

钢基堆焊复合板的硬度分布及冲击韧性研究

张紫凌^{1,2,3}, 卢立伟^{1,3}, 李艺权^{1,3}, 杨原凯¹, 谭毅¹, 伏明珠¹, 马旻^{1,3}

(1. 湖南科技大学材料科学与工程学院, 湖南湘潭 411201; 2. 珠海格力电器股份有限公司, 广东珠海 519070; 3. 湖南科技大学湖南省新能源汽车产学研海智创新中心, 湖南湘潭 411201)

摘要 采用熔化极气体保护焊堆焊 Q345 钢基复合板, 利用光学显微镜、维氏硬度计、冲击试验机和扫描电镜对试样进行显微组织、维氏硬度、冲击韧性以及断口等试验观察及分析。结果表明: 堆焊复合板外观质量良好, 无明显焊接缺陷, 从基板至堆焊高强层的组织由块状铁素体和条带状珠光体变化为颗粒状铁素体和珠光体, 到表层呈块状铁素体和团絮状石墨; 焊后硬度存在跃升台阶, 分布较均匀, 冲击韧性高达 64 J/cm², 正火与淬火处理试样的冲击断口为韧性断裂和准解理断裂。制备的 Q345 钢基复合板硬度高, 冲击韧性好, 具有一定的科学研究价值和应用前景。

关键词 Q345 钢; 堆焊复合板; 硬度; 冲击韧性

中图分类号 TG146.2

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2020)01-0057-05

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20191023.005

Study on the hardness distribution and impact toughness of steel-based composite plate fabricated by built-up welding

ZHANG Ziling^{1,2,3}, LU Liwei^{1,3}, LI Yiquan^{1,3}, YANG Yuankai¹, TAN Yi¹, FU Mingzhu¹, MA Min^{1,3}

(1. School of Material Science and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Gree Electric Appliances Inc of Zhuhai, Zhuhai 519070, China;

3. Hunan Provincial Overseas-wisdom Innovation Center of New Energy Vehicle in Industrial-Academic-Research Cooperation, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract The Q345 steel base composite plate is surfaced with melting electrode gas shielded welding. The microstructure, microhardness distribution, Vickers hardness, impact toughness and fracture were observed and analyzed by optical microscope, Vickers hardness tester, impact tester and SEM. The results show that surfacing clad plate has good appearance quality and no obvious welding defects, the microstructure changes from the substrate to the high strength layer, from bulk ferrite and striped pearlite to granular ferrite and pearlite, and the final skin layer are block ferrite and flocculent graphite. After welding, the hardness value has a jump step, and the distribution is uniform. The impact toughness can reach up to 64 J/cm². Besides, the impact fracture specimens treated by normalizing and quenching are ductile fracture and quasi-cleavage fracture, respectively. The Q345 steel-based composite plate prepared in this paper has high hardness and good impact toughness, which has important scientific research value and application prospect.

Keywords Q345 steel; built-up; welding plate; hardness; impact toughness

由于工业体系的快速建设和发展, 产品升级修复需求不断增加。焊接所用复合材料以其易于推广且实际操作方便的特点而引起关注^[1-3]。焊接复合板结合多种材料优势, 多用在力学承载复杂的环境中^[4-5]。堆焊是一种重要的表面工程技术, 在钢基体上熔敷其他堆焊层可以有效利用多种金属的优势。堆焊制备出有效改进钢基体硬度、耐磨性和耐蚀性的材料, 已广泛应用于航空航天、机械制造、冶金矿山及建筑材料等行业^[6], 如以耐腐蚀为目的的压力容器和重油

脱硫装置内壁的堆焊; 以耐热、耐磨为目的的轧钢机轧辊表面堆焊和热锻模堆焊; 以提高耐磨性为目的的挖掘机铲齿面堆焊以及各机械零部件的堆焊等^[7-10]。Q345B 是低合金结构钢, 有良好的塑性和焊接性, 综合力学性能佳^[11-13], 在桥梁、矿山机械、车辆等承载结构有大量的工程应用^[14]。

面临科技发展的需要, 许多材料服役环境对其硬度和冲击韧性提出更高要求, 且需要严格控制其成本。因此, 作者选用成本低廉的 Q345B 钢为研究对

收稿日期: 2019-08-18; 修回日期: 2019-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(51975207); 湖南省自然科学基金优秀青年项目(2019JJ30010); 湖南省教育厅资助项目(17B089)

