

MH600DP与MH540FB双相钢MAG焊焊接性研究

吴兴欢¹, 赖春明¹, 彭思涵²

1. 湖南化工职业技术学院机电工程学院 湖南株洲 412000

2. 中车株洲电力机车有限公司 湖南株洲 412000

摘要: 通过碳当量和冷裂纹敏感系数计算, 以及硬度、金相组织检测等试验方法, 对汽车轮辐和轮辋用钢热轧马氏体双相钢MH600DP和贝氏体双相钢MH540FB的焊接性, 以及MAG焊角接头焊缝组织、显微硬度分布进行了研究。研究成果具有一定的现实意义和应用价值。

关键词: 双相钢; MAG焊; 显微组织; 显微硬度

Research on the weldability of MH600DP and MH540FB dual phase steel by MAG welding

WU Xinghuan¹, LAI Chunming¹, PENG Sihan²

1. School of Mechanical Engineering, Hunan Chemical Vocational and Technical College, Zhuzhou 412000, Hunan, China

2. CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412000, Hunan, China

Abstract: Investigates the weldability of hot-rolled martensitic dual-phase steel MH600DP and bainitic dual-phase steel MH540FB for automotive wheel spokes and rims through calculations of carbon equivalent, cold cracking sensitivity coefficient, hardness, and metallographic analysis. The research includes the study of MAG welded butt joint weld seam structure and microhardness distribution. The research findings have certain practical significance and application value.

Keywords: dual-phase steel; MAG welding; microstructure; microhardness

1 序言

为了实现“碳达峰”这个宏伟目标, 就要求汽车提高燃油效率并减少尾气排放。因此, 对于汽车来说, 降低汽车用钢的密度^[1], 实现汽车轻量化, 是完成这一目标的有效途径。汽车自重每降低10%, 油耗可降低5%~8%, 尾气排放也相应降低^[2]。目前, 汽车车身制造大量采用超深冲钢板, 但对于前后保险杠、轮辋、ABCD柱等受力部位, 必需使用双相钢或超高热成形钢来制造, 以保证汽车行驶的

安全性^[3-5]。

双相钢在具有较高强度的同时还具有良好的成形性, 其初始加工硬化速率高, 强度和延性匹配好, 这种特殊的力学性能使其比普通的高强钢具有更高的强度, 有利于提高车辆的安全性^[6, 7]。目前已被广泛应用于汽车保险杠、车门、轮辋及车体纵向横梁等各种重要的零部件中^[8-10]。

热轧马氏体双相钢具有良好的成形性能和较高的抗拉强度; 热轧贝氏体双相钢具有良好的扩孔性

基金项目: 湖南省教育厅资助科研项目优秀青年项目(23B0966)。

通信作者: 赖春明, 硕士研究生, 讲师, 主要研究方向为金属材料成形工艺及其组织性能调控, E-mail: laichunming@foxmail.com。

能，两种双相钢的相互结合是汽车车轮轻量化的理想材料。为实现汽车轻量化，本文采用MH600DP马氏体双相钢（以下简称MH600DP钢）和MH540FB贝氏体双相钢（以下简称MH540FB钢）试制双相钢车轮，试制过程中主要采用MAG焊焊接方式对双相钢进行焊接，研究两种双相钢MAG焊工艺的焊接性，为双相钢轮辋的生产提供指导数据。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

本试验所用的材料为2250热轧生产线生产的5.6mm厚热轧MH600DP钢和3.8mm厚的MH540FB钢，焊丝为ER50-6气体保护焊丝。试验材料的化学成分和力学性能分别见表1、表2。

表1 试验材料的化学成分（质量分数）（%）

试验材料	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Nb	Cu	Fe
MH600DP钢	0.07	1.19	1.18	0.01	0.002	0.044	0.42	—	—	余量
MH540FB钢	0.07	0.10	1.39	0.01	0.0008	0.029	—	0.018	—	余量
ER50-6焊丝	0.06~0.15	0.80~1.15	1.40~1.85	≤0.025	≤0.035	—	—	—	≤0.35	余量

表2 试验材料的力学性能

试验材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率(%)	屈强比
MH600DP钢	394	616	25.01	0.64
MH540FB钢	491	554	27.52	0.89
ER50-6焊丝	≥420	≥500	≥22	—

