

回火温度对40CrNiMo调质钢CMT堆焊HAZ组织性能的影响

王靖博¹, 连明洋¹, 付雅迪¹, 刘胜新¹, 黄智泉², 陈永¹

(1. 郑州大学材料科学与工程学院, 河南郑州 450001; 2. 郑州机械研究所有限公司, 河南郑州 450001)

摘要:针对海洋钻井平台齿轮的修复问题,采用冷金属过渡(CMT)技术在40CrNiMo调质钢表面进行堆焊,利用扫描电镜、显微硬度测试、冲击性能测试和拉伸性能测试等手段,研究了焊后回火温度对40CrNiMo调质钢堆焊热影响区(HAZ)组织和性能的影响。结果表明:随着焊后回火温度的升高,焊接热影响区的硬度逐渐下降,堆焊试样的抗拉强度逐渐下降,伸长率逐渐提高。焊后回火温度为400℃和500℃时,析出的碳化物在马氏体的条界、束界和晶界上分布,恶化了堆焊试样的冲击性能;焊后回火温度为600℃时,碳化物聚集长大和球化,并愈发弥散分布,从而改善了冲击性能。

关键词:40CrNiMo调质钢;热影响区;焊后回火;显微组织;力学性能

中图分类号:TG156.5 **文献标志码:**A **文章编号:**0254-6051(2021)05-0099-05

Effect of tempering temperature on HAZ microstructure and properties of CMT welded 40CrNiMo quenched and tempered steel

Wang Jingbo¹, Lian Mingyang¹, Fu Yadi¹, Liu Shengxin¹, Huang Zhiquan², Chen Yong¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450001, China;

2. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou Henan 450001, China)

Abstract: In order to repair the marine drilling platform gear, 40CrNiMo quenched and tempered steel was surfacing welded by cold metal transfer (CMT) technology. Effects of post-welding tempering temperature on HAZ microstructure and properties of the 40CrNiMo quenched and tempered steel were investigated via the characterization methods such as scanning electron microscope (SEM), microhardness test, impact test and tensile test. The results show that with the increase of post-welding tempering temperature, both the microhardness of the HAZ and the tensile strength of the welded specimen decrease, while the elongation increases gradually. When tempered at 400℃ and 500℃, the precipitated carbides are distributed on the lath boundary, block boundary and grain boundary of martensite, which worsens the impact property of the welded specimens. When tempered at 600℃, the carbides are aggregated, spheroidized, and distributed more dispersedly, so that the impact property is improved.

Keywords: 40CrNiMo quenched and tempered steel; heat affected zone; post-welding tempering; microstructure; mechanical properties

收稿日期:2020-10-18

基金项目:郑州市重大科技创新专项项目(188PCXZX784)

作者简介:王靖博(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为先进金属材料及加工新技术,E-mail:wangjingbo246@163.com。通讯作者:陈永,教授,E-mail:cheny66@zzu.edu.cn

DOI:10.13251/j.issn.0254-6051.2021.05.016

参考文献:

- [1] Koistinen D P, Marburger R E. A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels[J]. Acta Metallurgica, 1959, 7(1): 59-60.
- [2] 张孝福. 超级马氏体不锈钢:海洋用不锈钢新系列[J]. 太钢译文, 1999(4): 66-70.
- [3] 于丽萍, 刘骁禹. 热处理对0Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. 一重技术, 2005(4): 29-30.
- [4] 周彤, 卫心宏. ZG06Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢叶片热处理工艺研究[J]. 铸造设备与工艺, 2017(3): 32-34.
Zhou Tong, Wei Xinhong. Heat treatment process of ZG06Cr13Ni4Mo martensitic stainless steel blade foundry[J]. Equipment & Technology, 2017(3): 32-34.

随着社会的发展,人们对能源的需求量不断增加,陆地上已探明的资源随着开采日渐减少,但随着海洋探测技术的发展,海洋中探测到的油气资源逐渐增多^[1-3]。自升式海洋钻井平台是海洋油气资源开采的主要装备,在恶劣的海洋条件下,其内部的升降齿轮经

- [5] 张洪生, 付晓虎, 张苏星. ZG04Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢力学性能研究[J]. 一重技术, 2018(1): 43-47.
Zhang Hongsheng, Fu Xiaohu, Zhang Suxing. Mechanical property test of ZG04Cr13Ni4Mo martensitic stainless steel[J]. CFHI Technology, 2018(1): 43-47.
- [6] 李生文, 董方奇, 张世明, 等. ZG06Cr16Ni5Mo马氏体不锈钢材料力学性能研究[C]//2016年中国电机工程学会年会. 2016年清洁高效发电技术协作网年会论文集, 2016: 1-5.
- [7] 张兴. 低屈服比高强度结构钢的发展概况[J]. 宽厚板, 2018, 24(4): 35-38.
Zhang Xing. General development of high strength structural steel with low yield-tensile strength ratio[J]. Wide and Heavy Plate, 2018, 24(4): 35-38.