第一作者: 张紫凌, 女; 研究方向为焊接与塑性变形工艺及理论。E-mail: 936614953@qq.com。

通信作者: 卢立伟, 男, 博士, 副教授; 主要从事焊接与塑性变形工艺及理论等方面的研究。E-mail: equlqyz@126.com。

象,采用中间过渡层法,利用气体保护焊堆焊出高强度合金层,重点开展复合材料的显微组织、硬度分布以及冲击韧性和断口等方面研究,为高性能堆焊复合材料的加工制备提供重要参考价值。

1 试验

1.1 试样制备

堆焊基材选取热轧态 Q345B 钢板,采用线切割加工出尺寸(长×宽×厚)为 70 mm×90 mm×12 mm 的钢板,为制备出表层高强度的堆焊复合板,提高界面结合性能,先在钢板表层过渡堆焊直径为 1.2 mm 的 ZM 药芯焊丝,用手工锤敲击表面去除焊渣,并用砂纸打磨表面至光亮状态,过渡堆焊层厚度为 1 mm,在光亮的过渡层表层继续堆焊直径为 1.2 mm 的 YD788 药芯焊丝,形成高强层,同样采用手工锤敲击表面去除焊渣,并用砂纸打磨表面至光亮状态,高强层厚度为 5 mm。Q345B 钢、药芯焊丝 ZM 和 YD788 的主要化学成分,如表 1 所示。

堆焊焊接选用体积分数为 80% 氩气与 20% 二氧化碳气体保护焊,焊接电流为 320 A,焊接电压为 29.4 V。用铣刀将堆焊复合板中 Q345B 钢的厚度铣至 4 mm,再用线切割将堆焊复合板切至 55 mm×10 mm×10 mm 试样。用砂纸将试样的侧面打磨至抛光级别,为检验复合板冲击韧性,在试样高强层侧的中间开 45°V 形槽,槽深为 2 mm,堆焊示意图,如图 1 所示。

表 1 复合材料主要成分(质量分数/%)

Table 1 Main components of the composite (mass fraction/%)

元素	Q345	ZM	YD788	元素	Q345	ZM	YD788
C	0.12	0.14	4.6	Ni	—	1.100	—
Si	0.25	2.00	0.7	P	0.025	0.007	0.003
Mn	1.20	1.60	1.2	S	0.025	0.007	0.003
Cr	—	2.50	24.0				

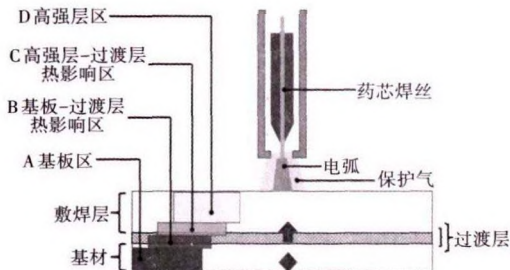


图 1 堆焊示意图

Fig.1 Schematic diagram of built-up welding

1.2 方法

将铣好且打磨至抛光级别的小块试样侧面用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀,利用 Leica DMIRM

光学显微镜观察(图 1)的基材区、基材-过渡层热影响区、高强层-过渡层热影响区及高强层区的显微组织,其中基板腐蚀时间为 25 s,过渡层用时 5 s,高强层腐蚀用时为 90 s。利用上海荼明光学显微镜 EF3HP-1 型硬度计对堆焊复合板进行硬度测试,基板层和过渡层用 1 N 的加载,高强层用 5 N 加载,保载时间设置为 10 s,从距基板边缘 1.5 mm 处,每隔 0.5 mm 测试硬度,直到 9.0 mm 处,共测 16 个位置的硬度值。为平衡优化堆焊复合板的硬度与冲击韧性,将试样进行 870、890、910 °C 的正火和 850 °C 的淬火热处理,正火保温 20 min 后空冷,淬火保温 1 h 后油冷,热处理工艺,如图 2 所示。此外,由于焊接、正火和淬火时间涉及到的加热、保温、冷却时间相差比较大,横坐标不易标注出数据。热处理后测量距基板边线 2 mm 处和距高强层边线 3 mm 处的硬度,使用 JBS-300.500A 数字式冲击试验机对热处理试样进行冲击断裂试验,并将冲击后的试样断口进行扫描电镜分析。