2.2 试验方法

马氏体双相钢用于轮辐，贝氏体双相钢用于轮辋。焊接方法为MAG焊，焊接接头形式为角接头，焊丝垂直对准焊缝中心，焊接接头如图1所示。

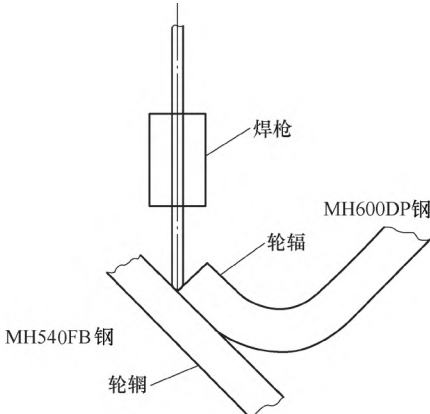


图1 焊接接头示意

焊丝为直径1.2mm的ER50-6气体保护焊丝，保护气体为20%CO₂+80%Ar。焊接设备为YD-500AG II 电脑焊接波形控制型MAG焊机。试验用焊接参数见表3。

表3 试验用焊接参数

焊接电流/A	电弧电压/V	焊丝直径/mm	送丝速度/(m/min)	气体流量/(L/min)	焊丝干伸长/mm
250~270	26.5~27.1	1.2	7.8~8.7	15~20	12~18

焊后截取焊缝横截面，用3%的硝酸酒精腐蚀，对其进行显微组织分析。

3 试验结果与分析

3.1 碳当量及裂纹敏感性分析

根据以上两个钢种的化学成分和力学性能，选用国际焊接学会（IIW）定义的碳当量计算公式计算MH600DP钢和MH540FB钢的碳当量值，以此判断其焊接性。

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad (1)$$

经计算得知，MH600DP钢的碳当量为0.35%，MH540FB钢的碳当量为0.31%，均<0.4%，因此两种双相钢均属于焊接性中等的钢种。

采用日本提出的冷裂纹敏感指数P_{cm}公式计算试验材料的冷裂纹敏感系数。

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Cr}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2)$$

经计算得知，MH600DP钢、MH540FB钢的冷裂纹敏感指数分别为0.17%、0.14%，均<0.20%，这两种钢材焊接性良好，焊接时不预热也不会产生焊接冷裂纹。

3.2 显微组织分析

（1）焊缝宏观形貌分析 在焊缝不同位置上横向截取3个试样，焊缝横截面宏观形貌如图2所示。

从图2可看出，3个试样中焊缝填充金属在MH600DP钢一侧向外延伸。焊缝熔深最深处均在MH540FB钢一侧，说明焊接过程中焊枪偏向轮辋一侧。

分别测量焊接试样的焊缝宽度、余高和熔深，测量方式如图3所示，得到焊接接头关键参数见表4。

从表4可看出，2[#]试样熔深率最大，不满足评判标准，1[#]试样的焊缝余高最高，焊缝宽度最宽。3[#]

