

预热温度和焊接电流对 4Cr5Mo2V 钢表面堆焊层组织性能的影响

左鹏鹏^{1,2,3}, 刘骏伟³, 唐剑³, 张璐瑶³, 嵇孝儒³, 金森林⁴

(1. 中国矿业大学材料与物理学院, 江苏 徐州 221116; 2. 浙江青山钢铁有限公司, 浙江 丽水 323903;
3. 江苏科技大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212003; 4. 深圳中国计量科学
研究院技术创新研究院, 深圳 518107)

摘要: 通过微观组织观察和显微硬度测试,研究了预热温度和焊接电流两个工艺参数对 4Cr5Mo2V 钢表面堆焊层组织性能的影响,并通过堆焊层温度场数值模拟结果揭示了堆焊层组织和性能的演变机理。结果表明:母材未预热处理时,采用 70 A 的焊接电流对 4Cr5Mo2V 钢进行堆焊,其熔池的熔宽和熔深分别为 7.0 和 1.5 mm,晶粒长度和宽度分别为 10.9 和 4.0 μm ;增大焊接电流后,熔池峰值温度的大幅度上升使得熔池尺寸、晶粒尺寸和热影响区宽度进一步增大,从而恶化了堆焊层的性能;预热温度的升高降低了 4Cr5Mo2V 钢堆焊层在堆焊过程中的冷却速度,导致堆焊层平均硬度逐渐降低,450 $^{\circ}\text{C}$ 预热后堆焊层平均硬度降低了 4.9%,母材仍保持原有的硬度水平,得到了强韧性匹配较高的堆焊层。

关键词: 模具钢; 预热温度; 焊接电流; 温度场; 堆焊层

中图分类号: TG455 文献标志码: A 文章编号: 1009-6264(2024)12-0201-10

Influence of preheating temperature and welding current on microstructure and properties of surfacing layer on 4Cr5Mo2V steel surface

ZUO Peng-peng^{1,2,3}, LIU Jun-wei³, TANG Jian³, ZHANG Lu-yao³, ZHUO Xiao-ru³, JIN Sen-lin⁴

(1. School of Materials Science and Physics, University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. Zhejiang Qingshan Iron and Steel Co Ltd, Lishui 323903, China; 3. School of Materials
Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;
4. Shenzhen Institute for Technology Innovation, NIM, Shenzhen 518107, China)

Abstract: Influence of preheating temperature and welding current on microstructure and properties of surfacing layer on 4Cr5Mo2V steel surface was studied through microstructure observation and microhardness testing. The evolution mechanism of the microstructure and properties of the surfacing layer was revealed through numerical simulation results of the surfacing layer temperature field. The results show that when the base material is not preheated, a welding current of 70 A is used to weld 4Cr5Mo2V steel, the width and depth of the weld pool are 7.0 and 1.5 mm, respectively, and the length and width of the grain are 10.9 and 4.0 μm , respectively. With the increase of welding current, the peak temperature of weld pool increases greatly, which further increases the size of weld pool, the grain size and the width of heat affected zone, thus deteriorating the performance of the surfacing layer. The increase in preheating temperature reduces the cooling rate of the 4Cr5Mo2V steel surfacing layer during the surfacing, resulting in a gradual decrease in the average hardness of the surfacing layer. After preheating at 450 $^{\circ}\text{C}$, the average hardness of the surfacing layer decreases by 4.9%, while the base material keeps the original hardness level, so the surfacing layer with high strength and toughness matching is obtained.

Keywords: die steel; preheating temperature; welding current; temperature field; surfacing layer

收稿日期: 2024-06-26 修订日期: 2024-09-11

基金项目: 深圳市自然科学基金重点项目(JCYJ20220818103601003)

作者简介: 左鹏鹏(1988—),男,讲师,硕士生导师,博士,主要从事先进特殊钢及使役行为研究,E-mail:zpp0513@163.com。

引用格式: 左鹏鹏,刘骏伟,唐剑,等. 预热温度和焊接电流对 4Cr5Mo2V 钢表面堆焊层组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(12): 201-210.

ZUO Peng-peng, LIU Jun-wei, TANG Jian, et al. Influence of preheating temperature and welding current on microstructure and properties of surfacing layer on 4Cr5Mo2V steel surface[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45(12):201-210.

4Cr5Mo2V 钢作为典型的压铸模具钢,具有优异的抗热疲劳性能和强韧性^[1-2],然而,随着服役模次的增加,模具难免会出现焊合、热熔损和热龟裂等问题^[3],通过堆焊技术可以修复失效的模具并延长其使用寿命^[4]。随着科技的发展,新型的堆焊修复技术(例如:电子束焊和激光焊)逐渐推广,惰性气体钨极保护焊(TIG 焊)由于其经济性和操作灵活性仍然是不可替代的,但是如何设定合适的堆焊工艺参数是 TIG 焊中需要解决的重要问题^[7]。堆焊是一个复杂的过程,涉及到传热学、电磁学、冶金学等多学科交叉的知识,单纯通过实验无法再现堆焊过程中复杂的物理变化^[8],这也造成参数优化过程的困难。目前对于堆焊工艺参数的研究主要有两种方法:一种是通过大量的堆焊实验对不同的参数进行测试,通过对比不同参数下的实验结果选出合适的堆焊参数^[9-11];另一种方法是通过计算机对堆焊过程进行数值模拟,利用计算的结果对堆焊参数进行筛选^[12-14]。这两种方法有利有弊,方法一符合实际,但是费时费力,并且实验可能存在偶然性不够稳定;方法二都是采用计算机进行计算仿真,其结果存在可重复性,同时减少了实验中试错的成本,还能得到一些实验无法得到的数据,但是模拟的结果也存在一定的偏差,对模型建立的准确性要求较高。因此,目前对堆焊工艺参数的研究可以采用数值模拟和堆焊实验结合的方法,不仅能减轻一定工作量,还能保证参数优化的可靠性。

4Cr5Mo2V 钢较高的碳当量造成其焊接性较差,因此在堆焊前必须对其进行预热处理^[15],其目的主要是为了防止焊后出现冷裂纹,因为焊前预热可以改变焊接接头附近的焊接热循环^[16],降低焊缝和周围金属的温度差,从而降低焊后冷却速度^[17]。焊接电流也是堆焊过程中影响焊接质量的一个重要因素,焊接电流的变化会影响堆焊层的硬度和晶粒度^[18],从而使其性能发生变化,可见焊接电流过高或者过低都不利于堆焊层的使用。对堆焊过程中的温度场控制是提高成形性和质量的重要方法^[19],目前关于 4Cr5Mo2V 钢的堆焊工艺参数的研究较少,同时对于不同工艺参数的温度场对堆焊层组织性能的作用机理尚不明确。因此,本文主要针对堆焊过程中的预热温度和焊接电流这两个重要的工艺参数,通过模拟和实验结合的方法,探究工艺参数对 4Cr5Mo2V 钢堆焊层温度场和组织性能的影响,为 4Cr5Mo2V 钢堆焊工艺参数的制定提供数据支撑。

