

排气阀等离子堆焊高强度合金粉末的残余应力与变形有限元分析

杨兴林¹, 何芳¹, 肖裕华¹, 丁国娣²

(1.江苏科技大学能源与动力工程学院,江苏镇江212000;2.南京中远海运船舶设备配件有限公司,江苏南京211121)

摘要:针对大型船用排气阀在焊接过程中易出现应力集中等焊接缺陷的问题,采用ABAQUS有限元软件对排气阀等离子堆焊高强度合金粉末材料的应力、变形进行数值模拟。为了考虑合金粉末材料的非线性变化,采用熔点定义材料的不同状态,并将其与材料参数一起写入UMATHT子程序。结果表明:基于UMATHT子程序计算出的残余应力值与实验结果拟合度高,残余应力受材料本身的影响较大,厚度方向与轴向的残余应力大致以焊缝为中心呈对称现象。焊缝的变形量总体上比母材的大,但变形量较小,主要位于焊缝中间部位。

关键词:排气阀;合金粉末;残余应力;数值模拟

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20201947

中图分类号: TG404

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2022)15-0128-04

Finite Element Analysis of Residual Stress and Deformation in Plasma Surfacing High-Strength Alloy Powder on Exhaust Valve

YANG Xingling¹, HE Fang¹, XIAO Yuhua¹, DING Guodi²

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China; 2. COSCO Shipping Marine Equipment & Spares (Nanjing) Co., Ltd., Nanjing 211121, China)

Abstract: Aiming at the welding defects that stress concentration easily occurs in the welding process of large marine exhaust valves, the ABAQUS finite element software was used to numerically simulate the stress and deformation of the exhaust valve in surfacing high-strength alloy powder. In order to take into account the nonlinear changes in the material, the melting point was used to define different states of the material, and write it together with the material parameters into the UMATHT subroutine. The results show that the calculated residual stress values based on the UMATHT subroutine have a better fitting degree with the experimental results, and the residual stress is strongly influenced by the material itself, and the stresses of the thickness direction and the axial direction are roughly symmetric with the center of the weld. The overall deformation of the weld is larger than that of the base material, but the deformation is small, which is mainly located at the middle part of the weld.

Key words: exhaust valve; alloy powder; residual stress; numerical simulation

排气阀是大型船舶柴油机主机燃烧室的重要组成部分,长期在高温、高压的恶劣环境下工作。为了提高排气阀的产品质量和使用寿命,通常在密封面上使用等离子堆焊高强度高温合金粉末。但是由于等离子弧在焊接过程中热输入能量很高,以致在焊接完成后焊件内部仍留有未消除的焊接残余应力以

及焊接变形,会对气阀的质量产生不利影响^[1],严重危害内燃机的稳定性和安全性^[2-3]。

国内外学者对焊接残余应力及其对结构的影响已经进行了较为全面的研究,但是对于船用气阀等离子堆焊的有限元分析还相对较少。高立^[4]通过实验的方式研究了发动机排气阀激光焊接工艺,得出主要通过打磨、抛光和紧密接触的方式提高焊接质量。郑乔^[5]等人通过SYSWELD软件分析了熔覆顺序对焊接残余应力和形变的影响,指出熔覆顺序严重影响焊接残余应力的分布和变形分布形态。而到目前为止,关于高合金粉末等离子堆焊过程材料热本构行为的数值研究,国内外还鲜有报道。基于

收稿日期:2020-08-05

作者简介:杨兴林(1964-),男,湖南人,教授,博士,主要从事内燃机系统设计与船舶先进制造技术研究;电话:18905280992;

E-mail:2975553282@qq.com

通讯作者:何芳(1995-),女,湖南人,硕士,主要研究方向:粉末等离子堆焊残余应力;电话:15751009181;