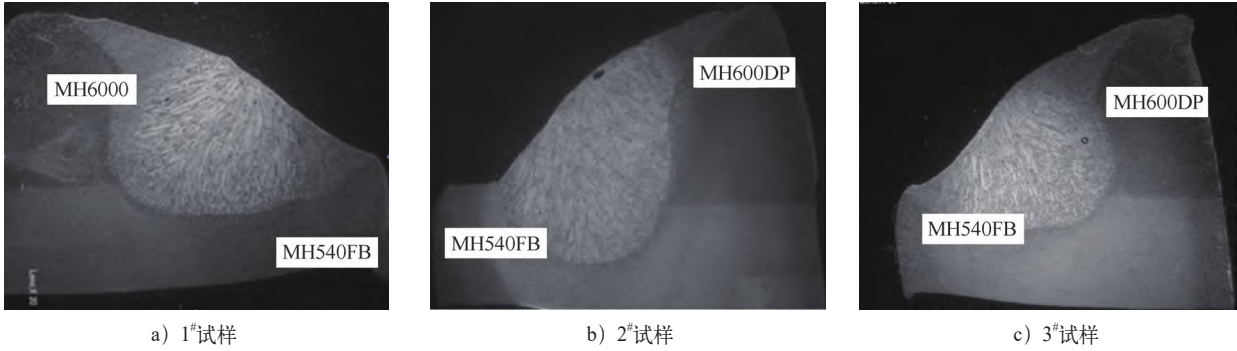


图2 焊接试样焊缝横截面宏观形貌

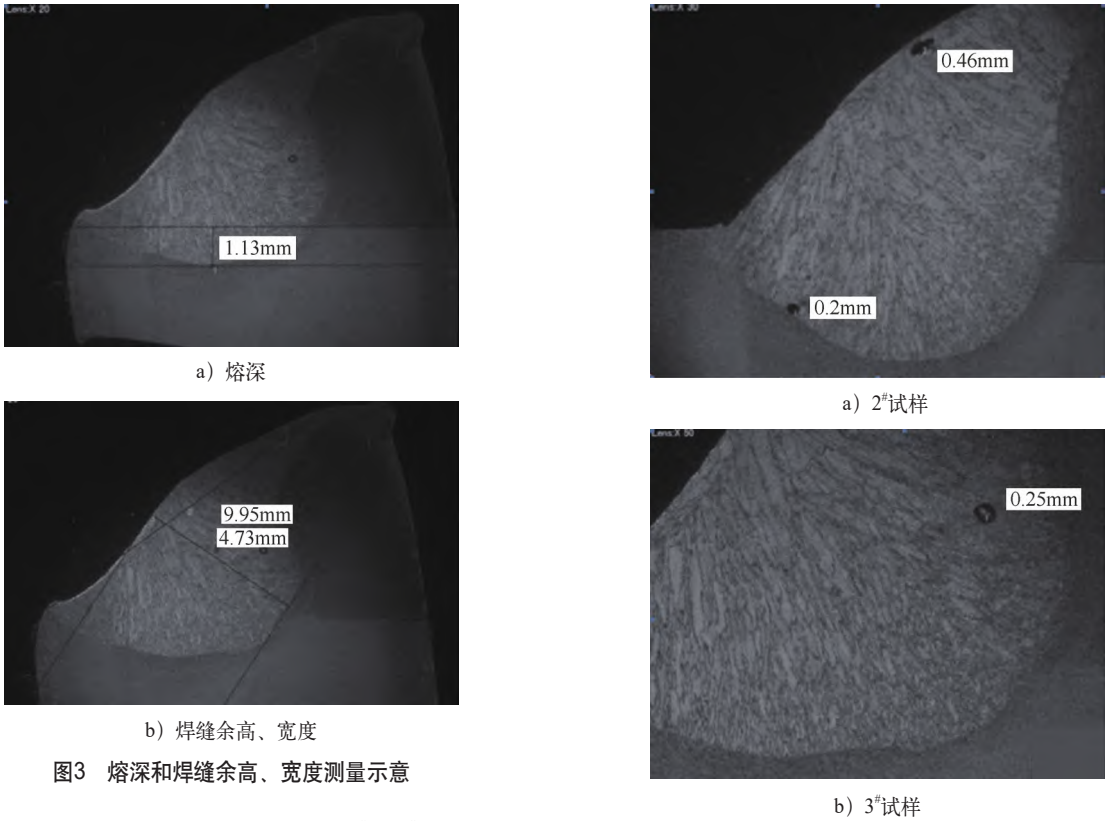


图3 熔深和焊缝余高、宽度测量示意

试样焊缝余高最低，焊缝最窄，在2[#]、3[#]试样的焊缝内均发现气孔，如图4所示。2[#]试样气孔最大直径

表4 焊接接头关键参数						
序号	牌号	母材厚度/mm	熔深/mm	焊缝厚度/mm	焊缝宽度/mm	熔深率(%)
1	MH600DP	—	0.65	5.97	10.79	—
	MH540FB	3.8	1.19			31.3
2	MH600DP	—	0.39	5.07	10.43	—
	MH540FB	3.8	1.84			48.4
3	MH600DP	—	0.8	4.73	9.95	—
	MH540FB	3.8	1.13			29.7

