

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.01.006

转向架用 P355NL1 钢 MAG 多层焊微观组织及 温度场分析

尤君¹, 罗涛¹, 刘睿祖², 王建峰²

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 南京 210031; 2. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211106)

摘要: 为进一步提升地铁转向架 P355NL1 钢材的熔化极活性气体保护 (Metal active gas, MAG) 多层焊接质量, 开展了 P355NL1 钢地铁转向架对接接头 MAG 多层焊接试验, 分析了对接结构的宏观及微观形貌, 重点研究了每一层的焊缝及热影响区的组织, 建立了对接接头 MAG 多层焊接模型并进行校核, 探明了 MAG 多层焊温度场的分布规律。结果表明, 在 MAG 多层焊接试验中, 后道焊缝的热输入通过两次相变重结晶作用, 破坏了前道焊缝中的柱状晶结构, 此过程使得前道焊缝晶粒细化, 形成了细小的铁素体晶粒和少量珠光体。双椭球热源模型可以有效模拟 P355NL1 钢 MAG 多层焊焊接过程, 后道焊缝焊接时最高温度显著升高, 因此在多层焊的焊接过程中, 控制填充层的焊接温度对于细化晶粒组织至关重要。

关键词: MAG 多层焊; 地铁转向架; 微观组织; 温度场

中图分类号: TG442 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2025)01-0066-07

Microstructure and Temperature Field Analysis of MAG Multi-layer Welding of P355NL1 Steel for Metro Bogies

YOU Jun¹, LUO Tao¹, LIU Ruizu², WANG Jianfeng²

(1. CSR Nanjing Puzhen Vehicle Co., Ltd., Nanjing 210031, China; 2. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: To further enhance the metal active gas (MAG) multi-layer welding quality of P355NL1 steel used in metro bogies, this paper conducts the MAG multi-layer welding tests of the butt joint of P355NL1 steel metro bogies, analyses the macro and micro morphologies of the butt joint structure, focuses on the study of the weld and the organisation of the heat-affected zone of each layer, establishes a MAG multi-layer welding model of the butt joint and performs calibration, and studies the distribution law of the temperature field of the MAG multi-layer welding. The results indicate that in the MAG multi-layer welding experiment, the heat input from the subsequent weld passes two phase transformations and recrystallization, which disrupts the columnar grain structure in the previous weld pass. This process leads to the refinement of the grain structure, forming fine ferrite grains and a small amount of pearlite. The double ellipsoid heat source model effectively simulates the welding process of P355NL1 steel in MAG multi-layer welding. The maximum temperature significantly increases during the welding of the upper layers. Therefore, controlling the welding temperature of the filler layers is crucial for grain refinement in multi-layer welding processes.

Key words: metal active gas (MAG) multi-layer welding; metro bogies; microscopic organization; temperature field

收稿日期: 2024-11-24; 修订日期: 2025-01-15

通信作者: 王建峰, 男, 副教授, 硕士生导师, E-mail: wangjianfeng@nuaa.edu.cn。

引用格式: 尤君, 罗涛, 刘睿祖, 等. 转向架用 P355NL1 钢 MAG 多层焊微观组织及温度场分析[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(1): 66-72. YOU Jun, LUO Tao, LIU Ruizu, et al. Microstructure and temperature field analysis of MAG multi-layer welding of P355NL1 steel for metro bogies[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(1): 66-72.

近年来,轨道交通车辆转向架的焊接工艺逐渐成为研究的重点,特别是在高性能钢材的应用及其焊接方法上取得了显著进展。地铁转向架是轨道交通车辆中至关重要的部件之一,其结构复杂,由多种零部件高度集成,且对承载、抗冲击等性能要求较高,因此结构一体化成形工艺难度极高^[1-3]。作为该结构的主要材料,P355NL1 钢是符合欧盟标准的低温质量级钢材,具备优异的塑性、韧性和焊接性,含有硅、锰、镍等元素,显微组织为条状铁素体和珠光体,晶粒细小且均匀分布,有较好的塑性、韧性和焊接性,广泛应用于化工、轨道交通等领域^[4-6]。目前,国内针对熔化极活性气体保护(Metal active gas, MAG)焊中的应用开展了多方面的研究,包括焊接参数优化、焊缝性能提升和焊接过程模拟等方面,特别是对多层 MAG 焊接工艺的温度场和应力场模拟进行了深入分析^[7-8]。MAG 采用富活性气体作为保护气体,在电弧稳定性和焊缝成形质量上具有显著优势,能够有效克服在单一 Ar 气焊接时电弧阴极漂移带来的电弧不稳和焊缝成形不良问题^[9],同时具有焊接效率高、焊接质量好、电弧稳定性高、飞溅小、熔透性强等优点,易于实现高效自动化焊接^[10-11]。因此,MAG 焊接工艺非常适用于 P355NL1 钢材料在地铁转向架中的应用场景,在提高焊接质量和生产效率方面表现出显著的技术优势。