过一段时间使用会发生不同程度的磨损,部分磨损严重的齿轮将影响平台的正常使用^[4-5]。如果仅因齿面磨损就将整个齿轮报废,将会造成极大的资源浪费。堆焊是对齿类零件进行修复和强化的常用方法,采用堆焊法进行修复时,可以实现堆焊层与母材之间的冶金结合,并且修复效率高,修复成本低^[6-7]。

升降齿轮的材质为 40CrNiMo 调质钢,该钢种为中碳调质钢,焊接性差,焊接热影响区(HAZ)存在严重的脆化现象,为堆焊修复工件的性能薄弱区域^[8-10]。研究表明,焊后回火处理可以改善 HAZ 的组织和性能^[11-13]。因此,本文通过设计 3 种不同的回火温度对 40CrNiMo 调质钢冷金属过渡(CMT)堆焊后的试样进行焊后回火处理,研究回火温度对堆焊 40CrNiMo 钢 HAZ 组织和性能的影响,以期为 40CrNiMo 调质钢 CMT 堆焊修复工艺的制定提供理论指导。

1 试验材料与方法

试验选用尺寸为 160 mm × 150 mm × 20 mm 的 40CrNiMo 调质钢作为焊接母材,其化学成分如表 1 所示,力学性能如表 2 所示,40CrNiMo 调质钢的组织为回火索氏体,如图 1 所示。

表 1 40CrNiMo 调质钢的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of the 40CrNiMo quenched and tempered steel (mass fraction, %)

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	S	P
0.37 ~ 0.44	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37	1.25 ~ 1.66	0.60 ~ 0.90	0.15 ~ 0.25	≤ 0.025	≤ 0.025

表 2 40CrNiMo 调质钢的力学性能
Table 2 Mechanical properties of the 40CrNiMo quenched and tempered steel

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	冲击吸收能量(-40℃)/J
≥835	≥980	≥12	≥41

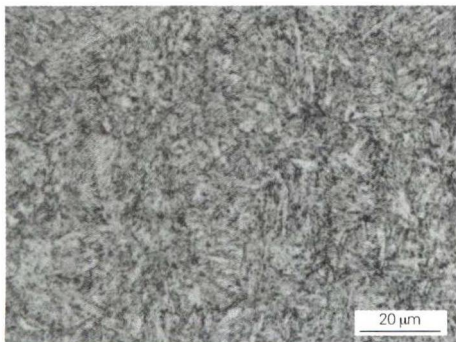


图 1 40CrNiMo 调质钢母材的显微组织
Fig. 1 Microstructure of the 40CrNiMo quenched and tempered steel as base metal

采用 TPS4000CMT 焊机对 40CrNiMo 调质钢进行单层多道堆焊。焊前将 40CrNiMo 调质钢板放入 250℃ 保温炉中保温 2 h,随后取出进行堆焊。堆焊完成后,将其中 1 块试板由石棉布包裹缓冷至室温;另外 3 块试板放入箱式电阻炉进行回火处理,回火温度分别设定为 400、500 和 600℃,保温时间为 4 h,保温完成后取出空冷至室温。CMT 堆焊工艺参数如表 3 所示。

表 3 CMT 堆焊工艺参数
Table 3 Process parameters of the CMT welding

送丝速度/ (m · min ⁻¹)	焊接速度/ (mm · s ⁻¹)	摆宽/ mm	电流/ A	电压/ V
4	3	12	129	16

在热处理前后试板的焊缝中部截取金相试样,利用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀 10 s,在 Quanta 2000 型扫描电镜上进行显微组织观察;利用 HVS-1000 型显微硬度计进行显微硬度测试,载荷砝码为 300 g,保荷时间为 10 s;利用 ZBC2452-C 型摆锤式冲击试验机测试冲击性能,冲击试验温度为 -40℃,并采用 Quanta 2000 型扫描电镜观察断口形貌;采用 SHT4605 型微机控制电液伺服万能试验机测试拉伸性能。