注：评判标准为熔深率 = (熔深/母材厚度) × 100% ≤ 40%。

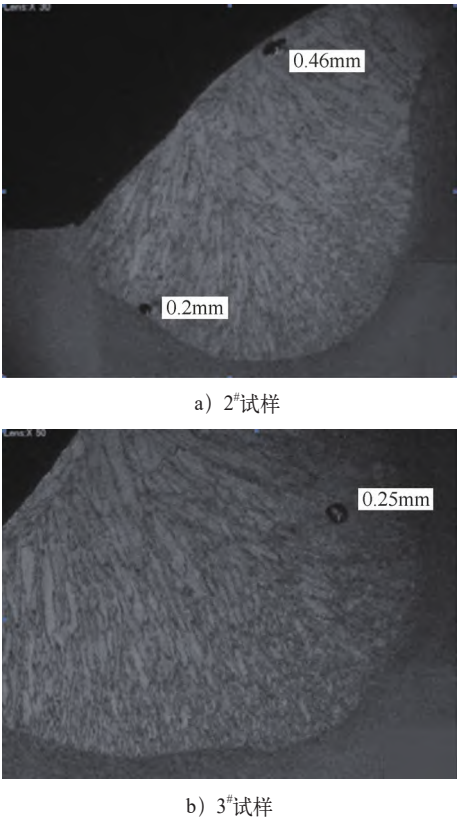


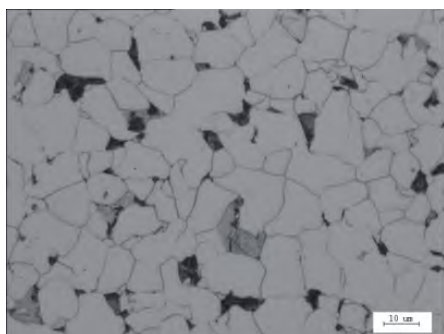
图4 焊缝内部气孔

为0.46mm，3[#]气孔最大直径为0.25mm，根据JB/T 9186—1999《二氧化碳气体保护焊工艺规程》中焊缝表面质量分级规定，试样质量等级为Ⅱ级。这是由于MAG焊时冷却速度较快，在焊接时液态金属中产生的气泡因来不及逸出而残留下来形成气孔。

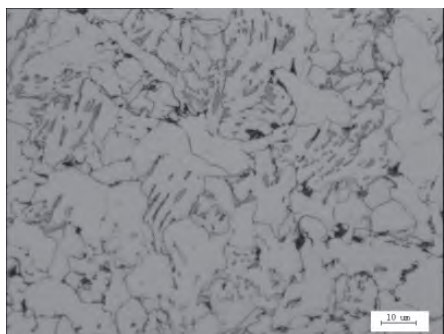
(2) 母材显微组织分析 两种双相钢母材显微组织如图5所示。由图5a可知，MH600DP钢为铁素体+马氏体+珠光体组织，白色的为多边形铁素体组织，灰色的为马氏体组织，黑色的为珠光体，马氏体组织呈岛状分布在铁素体晶界上。由图5b可知，MH540FB钢的组织为铁素体+贝氏体+珠光

体，珠光体分布在铁素体晶界上，由于两种钢的组织都含有铁素体基体，所以双相钢在具有较高强度的同时韧性良好。

(3) 焊接接头显微组织分析 焊接接头不同区域的温度和冷却速度均不同，导致组织不一样，



a) MH600DP钢



b) MH540FB钢

图5 两种双相钢母材显微组织

从焊缝中心向母材依次分为焊缝区(A)、熔合区(B)、过热区(C)、完全重结晶区(D)、不完全重结晶区(E)和母材区(F)6个区域(见图6)。从焊缝向MH540FB钢一侧，不同区域的显微组织如图7所示。

由图7a可知，焊缝区金属为填充焊丝与双相钢的混合产物，组织为块状铁素体和针状铁素体，焊缝金属在电弧的作用下熔化后快速冷却，冷却过程发生非平衡状态下的凝固和固态相变，为铸态组织。当钢在加热温度过高并以较快速度冷却时，先共析铁素体或先共析渗碳体从奥氏体晶界沿奥氏体一定晶面向晶内生长并呈针状析出。

由图7b可知，熔合区有一条明显的分界线，熔合区内针状铁素体消失，在铁素体晶界上有弥散分

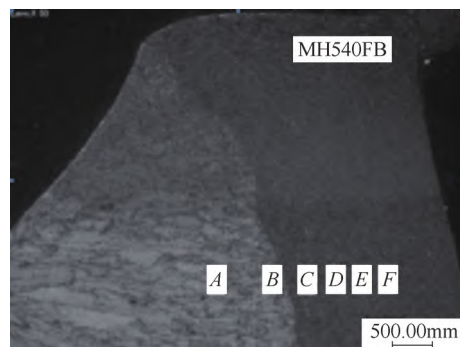
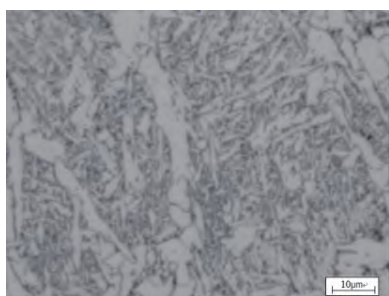
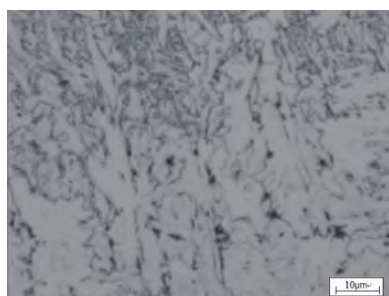


