

# 高氮钢-不锈钢电弧增材制造表面形貌研究

叶约翰,周琦,秦伟铭,章晓勇,吴成成

(南京理工大学 材料科学与工程学院,江苏 南京 210094)

**摘要:**为了对异质材料电弧增材成型结构机理进行研究,采用机器人电弧增材成型技术,对高氮钢多方式(普通单道、单道多层、多道单层)沉积表面进行分析,筛选最佳工艺参数、焊道间间距,进行电弧交织结构的增材成型。试验结果表明:高氮钢单道焊缝随着沉积速度增大,表面气孔减少;高氮钢多层多道沉积时,送丝速度增大,表面气孔增多;通过最佳焊道间距的预测,得到的过渡层表面平整,表面成形精度达到亚毫米级。

**关键词:**高氮钢-不锈钢;单道多层;单层多道;道间距

**中图分类号:** TG444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2019)03-0042-04

## Study of Surface Morphology of High Nitrogen Steel-stainless Steel Arc Additive

YE Yuehan, ZHOU Qi, QIN Weiming, ZHANG Xiaoyong, WU Chengcheng

(School of Material and Science Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** This paper makes a study of the structural mechanism of heterogeneous material arc additive manufacture, analyzes the deposition surface of high nitrogen steel (HNS) multi-channel (ordinary single channel, single channel multi-layer, multi-channel single layer) by robot arc additive manufacture technology and screens the optimal process parameters and the distance between the passes to carry out the material forming of the arc intertwined structure. The results show that the surface pores are reduced with the increase of the deposition rate of the single-pass welds of the high-nitrogen steel. When the high-nitrogen steel is multi-channel multi-channel deposition, the wire feeding speed increases and the surface pores increase. The surface of the transition layer is flat, the surface forming accuracy comes to sub-millimeter level.

**Keywords:** high nitrogen steel-stainless steel; single channel multi-layer; single layer multi-channel; distance between passes

## 0 引言

电弧增材制<sup>[1-2]</sup>(WAAM)是基于熔焊技术,利用丝材熔化直接成形致密零件的技术,具有沉积速率快、成本低、可以成形复杂结构等优势<sup>[3-5]</sup>。目前电弧增材技术实现了实心钢铁零件、铝合金结构等构件的成型<sup>[6-7]</sup>。张瑞<sup>[8]</sup>通过GMAW增材与3DAutomate、Mastercam软件结合快速成型复杂的铝合金零部件,研究了层间温度、保护气成分及热输入等工艺参数对增材结构件成型及性能的影响规律,最终获得成形良好的复杂件。

Donghong Ding<sup>[9]</sup>等分析了多种GMAW焊接机器人行走路径,确定同种材料焊道重叠间距,最终电弧增材成形厚壁空心结构件。这些结构都是由同种材料组成,起弧次数较少,或者仅需要考虑同种材料单层多道间的重叠间距<sup>[10]</sup>,然而对于电弧增材成型异质材料结构的研究较少。电弧增材成形异材结构至少由2种不同性能的材料组成,通过调节异质材料的配比,利用各自的性能特点,以制造出具有某种或者多种特殊性能的结构件。

电弧增材成型异材结构,即通过分配层内异质材料成分比例,层间成角度相互叠加,采用电弧沉积技术,形成交织结构。采用电弧增材交织结构的技术为新型材料研发

提供一种创新方法。

相对于传统的电弧增材制造结构来说,增材交织结构具有以下2个突出难点:第一,最优参数的选择更为复杂,主要通过分析多种材料沉积单道以及多道重叠的成形,筛选最佳单道的工艺参数,再进行异材沉积单道的几何尺寸的匹配,参考的参数包括高度、宽度、截面面积。第二,丝材采用2种不同材料,异种材料交织成型需要确定最佳焊道间距,确保交织结构边界的几何精度,减少交织结构后处理的加工量。

高氮钢作为一种新型钢材,通过增压固氮技术增加不锈钢中的氮含量,在增加抗腐蚀性能的同时能获得两倍于不锈钢的强度,是一种性能优异的材料。不锈钢具有良好的综合性能,焊接工艺稳定,焊接时能与高氮钢良好结合。本文针对之前提出的增材交织结构的2个难点,采用高氮钢焊丝作为硬质材料,316L不锈钢(以下称不锈钢)焊丝作为软质材料,进行异质材料软硬相交结构的电弧增材成型。