2 试验结果与讨论

2.1 回火温度对显微组织的影响

图 2 为不同回火温度下堆焊 40CrNiMo 钢完全淬火粗晶区显微组织的 SEM 照片。由图 2 可知,随着回火温度升高,马氏体板条发生合并变宽,在 600℃ 回火时,α 相的回复已十分明显,基本观察不到板条形态。另外,随着回火温度的变化,析出碳化物分布和形状也发生明显变化。在 400℃ 回火组织中,可以观察到大量的条状碳化物分布在马氏体的条界和束界,随着回火温度升高,析出的碳化物数量增多,碳化物发生聚集长大和球化,在 600℃ 回火组织中,可以观察到碳化物大部分为球状,并且分布的更加弥散。

钢的马氏体组织是碳和合金元素固溶于 α-Fe 形成的过饱和固溶体,在室温下为亚稳状态,其稳定态为铁素体加碳化物,回火热处理将会加快其从亚稳态转变为稳定态的过程^[14-15]。因此在 400℃ 回火时,过饱和的 C 从马氏体中析出,形成碳化物析出相,析出相优先分布在界面处。当回火温度继续升高时,原子热激活能量增大,迁移能力增强,马氏体中逐渐析出渗碳体,并使渗碳体均匀分布于 α 相基体上。

2.2 回火温度对显微硬度的影响

图 3 是回火处理前后堆焊试样熔合线附近显微硬

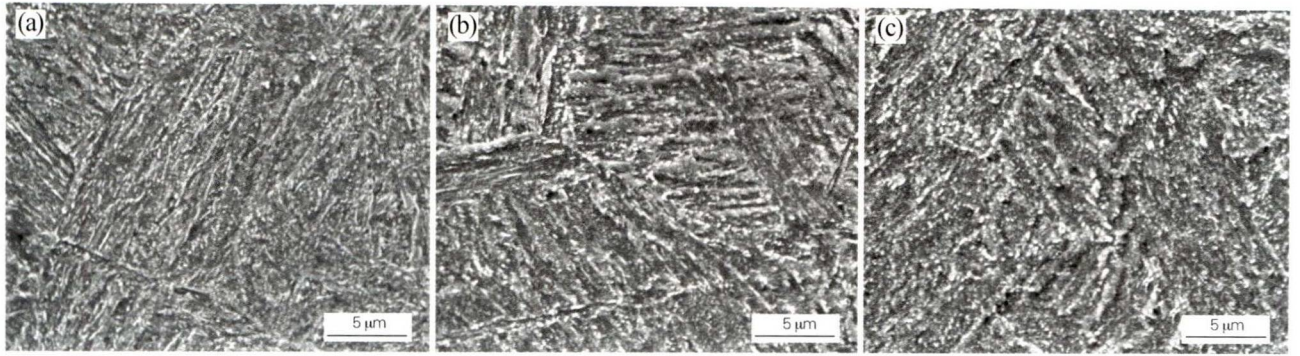


图2 不同回火温度下堆焊40CrNiMo钢完全淬火粗晶区的SEM照片

Fig.2 SEM images of coarse grain heat affected zone in the welded 40CrNiMo steel tempered at different temperatures (a) 400 °C; (b) 500 °C; (c) 600 °C

度变化曲线。图3中坐标原点处的线为熔合线,熔合线左侧为焊缝区的硬度,右侧依次为HAZ和母材的硬度。由图3可知,未回火处理、400 °C和500 °C回火时大部分区域的硬度高于标准上限值(郑州机械研究所齿轮生产相关企业标准,下同),只有600 °C回火时大部分区域的硬度满足标准值的范围要求;并且随着回火温度升高,HAZ的显微硬度整体下降,回火温度升高,马氏体板条内部的位错密度降低和组织内部过饱和的C元素析出是硬度下降的主要原因。

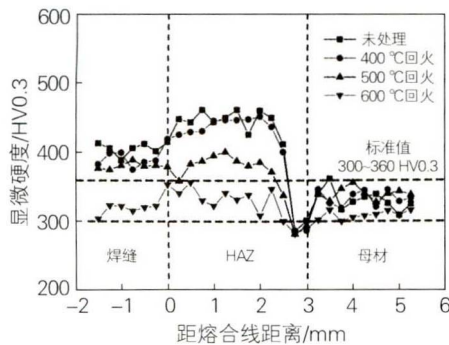


图3 回火处理前后堆焊试样熔合线附近的显微硬度分布

Fig.3 Microhardness distribution profiles near the fusion line of the welded specimens before and after tempering