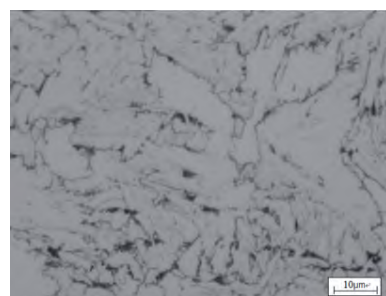
图6 焊缝中心到母材的区域划分示意



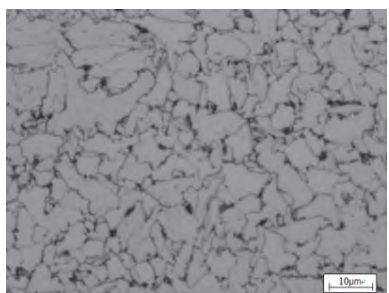
a) 焊缝区



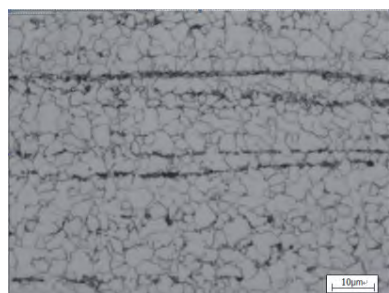
b) 熔合区



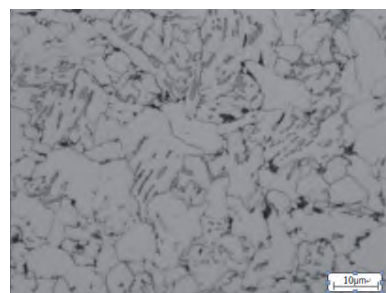
c) 过热区



d) 完全重结晶区



e) 不完全重结晶区



f) 母材区

图7 焊缝不同区域的显微组织

布的珠光体组织。

由图7c可知,过热区处于固相线以下至1100℃左右温度范围,金属处于过热状态,奥氏体晶粒严重长大,冷却后便得到粗大的铁素体+贝氏体+珠光体组织。

由图7d可知,完全重结晶区温度范围处于1100℃至 A_{c3} 之间,金属发生了完全重结晶,在随后的空冷过程中,得到了细小均匀的铁素体+贝氏体+珠光体的正火组织。

不完全重结晶区度范围处于 A_{c3} 与 A_{c1} 之间,只有部分金属发生了相变重结晶,成为细小的铁素体,另一部分未发生相变重结晶的仍为粗大的铁素体,但从图7e可知,组织为均匀细小的铁素体和带状珠光体组织。

3.3 显微硬度检测

由于接头形式为角接头,为测得两种材料的接头硬度值,需采用横向和纵向加压。硬度试验设备为HV-1000硬度计,试验加载力为500g(4.9N),硬度测试点间距为0.3mm,打点方向均从母材到焊缝方向,测试示意如图8所示。分别测试3个试样的显微硬度,结果如图9~图11所示。

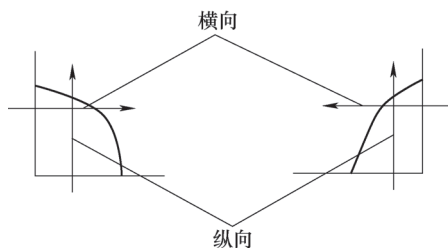


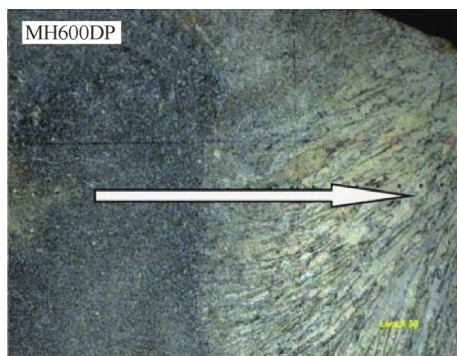
图8 显微硬度测试示意

从图9~图11可看出,1#试样MH540FB钢母材的显微硬度约为160HV, MH540FB钢的显微硬度约为155HV。从母材向焊缝区,显微硬度逐渐增大,在焊缝区达到稳定。2#试样焊缝区显微硬度较高,在210HV左右,但上下波动较大。3#试样焊缝区显微硬度较低,在190HV左右,上下波动相对较小。

