未搭接上。

十字交叉位置熔道未搭接上,因为焊接初始层时,基板温度较低,熔道较窄,所以圆弧半径应减小。熔道 6 在与熔道 4 起弧的 T 字形接头偏后位置出现断点,是因为熔道 2 熄弧后,有小熔滴凝固在钛丝末端,当在熔道 4 起点起弧时,会形成一个较大的熔滴滴落,此处会凸起。当熔道 6 经过该位置时,钛丝末端形成的熔滴极易在熔道 4 起弧凸起位置的表面张力作用下被粘走,而没有滴落在正下方,下一层依然如此。当堆积几层后,当钛丝末端与熔池表面的高度差足够熔滴可以长大到最大尺寸,熔滴发生滴落。

表面波动小,宏观形貌未呈现各向异性。

电弧热量是熔化钛丝的主要能量源,电弧的热量主要集中于弧柱区。弧柱区是典型的“钟罩形”结构,其温度服从高斯分布,沿中轴线往径向温度逐渐降低。当倾斜焊枪和送丝杆时,钛丝末端与焊枪中轴线的水平距离减小,在后向送丝时钛丝可以获得更多的热量熔化形成液滴。

2.3 典型“田”字形框结构成形路径研究

典型“田”字形框结构在方形框结构基础上多了十字交叉结构。此交叉结构如果熔道交叉,会造成高度凸起;如果分四段堆积,由于电弧在起弧、熄弧位置高度不稳定,会造成表面不平整。本文对交叉结构采用圆弧搭接的路径,如图 7(a)所示,箭头表示焊枪移动方向,箭头上面的数字表示成形的顺序,其中

滴落过程中,熔滴受到电弧吹力作用,容易发生飞溅,散落到熔道 6 外侧。因此,此 T 形接头位置的距离应加大。熔道 2 和 4 熄弧时,小熔滴可能凝固在钛丝末端未滴落下来,所以这些 T 形接头位置的距离应减小。

若交叉位置圆弧半径为 3.5mm,熔道 2 和 4 熄弧位置分别距离熔道 6 为 2mm,熔道 4 起弧位置距离熔道 6 为 3.3mm,成形试样如图 7(c)。在熔道 4 拐角过后出现断点,因为圆弧半径太小,重叠区域较大,同熔道 6 在与熔道 4 起弧的 T 字形接头位置后面出现断点原因类似,所以圆弧半径应加大。熔道 6 在与熔道 4 起弧的 T 字形接头位置后面熔道出现低点,所以此 T 形接头位置距离应加大。

若十字交叉位置圆弧半径为 4mm,熔道 2 和 4 熄弧位置分别距离熔道 6 为 2mm,熔道 4 起弧位置距离熔道 6 为 3.5mm,成形试样如图 7(d)所示,此样件表面质量良好。

3 结论

(1) 成形工艺参数对单道宏观形貌的影响规

律:峰值电流、占空比、基值电流中任意一值增大,或焊枪移动速度减小,都将增大热输入,从而使熔道宽度的增加;随着脉冲频率增加,熔道宽度逐渐减小;当送丝速度太大或太小时,熔道都无法实现连续成形。

(2) 通过将焊枪和送丝杆整体旋转 10° , 钛丝末端与焊枪中轴线的水平距离会减小, 有助于送丝杆在焊枪移动方向的后侧时, 钛丝可以获得足够的热量熔化成形, 从而实现成形零件呈各向同性的宏观形貌。

(3) 对于十字交叉位置, 采用圆弧搭接路径, 可以获得表面质量良好的“田”字形框类结构件。

参考文献:

- [1] Lütjering G, Williams J C. Titanium [M]. Berlin: Springer, 2003.
- [2] Ezugwu E O, Wang Z M. Titanium alloys and their machinability-a review [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 68(3): 262-274.
- [3] 关桥. 焊接 / 连接与增材制造 (3D 打印)[J]. 焊接, 2014(5): 1-8.
- [4] Ding D, Pan Z, Cuiuri D, et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1-4): 465-481.
- [5] Shinn B W, Farson D F, Denney P E. Laser stabilisation of arc cathode spots in titanium welding [J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2013.
- [6] Williams S W, Martina F, Addison A C, et al. Wire+ arc additive manufacturing [J]. Materials Science and Technology, 2016: 1-7.
- [7] Baufeld B, Biest O, Gault R. Microstructure of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition[J]. International Journal of Materials Research, 2009, 100(11): 1536-1542.
- [8] Baufeld B, Van der Biest O. Mechanical properties of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2016.
- [9] Wang F, Williams S, Rush M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(5-8): 597-603.
- [10] Wang F, Williams S, Colegrove P, et al. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(2): 968-977.
- [11] 刘宁, 范成磊, 杨春利, 等. TIG 堆焊成型中工艺参数对钛合金成型尺寸的影响[J]. 焊接, 2013(6): 30-33.
- [12] Guo J, Zhou Y, Liu C, et al. Wire arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy: grain refinement by adjusting pulse frequency[J]. Materials, 2016, 9(10): 823.
- [13] Fuerschbach P W, Knorovsky G A. A study of melting efficiency in plasma arc and gas tungsten arc welding: a method for selecting optimal weld schedules to minimize net heat input is derived from calorimetric measurements [J]. Welding Journal, 1991, 70(11): 287-297. 

(上接第 188 页)

心区域致密化程度低, 相对密度值约为 0.78, 整体上—道次后试样相对密度约为 0.86。

(2) 1 道次挤扭的强剪切塑变会导致材料成形致密的不均匀性, 需要进行多道次或者对模具螺旋通道结构加以优化设计, 以改善其均匀性, 从而获得更佳的材料性能。

参考文献:

- [1] Popov V V, Popova E N, Stolbovskiy A V. Nanostructuring Nb by various techniques of severe plastic deformation[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 539: 22-29.
- [2] Beygelzimer Y E, Varyukhin V N. Structural changes in metals subjected to directed or twist extrusion: mathematical simulation [J]. Russian Metallurgy (Metally), 2006(1): 25-32.
- [3] 李文翔, 刘曙光. ECAP 对 T2 工业纯铜的性能影响及实验过程模拟[J]. 热加工工艺, 2011, 40(2): 36-39.
- [4] 周明智. 粉末多孔材料等通道转角挤压数值模拟及实验研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- [5] 胡卜亮, 杨西荣. 纯钛连续等径通道转角挤压的有限元模拟 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(13): 134-137.
- [6] Shpak A P, Varyukhin V N, Tkatch V I. Nanostructured $\text{Al}_{80}\text{Gd}_{10}\text{Ni}_{10}\text{Co}_2$ bulk alloy produced by twist extrusion of amorphous melt-spun ribbons [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 425: 172-177.
- [7] 李永志, 薛克敏, 李萍, 等. 多目标质量的粉末包套等通道挤扭成形致密工艺参数优化 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 57-63.
- [8] 李永志, 陈爱霞. 65Mn 钢制大塑性变形挤扭凸模的热处理工艺改进[J]. 热加工工艺, 2013, 42(22): 154-156. 