目前国内外尚未开展地铁转向架用 P355NL1 钢多层焊焊接过程温度场分布以及微观组织相关研究,本文针对轨道车辆转向架的典型中厚板对接结构,开展了多层 MAG 焊接实验研究。考虑到多层焊接在改善焊缝性能方面的特殊作用^[12-13],构建了 MAG 多层焊接的数值模拟模型,对不同焊接层数下的显微组织演变进行了详细分析,并通过实验测量与模拟计算相结合,系统研究了焊接过程中的温度场分布规律。本文研究为进一步提升地铁转向架 P355NL1 钢材的 MAG 多层焊接质量提供了重要的理论基础,有助于推动该材料在轨道交通领域的应用,为实际工程提供技术支持和参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

母材为 100 mm×100 mm×14 mm 的 P355NL1 钢,其常温下抗拉强度为 490~630 MPa,材料的化学成分如表 1 所示。焊前先用砂纸打磨去除氧化物,然后使用丙酮清除表面油污。

表 1 P355NL1 钢焊接母材成分表(质量分数)

Table 1 Chemical composition of P355NL1 steel base material for welding (mass fraction) %

元素	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cu	Fe
含量	≤0.18	≤1.30	≤0.50	≤0.01	≤0.001	≤0.35	≤0.01	余量

1.2 试验方法

试验采用 MAG 多层焊,保护气为 80%Ar+20%CO₂,接头形式为对接,坡口角度为 60°,坡口间隙为 1.0 mm,焊道层次为 4 层,对接接头 MAG 多层焊接试验参数表如表 2 所示,MAG 多层焊接示意图如图 1 所示。焊接完成后切割焊接件制备金相试样,经打磨抛光后使用 5% 的硝酸酒精试剂进行腐蚀,使用金相显微镜及扫描电子显微镜对显微组织进行拍照分析。

表 2 对接接头 MAG 多层焊接试验参数表

Table 2 Butt joint MAG multi-layer welding test parameters

焊层	焊接功率/ kW	焊接电流/ A	焊接速度/ (m·min ⁻¹)
第一层(WB1)	3.230	170	2.5
第二层(WB2)	7.500	250	4.25
第三层(WB3)	8.400	280	2.8
第四层(WB4)	8.400	280	2.8

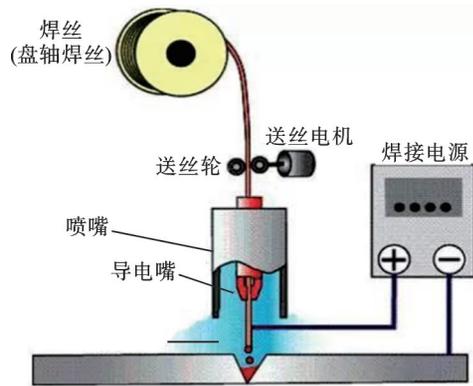


图 1 对接接头 MAG 多层焊接试验示意图

Fig.1 Schematic of butt joint MAG multi-layer welding test

2 P355NL1 钢对接接头仿真的数值模型

基于地铁转向架用 P355NL1 钢对接接头材料特性以及 P355NL1 钢 MAG 多层焊对接接头宏观形貌,采用有限元仿真技术,建立地铁转向架典型对接接头 MAG 多层焊接模型,探究其焊接温度场分布规律,对地铁转向架 MAG 多层焊有指导意义。

2.1 模型建立

根据实际对接接头焊接件的尺寸,建立规格尺寸为 100 mm×100 mm×14 mm 的三维模型,坡口角度为 60°,采用 3:1 的过渡方式,焊缝区域网格尺

寸为 $1.00\text{ mm} \times 1.00\text{ mm} \times 1.11\text{ mm}$, 网格模型的单元总数为 41 750, 节点总数为 44 729, 如图 2 所示。