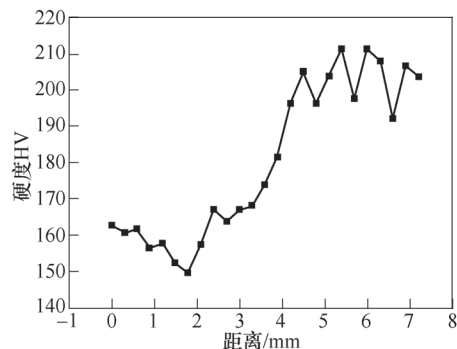
4 结束语

1) 由碳当量和冷裂纹敏感系数计算结果可知, MH600DP钢和MH540FB钢均属于焊接性良好的钢种,冷裂纹敏感系数相对较小,焊接时冷裂倾向不大。

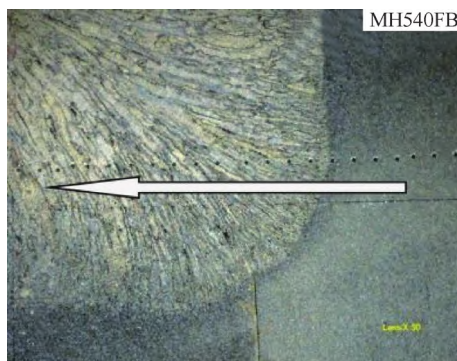
2) 2#试样和3#试样在焊接接头横截面上的焊缝



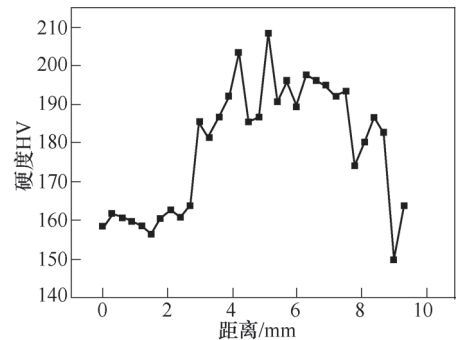
a) MH600DP钢侧打点示意



b) MH600DP钢侧显微硬度



c) MH540FB钢侧打点示意

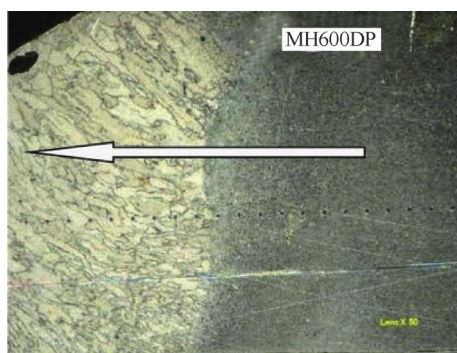


d) MH540FB钢侧显微硬度

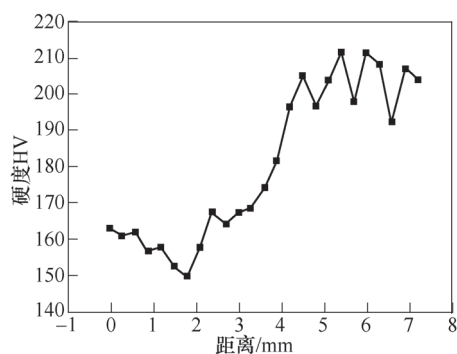
图9 1#试样显微硬度分布

区内均发现不同尺寸的气孔,焊接接头质量等级按标准评级为Ⅱ级。

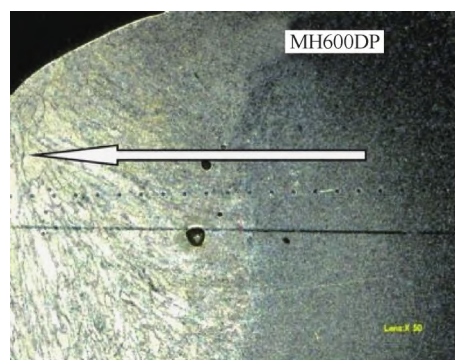
3) 焊缝区组织为铸态组织,从焊缝区向母材区



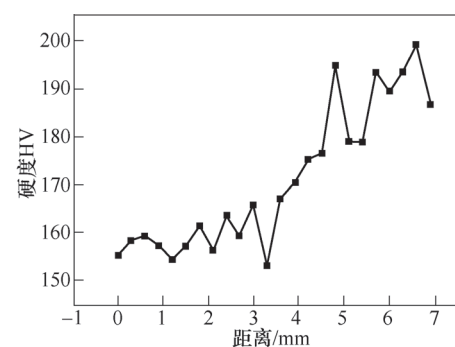
