

焊接热循环对18CrNiMo钢焊接热影响区冲击韧度的影响

石红昌, 黄安明, 黄辉

德阳天元重工股份有限公司 四川德阳 618000

摘要: 在桥梁钢结构焊接过程中, 焊接热循环产生的温度效应是导致焊接接头热影响区微观组织不均质性的重要因素, 进而可能引发钢结构的局部脆化和应力集中问题。利用Gleeble-540热力耦合试验机对焊接热循环进行了物理模拟, 重点分析了峰值温度与冷却速率对桥梁用18CrNiMo钢母材热影响区微观组织和冲击韧度的影响。研究结果显示: 当焊接热循环的峰值温度超过950℃时, 18CrNiMo钢在升温阶段会发生显著的奥氏体相变, 且峰值温度的升高会导致热影响区材料的晶粒度明显粗化。而在焊接冷却阶段, 当 $t_{8/5} < 15\text{s}$ 时, 18CrNiMo钢中的马氏体含量增加, 进而导致冲击韧度下降。基于上述分析结果, 为有效避免18CrNiMo钢结构焊接出现局部脆化现象, 需实施严格的焊接层间温度控制和焊后热处理措施。

关键词: 电弧焊接; 热影响区; 冲击韧度; 微观组织

Effect of welding thermal cycle on impact toughness of heat-affected zone of 18CrNiMo steel

SHI Hongchang, HUANG Anming, HUANG Hui

Deyang Tengen Heavy Industry Co., Ltd., Deyang 618000, Sichuan, China

Abstract: During the welding process of bridge steel structures, the temperature effect generated by the welding thermal cycle is a crucial factor leading to microstructural inhomogeneity in the heat-affected zone (HAZ) of welded joints, which may subsequently induce local embrittlement and stress concentration issues in steel structures. This study utilizes a Gleeble-540 thermodynamic couple testing machine to physically simulate the welding thermal cycle, focusing on analyzing the influence of peak temperature and cooling rate on the microstructure and impact toughness of the HAZ of the base material, 18CrNiMo steel, used in bridges. The research results indicate that when the peak temperature of the welding thermal cycle exceeds 950℃, significant austenitic transformation occurs in 18CrNiMo steel during the heating stage, and an increase in peak temperature leads to significant grain coarsening in the HAZ material. During the welding cooling stage, when the $t_{8/5}$ time is less than 15s, the martensite content in 18CrNiMo steel increases, resulting in a decrease in impact toughness. Based on the above analysis, to effectively avoid local embrittlement in welded steel structures of 18CrNiMo, strict interlayer temperature control during welding and post-weld heat treatment measures are necessary.

Keywords: arc welding; heat-affected zone; impact toughness; microstructure

第一作者: 石红昌, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为索桥核心部件研发制造技术, E-mail: shc052879@126.com。

1 序言

在桥梁工程领域，钢结构因其高强度、良好的韧性和施工便捷性而被广泛应用^[1-4]。然而，钢结构桥梁在制造和安装过程中，焊接是一个不可或缺的环节，而焊接过程中产生的热循环效应对钢材的微观组织和力学性能具有显著影响。特别是焊接接头热影响区（HAZ），由于经历复杂的热历程，往往导致微观组织的不均质性，进而可能引发钢结构的局部脆化、软化和应力集中问题^[5-8]，尤其在传统桥梁钢的焊接中，会因材料碳含量较高等原因导致焊接热影响区硬度大、韧性差，容易产生焊接裂纹^[9-11]，严重影响桥梁的安全性和使用寿命^[12, 13]。

针对这一关键问题，本文聚焦于桥梁用18CrNiMo钢在焊接过程中的热循环效应，旨在深入探究焊接热循环对钢材微观组织和力学性能的影响机制。18CrNiMo钢作为一种常用的桥梁结构材料，其焊接性能的研究对于确保桥梁结构的安全性和可靠性具有重要意义。焊接热循环不仅会引起微观组织的不均质性，还会导致马氏体淬硬组织转变的出现^[14-17]。马氏体组织导致焊缝及热影响区在受外力时更容易发生应力集中，促进裂纹的萌生和扩展，使材料更容易发生脆性断裂，降低材料的韧性，对焊接结构的性能产生不利影响^[18-20]。为了改善焊缝及热影