E-mail:1599798477@qq.com

ABAQUS 有限元软件对船用排气阀等离子堆焊过程的残余应力和变形进行了计算分析,并编写了 UMATHT 子程序着重考虑了材料热本构行为的影响,最后通过 X 射线法测量了船用气阀焊后残余应力,通过比较实验和数值模拟的结果,验证了所开发方法的有效性,研究结果能有效提高排气阀的焊接质量。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验所试制的某排气阀母材材料为 40Cr10Si2Mo 钢,其化学成分如表 1 所示。焊件尺寸如图 1 所示,盘底直径 47.5 mm,盘底厚 8 mm,杆径 22 mm,颈部直径 45 mm,焊缝部位根据工艺要求开 8 mm 深的 U 型槽。以 Stellite 6 钴基合金粉末作为熔覆材料,其化学成分如表 2 所示。

表 1 40Cr10Si2Mo 钢的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of 40Cr10Si2Mo steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
0.37	2.23	0.36	0.023	0.006	9.91	0.37	0.23	0.027	余量

表 2 Stellite 6 焊粉的化学成分(质量分数,%)

Tab.2 Chemical composition of Stellite 6 solder powder (wt%)

C	Si	Mn	Cr	Fe	W	Co
1.2	1.1	1.0	28.0	3.0	4.5	余量

1.2 实验方法

等离子堆焊前,先用细砂纸将表面锈迹擦除,再用酒精将焊槽表面清洗干净并吹干,使用 PTA 粉末等离子堆焊机进行焊接。焊接前,首先将焊件进行预热,预热温度为 250 °C,具体的焊接工艺参数如表 3 所示,最终得到如图 1(b)所示的堆焊层宏观形貌。

表 3 焊接工艺参数

Tab.3 Welding process parameters

焊道层数	焊接电压 /V	焊接电流 /A	焊接速度 / (mm·s ⁻¹)	热源效率 η
1	33	135	4.4	0.85

2 有限元模型的建立

2.1 有限元计算模型

为了尽量减少模拟计算的时间,在考虑实际模型尺寸的情况下建立了 1/4 个有限元模型。由于等离子堆焊过程中焊缝区域及附近母材熔化,是最易出现应力集中与焊接缺陷的地方,因此在应力集中较为明显的焊缝区域划分较细的网格,远离焊缝的区域划分较为稀疏的网格^[6],如图 2 所示。为了充分