2.3 回火温度对冲击性能的影响

图4为不同回火温度处理后堆焊试样的冲击性能测量结果。由图4知,在400 °C回火时,冲击吸收能量最低,平均值为21.9 J,低于未回火处理试样的冲击性能;随着回火温度升高,冲击性能逐渐改善,在500 °C回火时,冲击吸收能量与未回火处理试样冲击吸收能量相差不大;当回火温度升高到600 °C时,冲击吸收能量大幅度提升,高于未回火处理试样的冲击性能,并且远高于标准值41 J。

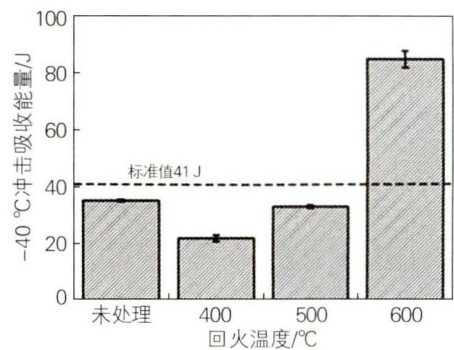


图4 不同回火温度下堆焊试样的冲击性能

Fig.4 Impact properties of the welded specimens tempered at different temperatures

图5为不同温度回火处理后堆焊试样HAZ的冲击断口形貌。由图5(a~c)可知,未回火处理、400 °C回火和500 °C回火时HAZ的断口形貌以准解理断裂为主,有少量撕裂棱和浅韧窝区存在。由图5(d)可知,当回火温度为600 °C时,HAZ的断口形貌以韧窝和韧性撕裂棱为主,韧窝区所占的面积在70%左右。这表明,在600 °C回火时,焊接热影响区的冲击性能显著改善。

碳化物析出相的尺寸和分布会显著影响材料的冲击性能^[16-17]。当碳化物分布在马氏体的条界、束界和晶界上时,在断裂过程中,位错会在碳化物周围塞积,造成局部区域应力集中,致使脆硬的碳化物破碎,形成二次裂纹或者微孔,诱发脆性断裂^[18]。由图2可知,在400和500 °C回火时,碳化物沿着马氏体板条界、束界和晶界分布,因此在冲击断裂过程中,这些碳化物周围发生应力集中,诱发准解理断裂,导致材料冲击吸收能量降低。

2.4 回火温度对拉伸性能的影响

图6为不同温度回火处理后堆焊试样的拉伸性能。由图6(a)可知,在400 °C回火时试样的抗拉强度

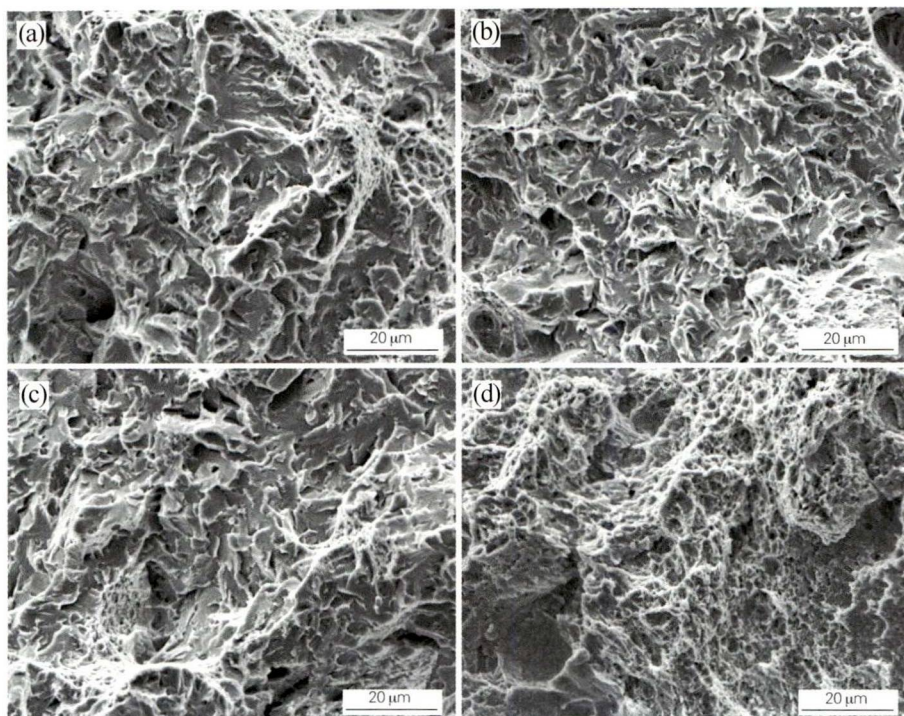


图 5 不同回火温度下堆焊试样 HAZ 的冲击断口形貌
(a) 未回火; (b) 400 °C; (c) 500 °C; (d) 600 °C

Fig. 5 Impact fracture morphologies of the welded specimens HAZ tempered at different temperatures
(a) non-tempered; (b) 400 °C; (c) 500 °C; (d) 600 °C