响区的脆性和组织不均匀性，通常采用热处理方法对焊接接头的塑韧性进行调控^[21]。

为了更全面地理解这一过程，本文稿采用Gleeble-540热力耦合试验机对焊接热循环进行了物理模拟。通过精确控制不同的峰值温度和冷却速率，重点分析了这些关键参数对18CrNiMo钢母材热影响区微观组织和冲击韧度的影响，以深入地理解焊接过程中热循环对钢材微观结构的演变规律，以及这种演变如何进一步影响钢材的力学性能。期望通过本研究，能够为优化焊接工艺、改善焊接接头性能提供重要的理论依据，并为避免18CrNiMo钢结构焊接出现局部脆化现象提供科学指导。

2 试验材料及过程

2.1 试验材料及热循环温度采集

对16mm厚的18CrNiMo钢板材进行焊接试验和热循环温度采集。其中，焊接试验采用焊接材料为 ϕ 1.2mm的GML-W60。母材和焊接材料的化学成分见表1。采用MAG焊堆焊参数为：焊接电流300~320A，电弧电压32~34V，焊接速度35~45cm/min。焊接过程采用福尼斯TPS4000焊机搭配ABB机械手及其弧焊软件和智能控制系统施焊，并采用K型热电偶对热影响区的焊接温度进行测试，如图1所示。

表1 18CrNiMo钢及焊接材料GML-W60的化学成分（质量分数）（%）

材料	C	Mn	Si	S	P	Mo	Ti	Ni	Cr	Cu
18CrNiMo钢	0.18~0.25	≤0.5	≤0.4	≤0.02	≤0.03	0.2~0.5	—	0.8~1.2	0.9~1.2	—
GML-W60焊接材料	≤0.1	1.2~1.9	0.5~0.95	≤0.025	≤0.025	0.1~0.45	≤0.12	适量	适量	≤0.5

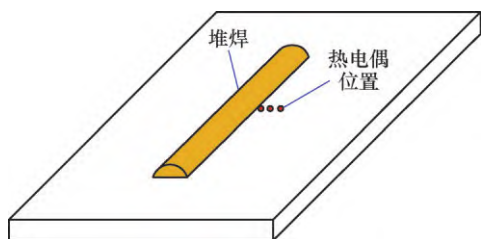


图1 焊接试验及热循环测试示意

通过对来料18CrNiMo钢锻件（厚度为16mm）进行MAG堆焊并测试热影响区的温度热循环曲线，测试得到热影响区的升温速度为220~270℃/s，温度测点布置在距焊缝熔合线0.5~1mm的热影响区

内，采用直径为1.5mm的热电偶进行测量。连续冷却时间 $t_{8/5}$ 为11~15s，峰值温度 T_m 为1050~1372℃，如图2所示。

2.2 Gleeble热模拟试验

采用Gleeble-540热力耦合试验机，对18CrNiMo钢板材进行焊接热循环温度模拟。根据测试的MAG焊接热循环参数，并考虑实际桥梁焊接板材厚度更大，会导致焊接冷却速率加快，故设计焊接热模拟的温度曲线，如图3所示。其中，加热速度 $v=200℃/s$ ，峰值温度 $T_m=950℃、1050℃、1150℃$ ， $t_{8/5}=6s、7.5s、10s、15s$ ，高温停留时间 $t_h=0.5s$ 。