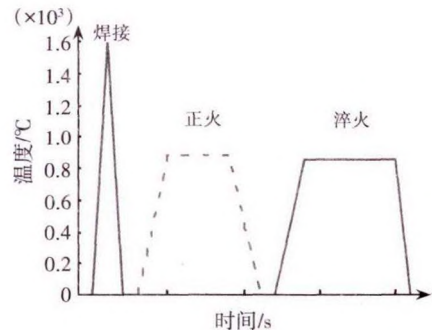


图 2 热处理工艺

Fig.2 Heat treatment process

2 结果与讨论

2.1 堆焊复合板宏观形貌

堆焊复合板,如图 3 所示。界面结合部位呈波浪状,这是由于焊接过程中板件受到焊接应力而产生一定程度的弯曲变形所致。基板层的厚度约为 3.7 mm,过渡层和高强层之间未明显分界,二者融合较好。堆焊复合板试样经研磨后发现,高强层被铣削表面平滑有金属光泽,未见明显裂纹,垂直于被铣削平面的侧



图 3 堆焊复合板实物图

Fig.3 Actual sample of built-up welding plate

面可明显观察到复合板无明显焊渣以及气孔等缺陷,界面结合处无裂纹,呈较好焊接成形,这主要是由于采用的过渡层材料ZM与基板和高强层均具有良好的焊接结合性能。

2.2 堆焊复合板显微组织

图4为堆焊复合板的显微组织。由于复合板结构较复杂,涵盖基板层、过渡层和高强层,其内部组织分布更繁杂,为此,在堆焊复合板中选取具有代表性的基板区、基板-过渡层热影响区、高强层-过渡层热影响区和高强层区进行观察与分析。

在基板区呈明显铁素体和珠光体交替分布的带状组织,如图4a所示。这主要是由于Q345B钢板冶炼时

的夹杂物含量较多,在热轧变形过程中,低碳钢中的夹杂物被挤压破碎后沿轧制变形的方向分布。当钢板从轧制温度冷却时,这些杂质率先成为铁素体组织生长的核心,使铁素体在夹杂物周围形成带状组织,最后铁素体带之间的奥氏体转变为珠光体。这种由于夹杂物引起的带状组织难以用热处理消除,在焊接成形后依然存留下来。图4b为基板-过渡层热影响区组织。上侧为过渡层,下侧为Q345B基板,焊缝附近在过渡层侧出现光亮的脱碳层,且越接近焊缝处脱碳越严重,如箭头所指。这主要是由于过渡层与Q345B钢有一定的浓度差(表1),外加堆焊的持续热输入,在较高温度下,碳的扩散速率加大且易氧化,造成过渡层脱碳。

图4c为过渡层-高强层热影响区组织。无明显晶界轮廓和过渡分界,说明过渡层与高强层材料具有优良的焊接结合能力,组织主要由细小的铁素体和珠光体组成。图4d为高强层组织。由于焊丝中的高碳含量,堆焊厚度较大,焊接过程中层与层间不断地加热,使得钢中最低能量排列的珠光体转化为铁素体和渗碳体。高强层中共晶组织呈网状分布在枝晶组织周围,共晶组织晶粒尺寸逐渐减小,弥散均匀分布在晶界内部。这种焊接凝固过程中形成的组织差异,主要由冷却速度不同所致。冷却速度缓慢时,室温下得到铁素体基体,冷却速度较快时,易得到珠光体基体。由于高强层在堆焊时反复受到低于共析温度的加热,高碳钢球化,且随着时间加长,珠光体破碎,致使形成片状石墨。

2.3 堆焊复合板显微硬度分布

采用过渡层堆焊高硬度合金材料已被证实是较为科学的方法,于跟喜^[15]开展了有无过渡层对堆焊Q345钢复合板硬度的影响研究,发现有过渡层堆焊材料的最高硬度高达429HV,远高于直接堆焊复合材料的最高硬度409HV。图5为堆焊复合板的硬度分布曲线图。基板硬度约为165HV,高强层硬度最高可达447HV。基板区主要位于-4~-2 mm,硬度值较为稳