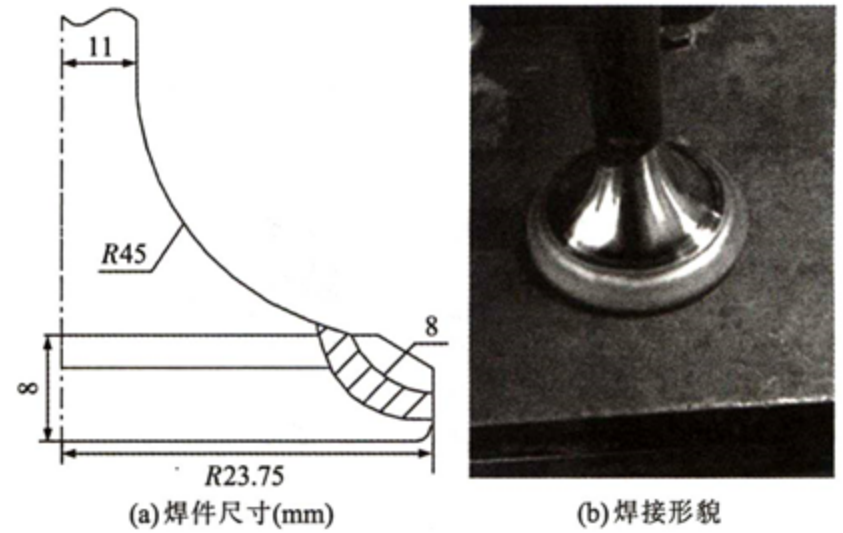


图 1 焊件尺寸及形貌
Fig.1 Size and morphology of the weldment

模拟实际焊接工况,建立与实际焊接情况一致的约束边界条件^[7],见图 2。

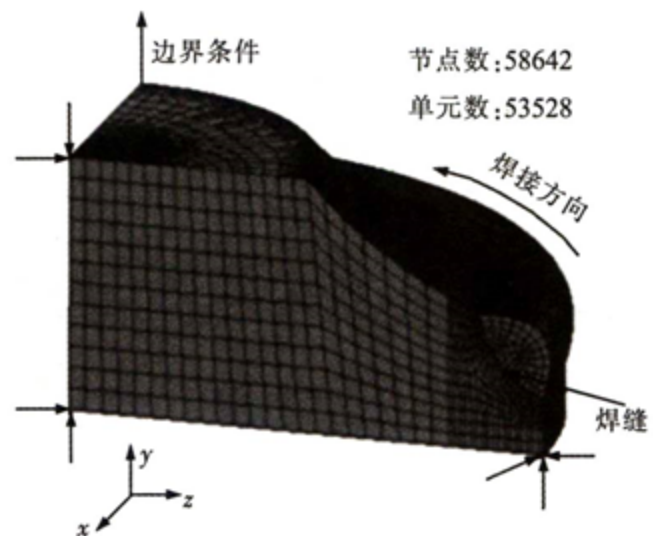


图 2 焊接有限元模型
Fig.2 Finite element model for the welding

2.2 焊接热源的选择

在等离子堆焊过程中,母材表面以及厚度方向都会受到热冲击的作用而部分熔化,熔池较深。双椭球体积分布热源能很好地描述该行为,通过 FORTAN 语言二次开发 Dflux 子程序,并通过生死单元法模拟焊料的逐步填充^[8-9]。焊槽内任意一点的热源模型为:

$$q = \begin{cases} \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_f^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right) & \text{前端} \\ \frac{6\sqrt{3}f_b Q}{abc_b \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_b^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right) & \text{后端} \end{cases} \quad (1)$$

式中: q 为点 (x, y, z) 处的热流密度; Q 为焊接热输入; a, b, c_f 与 c_b 代表模型的形状参数,如图 3 所示; f_f 与 f_b 分别为热源中心前后两个四分之一椭球的能量分配系数 $f_f + f_b = 2$ 。

2.3 不同材料参数的处理

等离子堆焊过程中焊粉的状态经过粉末-液

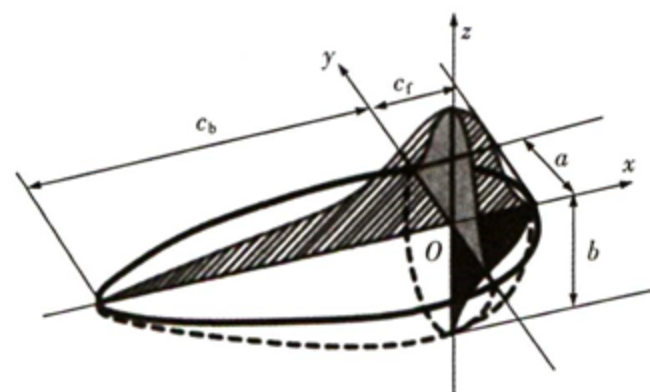


图3 双椭球热源模型

Fig.3 Double-ellipsoidal heat source model

态-固体的变化,其中液态存在的时间最短,而Stellite6钴基合金粉末状态的材料参数与固体状态相差很大,在进行仿真计算时需要对不同的状态加以区分,在不同的状态下使用不同的材料参数。在ABAQUS软件的材料属性模块中不能进行如此复

杂的设置,需要在子程序UMATHT中定义Stellite6合金粉末的不同状态,设置熔点温度为1300℃。同时对材料参数进行最小二乘法多项式拟合^[8]后写入UMATHT子程序中。