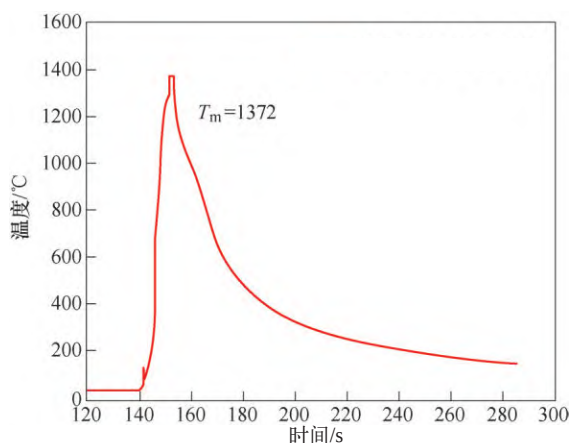


图2 18CrNiMo钢焊接熔合线位置的热循环曲线

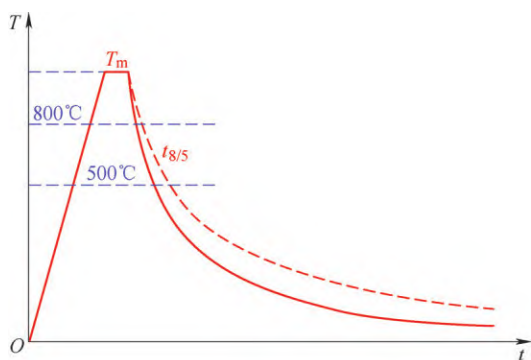


图3 焊接热模拟的温度曲线

温度模拟试样尺寸为55mm×10.5mm×10.5mm。

2.3 金相分析及冲击韧性测试

采用Axio Observer.A1m倒置式蔡司金相显微镜

对18CrNiMo钢进行金相分析。通过标准制样流程，包括切割、研磨、抛光及腐蚀处理，获取清晰的显微组织图像，评估不同焊接热循环后晶粒尺寸、形态及相分布。

使用JBW-300B微机屏显半自动冲击试验机进行夏比冲击试验。按GB/T 229—2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》制备V型缺口试样，采用每种焊接热循环后的材料制备3个样品，评估材料的抗缺口敏感性及韧性。

3 试验结果与讨论

为了评估焊接接头热影响区的组织演变及其脆性倾向，本文采用金相分析与夏比冲击试验相结合的方法，系统探究了不同焊接热循环参数对18CrNiMo钢微观组织结构及冲击韧度的影响规律。

3.1 焊接热循环模拟

采用Gleeble-540热力耦合试验机对18CrNiMo钢进行焊接热循环模拟试验。设定温度和测试温度曲线如图4~图7所示，模拟不同冷却速率下焊接热循环的温度演变行为，温度模拟均温区宽度为10~12mm，试件的设定温度和测试温度曲线拟合良好。焊接热模拟试样如图8所示。

3.2 热循环对18CrNiMo钢微观组织的影响

原始的18CrNiMo钢微观组织主要由铁素体和贝

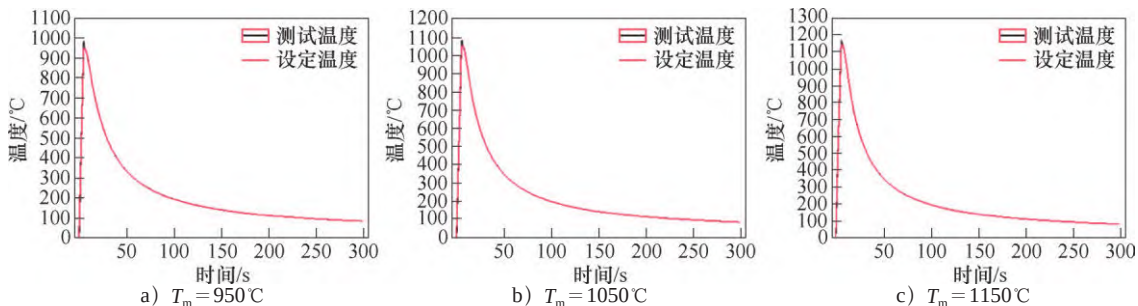


图4 焊接热模拟温度曲线 ($t_{8/5} = 15s$)