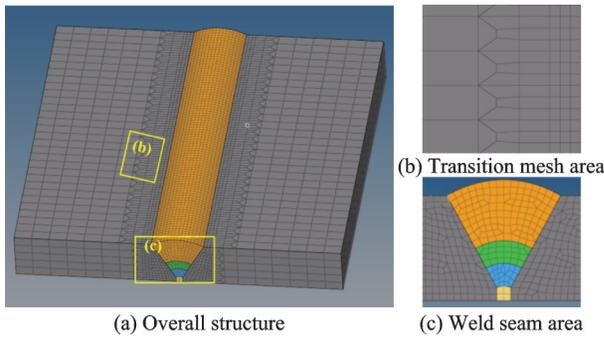


图 2 对接结构几何模型的网格划分

Fig.2 Mesh division of the butt joint geometric model

2.2 P355NL1 钢材料热物理性能参数

将划分好的 3D 网格导入有限元仿真软件 Marc 后需定义材料属性。由于材料热物理性能参数随温度非线性变化, 并且焊缝区域的温度较高, 因此需要输入材料热物理性能参数从低温到高温线性趋势以模拟真实焊接过程中材料的变化。由于只对焊件进行热分析, 所以仅输入 P355NL1 钢的比热容及导热系数, 其参数随着温度的变化如图 3 所示。

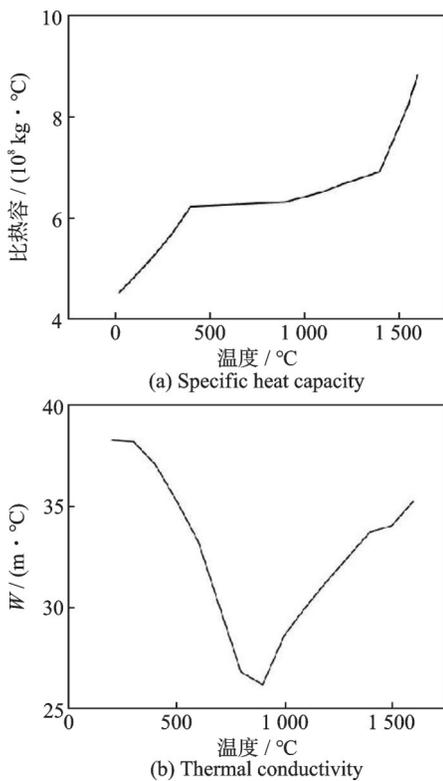


图 3 P355NL1 钢物理性能参数

Fig.3 Physical property parameters of P355NL1 steel

2.3 热源建立

针对 MAG 多层焊接, 本文采用的热源模型是双椭球热源, 由于焊接热源的瞬时性和移动性, 其热源形状是不规则的椭球状。双椭球热源的前半

部能量更集中, 温度梯度更大, 温度分布区间更小^[14-15]。因此, 利用两个半轴不同的 1/4 椭球模型来模拟焊接熔池的形态特征, 熔池内部的热流分布如图 4 所示。

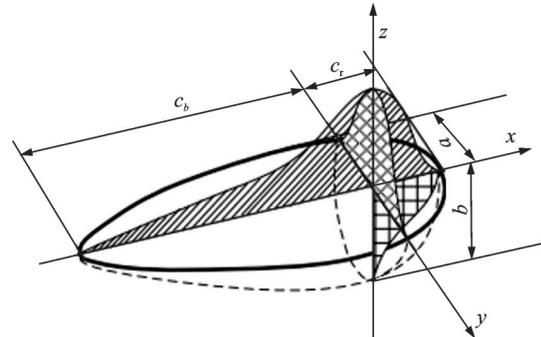


图 4 双椭球热源模型示意图

Fig.4 Schematic of the double ellipsoid heat source model

前半部分椭球能量分布函数为

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_f q_0}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} e^{-3x^2/c_r^2} e^{-3y^2/a^2} e^{-3z^2/b^2} \quad (1)$$

后半部分椭球能量分布函数为

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_r q_0}{abc_b \pi \sqrt{\pi}} e^{-3x^2/c_b^2} e^{-3y^2/a^2} e^{-3z^2/b^2} \quad (2)$$

式中: f_f, f_r 分别为熔池前半椭球和后半椭球的分配系数, 参数 a, b, c_b 和 c_r 为形状参数, 通过实验校核来获取。其中每层热源校核双椭球热源模型参数数据如表 3 所示。

表 3 双椭球热源模型热源校核参数

Table 3 Heat source calibration parameters for the double ellipsoid heat source model

层数	功率/ kW	效能	焊接速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	a	b	c_r	c_b
1	3.23	0.9	3	3	4	3	5
2	8.40	0.5	5	3	4	5	7
3	8.40	0.5	3.3	5	5	5	7
4	8.40	0.6	3.3	7	7	5	10

2.4 初始条件及边界条件建立

本文设定初始条件为室温 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 以热对流为主, 在有限元软件中将热交换定义为单元面对流, 加载在与空气接触的钢的表面上。模拟 MAG 多层焊接, 在每条焊缝各加载一个热源模型, 选择各自的焊接路径。在有限元软件中加载焊接体热流, 软件自带的热源可以满足要求, 能直接实现热源模型的加载。