a) MH600DP钢侧打点示意



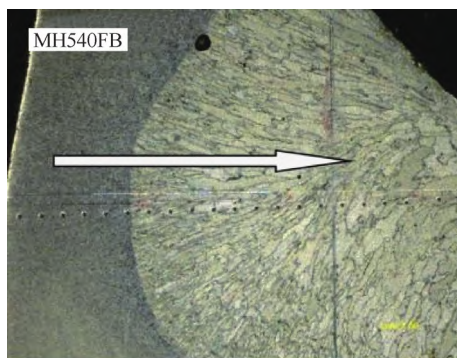
b) MH600DP钢侧显微硬度



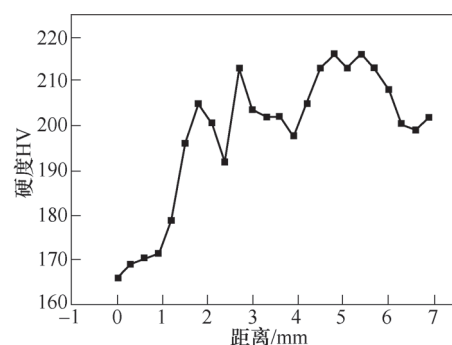
a) MH600DP钢侧打点示意



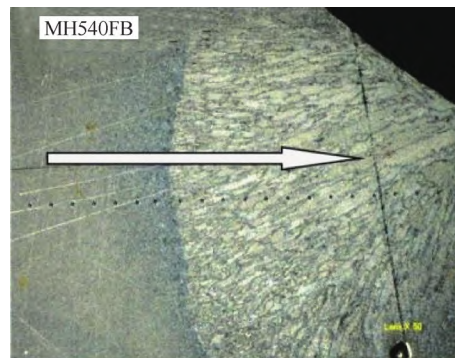
b) MH600DP钢侧显微硬度



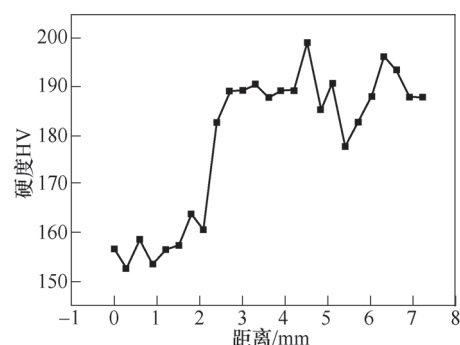
c) MH540FB钢侧打点示意



d) MH540FB钢侧显微硬度



c) MH540FB钢侧打点示意



d) MH540FB钢侧显微硬度

图10 2#试样显微硬度分布

图11 3#试样显微硬度分布

过渡,组织不均匀,变化较大。

4) 从显微硬度上分析,焊缝区显微硬度在200HV左右,普遍高于母材区显微硬度,从母材区

向焊缝区,显微硬度逐渐升高。

参考文献:

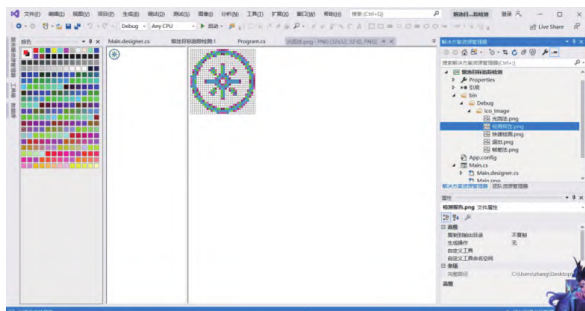
[1] 马廷涛,庄厚川,金科,等. 高强度材料车身轻量化

(下转第44页)