## 1 试验准备

### 1.1 试验材料

试验材料为自制高氮奥氏体不锈钢焊丝,质量分数见

基金项目:国防科技创新特区项目(15037131532;17-H863-03-2D-007-004-02)

作者简介:叶约翰(1992-),男,浙江温州人,硕士研究生,主要研究方向为异种金属电弧增材制造。

表 1, 316L 不锈钢焊丝, 焊丝直径为 1.2 mm。沉积单道基板为 200 mm×200 mm×5.5 mm 的 304 不锈钢板材, 增材交织结构基板采用 400 mm×400 mm×16 mm 的 304 不锈钢板材。

表 1 试验用丝材质量分数 wt%

| 自制高氮钢焊丝    |       |      |       |      |       |       |      |       |       |      |    |
|------------|-------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|----|
| 成分         | C     | Mn   | Cr    | Mo   | Ni    | N     | Si   | V     | Nb    | Ti   | Fe |
| 含量         | 0.01  | 18   | 22    | 1    | 2     | 0.8   | 0.7  | 0.4   | 0.05  | 0.15 | 余量 |
| 316L 不锈钢焊丝 |       |      |       |      |       |       |      |       |       |      |    |
| 成分         | C     | Mn   | Cr    | Mo   | Ni    | N     | Si   | P     | S     | Cu   | Fe |
| 含量         | 0.014 | 2.07 | 19.24 | 2.28 | 12.88 | 0.038 | 0.55 | 0.021 | 0.009 | 0.02 | 余量 |

## 1.2 试验条件及方法

试验设备是九轴协同双丝焊接机器人系统, 主要由倒挂 MIG 焊接机器人、福尼斯双丝焊枪、2 台 TPS5000 福尼斯焊机组成, 参数采集系统负责采集实时电流电压等焊接电源参数。

电弧增材交织结构涉及到 2 种材料的焊接工艺, 为了分析实验参数和路径规划对交织结构成型的影响, 试验选用送丝速度 ( $F$ )、行走速度 ( $S$ )、相邻焊道间距 ( $D$ ) 3 个条件为实验变量, 其他参数固定如下: 干伸长 12 mm、保护气 93.8% Ar+1.2% O<sub>2</sub>+5% N<sub>2</sub>、气流量为 25 L/min。

## 2 单道筛选

沉积单道的几何尺寸、成型质量和多道重叠的平整度对单层的几何精度甚至整体样件成型具有重要的影响。在电弧增材过程中, 异材单道的几何尺寸匹配是决定分割层路径规划的主要变量。对于 316L 不锈钢的最优成型参数的研究已经相对成熟, 本节着重研究高氮钢成型参数。

### 2.1 单道成形

如表 2 所示, 试验将 8 种不同送丝速度, 7 种不同焊接速度采用田口正交方法筛选形成 36 组工艺参数组合。图 1 是在一定送丝速度、焊接速度下得到成形较好的高氮钢沉积单道宏观截面图。

表 2 高氮钢成形参数选择 (m/min)

| 参数   | 数值   |      |      |      |      |     |      |     |
|------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|
| 送丝速度 | 4.0  | 4.9  | 5.5  | 6.5  | 7.5  | 8.5 | 9.0  | 9.9 |
| 沉积速度 | 0.12 | 0.24 | 0.36 | 0.48 | 0.54 | 0.6 | 0.72 |     |

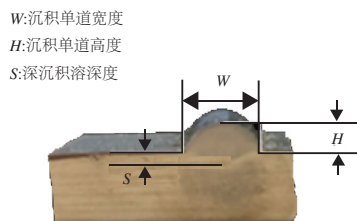


图 1 高氮钢宏观截面

## 2.2 合理沉积参数选择

根据高氮钢沉积单道成型特点的不同, 将 36 组工艺组合划分成 5 个区域, 如图 2 所示。Ⅲ区域如图 3(a) 所示, 沉积单道表面气孔密集且伴有较大凹坑出现, 焊缝表面褶皱纹明显。这是由于较低的行走速度使得线能量过大, 氮元素在熔池处于过饱和状态, 焊缝内形成大量氮气, 加上熔池存在时间较长, 最后来不及逸出而形成的氮气孔大多分布于焊道表面。