3 试验结果与分析

3.1 MAG 多层焊焊缝组织形貌

对接接头的宏观形貌如图 5 所示, 4 道焊缝基

本熔透,熔深熔宽较大,4道焊缝边界都较清晰,没有出现明显的裂纹、气孔、未熔合等缺陷,焊缝质量良好。

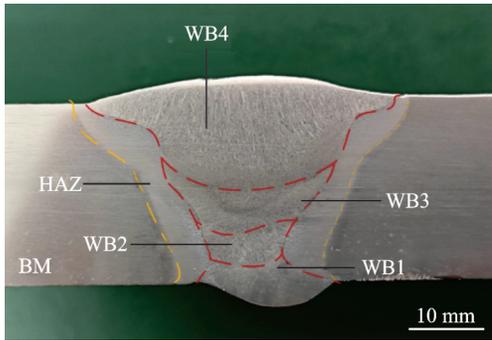


图 5 对接接头宏观形貌

Fig.5 Macrograph of the butt joint

对接接头 MAG 多层焊接焊缝区及热影响区的微观形貌如图 6 所示。图 6(a~d)分别为第一层焊缝、第二层焊缝、第三层焊缝、第四层焊缝的微观组织图。由图可知,P355NL1 钢初始焊接的微观组织是柱状晶,随着第二层、第三层等焊接的对前层组织的热影响,造成组织的重熔、再结晶以及回火效应,破坏了前一层焊缝中的柱状晶,产生了均匀细小的铁素体与少量的珠光体。因此,第一层以

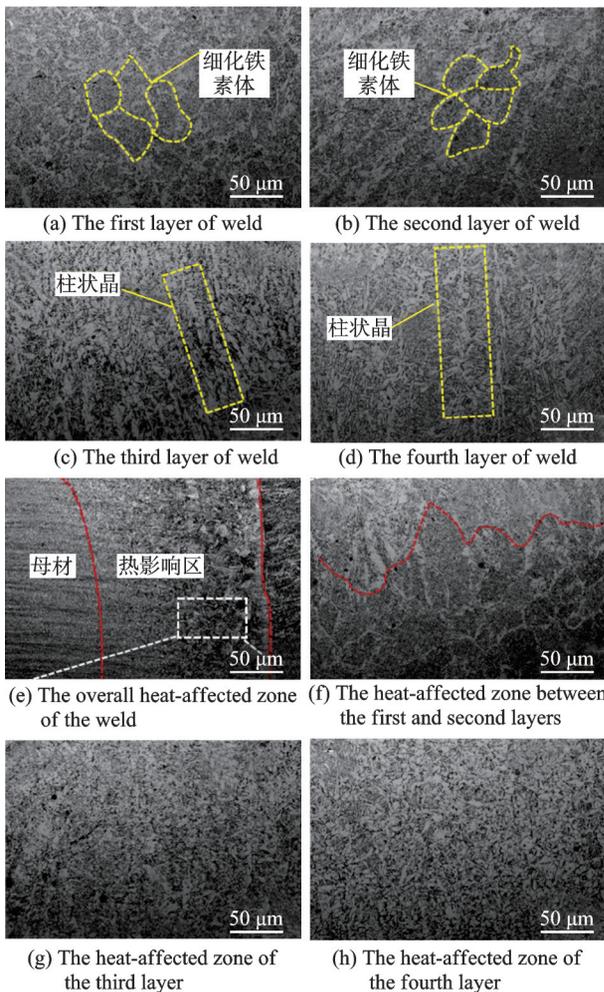


图 6 对接接头组织形貌

Fig.6 Microstructure of the welded joint

及第二层受到多次热影响,组织多为细化铁素体;第三层和第四层受到热影响较少,组织多为柱状晶,在第四层中最为显著。图 6(e~h)分别为焊缝整体热影响区,第一、二层间热影响区,第三层热影响区,以及第四层热影响区的微观组织图。热影响区的组织特征随焊接热循环的不同而呈现出明显的分层现象,如图 6(f)所示,在多层焊接过程中,第一层与第二层的层间热影响区因焊接热循环温度超过奥氏体化临界温度,导致第一层焊缝表面金属经历了完全的相变重结晶。在冷却过程中,第一层焊缝进一步经历了一次新的相变重结晶过程,因此其晶粒得以显著细化。第三层、第四层的热影响区组织如图 6(g)和图 6(h)所示,由于第三层组织经历的热影响次数较小,但与第四层组织相比晶粒细化特征仍然明显。同时,后层热输入消除了微裂纹或孔洞缺陷。