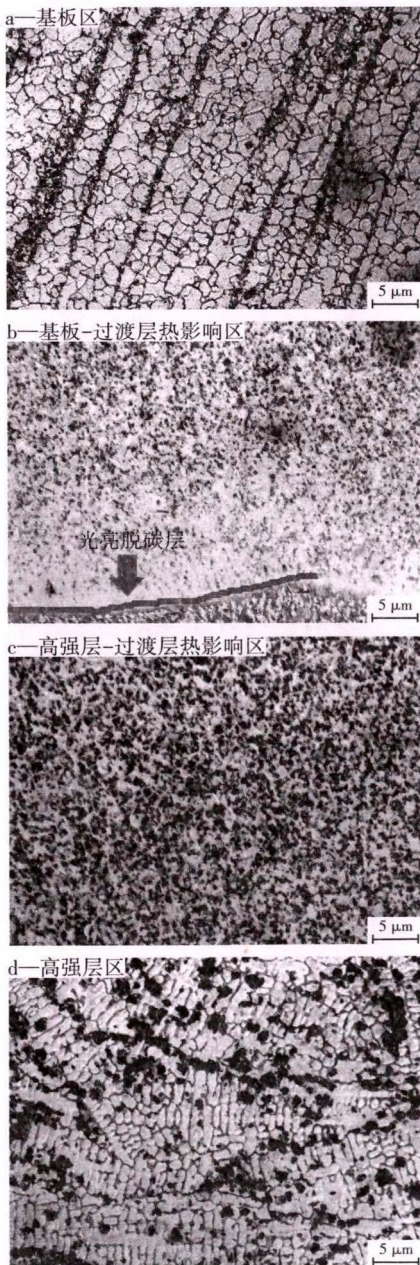


图4 堆焊复合板显微组织

Fig.4 Microstructure of built-up welding plate

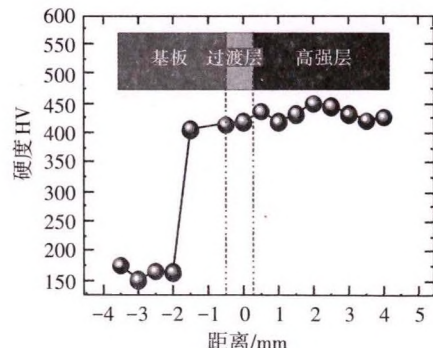


图5 堆焊复合板硬度分布

Fig.5 Hardness distribution of built-up welding plate

定;硬度出现较大变化的位置在-2~-1 mm,这主要是由于该区间是界面结合部位,Q345B钢在堆焊过渡层发生表层碳扩散导致碳势增加;-1 mm后硬度有一定程度升高,主要是高强层材料在过渡层表面熔敷所致,硬度变化不大,主要在425HV上下波动。过渡层的设计使高强层与基板间的硬度差有所缓冲,试样在堆焊层的硬度分布变得更均匀。

结合图4,基板晶粒呈细小等轴状,同时还具有加强的纤维组织,与普通Q345钢130HV~170HV的硬度相比有所偏高。虽然高强层晶粒度与基板相比偏小,由于析出了大量的石墨和一些高硬度碳化物,促使硬度得到极大提升。

为进一步提高堆焊复合板的硬度,将焊接试样进行正火和淬火热处理,并分别进行硬度测试。堆焊复合板热处理前后硬度对比,如图6所示。淬火处理后硬度值最高,基板硬度为244HV,高强层硬度高达853HV。由于淬火介质是机油,比水冷速度小很多,因此,未发现淬火试样表面出现淬火裂纹。正火处理试样中,890℃正火处理的硬度最高,基板和高强层的硬度分别为189HV和815HV。正火870℃相较于890℃而言,温度稍低,试样组织的细化程度稍弱。而910℃试样内应力释放比890℃的更充分,所以890℃正火处理试样的硬度性能最佳。

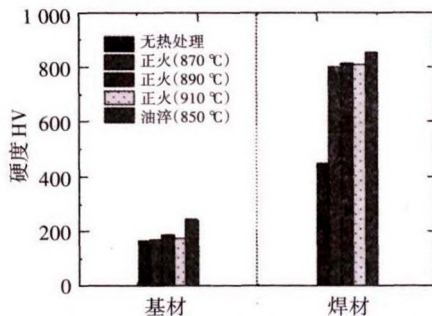


图6 堆焊复合板热处理前后硬度对比图

Fig.6 Hardness comparison of built-up welding plate before and after heat treatment

2.4 冲击韧性

材料在获得高硬度的同时须保持一定的冲击韧性,以应对复杂的服役环境,避免脆性断裂失效。为此,选取堆焊复合板试样、淬火试样和890℃正火试样分别进行3次冲击试验,并求取平均值评估其冲击韧性。热处理前后堆焊复合板的冲击韧性,见表2。