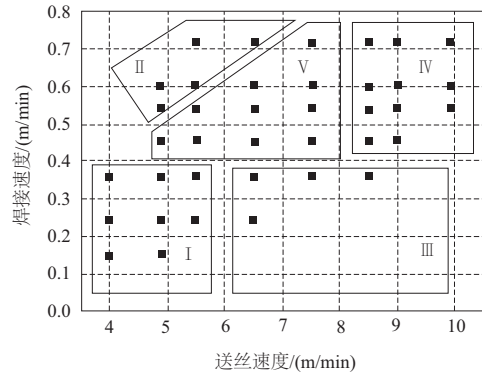


图 2 I-IV 区域出现的缺陷

Ⅱ区域如图 3(b) 所示, 沉积焊道成轻微蛇形, 焊趾处未完全熔合。这是由于区域行走速度太大, 电弧燃烧不稳, 热输入量过低, 使得单道两侧焊趾处未完全熔化; Ⅰ区域成形与Ⅲ区域相比因线能量的降低而大幅减少了表面气孔, 但焊道成形过程仍不大稳定, 如图 3(c) 所示。通过参数采集系统, Ⅳ、Ⅴ区域线能量大多在 500 J/mm 以下, 沉积焊道表面成形良好, 表面几乎不存在气孔, 且焊道过渡平稳, 铺展良好。

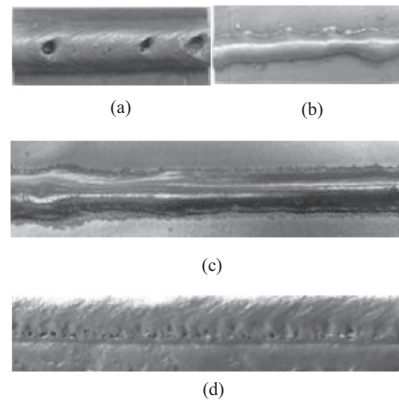


图 3 高氮钢成形工艺窗口

在进行多层多道成型实验时, 选用Ⅳ、Ⅴ区域的参数进行沉积实验, 得到的沉积表面形貌如图 3(d) 所示。采用Ⅳ区域的参数进行多层多道沉积时, 原先的部分焊道重新熔化, 在焊道两侧和焊道之间出现明显气孔。分析焊道侧面形成气孔的原因: 由于最小电压原理, 电弧会攀升到前焊道的表面, 此时侧面处于钟罩状保护气区域之外, 气流紊乱, 空气中的氮气混杂进入该区域提高了熔池金属中的氮元素含量, 同时边侧区域处于熔池边缘, 热量交换最

为迅速,使得液态金属中的氮气来不及逸出,在表面聚集凝固,形成侧边气孔。在V区域,多层与多道沉积件表面成形良好,没有气孔产生,是较为合理的参数,见图4(a)、图4(b)。

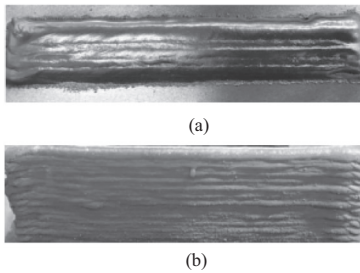


图4 V区域焊道成形较好

### 2.3 最佳沉积单道选择

沉积单道横截面面积的误差  $E$  定义为实际截面面积与理论截面面积差值的绝对值比实际截面面积,见式(1)。

$$E = \frac{|A_p - A_a|}{A_a} \times 100\% \quad (1)$$

其中: $A_p$ 是单道理论截面面积, $A_a$ 是单道实际测量截面面积, $A_p$ 的计算公式有抛物线(Parabolic)、余弦(Cosine)、椭圆(Ellipse)、圆弧(Arc)4种计算模式。通过测量沉积单道的宽度  $D$  和高度  $H$ ,曲线积分求得理论截面面积,最后得出沉积单道横截面面积误差  $E$  与  $\lambda$  ( $\lambda$  是送丝速度  $F$  与沉积速度  $S$  之比)的关系。如图5、图6所示,发现圆弧计算模式的误差  $E$  最小且没有大幅度的波动。