1 实验材料与方法

堆焊实验的母材和焊丝均采用国内某钢厂炼制的 4Cr5Mo2V 钢,其化学成分见表 1。堆焊的母材为 50 mm×50 mm×15 mm 的平板,焊前母材经过了 1030 ℃×30 min 淬火和 600 ℃×2 h 多次回火处理使其硬度值为 44~46 HRC,符合压铸模具钢的使用要求。采用 YC-400TX 型直流氩弧焊机在母材上表面中心进行 TIG 单层堆焊,堆焊工艺参数如表 2 所示,焊前预热的保温时间均为 2 h。焊后在堆焊试板中心处取样,试样包含堆焊层的焊缝、热影响区和母材部分,取样后将试样堆焊层截面打磨抛光,之后用体积分数为 4% 硝酸酒精溶液腐蚀,通过 Axio Lab. A1 型光学显微镜(OM)观察堆焊层形貌,用 HVS-1000M 型维氏硬度计测量堆焊层截面的硬度梯度,硬度实验的检测标准依据 GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》,其加载载荷为 200 g,加载时间为 15 s。

表 1 4Cr5Mo2V 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the 4Cr5Mo2V steel (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0.38	0.27	0.36	0.010	0.002	4.99	2.44	0.55

表 2 堆焊工艺参数

Table 2 Surfacing process parameters

Sample No.	Preheating temperature/℃	Welding current/A	Welding voltage/V	Welding speed/(cm·min ⁻¹)
1	Unpreheated	70	15	20
2	Unpreheated	90	15	20
3	Unpreheated	110	15	20
4	250	70	15	20
5	350	70	15	20
6	450	70	15	20

2 堆焊有限元模型建立

2.1 堆焊有限元模型

实际堆焊试样的焊缝尺寸为:焊缝的突起部分为 1 mm,表面熔覆金属的宽度为 6 mm,据此设计的堆焊层有限元模型如图 1 所示,模型的网格单元数为 38000。在焊缝处加入了生死单元以准确模拟堆焊的填丝过程,通过编译 python 程序来实现。4Cr5Mo2V 钢堆焊模拟所用的物理参数如表 3 所示。

2.2 堆焊热源

为了准确反映堆焊过程中堆焊层在熔深方向的能量变化^[20],选用双椭球热源模型作为 TIG 堆焊的焊接热源^[21],如图 2 所示。热源的分布表达式

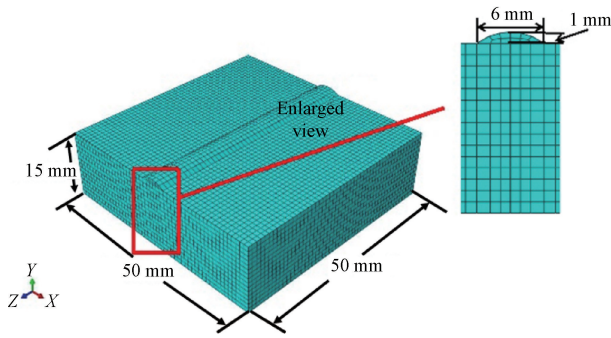


图 1 堆焊模型
Fig. 1 Surfacing model

见公式(1):

$$\left\{ \begin{aligned} q_f(x, y, z) &= \frac{6\sqrt{3} Q_f \eta UI}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), \\ x &\geq 0 \\ q_r(x, y, z) &= \frac{6\sqrt{3} Q_r \eta UI}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), \\ x &< 0 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: a_f, a_r, b, c 分别为热源的形状参数; Q_f 和 Q_r 表示焊接热输入在半球的分配系数, $Q_f + Q_r = 2$; η 为

表 3 材料的物理性能

Table 3 Physical properties of materials

Temperature/°C	25	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
Specific heat capacity/(J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	443.0	512.1	606.3	823.1	883.7	623.8	657.5	691.2	821.1
Heat conductivity/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	30.5	34.3	34.8	32.3	28.8	28.2	30.6	32.9	34.2
Density/(kg·m ⁻³)	7836	7784	7720	7650	7575	7548	7443	7339	6964

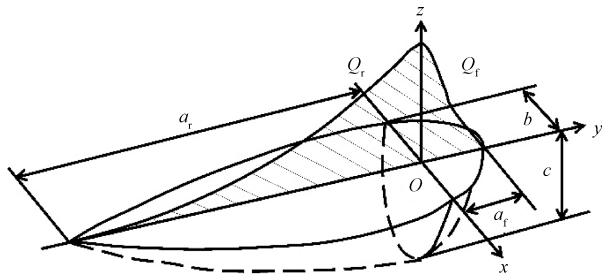


图 2 双椭球热源模型^[21]

Fig. 2 Double ellipsoid heat source model^[21]

TIG 焊的热源效率, 设为 0.7; U 为焊接电压; I 为焊接电流, 具体的工艺参数设定和表 2 堆焊实验保持一致。热源的施加主要通过 Abaqus 关联的 Fortran 子程序来实现, 将以上的热源参数编译到子程序中就完成了热源模型的建立。

2.3 边界条件

在堆焊过程中, 设定整个堆焊件的外表面为散热对象, 主要考虑对流和热辐射两个过程^[22], 将两者设为热边界条件。对流换热和热辐射的边界条件表达式分别见公式(2)和(3):

$$Q_H = -h(T - T_0) \quad (2)$$

$$Q_F = \varepsilon A(T^4 - T_0^4) \quad (3)$$

式中: Q_H 和 Q_F 分别为对流和辐射引起的热损失; T_0 为母材初始温度, 焊前预热可以改变该数值; h 为对流换热系数, 取 20 W/(m²·K); ε 为辐射换热系数, 取 0.85; A 为波尔兹曼常数, 取 5.67×10⁻⁸ J/(°C·m²·s)。