3.2 对接接头 SEM 形貌及组织分析

图 7 为对接接头不同层焊缝区的 SEM 形貌图,图中 F 为铁素体,δ'指先共析铁素体。由图 7(d)所示,第四层焊缝组织主要是由粗大的板条状和块状的先共析铁素体以及少量的珠光体组成,多数条状和少量块状的先共析铁素体于柱状晶界上分布,沿奥氏体晶界析出先共析铁素体,针状和条状铁素体向晶内生长。由图 7(a~c)所示,前一道焊缝由于受后一道焊缝焊接时的附加热处理作用,产生了两次相变重结晶,一部分侧板条铁素体向晶内生长,形成较为细小的块状铁素体、针状铁素体及珠光体的晶粒组织,最下层焊缝由于受到多次热处理影响,细化效果更为显著。

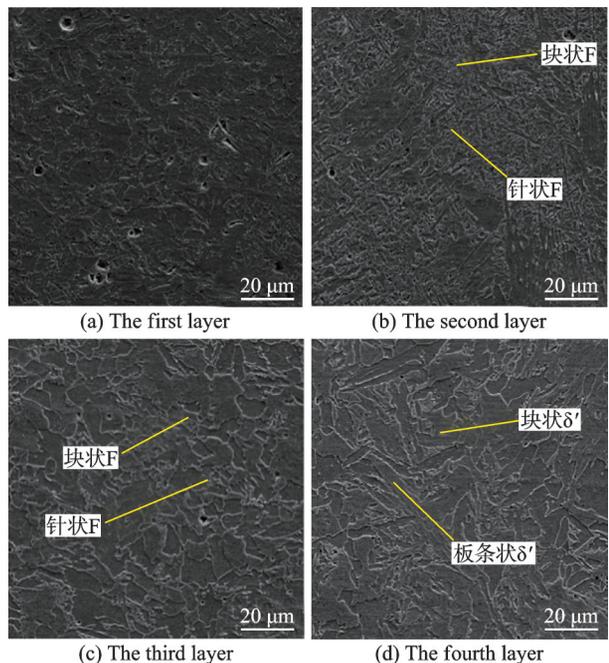


图 7 对接接头焊缝区 SEM 图

Fig.7 SEM images of the weld zone in the welded joint

3.3 焊接温度场分布及热循环分析

为了确保模拟结构的准确性,将模拟得到的温度场与实验结果的焊缝形貌进行对比,校核热源模型。对接结构温度场与实际试样的对比图如图 8 所示。由图 8 可知,仿真模拟结果相对准确,参数及热源模型的选择都较为合理,其中第四道

焊缝计算的熔池轮廓和实验轮廓有较大的差异,主要原因是在实际实验中,焊接材料的成分、微观结构可能具有一定的非均匀性,若材料中存在合金元素的分布不均或晶粒粗化现象,可能会导致热输入分布与计算预期存在差异,进而造成熔池轮廓偏差。

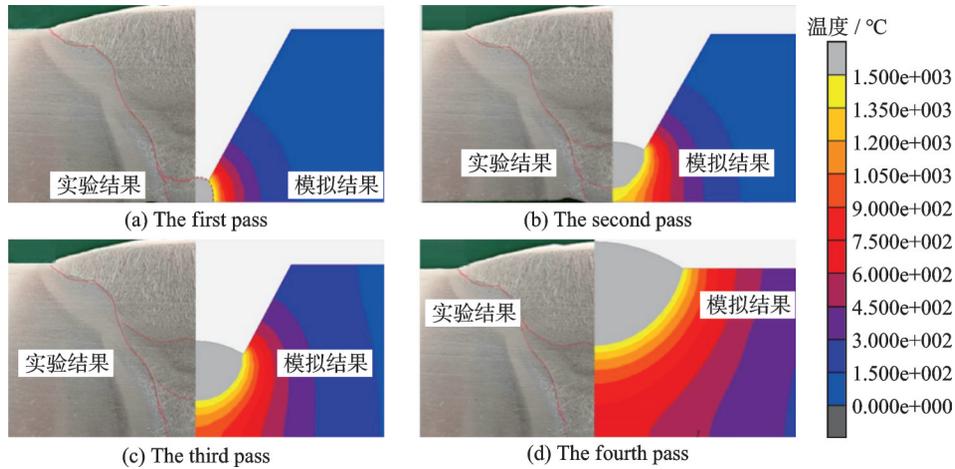


图 8 焊缝与模拟熔池对比图

Fig.8 Comparison of weld and simulated melt pool

焊缝中部的温度场云图如图 9 所示,在靠近热源中心的区域,等温线较为密集,温度梯度较大;远离热源中心的区域,等温线较为稀疏,温度梯度较小,4道焊缝的温度分布范围逐渐增大,即第四层焊缝对母材以及前道焊缝的热影响范围最大。焊接区域的最高温度由第一层到第四层分别呈现先增后减的趋势,产生这一现象的主要原因是在多层