无热处理试样、890℃正火试样和850℃淬火试样的冲击韧性值分别为64、50、28 J/cm²。850℃淬火试样的硬度虽然最高,但冲击韧性值最低,主要是由于淬火后得到的马氏体组织硬而脆所致;无热处理堆焊试

表2 堆焊复合板热处理前后冲击韧性对比

Table 2 Impact toughness comparison of built-up welding plate before and after heat treatment

工艺	冲击韧性值/(J·cm ⁻²)			平均值/(J·cm ⁻²)
	α ₁	α ₂	α ₃	
无热处理	62	68	58	64
890℃正火	52	47	51	50
850℃淬火	24	30	32	28

样的冲击韧性值最高,这是由于堆焊相当于给试样进行热处理,每焊一层试样都要经过加热、冷却又加热的过程,但是其硬度较低,仅为425HV。值得注意的是3次冲击韧性测量试验所得的冲击韧性值有所波动,幅度不大,这主要与受堆焊复合板内部组织不均匀和带状组织明显等因素的影响有关。赵罗根^[16]在Q345R钢板冲击韧性波动原因分析中也有过类似发现。

图7为890℃正火试样和850℃淬火试样冲击断口的宏观与SEM图。图7a为890℃正火试样冲击断裂的宏观形貌图。高强层一侧(图片中靠中位置的一侧)的断面没有太多凸起和粘连,基板一侧的断面有明显撕裂带。图7b为堆焊复合板中Q345钢处在室温下发生冲击断裂断口的SEM图。内部存在大量不规则的圆形韧窝,韧窝细小且均匀,属于韧性断裂。图7c为堆焊复合板中高强层在室温下冲击断裂断口的SEM图。韧窝尺寸大小不均,呈交错分布状态,且韧窝较深,与基板相比,韧窝呈不规则的多边形,边界不平整,整体尺寸偏大,同属于韧性断裂。该发现与禅志善^[17]在承压设备用钢焊接接头粗晶热影响区的冲击断口形貌中的研究较为相似。

图7d为850℃淬火试样冲击断裂的宏观形貌图。整个断口断裂均未发现明显粘连,断裂凸起少。图7e为堆焊复合板中Q345钢在室温下发生冲击断裂断口的SEM图。韧窝不明显,深度较浅,存在明显的撕裂脊线,属于准解理断裂。图7f堆焊复合板中高强层在室温下发生冲击断裂断口的SEM图。韧窝开口尺寸较大,甚至出现明显的撕裂韧窝。仔细观察发现图7e、f中韧窝内部具有河流状花样分布,韧窝被撕裂分割成各种小单元,短程河流状花样表明,裂纹在失稳扩展阶段由许多微小裂纹汇合导致最终断裂。图7b、c、e、f中韧窝底部或边缘均出现不规则球状夹杂物,这主要是由于复合材料中合金元素含量高,形成了碳化物或氮化物,同时碳化物的尺寸较小,发生冲击断裂变形时,这些球状的碳、氮化物脱离基体形成球状孔洞。