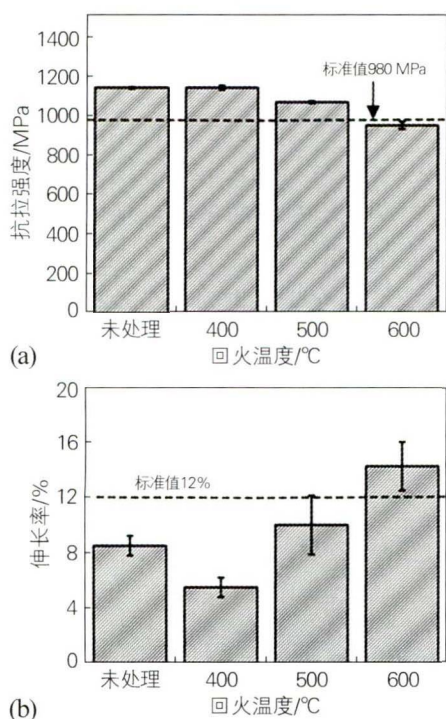


图 6 不同回火温度下堆焊试样的拉伸性能
(a) 抗拉强度; (b) 伸长率

Fig. 6 Tensile properties of the welded specimens tempered at different temperatures
(a) tensile strength; (b) elongation

与未回火处理试样的抗拉强度相当;随着回火温度升高,抗拉强度逐渐下降,当回火温度为 600 °C 时抗拉强度略低于标准值。由图 6(b) 可知,未回火处理的试样伸长率高于 400 °C 回火时的伸长率,低于 500 °C 回火时的伸长率;对于回火处理的试样,随着回火温度升高,伸长率逐渐提高,当回火温度为 600 °C 时伸长率高于标准值。

淬火形成的马氏体中存在大量的位错,在回火过程中 α 相中的位错胞和胞内位错通过滑移和攀移逐渐消失,晶体中的位错密度下降。40CrNiMo 钢具有较高的回火抗力,在 400 °C 回火时,马氏体板条束间距尺寸最小,白色点状物的分布相对更加均匀,析出的碳化物细小弥散且与 α 相保持共格关系,钢中的晶粒大小均匀性最好,马氏体板条束间距最小。此时由于细晶强化、弥散强化、固溶强化和位错强化等综合作用,使得材料抗拉强度无明显变化,伸长率下降。在 500 °C 和 600 °C 回火时,随着回火温度升高,马氏体板条束大量合并,束间距增大, α 相回复明显,碳化物长大,弥散度减小,位错密度降低,钢中基体的固溶强化、碳化物的弥散强化和细晶强化作用减小。因此当回火温度大于 400 °C 时,抗拉强度下降,伸长率提高。

3 结论

1) 在400~600℃进行焊后回火处理时,随着回火温度升高,40CrNiMo钢完全淬火粗晶区的 α 相回复越来越明显,淬火马氏体板条合并变宽,马氏体形态逐渐消失;碳化物发生聚集和长大,并且分布的越弥散。

2) 随着回火温度的提高,40CrNiMo钢焊接热影响区的显微硬度逐渐下降,冲击性能逐渐变好,抗拉强度逐渐下降,伸长率逐渐提高。

3) 600℃回火处理可以显著提高40CrNiMo钢焊接热影响区的冲击性能,使其满足冲击性能标准值的要求;400℃和500℃回火处理时,由于产生回火脆性,冲击性能较差,冲击吸收能量低于未回火处理试样。

参考文献:

- [1] 曹勇. 2040年世界能源展望——埃克森美孚2018版预测报告解读[J]. 当代石油石化, 2018, 26(4): 8-14.
Cao Yong. A brief introduction to Exxon Mobil 2018 outlook for energy to 2040[J]. Contemporary Petroleum and Petrochemical, 2018, 26(4): 8-14.
- [2] 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949-1960.
Xie Heping, Wu Lixin, Zheng Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949-1960.
- [3] 成志杰. 中国海洋战略的概念内涵与战略设计[J]. 亚太安全与海洋研究, 2017(6): 26-41.
Cheng Zhijie. China's ocean strategy: Concept and strategy[J]. Asia-Pacific Security and Maritime Affairs, 2017(6): 26-41.
- [4] 黎剑波. 激光熔焊技术在海洋钻井平台齿轮修理上的应用研究[J]. 中国修船, 2012, 25(3): 39-42.
Li Jianbo. Research on application of laser fusion welding technology in gear repair of offshore drilling platform[J]. China Ship Repair, 2012, 25(3): 39-42.
- [5] 董凯. 激光熔覆技术在海洋自升式钻井平台升降齿轮修复中的应用实例[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(20): 150-151.
Dong Kai. Application examples of laser cladding technology in the repair of lifting gears of marine jack-up drilling platforms[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018, 38(20): 150-151.
- [6] 马志鹏, 张誉誉, 张旭昀, 等. 35CrMo齿轮堆焊接头组织与力学性能分析[J]. 化工机械, 2017, 44(3): 271-275, 327.
Ma Zhipeng, Zhang Yuyu, Zhang Xuyun, et al. Analysis of microstructures and mechanical properties of 35CrMo gear overlaying joint[J]. Chemical Machinery, 2017, 44(3): 271-275, 327.
- [7] 常晓巍. 直齿轮联合堆焊在线修复[J]. 山东工业技术, 2018(9): 12.
Chang Xiaowei. On-line repair of spur gear combined surfacing welding [J]. Shandong Industrial Technology, 2018(9): 12.
- [8] 刘璇, 赵刚, 李大航, 等. 热处理工艺对510MPa级船板用钢组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(1): 61-64.
Liu Xuan, Zhao Gang, Li Dahang, et al. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of 510 MPa grade ship steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(1): 61-64.
- [9] 张蕾, 李亚江, 蒋庆磊. 淬火+回火低合金高强度钢焊接的研究现状[J]. 现代焊接, 2010(10): 17-21.
Zhang Lei, Li Yajiang, Jiang Qinglei. Present situation of study on the welding of quenching + tempering low-alloy and high-strength steel[J]. Modern Welding Technology, 2010(10): 17-21.
- [10] 史献营. 中碳调质钢焊接中的问题及工艺措施[J]. 新技术新工艺, 2015(7): 134-136.
Shi Xianying. Welding problems and process measures of the medium carbon quenched and tempered steel[J]. New Technology and New Process, 2015(7): 134-136.
- [11] 付海峰, 李俏, 徐跃明, 等. 重载齿轮热处理及应用[J]. 金属热处理, 2020, 45(3): 178-185.
Fu Haifeng, Li Qiao, Xu Yueming, et al. Heat treatment technologies and its application of heavy duty gears[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(3): 178-185.
- [12] 薄国公, 王勇, 韩涛, 等. 焊后热处理对ASTM 4130钢焊接热影响区组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(2): 83-87.
Bo Guogong, Wang Yong, Han Tao, et al. Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of HAZ of ASTM 4130 steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(2): 83-87.
- [13] Zhao M S, Chiew S P, Lee C K. Post weld heat treatment for high strength steel welded connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 122: 167-177.
- [14] 刘庆冬, 刘文庆, 王泽民, 等. 回火马氏体中合金碳化物的3D原子探针表征 I. 形核[J]. 金属学报, 2009, 45(11): 1281-1287.
Liu Qingdong, Liu Wenqing, Wang Zemin, et al. 3D atom probe characterization of alloy carbides in tempered martensite I. Nucleation [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(11): 1281-1287.
- [15] 赵乃勤. 合金固态相变[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2008.
Zhao Naiqin. Solid Phase Transformation in Alloys[M]. Changsha: Central South University Press, 2008.
- [16] Bott I D S, Teixeira J C G. Toughness evaluation of a shielded metal arc carbon-manganese steel welded joint subjected to multiple post weld heat treatment [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1999, 8(6): 683-692.
- [17] Li J, Zhang C, Liu Y. Influence of carbides on the high-temperature tempered martensite embrittlement of martensitic heat-resistant steels [J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 670: 256-263.
- [18] 文明月. 焊接热循环对Fe-Cr-Ni-Mo系高强度钢组织与力学性能的影响[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
Wen Mingyue. Effect of welding thermal cycle on the microstructure and properties of Fe-Cr-Ni-Mo high strength steel [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.