焊接过程中,每一层的焊接热输入会部分传导至基材,但由于焊缝金属和基材的热导性能有限,热量无法完全扩散到环境中。后续焊接层在未完全冷却的基础上进行,焊缝及周围区域的初始温度逐层升高。第三层与第四层焊接时的最高温度显著高于前两层,说明填充层焊接过程中热输入的累积效应明显。

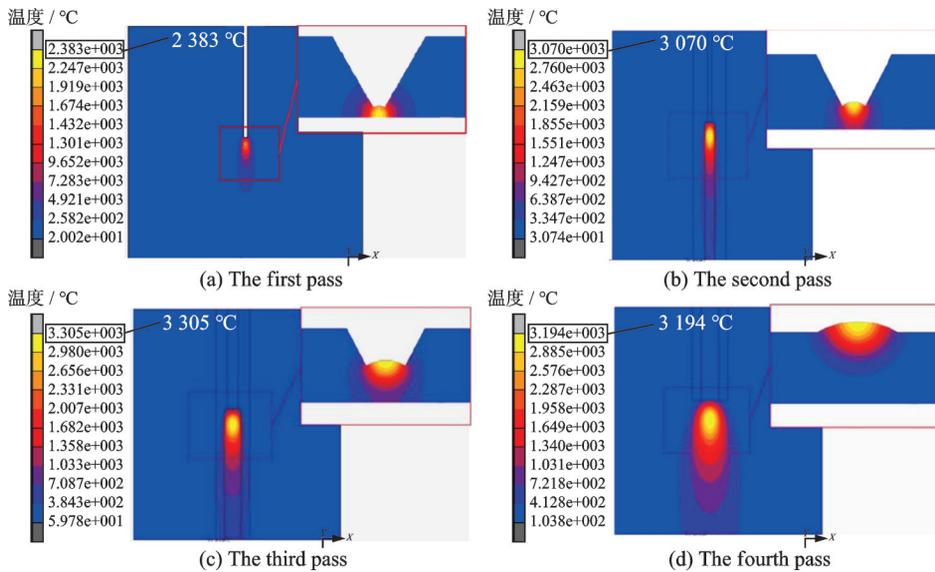


图 9 焊缝中部温度场云图

Fig.9 Temperature field contour maps in the center of the weld

图 10 为不同层间焊缝时间-温度分布曲线图。在焊接过程中,由于热源的移动和多层多道焊的堆积效应,每一层的时间-温度分布会表现出显著差异,后续层的热输入足够高,可能导致

前层焊缝部分熔化,形成新的熔合区和凝固组织。由图可知,A点和B点在都经历了重熔、再结晶以及高温回火细化晶粒的过程中,温度越高,晶粒的再结晶驱动力越大,导致焊缝区域的

晶粒细化。随着层数的增加,后续层产生的热影响减小,发生回火转变,由于热累积效应,冷却速率降低,晶粒逐渐粗化。C 点由于只受一次热输入的影响,经历一次再结晶过程。

图 11 为层间组织转变示意图。由图可知,第四层峰值温度显著高于第二层,第二层经过一次重结晶与一次高温回火后组织与第四层组织相比得

到显著细化。图 11(c)表示了后一层对前层焊缝的热影响作用,相近层的热影响促使了晶粒重熔、再结晶形成了新的凝固组织,随着焊接层数的增加,对初始层的热影响温度逐渐降低,反复回火效应促进初始层析出相均匀分布,因此多层多道焊中后层热输入可再加热扩展前层的焊缝区和热影响区,显著影响组织特性。