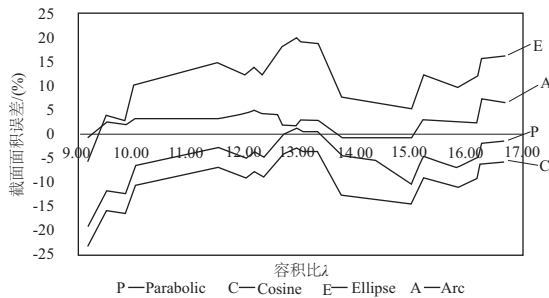


图5 高氮钢截面面积误差值  $E$

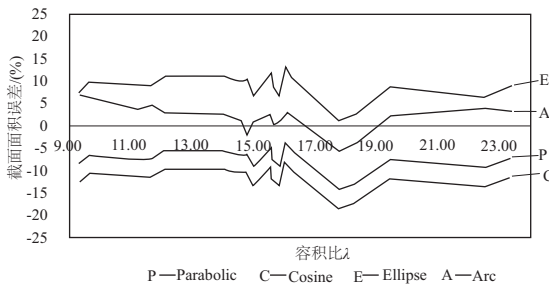


图6 316L 不锈钢截面面积误差值  $E$

从高氮钢V区域中筛选10组 $\lambda$ 处于10~25之间的工艺参数与不锈钢沉积单道进行宽度、高度、截面面积的

匹配,如图7所示。黑色线框中的A、B、C、D4组组合匹配较好。接下来将A、B、C、D区域中高氮钢和不锈钢工艺参数一一对应,进行截面面积匹配操作,图8中,B区域中两者截面面积最为近似相等,而A、B、D区域截面面积相差较大。综上所述,最终选定高氮钢成型最佳单道参数:送丝速度为7.0 m/min,行走速度0.54 m/min、不锈钢成型最佳单道参数为送丝速度6.2 m/min,行走速度0.48 m/min。

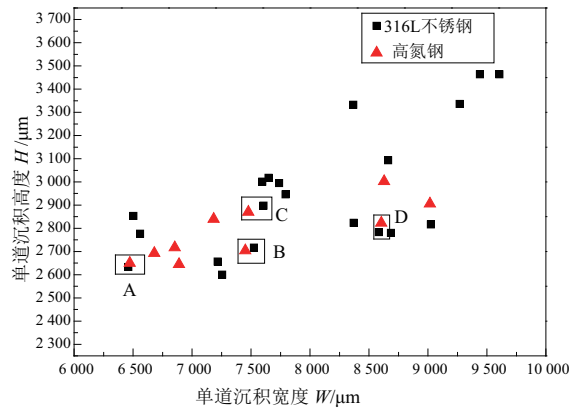


图7 两种材料单道几何尺寸

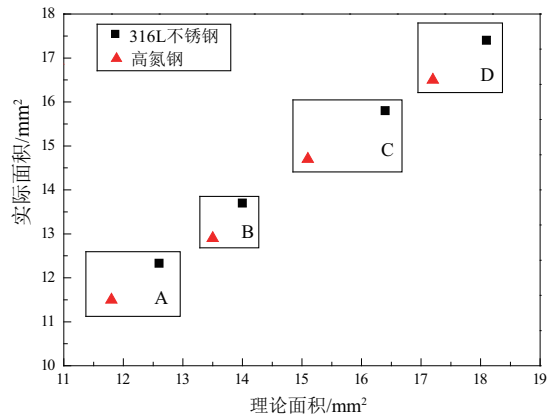


图8 两种材料沉积单道截面面积

### 3 相邻焊道间距选择

如图9所示,先在基板上沉积第一道,第二道以道间距  $d$  沉积在第一道一侧。当道间距  $d > d^*$  ( $d^*$  为相邻焊道表面齐平时的道间距)时,重叠区域面积小于“山谷”区域面积,使得两道之间产生下凹区域,甚至会出现未熔合缺陷。当道间距  $d < d^*$  时,两道重叠区域过大,使得分割层高度不一,将会给累计多层后产生明显的高度差。当道间距  $d = d^*$  时,两道之间产生的“山谷”区域面积等于两道重叠区域的面积,这样两道焊缝中心线之间的表面为平整面。

采用圆弧的截面模型对理想道间距进行预测,当  $d = 3/5d^*$  时能获得最理想平面。随后设立6组不同试验对异种材料多道重叠道间距进行评估。将道间距  $d$  设为高氮钢沉积单道宽度  $W$  的  $2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5$ , 进行不锈钢单道重叠高氮钢试验,最终结果如图10所示。当  $d < 3/5W$