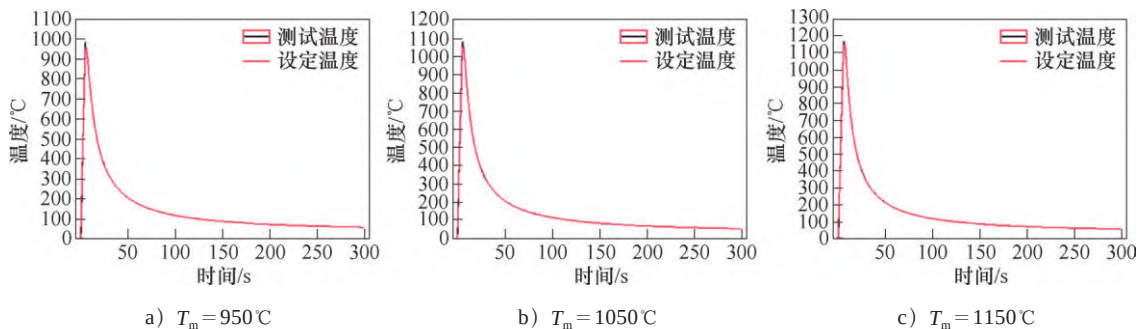


图5 焊接热模拟温度曲线 ($t_{8/5} = 10s$)

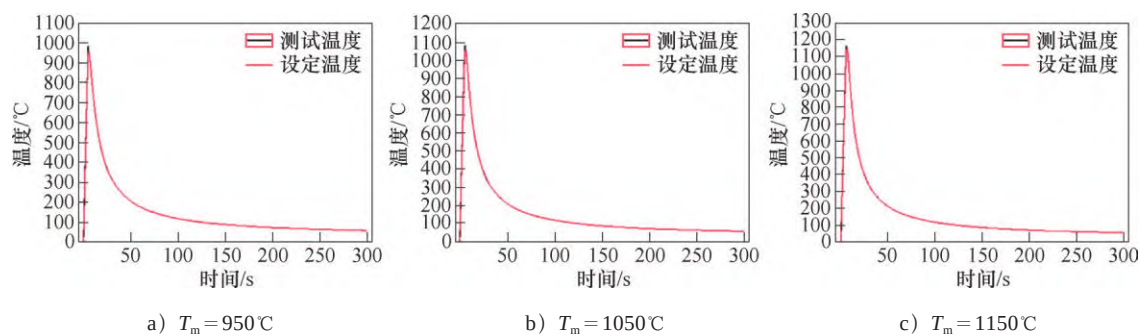


图6 焊接热模拟温度曲线 ($t_{8/5}=7.5s$)

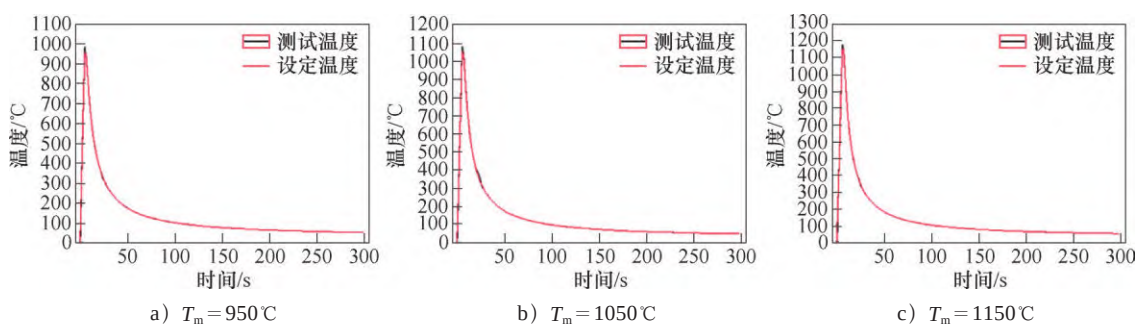


图7 焊接热模拟温度曲线 ($t_{8/5}=6s$)



图8 焊接热模拟试样

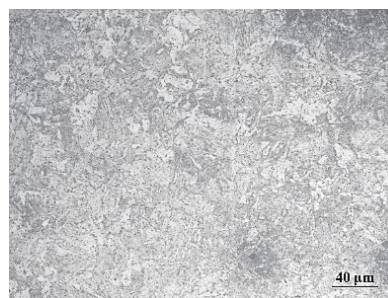


图9 18CrNiMo钢原始微观组织

氏体构成,如图9所示。而经历焊接热循环后的微观组织则展现出不同的特征,如图10~图13所示。

由图10~图13可知,当18CrNiMo钢经受峰值温度为950℃的热循环时,发生了部分的奥氏体转变。在随后的冷却过程中,形成了粒状贝氏体和少量的马氏体转变。特别地,随着热循环冷却过程中的 $t_{8/5}$