2.4 模型验证

图 3(a) 和 3(b) 分别为模拟和实际的堆焊层截面形貌。图 3(a) 中 I 区的温度大于 4Cr5Mo2V 钢的熔点 1400 °C, 为堆焊层的熔池区, 从图 3(b) 中可以看出在该工艺下能保证堆焊层的填充金属及其附近的母材在堆焊过程中完全熔化, 形成了良好的冶金结合。II 区为熔合区, 熔合区是堆焊层中焊缝区和热影响区的过渡区, 其特征是存在明显的熔合线边界。III、IV 和 V 区为热影响区。其中, III 区的温度均在 4Cr5Mo2V 钢的 A_{cm} (938 °C)^[23] 以上, 为热影响区中的完全淬火区; IV 区的温度在 4Cr5Mo2V 钢的 A_{c1} (835 °C) 和 A_{cm} (938 °C) 之间^[23], 为热影响区中的不完全淬火区; V 区的温度均在 4Cr5Mo2V 钢的 A_{c1}

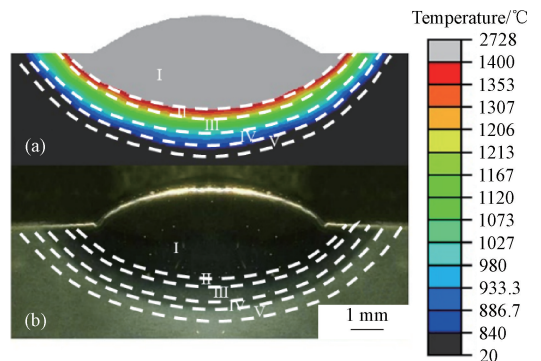


图 3 试样 No. 1 的堆焊层的截面形貌
(a) 数值模拟结果; (b) 实际实验结果

Fig. 3 Cross section morphology of surfacing layer of the sample No. 1 (a) numerical simulation results; (b) practical experimental results

(835 ℃)^[23]以下,为热影响区中的软化区;各区域形貌将在后续进一步分析。图3(b)中堆焊层的余高为1.1 mm,熔宽为6.8 mm,熔深为1.5 mm,将数值模拟和实际堆焊层形貌进行对比发现两者的熔池形貌和热影响区的轮廓基本一致,从而验证了堆焊模型的可靠性。

3 实验结果与分析

3.1 预热温度和焊接电流对堆焊层温度场的影响

图4是4Cr5Mo2V钢在堆焊过程中的温度场变化,为了便于观察熔池附近的三维温度场变化,沿着试板的焊道中心方向切开,选取其中的一半作为观察对象。图4(a)~4(c)为堆焊的开始阶段:当引弧完成后随着焊枪的移动和焊丝的填入,母材和焊丝部分熔化结合,初步形成了焊接熔池。可以看出该阶段的熔池体积较小,处于不稳定状态,随着堆

焊过程的进行熔池的体积逐渐增大并且其峰值温度逐渐升高。出现该现象的原因是在堆焊前期焊接热源只有部分作用于母材表面,另一部分作用于空气中,热源向母材方向移动后熔池获得了更多的能量,熔池的温度和作用范围也逐渐增大。图4(d)~4(f)为堆焊的中间阶段,从图中可以看出,在堆焊2.4 s时已经形成了稳定的焊接熔池,直到热源离开前熔池形态基本保持不变。堆焊7.5 s时,此时熔池位于堆焊试板的中心位置,该时刻热源完全作用于堆焊试板表面,且在该时刻前后熔池的峰值温度波动不大,因此在堆焊实验时选择试板中心位置取样更能充分反映熔池特性。堆焊15 s之后焊接热源已经离开工件表面,因此随后的图4(g)~4(i)为冷却阶段,在收弧位置的熔池逐渐向试板其他位置散热,到315 s左右整个试板的温度基本均匀,大致在100 ℃。

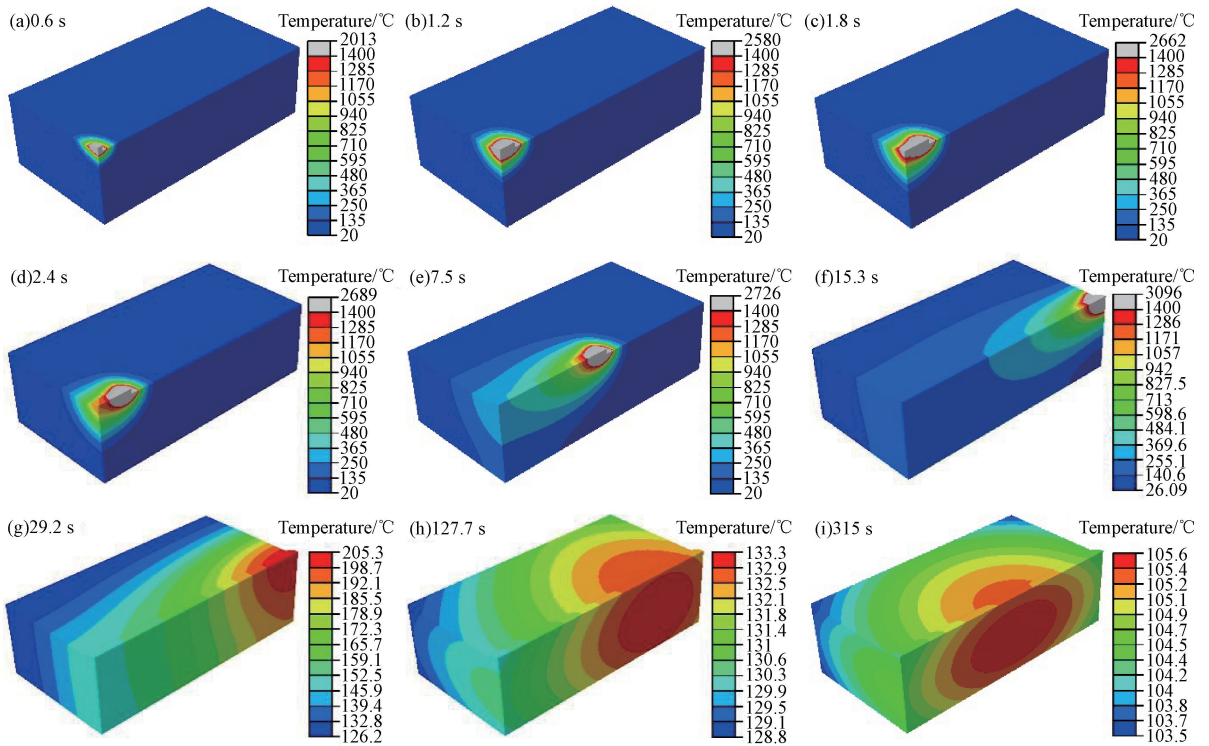


图4 试样 No. 1 在堆焊过程中不同时刻的温度场分布云图

(a) 0.6 s; (b) 1.2 s; (c) 1.8 s; (d) 2.4 s; (e) 7.5 s; (f) 15.3 s; (g) 29.2 s; (h) 127.7 s; (i) 315 s