3 结果与讨论

3.1 焊接温度场结果

图4为焊接温度场图。由于焊件起始端的温度较低,焊接热输入并不能使该位置在瞬间达到焊接温度。随着焊接的进行,温度缓慢上升,散失的热量和焊接热输入量逐渐保持平衡,熔池温度达到了稳定状态。在冷却过程中,温度下降明显,在接近常温时出现焊件整体温度下降的状况,与实际焊接过程中温度的变化情况相一致。

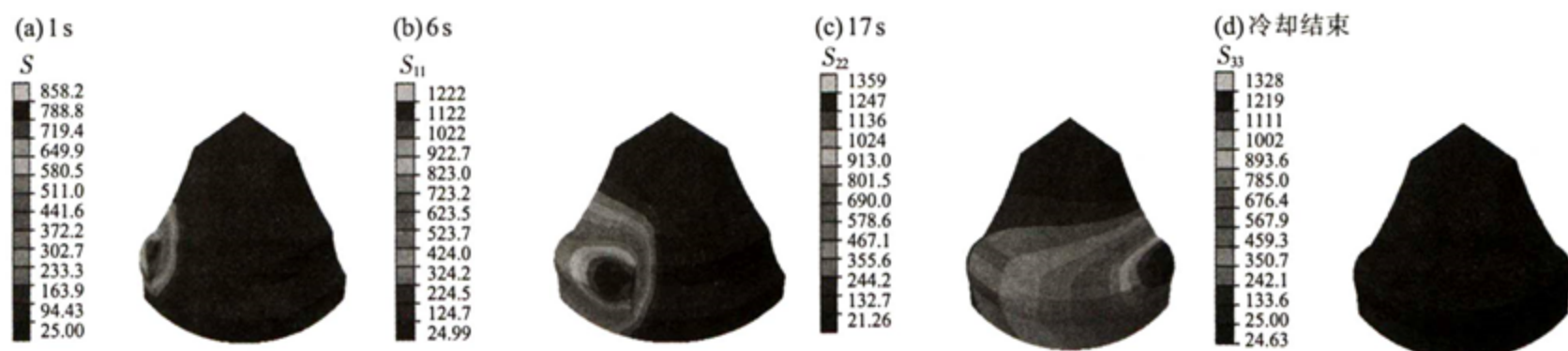


图4 焊接温度场图(°C)

Fig.4 Map of welding temperature field (°C)

3.2 焊接应力场结果

图5为焊接残余应力分布。从图中可以看出,焊接残余应力主要集中在焊缝附近,峰值为791.4MPa,远离焊缝的母材区域应力值较小。焊料由于弹性模量较大及较高的屈服极限引起了较大的焊接残余应力,厚度方向与轴向的应力大致以焊缝为中心呈现对称现象,峰值分别出现在焊接起始端与末端。环向应力总体按中心线对称分布,变化较为平缓,整