时间降低至6s,观察到了显著的板条马氏体转变现象。

在峰值温度为1050℃的热循环条件下,18CrNiMo钢发生了完全的奥氏体相变。在后续的冷却过程中,依次发生了铁素体、粒状贝氏体和少量马氏体的转变。值得注意的是,随着热循环冷却速度的提

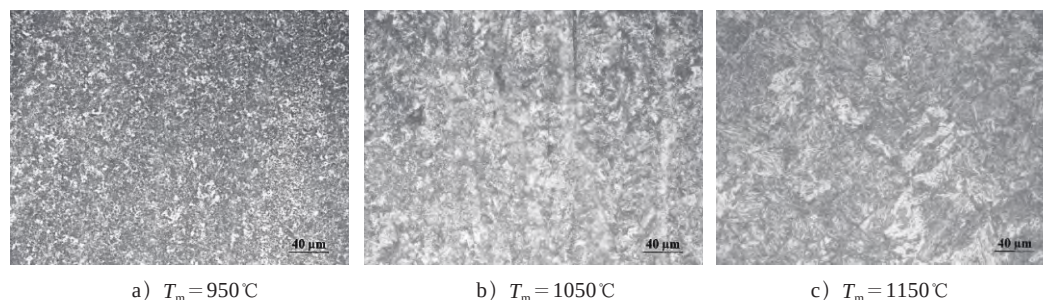


图10 焊接热循环后18CrNiMo钢的微观组织形貌 ($t_{8/5}=15s$)

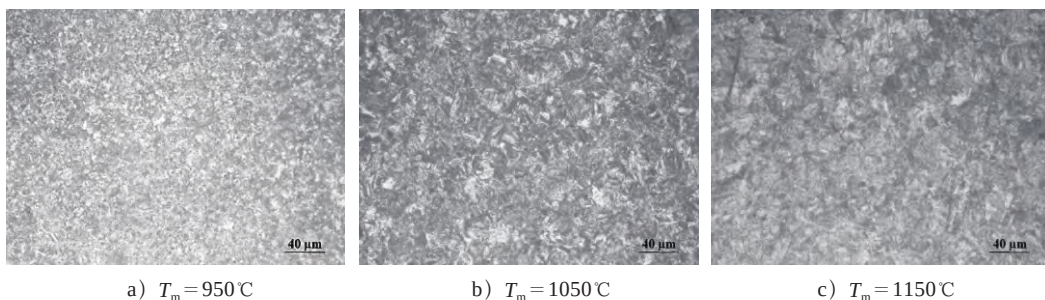


图11 焊接热循环后18CrNiMo钢的微观组织形貌 ($t_{8/5} = 10s$)

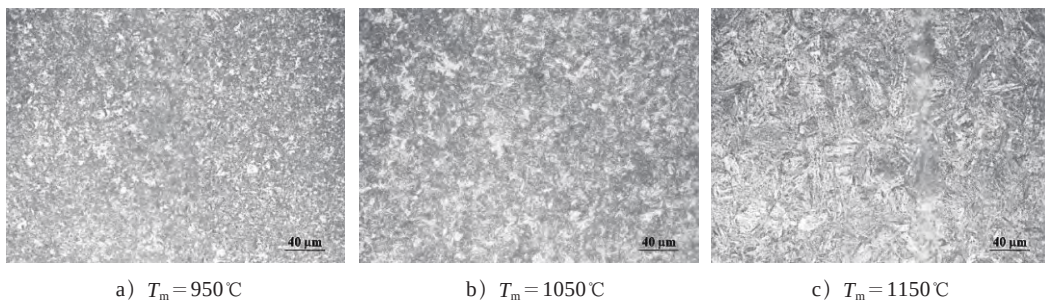


图12 焊接热循环后18CrNiMo钢的微观组织形貌 ($t_{8/5} = 7.5s$)