Fig. 4 Cloud maps of temperature field distribution of the sample No. 1 at different time during surfacing

(a) 0.6 s; (b) 1.2 s; (c) 1.8 s; (d) 2.4 s; (e) 7.5 s; (f) 15.3 s; (g) 29.2 s; (h) 127.7 s; (i) 315 s

图5为不同工艺参数下堆焊8.28 s时堆焊层的瞬态温度场。从图5中可以看出在该时刻下各堆焊层的焊接熔池均达到稳定状态,图5(a)~5(c)是在不同焊接电流下堆焊8.28 s时堆焊层的瞬态温度

场,70、90和110 A焊后堆焊层熔池的峰值温度分别为2727、3229和3731 ℃,表明焊接电流的增加会导致堆焊过程中熔池的峰值温度逐渐增大,从图中还可以看出随着焊接电流的增大,堆焊层的热影响区也逐

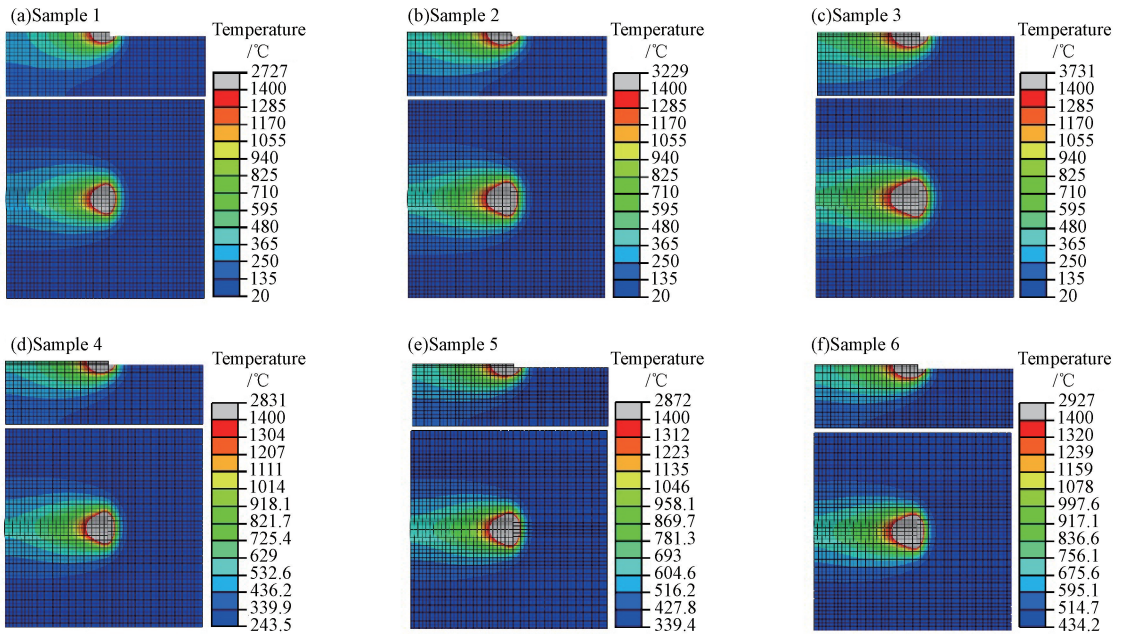


图 5 不同工艺参数下堆焊层的瞬态温度场

(a) 试样 No. 1; (b) 试样 No. 2; (c) 试样 No. 3; (d) 试样 No. 4; (e) 试样 No. 5; (f) 试样 No. 6

Fig. 5 Transient temperature field of surfacing layer under different process parameters

(a) sample No. 1; (b) sample No. 2; (c) sample No. 3; (d) sample No. 4; (e) sample No. 5; (f) sample No. 6

渐向母材侧扩展,导致热影响区宽度进一步增大。图 5(d)~5(f)为不同预热温度下堆焊 8.28 s 时堆焊层的温度场变化,250、350 和 450 °C 预热后堆焊的熔池峰值温度分别为 2831、2872 和 2927 °C,可以看出随着预热温度的升高熔池的峰值温度也逐渐增大,但是 450 °C 的预热温度下熔池的峰值温度也仅比未预热的熔池温度增大了 200 °C,说明预热对熔池的峰值温度的影响要略低于焊接电流的影响。通过 Abaqus 中的测量工具对熔池尺寸进行测量,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,当焊接电流从 70 A 增大到 110 A 时,熔池的熔宽从 7.0 mm 增大到 9.0 mm,熔深从 1.5 mm 增大到 2.6 mm,熔宽和熔深分别增大了 28.6% 和 73.3%。当预热温度从 250 °C 升高到 450 °C 时,熔池的熔宽从 8.0 mm 增大到 8.5 mm,熔深从 2.0 mm 增大到 2.5 mm,熔宽和熔深分别增大了 6.25% 和 25%,可以看出预热对熔池尺寸增长幅度的影响远低于焊接电流的影响。

3.2 预热温度和焊接电流对堆焊层组织性能的影响

图 7 为不同工艺参数下堆焊层焊缝的显微组织形貌,可以看出焊后焊缝处为细胞状的铸态组织。相同焊接电流条件下,预热温度对焊缝铸态组织的影响不显著,如图 7(a) 和 7(d)~7(f) 所示。未经过预热条件下,焊接电流对焊缝铸态组织有明显影响,电流

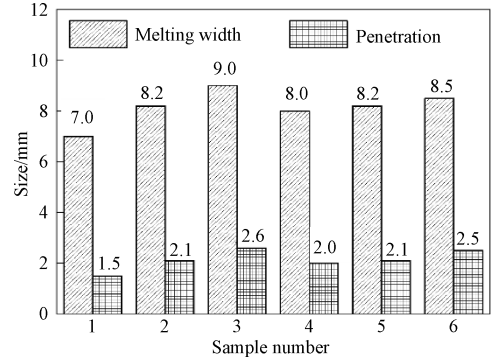


图 6 不同工艺参数下堆焊层的熔池尺寸

Fig. 6 Weld pool size of surfacing layer under different process parameters

越大,熔池温度越高,熔池和晶粒尺寸越大,导致胞状铸态组织越粗大。通过 Image-J 软件对焊缝的晶粒尺寸进行测量,结果如图 8 所示,结果表明未预热时用 70 A 的焊接电流堆焊后得到晶粒尺寸最细小的焊缝,其晶粒长度和晶粒宽度分别为 10.9 和 4.0 μm 。随着焊接电流的增大,焊缝的晶粒明显长大,90 和 110 A 焊后的晶粒已经长大到原来的两倍以上。随着预热温度的升高,晶粒也出现了粗化,但是从图 8 中可以看出,250~450 °C 预热后的晶粒尺寸均低于 90 A 焊接电流未预热焊后的晶粒尺寸。为了解释上述现象,结合之前数值模拟的结果绘制了不同工艺下