体应力值较小,并且应力梯度较为平缓。由于气阀形状较为特殊,底面较薄,在冷却过程中收缩易受到限制,导致底面出现较大的应力值,最大为366.5MPa。

3.3 应力-路径分析

为了确定焊接接头在不同位置上残余应力的大小及分布规律,选取了两条路径1、2进行分析,1、2路径分别位于焊缝结合处附近和贯穿于母材和焊缝位置,如图5(a)所示。

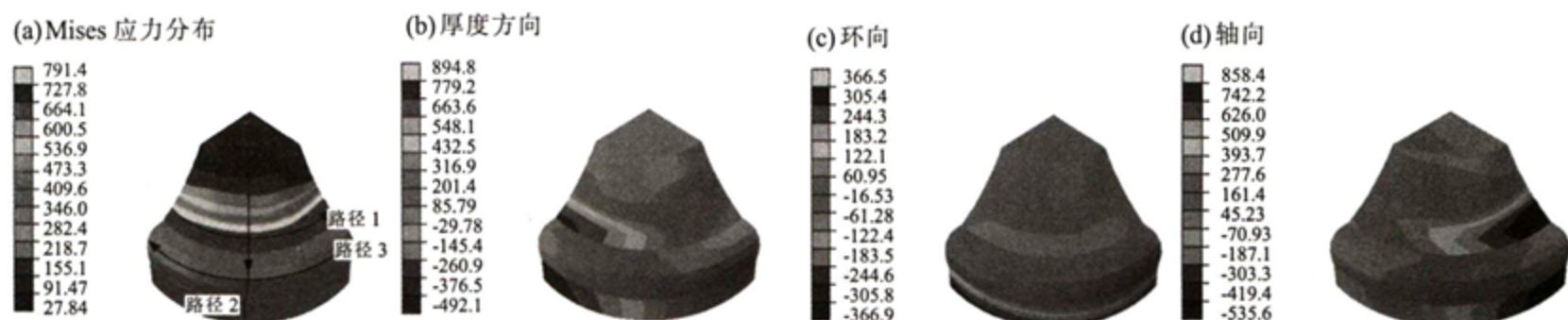


图5 焊接残余应力云图(MPa)

Fig.5 Cloud map of welding residual stress (MPa)

图6为不同的路径上残余应力的分布状态。从图6(a)可以得出焊接残余应力易受温度的影响,在焊接起始阶段由于焊件温度较低、等离子弧输入不

稳定等原因,导致其残余应力值较低,随着热输入逐渐趋于稳定,焊接残余应力值也趋于平衡状态。从图6(b)可以明显看出,不同位置的残余应力分布不同,

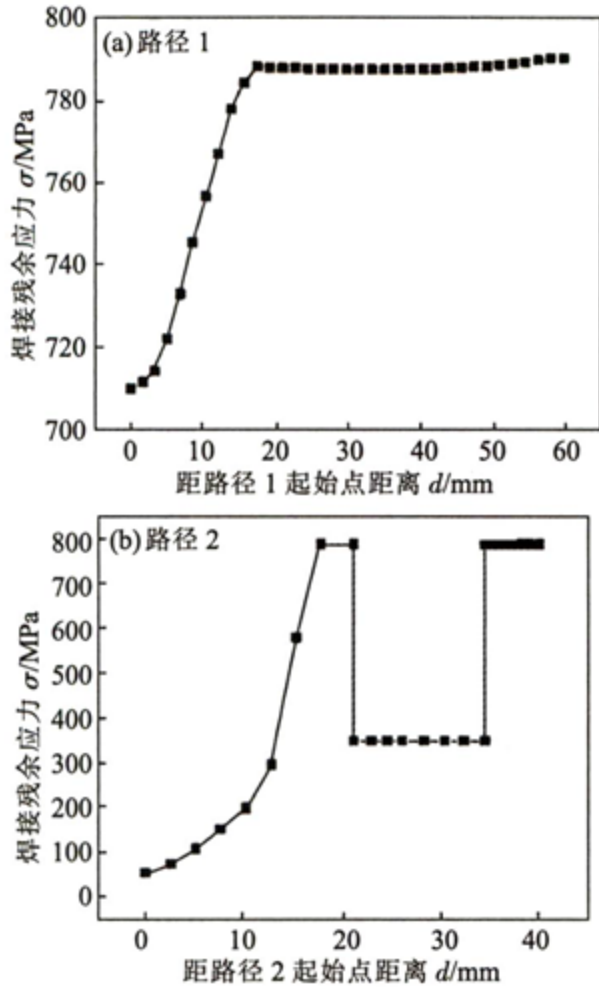


图6 不同路径上的焊接残余应力分布

Fig.6 Distribution of welding residual stress along different paths

受不同材料以及热输入的影响,母材和焊缝的残余应力分界线非常明显。

3.4 焊接位移场结果

排气阀属于高精度零件,形变所产生的位移量需后期的机加工进行切削,因此焊接残余应力对焊件结构的影响也不容忽视。图7为焊接位移场分布。可以看出,焊件的形变主要产生在焊料中间部位,由于焊件属于高硬度合金材料,产生的形变量较小,最大值为0.32mm。