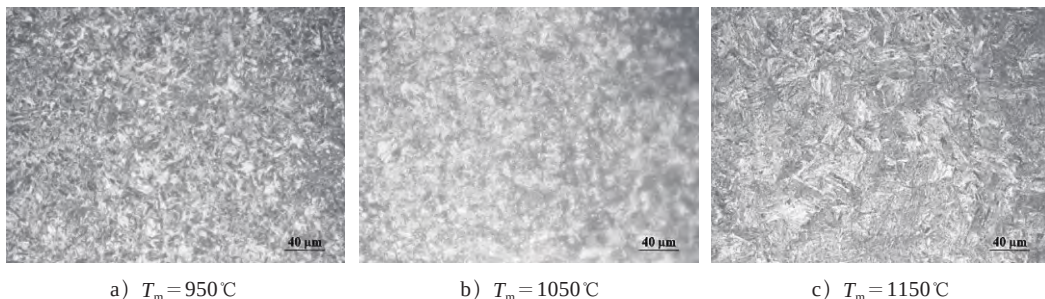


图13 焊接热循环后18CrNiMo钢的微观组织形貌 ($t_{8/5} = 6s$)

高，马氏体的含量也随之增多。与原始的微观组织相比，此时的晶粒显得更为细小。

当热循环的峰值温度升至1150℃时，18CrNiMo钢同样发生了完全的奥氏体相变。在后续的冷却过程中，主要发生了贝氏体和马氏体的转变。并且，随着冷却速度的增大，板条马氏体的转变量也呈现出增加的趋势。与母材组织相比，随着峰值温度的升高，晶粒明显发生了粗化现象。

3.3 热循环对18CrNiMo钢冲击韧度的影响

冲击韧度的试验结果如图14所示。由图14可知，在峰值温度为950℃的热循环作用下，随着冷却速度的增大，试样的冲击韧度呈现出下降的趋势。具体而言，当 $t_{8/5} = 15s$ 时，冲击韧度达到最高值，约为222J/cm²。这一现象的缘由，可归结为热循环的温度效应诱发了板条马氏体的转变，进而导致材料的冲击韧度有所下降。金属中的马氏体组织通常具有较高的硬度和强度，但其韧性相对较低，尤其是

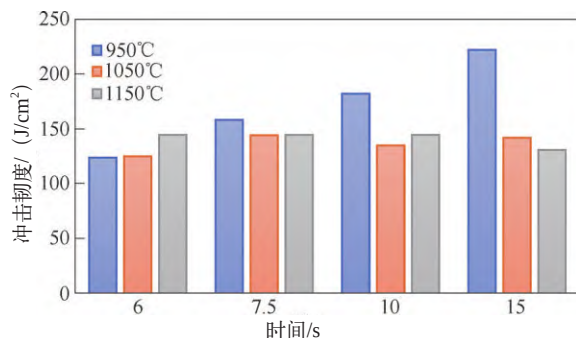


图14 冲击韧度试验结果

冲击韧度。马氏体组织的形成往往伴随着材料内部应力的增加和韧性的降低，这不利于材料在受到冲击载荷时的表现^[13, 14]。

在峰值温度为1050℃和1150℃的热循环作用下，试样的冲击韧度均出现了明显的下降，其数值大致维持在130~140J/cm²。在这两个温度条件下，马氏体组织的形成更加显著，进一步加剧了材料冲击韧度的下降。这表明，在金属材料的热处理和加

工过程中, 需要严格控制热循环条件, 以避免过多的马氏体组织形成, 从而保持材料良好的冲击韧度。

4 结束语

基于上述试验与测试结果, 得出以下结论。

1) 在特定焊接参数下(焊接电流320A、电弧电压32~34V、焊接速度35~45cm/min), 16mm厚的18CrNiMo钢电弧焊接的热循环加热速率为220~270℃/s, 且 $t_{8/5}$ 为11~15s。

2) 焊接热循环导致焊接接头热影响区出现冶金组织的非均质性。18CrNiMo钢的原始组织在加热过程中发生奥氏体转变, 并在随后的冷却过程中转变为贝氏体和马氏体组织。随着峰值温度的升高, 观察到晶粒粗化的现象。同时, 随着冷却速率的增大, 板条马氏体的转变量也相应增大。

3) 焊接热影响区材料的冲击韧度出现下降。特别是当峰值温度>1050℃时, 冲击韧度显著下降。相反, 当峰值温度<950℃时, 随着冷却速度的降低, 由于室温微观组织中的马氏体含量较少, 因此冲击韧度有所增大。