焊缝的热循环曲线,如图9所示。该热循环曲线揭示了焊缝的相变规律,在堆焊过程中,熔池区在2 s内从室温迅速升温至2000℃以上,随后10 s左右瞬间冷却到500℃以下,因此焊后会形成淬硬的马氏体组织,具有较高的硬度,但是由于冷却速度过快导致焊缝有较大的开裂倾向。从图9(a)可以看出,预热前随着焊接电流的增大焊缝的峰值温度和高温停留时间会明显上升,因此焊接电流的增大导致其晶粒粗化明显,严重恶化堆焊层性能。从图9(b)可以看出,在

堆焊8~9 s的高温段附近3条曲线基本重合,9 s后1500℃附近3条曲线的斜率开始发生变化,随着预热温度的升高曲线的斜率也逐渐减小,说明随着预热温度的升高焊缝在凝固过程中的冷却速度也逐渐降低,晶粒也会逐渐长大,但是由于预热温度的升高主要对1500℃以下的冷却速度影响较为明显,在凝固过程中不同预热温度的焊缝冷速差别不大,因此其晶粒的生长幅度会低于焊接电流增大后晶粒的生长幅度。

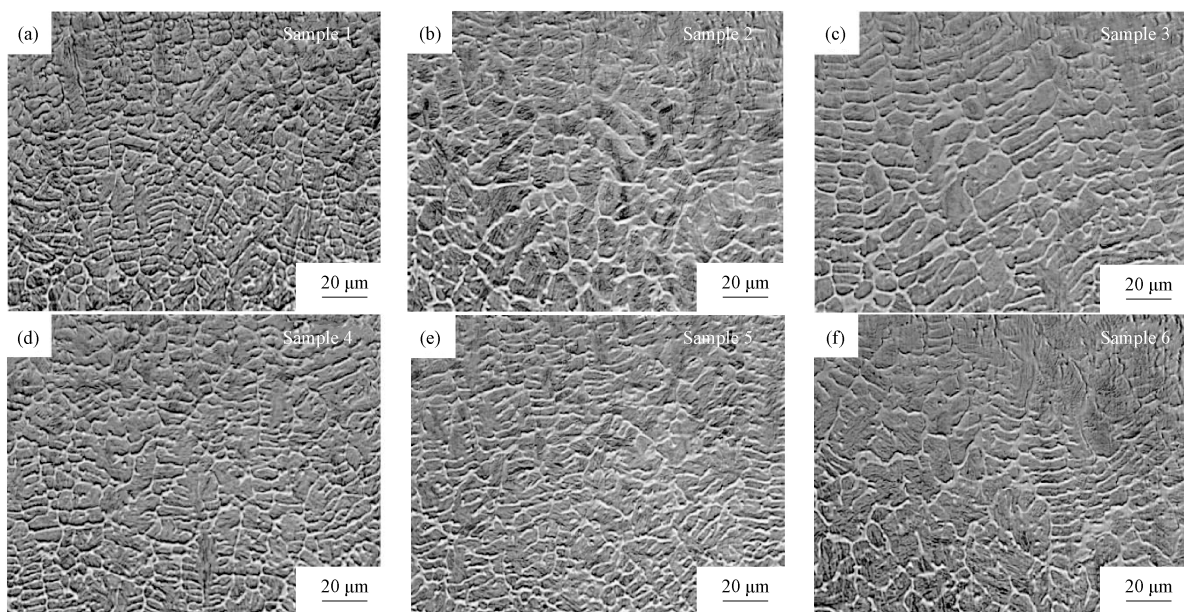


图7 不同工艺参数下焊缝的截面形貌

(a) 试样 No. 1; (b) 试样 No. 2; (c) 试样 No. 3; (d) 试样 No. 4; (e) 试样 No. 5; (f) 试样 No. 6

Fig. 7 Cross section morphology of weld under different process parameters

(a) sample No. 1; (b) sample No. 2; (c) sample No. 3; (d) sample No. 4; (e) sample No. 5; (f) sample No. 6

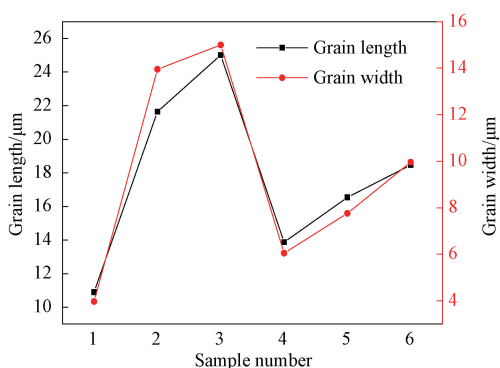


图8 不同工艺参数下焊缝的晶粒尺寸

Fig. 8 Grain size of weld under different process parameters

图10为堆焊层截面熔合区和热影响区的显微组织,结合图3分析,图10(a)为熔合区的显微组织形

貌,本文根据热影响区中不同区域的形貌特征将其划分为粗晶区、细晶区和软化区,分别对应于图10(b)、10(c)和10(d)。熔合线的左侧为热影响区的粗晶区,如图10(b)所示,粗晶区的特征是晶粒较为粗大,该区域的组织为隐针状马氏体和部分未溶碳化物。熔合线的右侧为堆焊层的焊缝区,其特征是粗大的柱状晶,熔池凝固时焊缝区的晶粒是依附于母材以联生结晶的方式生长。图10(c)是细晶区的形貌,相比于粗晶区其晶粒尺寸明显细小,因此强韧性会略高于粗晶区,堆焊过程中快速冷却形成的温度梯度会导致粗晶区和细晶区的析出相分布都不均匀^[24]。图10(d)为软化区的形貌,从图中可以看出该区域有明显的组织回复和碳化物析出现象,这也导致了该区域的硬度会下降。