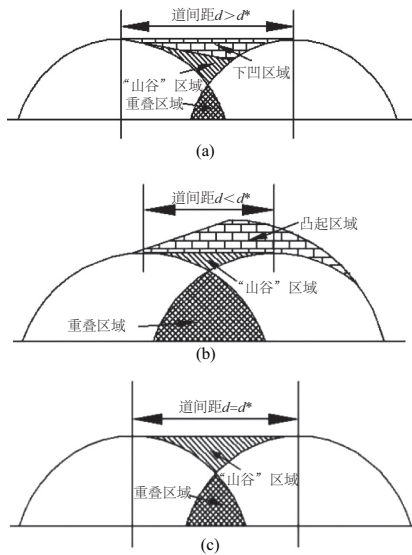


图9 不同道间距重叠模型

时,重叠区域过多,出现高低不平;当 $d > 3/5W$ 时,重叠区域未填满,出现下凹; $d = 3/5W$ 时,重叠区域较为平整,即高氮钢-不锈钢异材多道重叠的最佳道间距 $d^* = 3/5W$ ,与预测结果相符。采用同种方法对同种材料进行多道重叠试验,得出高氮钢与高氮钢多道重叠最佳道间距 $d^* = 3/5W$ ;不锈钢与不锈钢多道重叠最佳道间距 $d^* = 2/3W$ 。

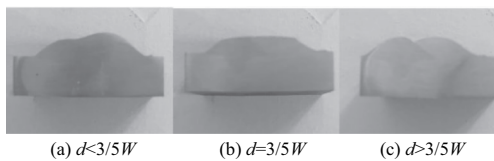


图10 异料沉积重叠截面

最后用优化后的工艺参数进行高氮钢与316L不锈钢交织单层多道成型,表面成型美观,层道两侧铺展良好,无气孔等缺陷,为下一层的增材提供了良好的成型环境,如图11所示。



图11 高氮钢-不锈钢单层多道成型情况

## 4 结语

通过对高氮钢-不锈钢最优沉积参数、最佳焊道间距

以及合理打印路径进行探索,并将最合理的参数应用至实际零件中进行打印,可以较好地完成高氮钢-不锈钢交织结构件的成型。通过此次实验可以得出如下结论:

1) 高氮钢沉积单道成形受线能量影响较大,最终选定中送丝快沉积的V区域为高氮钢成型较好的区域。

2) 通过异材沉积单道的几何尺寸匹配,同种、异种材料多道重叠最佳道间距试验,最终选定高氮钢成型最佳单道参数。通过对比不同截面模型下理论与实际面积误差 $E$ 的值,发现圆弧截面模型与实际截面最为吻合。随后用圆弧截面模型进行最佳道间距的预测与验证,试验结果证实了理论预测最佳道间距的可行性。

3) 将高氮钢-316L不锈钢的异质材料按比例分布在同一分割层,得到的异材交织分割层平整度良好,结合界面成型美观,可以较好地融合并在交替打印中形成尺寸精细、结合完好的增材结构件。

### 参考文献:

- [1] Ding J, Colegrove P, Mehnen J, et al. Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts [J]. Computational Materials Science, 2011, 50(12):3315-3322.
- [2] 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):465-481.
- [3] 王华明. 高性能金属构件增材制造技术开启国防制造新篇章 [J]. 国防制造技术, 2013(3):5-7.
- [4] 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.
- [5] 彭育辉, 陈英杰, 黄彬. 基于 STL 模型的异地实时协同环境的研究与应用 [J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(1):104-107.
- [6] 施建平, 杨继全, 王兴松. 多材料零件 3D 打印技术现状及趋势 [J]. 机械设计与自动化, 2017(2):11-17.
- [7] Karunakaran K P, Suryakumar S, Pushpa V, et al. Lowcost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(5):490-499.
- [8] 张瑞. 基于 CMT 的铝合金电弧增材制造(3D 打印)技术及工艺研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2016.
- [9] Ding D, Pan Z, Cuiuri D, et al. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 34(C):8-19.
- [10] Cao Y, Zhu S, Liang X, et al. Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(3):641-645.

收稿日期:2018-02-05