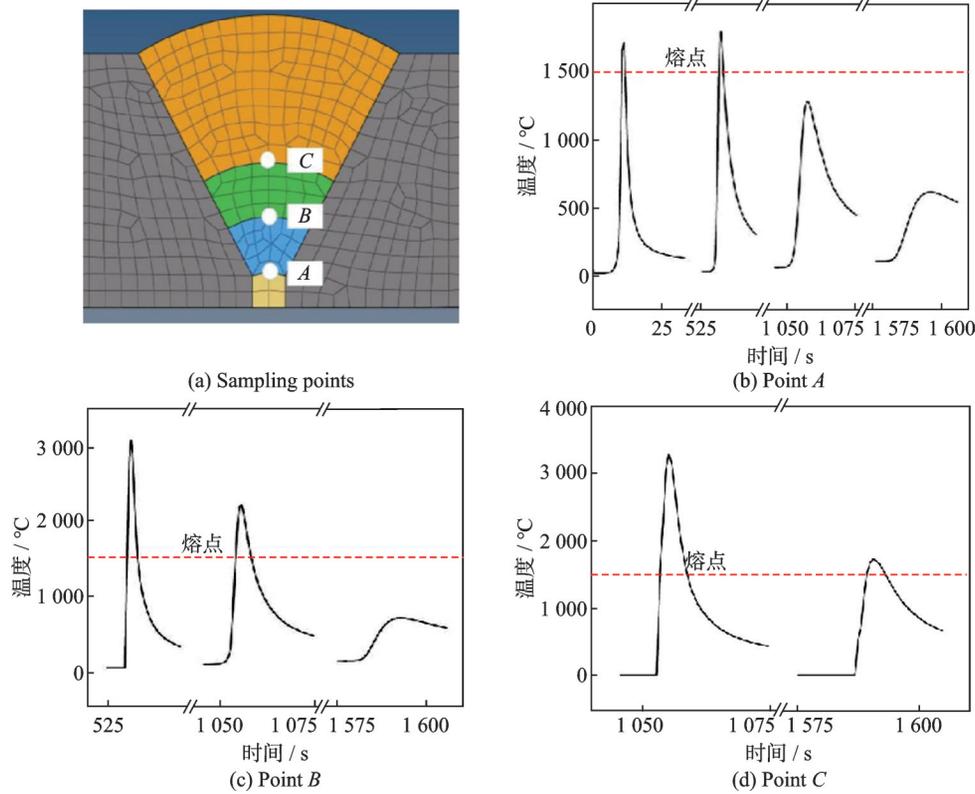


图 10 焊缝区时间-温度分布曲线

Fig.10 Time-temperature distribution curves in the weld zone

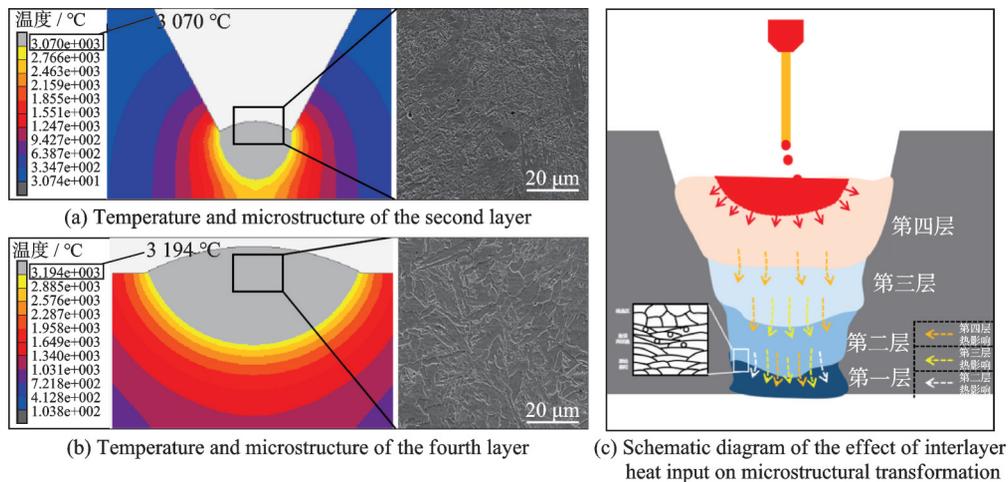


图 11 层间组织转变

Fig.11 Interlayer microstructural transformation

4 结 论

(1) 地铁转向架用 P355NL1 钢对接接头 MAG 多层焊接试验中,后道焊缝焊接时的热输入

对前道焊缝存在两次相变重结晶的作用,使得前道焊缝中的柱状晶被破坏,得到了细小的铁素体和少量的珠光体,达到细化前道焊缝晶粒的作用。

(2) 通过将模拟得到的温度场与实验结果的

焊缝形貌进行对比,校核热源模型,可知双椭球热源模型可以有效模拟 P355NL1 钢 MAG 多层焊接过程,焊接参数选择较为合理。温度场仿真模拟结果中第三层与第四层焊接时的最高温度显著高于前两层,说明填充层焊接过程中热输入的累积效应明显。

(3) 通过时间-温度分布曲线可以得出后续层的热输入会造成前层焊缝的重熔再结晶和高温回火,促进了柱状晶向铁素体的转变和细化晶粒,显著影响组织特性。

参考文献:

- [1] 魏康,王鑫.转向架用 P355NL1 钢焊接接头组织及力学性能的研究[J].机械制造文摘(焊接分册),2017(6):20-23.
WEI Kang, WANG Xin. Study on microstructure and mechanical properties of welded joints of P355NL1 steel for bogie[J]. Welding Digest of Machinery Manufacturing, 2017(6): 20-23.
- [2] 彭国平,高文慧,王海涛,等.转向架用 SMA490BW 钢激光-MAG 复合焊接头残余应力[J].电焊机,2015,45(4):158-160.
PENG Guoping, GAO Wenhui, WANG Haitao, et al. Residual stress of laser-MAG compound welding joints of SMA490BW for bogies[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(4): 158-160.
- [3] 逯连文.高速客车转向架新型材料、结构及工艺研究[D].长春:吉林大学,2003.
LU Lianwen. Study on new materials, structure and technology of high-speed passenger car bogie[D]. Changchun: Jilin University, 2003.
- [4] 李泽文,刘拥军,何轩.转向架构架 P355NL1 钢 MAG 焊接头低温力学性能研究[J].热加工工艺,2016,45(13):62-65.
LI Zewen, LIU Yongjun, HE Xuan. Study on low temperature mechanical properties of MAG welded joints of P355NL1 steel for bogie frame[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(13): 62-65.
- [5] 谢莹莹,张迪,杨红伟,等.P355NL1 钢双丝 MAG 焊接头组织及力学性能[J].焊接技术,2022,51(8):29-32.
XIE Yingying, ZHANG Di, YANG Hongwei, et al. Microstructure and mechanical properties of P355NL1 steel twin-wire MAG welded joint[J]. Welding Technology, 2022, 51(8): 29-32.
- [6] 杨宝林,方孝钟,王鑫,等.P355NL1 钢深熔焊与 MAG 焊接头力学性能对比研究[J].焊接技术,2019,48(5):27-30.
YANG Baolin, FANG Xiaozhong, WANG Xin, et al. Comparative study on mechanical properties between deep penetration welding and MAG welding of P355NL1 steel[J]. Welding Technology, 2019, 48(5): 27-30.
- [7] 王宗杰.熔焊方法及设备[M].2版.北京:机械工业出版社,2016.
- [8] 方孝钟,张迪,周晓远,等.地铁转向架构架 T 形接头应力应变数值模拟及显微组织[J].焊接技术,2023,52(3):34-38.
FANG Xiaozhong, ZHANG Di, ZHOU Xiaoyuan, et al. Numerical simulation and microstructure of T joint stress-strain of subway bogie frame[J]. Welding Technology, 2023, 52(3): 34-38.
- [9] 周勇,张成文,张国军,等.MAG 焊接技术研究进展[J].热加工工艺,2023,52(15):6-12.
ZHOU Yong, ZHANG Chengwen, ZHANG Guojun, et al. Research progress of MAG welding technology[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(15): 6-12.
- [10] 温子缘,雷振,徐富家,等.高功率激光-MAG 复合焊接成形稳定性[J].焊接,2024(5):9-15.
WEN Ziyuan, LEI Zhen, XU Fujia, et al. Forming stability of high power laser-MAG hybrid welding[J]. Welding & Joining, 2024(5): 9-15.
- [11] 陈球武,胡特生,张建平.混合气体保护焊多层焊工艺[J].焊接通讯,1981,10(4):2-3.
CHEN Qiuwu, HU Tesheng, ZHANG Jianping. Multi-layer welding process of mixed gas shielded welding[J]. Welding Technology, 1981, 10(4): 2-3.
- [12] 韩力,王天琪,龙斌,等.V 型坡口多层多道焊焊道几何参数预测[J].材料科学与工艺,2023,31(5):38-44.
HAN Li, WANG Tianqi, LONG Bin, et al. Prediction of weld channel geometric parameters for V-bevel multi-layer multi-pass welds[J]. Materials Science and Technology, 2023, 31(5): 38-44.
- [13] 黄坚.厚板窄间隙激光多层焊接技术进展[J].金属加工(热加工),2013(S2):95-98.
HUANG Jian. Development of laser multi-layer welding technology for thick plate with narrow gap[J]. MW Metal Forming, 2013(S2): 95-98.
- [14] 莫春立,钱百年,国旭明,等.焊接热源计算模式的研究进展[J].焊接学报,2001,22(3):93-96.
MO Chunli, QIAN Bainian, GUO Xuming, et al. The development of models about welding heat sources' calculation[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(3): 93-96.
- [15] 吴若麟,程开甲,戴威,等.高强钢激光熔透焊接接头残余应力数值分析[J].制造技术与机床,2024(7):55-62.
WU Ruolin, CHENG Kaijia, DAI Wei, et al. Numerical analysis of residual stress in high-strength steel laser penetration welded joints[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2024(7): 55-62.