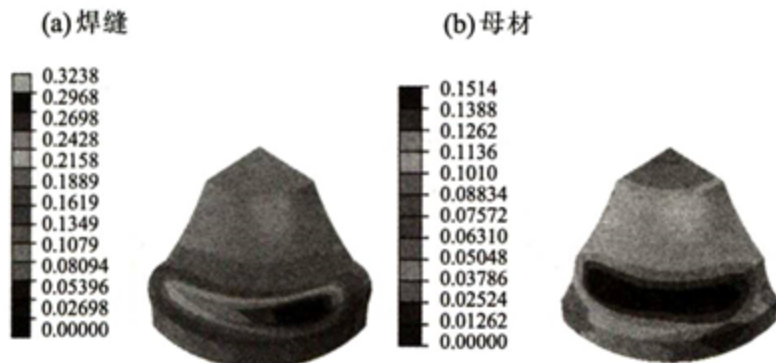


图7 焊接位移场图(mm)

Fig.7 Map of welding displacement field(mm)

图8对比分析了相应位置上母材和焊料的形变量。可以明显看出焊料上的应变明显大于母材,峰值相差53%,但是总体趋势保持一致。母材只是在表面受到热冲击的影响,而焊料被全部熔化再凝固,说明在材料属性差别不大的前提下,热输入成为影

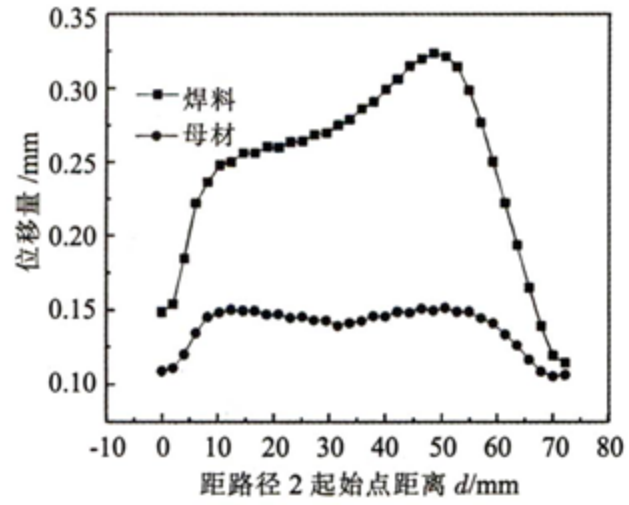


图8 母材和焊缝的位移对比

Fig.8 Comparison of displacement between base metal and weld

响焊接形变的主要因素。

3.5 残余应力测量验证

本实验采用X射线衍射法对焊后工件进行残余应力测量,在排气阀阀面表面用砂纸进行简单处理后,选取6个点进行测量,残余应力分布对比如图9所示。经计算,考虑UMATHHT子程序的模拟值与实验值吻合度更高,两者误差在10%以内,能清楚地说明采用此方法研究等离子堆焊过程是真实可靠的,符合实际情况。

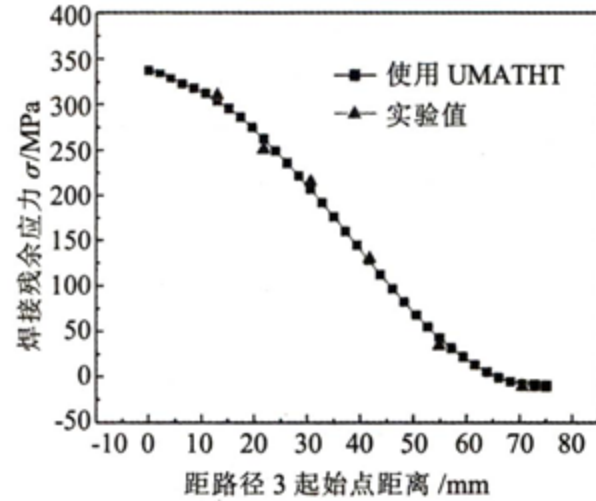


图9 残余应力的仿真结果与实验结果对比图

Fig.9 Comparison diagram between simulation result and experiment result of residual stress