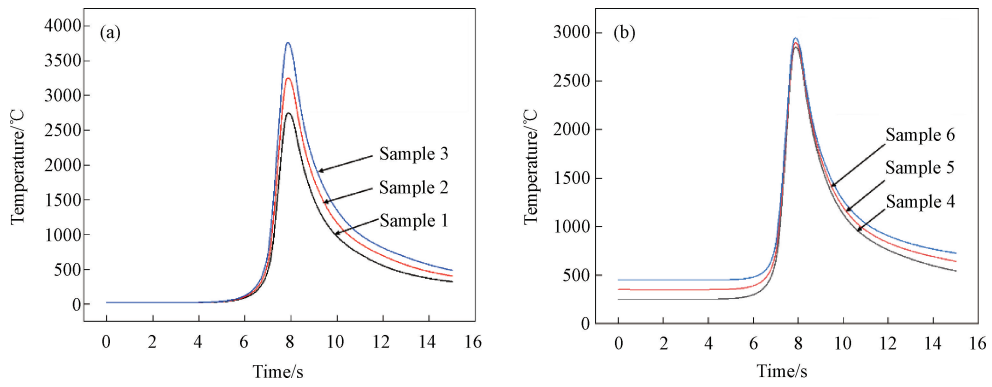


图 9 不同工艺参数下焊缝的热循环曲线 (a) 试样 No. 1~3; (b) 试样 No. 4~6

Fig. 9 Thermal cycle curves of weld under different process parameters (a) sample No. 1-3; (b) sample No. 4-6

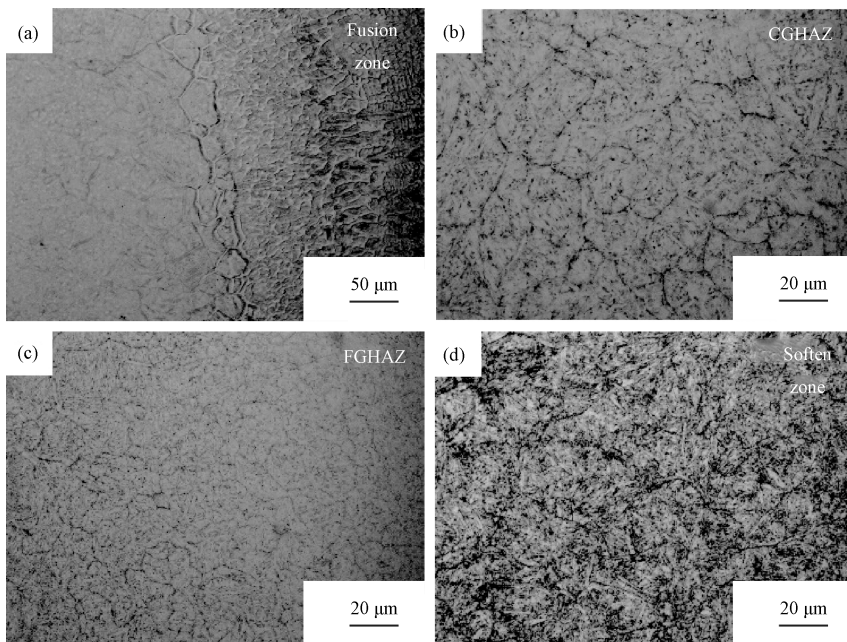


图 10 试样 No. 1 堆焊层热影响区的截面形貌 (a) 熔合区; (b) 粗晶热影响区; (c) 细晶热影响区; (d) 软化区

Fig. 10 Cross section morphology of heat affected zone in surfacing layer of the sample No. 1

(a) fusion zone; (b) coarse grain heat affected zone; (c) fine grain heat affected zone; (d) soften zone

为了进一步探究堆焊层热影响区的组织演变机理,选取图 11(a)所示的试样 No. 1 堆焊层界面温度云图,并绘制了图 11(b)所示的堆焊层截面不同位置的热循环曲线:图 11(a)中 A 为基准点,位于焊缝的中心位置并平行于母材表面,点 1、2 和 3 分别距离 A 点 1、2 和 3 mm 的位置。热循环曲线的结果表明:点 1 在堆焊时的峰值温度为 1779.64 °C,该温度远大于 4Cr5Mo2V 钢的熔点,在堆焊过程中该区域会快速升温形成焊接熔池,随后迅速冷却,在 4 s 内完成了凝固和相变的过程,从而形成了图 10(a)中熔合线右侧焊缝区的枝晶状形貌。点 2 在堆焊时的峰值温度为 1164.8 °C,该温度位于堆焊层母材的 A_{cm} 和熔点之

间,相当于淬火的过程,但是由于升温 and 冷却速度较快会导致碳化物的扩散不均匀,形成了图 10(b)的粗晶区形貌。点 3 在堆焊时的峰值温度为 793.27 °C,该温度低于堆焊层母材的 A_{c1} ,4Cr5Mo2V 钢母材经过该热循环相当于高温回火,会导致该区域的硬度大幅度下降,并低于母材,形成了图 10(d)的软化区形貌。

硬度是反映堆焊层不同区域力学性能的一个重要指标,结合之前的分析得知不同区域会经历不同的焊接热循环过程,堆焊过程中的峰值温度能够揭示堆焊层不同区域硬度变化的原因,基于此绘制了不同工艺参数下堆焊层截面的硬度梯度和峰值温度变化,如图 12 所示,图中堆焊层硬度梯度和峰值温度的测定

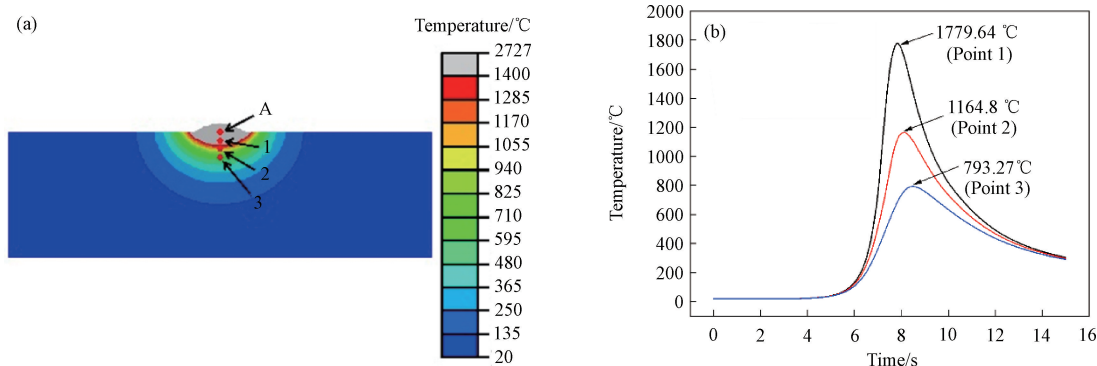


图 11 试样 No. 1 堆焊层截面不同位置的截面温度云图(a)和热循环曲线(b)