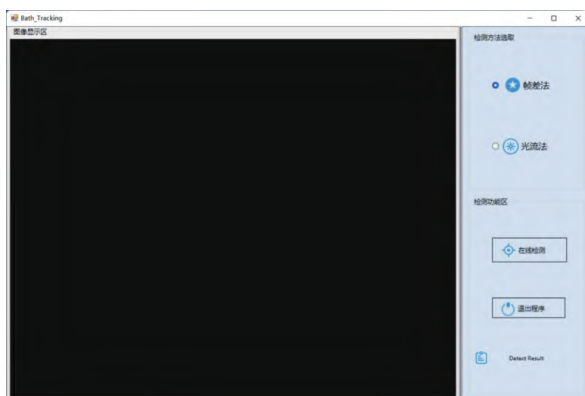
Windows 窗体设计器生成的代码

```
private System.Windows.Forms.SplitContainer splitContainer1;
private System.Windows.Forms.GroupBox groupBox1;
private System.Windows.Forms.GroupBox groupBox2;
private System.Windows.Forms.Button btn_close;
private System.Windows.Forms.Button btn_detect;
private System.Windows.Forms.PictureBox pictureBox_SingleMain;
private System.Windows.Forms.GroupBox groupBox3;
private System.Windows.Forms.RadioButton radioButton2;
private System.Windows.Forms.RadioButton radioButton1;
private System.Windows.Forms.Label label_result;
```

图6 VS主函数窗口的设定



a) 操作界面



b) 显示界面

图7 界面设计

5 结束语

研究基于焊接管道技术来研究熔池视觉跟踪技术方案,以此为后续焊缝判别提供一些思路。搭建好试验平台,通过CCD相机来采集熔池图像序列,通过Halcon软件进行图像分析处理。本文采用光流法、帧间差分法对熔池图像序列进行跟踪研究。试验结果表明,帧间差分法、光流法能够实现熔池跟踪。通过VS与Halcon软件混编,实现了两种算法对熔池的跟踪并通过UI界面显示跟踪效果。

参考文献:

- [1] 闫东升, 马晓芬, 朱健. 一种视频多运动目标跟踪方法研究[J]. 现代计算机(专业版), 2011(18): 17-20.
- [2] 尹宾. 块匹配DS算法在视频防抖动中的应用研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2011.
- [3] 薛晶滢. 基于GAC模型的交互式图像分割算法研究及应用[D]. 西安: 西北大学, 2009.
- [4] 刘珈铨, 侯磊, 毕新忠, 等. 基于机器视觉的注水泵智能监控方法研究[J]. 石油科学通报, 2021, 6(2): 282-291.
- [5] 葛雯, 姜添元. 改进YOLO与Deep sort检测跟踪算法的研究[J]. 计算机仿真, 2022, 39(5): 186-190.
- [6] 生鑫, 李争博, 付思, 等. 燃弧过程中真空旋转电弧轨迹追踪与特性[J]. 电工技术学报, 2024, 39(20): 6553-6563.
- [7] 李月. 基于光流法和语义分割的视觉SLAM系统研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.

MW 20240806

(上接第39页)

- 研究[J]. 汽车工艺与材料, 2019, 11(5): 1-5.
- [2] 杜行. 新型材料和工艺在汽车轻量化中的应用[J]. 科技创新与应用, 2019(5): 148-150.
- [3] 刘营凯, 沈波, 彭星艺, 等. 汽车用热成型钢和双相钢电阻点焊可焊性分析[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(3): 154-158.
- [4] 潘华, 吴岳. DP540双相钢焊接接头组织与拉伸断裂位置研究[J]. 上海金属, 2020, 42(1): 17-22.
- [5] 韩立军, 郭院波. 汽车轻量化车身先进连接技术的应用与发展[J]. 金属加工(热加工), 2021(4): 1-6.
- [6] 李春诚, 陈宇, 杨波, 等. 汽车用高强度双相钢的化学成分和退火温度研究[J]. 金属加工(热加工), 2024(4): 19-23.
- [7] 韩强, 陈沅, 麻永林, 等. 热轧DP590双相钢接头组织的研究[J]. 焊接技术, 2011, 40(7): 13-15.
- [8] 王秀明, 王梓楠. 汽车轮毂加工方法与工艺分析[J]. 金属加工(冷加工), 2023(4): 48-51.
- [9] 冯毅, 路洪洲, 黄光杰, 等. 钕微合金化对汽车用典型双相钢加工性能的影响研究[J]. 汽车工艺与材料, 2022(9): 1-8.
- [10] 霍世宗, 潘华, 丁凯, 等. DP540双相钢钢焊接接头组织特征及其不均匀变形研究[J]. 上海金属, 2019, 41(5): 26-31.

MW 20240806