4 结论

(1) 基于ABAQUS有限元软件,采用UMATHHT子程序定义材料参数,焊接残余应力模拟结果与实验值拟合度好,在10%以内。

(2) 焊接残余应力受材料本身的影响较大,峰值出现在焊缝附近,为791.4MPa,在轴向与厚度方向的焊接残余应力大致以焊缝为中心呈对称现象。

(3) 焊接形变主要发生在焊件中间部位,母材受焊接热冲击的影响较小,形变量较 (下转第137页)

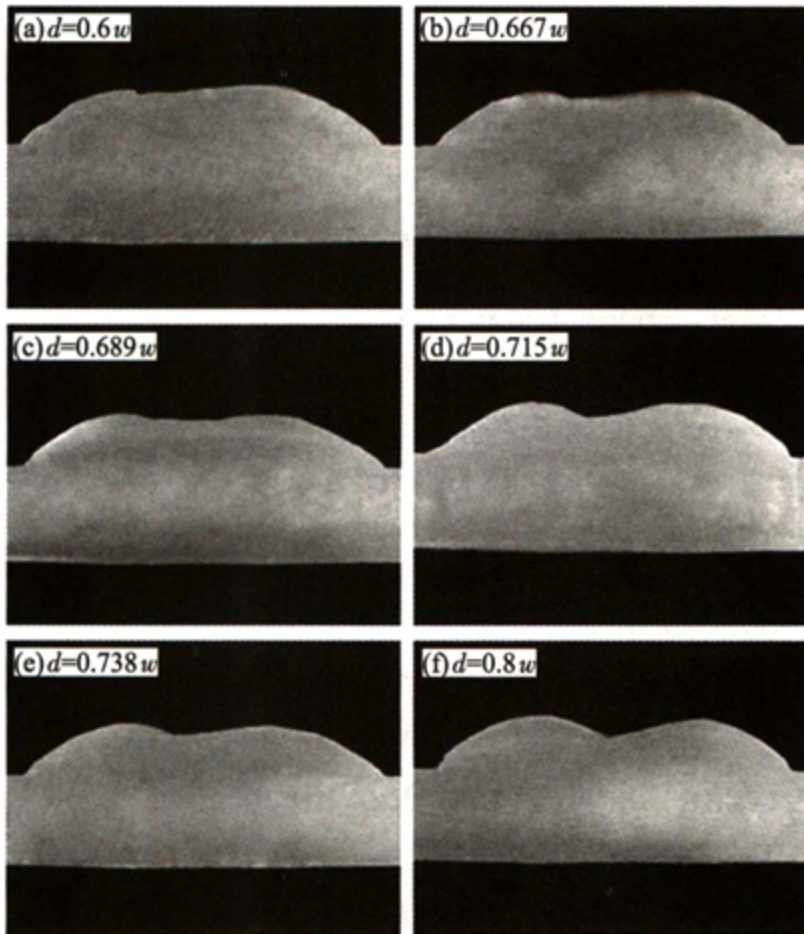


图14 不同搭接间距下单层两道搭接焊缝截面形貌
Fig.14 Cross-section morphology of single-layer two-pass lap welds under different lap spacings

单层多道成型的要求。当搭接距离继续增大时,如图14(d)、(e)所示,即斜顶搭接模型 $0.715w$ 和切线搭接模型 $0.738w$,焊道重叠区域开始下凹明显,焊道间距过大,重叠区域面积小于波谷面积。如图14(f)所示,当搭接间距为 $0.8w$ 时,波峰波谷高度差较大,搭接处出现明显凹陷,不符合成型要求,此时搭接状态为欠搭接。