Fig. 11 Cloud map of temperature field distribution (a) and thermal cycle curves (b) of different positions on surfacing layer section of the sample No. 1

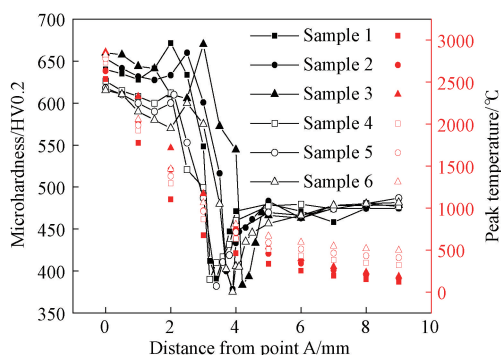


图 12 不同工艺参数下堆焊层的硬度梯度和峰值温度

Fig. 12 Hardness gradient and peak temperature of surfacing layer under different process parameters

位置仍以图 11 中的 A 点为基准点。结果表明,随着与 A 点距离的增加,4Cr5Mo2V 钢堆焊层截面的硬度先逐渐减小后逐渐增大到峰值,之后快速降低并出现一个硬度的最低值,随后硬度逐渐上升并趋于平缓。结合峰值温度进行分析,堆焊层曲线中第一段硬度下降区峰值温度均在熔点 1400 °C 以上,硬度值在 600 HV0.2 以上,该区域为堆焊层中的焊缝区,由于大部分为马氏体组织硬度较高;硬度曲线中硬度最高值的峰值温度在 1000~1200 °C,硬度值在 650 HV0.2 以上,该区域为热影响区中的粗晶区,其峰值温度大于 A_{c3} ,相当于淬火。随着淬火温度升高,碳化物溶入量逐渐增大,晶粒也逐渐长大,两者相互作用导致淬火后的材料硬度先上升后下降^[25],因此粗晶区出现随着峰值温度升高硬度先升高后降低的现象。第二段硬度下降区的峰值温度在 800~1000 °C,其硬度值在 370~650 HV0.2 之间,硬度下降区主要包含部分粗晶区和细晶区,细晶区的峰值温度位于 $A_{c1} \sim A_{cm}$ 之间,该区域相当于经历了不完全的奥氏体化,随着

峰值温度的升高细晶区奥氏体化程度越高,冷却后形成的马氏体含量越多,硬度也越高。第三段硬度回升区的峰值温度 600~800 °C,其硬度在 370~470 HV0.2 之间,该区域为软化区,其峰值温度低于 A_{c1} 未发生相变,该区域由于受到高温回火的作用导致母材过回火硬度急剧下降,随着峰值温度的升高,母材受到的过回火也越明显,硬度下降也越大。

随着焊接电流的增大,焊接熔池的体积会增大,热影响区会向母材扩展,硬度曲线整体有向右移动的趋势,同时从不同区域峰值温度的变化可以看出随着焊接电流的增大,从熔池到母材的峰值温度也增大,这就相当于将热源从熔池中心向母材处推进,因此导致曲线以类似的规律右移。相比于未预热的堆焊层,预热后熔合区附近的硬度值有所降低,从曲线上表现为前半部分的硬度上升区斜率变小,从焊缝到热影响区的过渡更加平缓,一定程度上降低了熔合区附近的脆性。随着预热温度的升高,堆焊层不同区域的峰值温度有较小的上升,因此硬度曲线也向右有小幅度的移动。结合之前热循环曲线的分析,随着预热温度的升高会导致堆焊层不同区域的冷速变慢,在硬度曲线上表现为堆焊层的平均硬度会有所降低,250、350 和 450 °C 预热后堆焊层平均硬度分别降低了 3.5%、4.0% 和 4.9%,因此 450 °C 预热后堆焊层有最小的淬硬倾向。同时从图 12 中试样 No. 6 的硬度曲线可以看出,450 °C 预热后母材的硬度仍维持在使用态水平,说明 450 °C 预热后能保证母材的性能不发生恶化。

4 结论

1) 采用 70 A 的焊接电流对 4Cr5Mo2V 钢进行堆

焊(母材未预热处理),得到了成形性较好的堆焊熔池,熔宽和熔深分别为 7 和 1.5 mm,晶粒长度和宽度分别为 10.9 和 4.0 μm ,继续增大焊接电流后熔池的峰值温度逐渐上升,熔池尺寸、晶粒尺寸和热影响区宽度进一步增大,堆焊层的性能逐渐恶化;

2) 预热温度的升高降低了 4Cr5Mo2V 钢堆焊层在堆焊过程中的冷却速度,堆焊层平均硬度逐渐降低,450 $^{\circ}\text{C}$ 预热后堆焊层平均硬度降低了 4.9%,母材仍保持原有的硬度水平,得到了强韧性匹配较好的堆焊层。