因此, 建议采取预热和层间温度控制措施, 以降低焊接冷却速度, 从而改善焊接接头的冲击韧度。另外, 可在焊后进行适当的热处理, 以降低热影响区的板条马氏体含量, 进而改善焊接接头的冲击韧度。

参考文献:

- [1] 李英杰. 钢结构在土木工程施工技术中的应用研究[J]. 科技资讯, 2023, 21 (19): 138-141.
- [2] 李东. 混凝土与钢结构工程中的建筑工程施工技术研究[J]. 陶瓷, 2024 (3): 225-227.
- [3] 马立朋, 高建忠, 徐向军. 耐候桥梁钢焊接关键技术及应用[J]. 金属加工(热加工), 2022 (7): 54-57.
- [4] 张海涛, 孙蕾蕾, 尹志强. Q690qD高强度桥梁钢焊接性研究[J]. 焊接技术, 2024, 53 (3): 36-41.
- [5] 张琦. 钢结构工程中焊接方法的选用及焊接工艺的应用[J]. 甘肃科技, 2012, 28 (20): 113-115.
- [6] 高建忠, 马立朋, 徐向军, 等. 高性能桥梁钢焊接性能研究[J]. 焊接技术, 2024, 53 (3): 53-58.
- [7] 张强, 韩建民, 张泽, 等. 高耐候钢与不锈钢焊接接头的微观组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43 (13): 173-174, 177.
- [8] 芦文钊, 胡学文, 袁晓敏, 等. 热模拟Q890高强钢焊接过程中组织转变的原位观察[J]. 热处理, 2022, 37 (1): 18-23.
- [9] 朱节宏, 李伟锋, 王智林. 焊接和热处理工艺对Q235B钢板焊缝微观组织和硬度的影响[J]. 装备制造技术, 2023 (11): 13-17.
- [10] 郝玉朋, 李力, 高振坤, 等. 焊接热输入对高性能桥梁钢接头组织和性能的影响[J]. 高速铁路新材料, 2022, 1 (6): 16-21.
- [11] 刘志强, 李晓红, 马彪, 等. 热处理工艺对30CrMnSi钢冲击性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40 (4): 74-76.
- [12] 徐向军, 高建忠, 刘振刚, 等. Q345qENH耐候桥梁钢焊接试验研究[J]. 金属加工(热加工), 2021 (1): 16-23.
- [13] LEE S, KIM B C, KWON D, et al. Fracture toughness analysis of heat-affected zones in high-strength low-alloy steel welds[J]. Metallurgical Transactions A, 1993, 24 (5): 1133-1141.
- [14] 朱梓坤. Q690D钢热影响区组织热模拟和焊接应力与变形数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [15] 葛琛, 赵洪山, 郑磊, 等. 900 MPa级高强钢的连续冷却转变及组织调控分析[J]. 钢铁, 2023, 58 (3): 128-134.
- [16] 顾晓明, 刘俊伟, 李康康, 等. 热处理工艺对18CrNiMo7-6渗碳钢奥氏体晶粒度的影响[J]. 金属加工(热加工), 2015 (7): 16-18.
- [17] 黄会强, 车平, 裴雪峰, 等. 我国桥梁钢结构焊接技术发展现状及展望[J]. 焊接技术, 2019, 48 (S2): 60-63.
- [18] 杨景华, 周继烈, 叶尹, 等. 焊接热输入对低合金高强钢焊接热影响区组织性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40 (3): 140-142, 146.
- [19] 彭宁琦, 付贵勤, 杨建华, 等. Q690q耐候桥梁钢免预热焊接热影响区的组织性能[J]. 钢铁, 2022, 57 (12): 152-160.
- [20] 陈焕德, 刘东升. 高强韧特厚桥梁钢板焊接热影响区的组织与性能[J]. 金属热处理, 2015, 40 (6): 1-6.
- [21] 曹睿, 冯伟, 彭云, 等. 980MPa级高强钢焊接接头HAZ冲击性能的分析[J]. 焊接学报, 2010, 31 (8): 93-96.

(收稿日期: 20250206)