综上所述,改进的 Tri-Arc DE 补偿搭接模型的搭接间距为 $0.689w$ 时,成形质量最好,此模型比已有的搭接模型更适用于双丝三弧焊。

5 结论

(1) 对双丝三弧焊的焊缝成形机理进行了研

究,分析了不同送丝速度、焊接速度、M 弧脉冲电流对焊缝成形的影响,并找出了最优参数。

(2) 用多种曲线与焊缝截面形貌进行拟合,得出了抛物线模型最适用于双丝三弧焊,基于抛物线模型进行计算可有效降低模型与真实焊缝截面的相对误差,提高模型与真实焊缝截面的吻合程度。

(3) 改进了已有的搭接模型,提出了一种新型可以补偿双丝三弧焊因飞溅过多损失熔融金属的搭接模型,并分析了焊道尺寸和相邻焊道间最佳搭接量的关系,通过对比试验验证了该模型的准确度。

参考文献:

- [1] 耿正,魏占静,韩雪飞,等. 高熔敷率低热输入的 Tri-Arc 双丝电弧焊接方法[J]. 金属加工(热加工),2014(22):36-39.
- [2] 杨俊. 基于双丝三电弧的堆焊工艺研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [3] 郑佳,李亮玉,钟蒲,等. 双丝三电弧焊中熔滴过渡及焊缝成形机理[J]. 焊接学报,2019(7):31-36.
- [4] 熊俊,薛永刚,陈辉,等. 电弧增材制造成形控制技术的研究现状与展望[J]. 电焊机,2015(9):51-56.
- [5] Suryakumar S, Karunakaran K P, Bernard A, et al. Weld bead modeling and process optimization in hybrid layered manufacturing [J]. Computer-Aided Design, 2011, 43 (4): 331-344.
- [6] Xiong J, Zhang G, Qiu Z, et al. Vision-sensing and bead width control of a single-bead multi-layer part: material and energy savings in GMAW-based rapid manufacturing [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 41 :82-88.
- [7] Ding D, Pan Z, Cuiuri D, et al. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) [J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2015, 31: 101-110.
- [8] 方学伟,白浩,姚云飞,等. 冷金属过渡电弧增材制造多道搭接工艺研究[J]. 机械工程学报,2020,56(1):141-147.
- [9] 闫崑宇,刘文洁,李新宇,等. 电弧增材制造焊缝建模及尺寸规律研究[J]. 热加工工艺,2018,47(5):177-181.

(上接第131页)焊缝位置的小。

参考文献:

- [1] 莫淑娟,朱浩,姜月,等. 偏移量对铝钢异种金属搅拌摩擦焊接头微观组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺,2020,49(1): 123-127.
- [2] 卓小敏,徐杰,李朋朋,等. 残余应力对管线钢韧性断裂的影响[J]. 焊接学报,2017,38(5):44-48.
- [3] 王家胜,舒林森. 焊接速度对异种不锈钢激光焊接接头组织与性能的影响[J]. 热加工工艺,2020,49(1):24-28.
- [4] 高立. 汽车发动机排气阀脉冲激光焊接实验研究[J]. 潍坊学

- [5] 郑乔,逯世杰,李索,等. 熔敷顺序和管壁厚度对异种钢管板接头焊接残余应力与变形的影响[J]. 机械工程学报,2019,55 (6):46-53.
- [6] 陈重毅,麻永林,王文君,等. 核用 SA508-3 钢特厚板焊后热处理有限元分析[J]. 焊接学报,2016,37(2):80-84.
- [7] 詹传康. 焊接残余应力对某转向架构架焊接结构疲劳寿命影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2019.
- [8] 孟祥陈. 选择性激光熔化金属粉末的能量传递和累积研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2015.
- [9] 黄道业. 镁合金脉冲激光焊接温度场的数值模拟[J]. 热加工工艺,2013,42(13):189-190.