参 考 文 献

- [1] Hu T, Wu R M, Li F J, et al. Effect of Mo-related precipitation behavior on the strengthening and thermal stability of 4Cr5Mo2V die steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(12): 10213–10224.
- [2] 夏书文, 左鹏鹏, 吴晓春. 国内外压铸模具钢发展概述[J]. *模具制造*, 2017, 17(7): 93–99.
XIA Shu-wen, ZUO Peng-peng, WU Xiao-chun. Overview of die casting die steel development at home and abroad[J]. *Mold Manufacturing*, 2017, 17(7): 93–99.
- [3] Markezic R, Naglic I, Mole N, et al. Experimental and numerical analysis of failures on a die insert for high pressure die casting[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 95: 171–180.
- [4] 胡随芯, 秦训鹏, 胡泽启, 等. 热作模具堆焊修复再制造技术发展现状与趋势[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(5): 10–16.
HU Sui-xin, QIN Xun-peng, HU Ze-qi, et al. Development status and trend of surfacing repair and remanufacturing technology for hot working die[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(5): 10–16.
- [5] Jhavar S, Paul C P, Jain N K. Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 34: 519–535.
- [6] Raj M P, Pramanick A K, Biswas P, et al. Optimization and high-temperature wear characterization of Stellite alloy claddings developed using TIG welding on 56NiCrMoV7 die steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2024, 487: 131015.
- [7] 张建生, 卢顺, 董旭刚, 等. 模具堆焊工艺中焊缝形状预测及工艺参数优化研究进展[J]. *锻压装备与制造技术*, 2020, 55(3): 126–129.
ZHANG Jian-sheng, LU Shun, DONG Xu-gang, et al. Research progress of weld shape prediction and process parameter optimization in die surfacing process[J]. *Forging Equipment and Manufacturing Technology*, 2020, 55(3): 126–129.
- [8] 董志波, 郭军礼, 杨来山, 等. 焊接过程宏微观数值模拟与仿真的研究现状[J]. *精密成形工程*, 2018, 10(1): 40–51.
DONG Zhi-bo, GUO Jun-li, YANG Lai-shan, et al. Research status of macro and micro numerical simulation of welding process[J]. *Precision Forming Engineering*, 2018, 10(1): 40–51.
- [9] 何子涛, 黄本生, 黄思语, 等. 焊接温度对 AZ91/TC4 扩散焊接接头组织和性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2023, 44(6): 191–198.
HE Zi-tao, HUANG Ben-sheng, HUANG Si-yu, et al. Effect of welding temperature on microstructure and properties of AZ91/TC4 diffusion welded joints[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2023, 44(6): 191–198.
- [10] 王金凤, 苏文超, 蔡笑宇, 等. QP980 淬火-配分钢 MAG 焊接接头组织及力学性能[J]. *钢铁*, 2023, 58(12): 119–127.
WANG Jin-feng, SU Wen-chao, CAI Xiao-yu, et al. Microstructure and mechanical properties of QP980 MAG welded joints[J]. *Iron and Steel*, 2023, 58(12): 119–127.
- [11] 汪小锋, 刘宏, 唐小波. 焊接方法对 Q235 钢焊接接头缺陷、组织和力学性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2021, 42(7): 150–159.
WANG Xiao-feng, LIU Hong, TANG Xiao-bo, et al. Effect of welding method on defect, microstructure and mechanical properties of welded joints of Q235 steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2021, 42(7): 150–159.
- [12] 王正天, 江淑园, 陈益平, 等. 基于 ABAQUS 的镁/钢异种金属激光焊接的数值模拟[J]. *材料热处理学报*, 2021, 42(7): 134–141.
WANG Zheng-tian, JIANG Shu-yuan, CHEN Yi-ping, et al. Numerical simulation of laser welding of magnesium and steel dissimilar metal based on ABAQUS[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2021, 42(7): 134–141.
- [13] Cadiou S, Courtois M, Carin M, et al. Heat transfer, fluid flow and electromagnetic model of droplets generation and melt pool behaviour for wire arc additive manufacturing[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 148: 119102.
- [14] Pang S, Cao B, Wang Y. Numerical analysis of low-current arc characteristics in micro-TIG welding[J]. *Journal of Manufacturing*

- Processes, 2023, 105: 246–259.
- [15] 吴少君, 郭鹏, 李玲, 等. 焊前和焊后淬回火对 SDDVA 钢堆焊层回火稳定性和抗热熔损性能的影响[J]. 机械工程材料, 2022, 46(8): 109–116.
WU Shao-jun, GUO Peng, LI Ling, et al. Effect of pre-and post-weld quenching and tempering on tempering stability and hot melting loss resistance of surfacing layer of SDDVA steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022, 46(8): 109–116.
- [16] Aalami-aleagha M E, Foroutan M, Feli S, et al. Analysis preheat effect on thermal cycle and residual stress in a welded connection by FE simulation[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2014, 114: 69–75.
- [17] 张鹏, 崔明亮, 傅强, 等. 预热温度对微弧等离子弧单道焊残余应力和性能的影响[J]. 焊接技术, 2020, 49(8): 4–10.
ZHANG Peng, CUI Ming-liang, FU Qiang, et al. Effect of preheating temperature on residual stress and properties of micro arc plasma arc single pass welding[J]. Welding Technology, 2020, 49(8): 4–10.
- [18] Chennaiah M B, Kumar P N, Rao K P. Experimental investigation of microstructure and mechanical properties of IS2602-EN316L MIG welded joint[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27: 2896–2900.
- [19] 赵鹏康, 唐成, 杨明顺, 等. TIG 增材成形 5356 铝合金温度场数值模拟分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(2): 71–77.
ZHAO Peng-kang, TANG Cheng, YANG Ming-shun, et al. Numerical simulation analysis of temperature field of 5356 aluminum alloy by TIG additive forming[J]. Ordnance Materials Science and Engineering, 2021, 44(2): 71–77.
- [20] 李春风, 肖笑, 尹玉祥, 等. TIG 电弧增材熔池行为的数值模拟研究现状[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(7): 25–32.
LI Chun-feng, XIAO Xiao, YIN Yu-xiang, et al. Research status of numerical simulation of TIG arc additive molten pool behavior [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(7): 25–32.
- [21] 朱志明, 符平坡, 杨中宇, 等. 电弧焊接数值模拟中热源模型的研究与发展[J]. 工程科学学报, 2018, 40(4): 389–396.
ZHU Zhi-ming, FU Ping-po, YANG Zhong-yu, et al. Research and development of heat source model in numerical simulation of arc welding[J]. Journal of Engineering Sciences, 2018, 40(4): 389–396.
- [22] Zhao Y, Jia Y, Chen S, et al. Process planning strategy for wire-arc additive manufacturing: Thermal behavior considerations[J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 100935.
- [23] 姚杰, 吴红庆, 王春涛, 等. 4Cr5Mo2V 热作模具钢 TTT 曲线测定及球化退火工艺探索[J]. 模具工业, 2019, 45(7): 51–55.
YAO Jie, WU Hong-qing, WANG Chun-tao, et al. TTT curve measurement and spheroidizing annealing process exploration of 4Cr5Mo2V hot working die steel[J]. Die Industry, 2019, 45(7): 51–55.
- [24] Shi Y, Wu S, Liao H, et al. Microstructure and mechanical properties of CLF-1/316 L steel dissimilar joints welded with fiber laser welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 54: 318–327.
- [25] 吴远辉, 左鹏鹏, 白植雄, 等. 淬回火工艺对压铸模具钢 4Cr5Mo2V 强韧性及组织影响[J]. 模具制造, 2017, 17(6): 93–97.
WU Yuan-hui, ZUO Peng-peng, BAI Zhi-xiong, et al. The effect of quenching and tempering process on the strength, toughness and microstructure of 4Cr5Mo2V die casting steel[J]. Die Manufacturing, 2017, 17(6): 93–97.