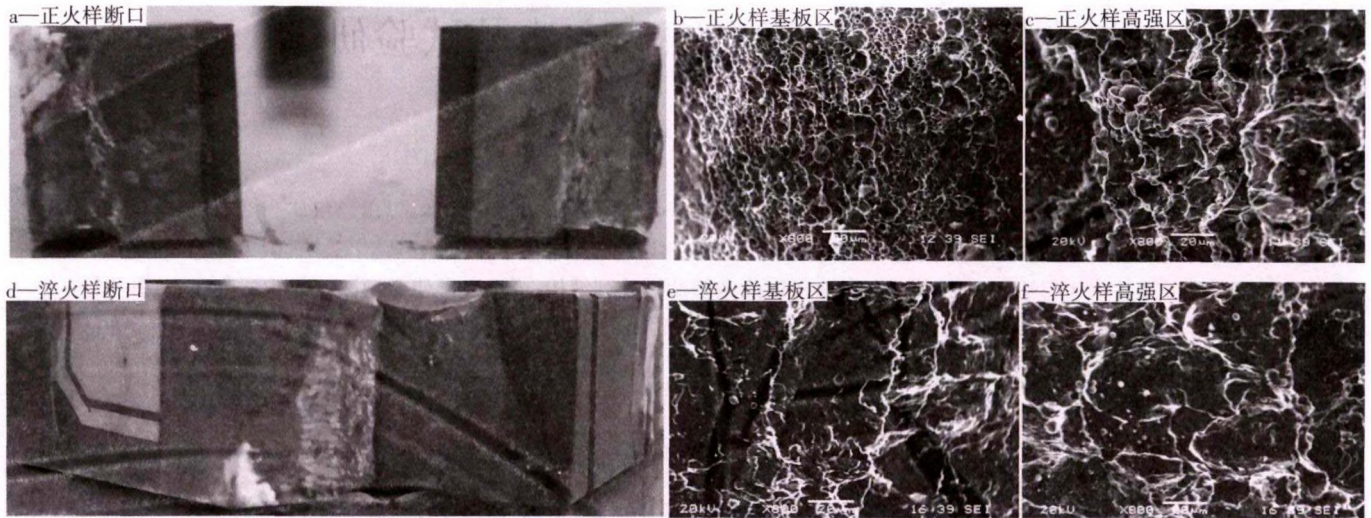


图7 890 °C正火和850 °C淬火试样的冲击断口图

Fig.7 Impact fracture of samples processed by 890 °C normalization and 850 °C quenching

3 结论

1) 熔化极气体保护焊堆焊复合板无裂纹、夹渣,复合界面结合良好。基板区域组织为块状铁素体和条带状珠光体,基体-过渡层热影响区形成光亮的脱碳层,高强度层-过渡层热影响区为珠光体+铁素体,高强度层为团絮状石墨和块状铁素体组织。

2) 堆焊复合板基体和高强度层的维氏硬度分别为165HV和447HV;热处理后,硬度显著提升,890 °C正火处理可将基板和高强度层的维氏硬度分别提升24HV和372HV;淬火处理试样基板和高强度层的维氏硬度达到最高,分别为244HV和853HV。

3) 热处理对堆焊复合板的冲击韧性具有重要影响,淬火处理虽可大幅提升硬度,但冲击韧性大幅下降,属脆性混合的准解理断裂;正火处理试样硬度提升较大,冲击韧性略微降低,呈典型的韧窝断裂。

4 参考文献

- [1] 任艳艳,张国赏,魏世忠,等. 我国堆焊技术的发展及展望[J]. 焊接技术,2012,41(6):1-5.
- [2] 周俊鹏,何明刚,崔淑芬. 半自动熔化极气体保护焊在不锈钢复合板覆层堆焊中的应用[J]. 石油化工设备,2018,47(6):65-68.
- [3] 贾登峰,赵菲,黄庆学,等. 不锈钢复合板的开发及其在焊接工程中的应用[J]. 热加工工艺,2019,48(10):21-24.
- [4] 禹业晓. 低碳钢堆焊表面改性工艺及其热过程分析[D]. 南

昌:南昌大学,2013.

- [5] 李强. 小直径连铸辊套的堆焊修复[J]. 焊接技术,2019,48(4):102-104.
- [6] 安同邦,由恒源,李弟,等. TA2/Q235复合板Nb/Cu双过渡层熔焊焊缝组织性能[J]. 热加工工艺,2019,48(9):18-21.
- [7] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册:材料的焊接[M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2014:970.
- [8] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册:焊接方法及设备[M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2015:761.
- [9] 郭克星,夏鹏举. 高铬铸铁耐磨性的研究进展与展望[J]. 铸造技术,2018,39(9):2138-2141.
- [10] 姬长波. WC颗粒增强高铬铸铁复合材料的制备及其性能研究[D]. 济南:山东大学,2018.
- [11] 潘强,刘尔玺,冯淳元,等. Q235钢板表面堆焊不锈钢改性处理[J]. 焊管,2017,40(4):22-26.
- [12] 邢晓磊. 电弧堆焊/激光重熔制备贝氏体表面改性层及强韧化机理研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2017.
- [13] 李丹,宋珏蓉,李长青,等. Q345B钢CO₂气体保护焊接接头组织与性能的研究[J]. 热加工工艺,2018,47(17):184-186.
- [14] 张舒婷,周友龙,李雄兵,等. 900 MPa钢与Q345B异种钢焊接接头的组织与力学性能分析[J]. 电焊机,2015,45(9):107-109.
- [15] 于跟喜. 低合金钢表面耐蚀层堆焊工艺及堆焊层组织性能研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2015.
- [16] 赵罗根. Q345R钢板冲击韧性波动的原因分析与改进.[C]//2012年全国轧钢生产技术论文集(下). 北京:中国有色金属学会,2012:667-672.
- [17] 禅志善. 承压设备用钢焊接接头粗晶热影响区冲击韧性表征[D]. 兰州:兰州理工大学,2018.