

调质处理对 22MnCrNiMo 钢闪光焊缝组织与力学性能的影响

李仲昱 王晓国 戴益波 张艳 郭宇航

(江苏科技大学 材料科学与工程学院, 镇江 212003)

摘要 为研究调质处理对 R4s (22MnCrNiMo) 级系泊链钢闪光焊缝区力学性能的影响, 通过改变循环淬火温度 (880 ~ 960 °C), 确定最优淬火温度; 然后通过改变回火温度 (560 ~ 640 °C) 和回火后保温时间 (20 ~ 40 min), 研究回火温度和回火后保温时间对钢力学性能的影响。结果表明, 经调质处理后, 焊缝区断口虽仍呈现韧性断裂, 但拥有较高的强度和较好的塑性, 特别是在 920 °C 30 min + 920 °C 30 min 淬火 + 600 °C 30 min 处理后, 焊缝区拥有较高的强度和最佳的塑性, 强度达到 1 071 MPa, 延伸率高达 17%, 综合性能最优。

关键词 系泊链钢 22MnCrNiMo 钢 焊缝 调质处理 力学性能

Effect of Quenching and Tempering Treatment on Structure and Mechanical Properties of 22MnCrNiMo Steel Flash Weld Zone

Li Zhongyu, Wang Xiaoguo, Dai Yibo, Zhang Yan and Guo Yuhang

(School of materials science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003)

Abstract In order to study the effect of quenching and tempering treatment on the mechanical property of R4s (22MnCrNiMo) mooring chain steel flash weld zone, the double quenching is carried out at 880 ~ 960 °C to define optimum quenching temperature; by changing the tempering temperature (560 ~ 640 °C), and the holding time 20 ~ 40 min, the effect of tempering temperature and holding time on the mechanical property of steel is studied. The results show that with quenching and tempering treatment, all the fracture surfaces in the weld area are ductile fracture with high strength and good plasticity. Especially after 920 °C 30 min + 920 °C 30 min quenching + 600 °C 30 min tempering treatment, the weld zone of steel has higher strength and best plasticity, the strength of steel is 1 071 MPa, the elongation is 17%, and the comprehensive performance reaches the optimal.

Material Index Mooring Chain Steel, 22MnCrNiMo Steel, Weld Seam, Quenching and Tempering Treatment, Mechanical Property

几十年来,随着陆地资源的开采量越来越大,很多资源储备下降,有些资源甚至枯竭,向深海探索已成为大势所趋,因此各国开始向远洋和深海挺进,探索海洋资源^[1-4]。探索海洋、开发海洋已成为全球竞争的新方向^[5],随着资源开发向海洋进军,服役环境日益复杂化、极端化^[6],海洋工程的大型船舶和船艇的安全与系泊链系统紧密相连。海洋工程系泊链是保证国家海上设施在恶劣深海情况下正常服役的保护工作装置^[7],R4s 系泊链条产品主要用于海洋石油开采平台生产设施的系泊定位。系泊链服役时,长期浸泡在海水中,工作环境恶劣,因此要求系泊链用钢不仅需要高强度、优异的韧性、抗疲劳、耐磨损等特性,而且还要求具有优良的耐海水腐蚀性能^[8]。其部分级别和机械性能规定如表 1^[7]。

R4s 级系泊链具有优异的综合性能,发展前景广阔^[9]。目前造船行业高质量锚链市场的主要生产方式是闪光焊接。随着工艺的进步,连续闪光焊接和预热闪光焊接这两种焊接方式发展相对完善,

且应用广泛^[7]。闪光对焊具备热效率高、焊缝质量好,可焊接材料种类多样的优点,接头形式多样,可以焊接紧凑的截面,也可以对展开界面进行焊接。

研究发现,在低温回火下焊缝区具有较高的强度,但塑性较低不能满足实际工程应用的需求,而在高温回火时焊缝区既保持高的强度还拥有较好的塑性,在实际生产时试样淬火后也都采用高温回火处理以获得最优的综合性能^[10],所以本试验着重研究循环淬火以及循环淬火后高温回火处理对焊缝区组织与性能影响,以最优的综合力学性能为指标确定最佳的热处理工艺,为企业大批量生产提供理论参考。

表 1 系泊链等级和性能

Table 1 Grade and performance of mooring chain

等级	抗拉强度/MPa	延伸率/%	断面收缩率/%	-20℃冲击功/J		屈强比
				焊缝	环背	
R4	860	12	50	50	36	0.92
R4s	960	12	50	56	40	0.92

表 2 22MnCrNiMo 钢的化学成分/%
Table 2 Chemical composition of 22MnCrNiMo steel/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	Nb
0.24~0.30	0.15~0.30	1.2~1.6	≤0.025	≤0.025	0.8~1.3	0.7~1.3	≤0.2	0.02~0.05	0.4~0.8	0.02~0.06

1 试验方法与过程

材料为 R4s 级系泊链专用钢,规格为 $\Phi 86$ mm 轧制棒。先沿圆棒纵向制成横截面为 21 mm × 21 mm 方形试料。表 2 为试验钢 22MnCrNiMo 化学成分。

淬火工艺:研究表明,轧制态 R4s 级系泊链钢在 740 °C 时,由珠光体向奥氏体转变(A_{C1});810 °C 是加热时转变为奥氏体终了温度(A_{C3})^[11],与企业实际生产温度以及相近温度相结合,在此选择 880、900、920、940 和 960 °C 五个临近温度进行淬火实验,在 600 °C 下回火 30 min 后水冷。

回火工艺:实际生产过程中为了获得有良好性能的回火索氏体,通常采用高温回火^[10]。因此本实验回火温度分别为 560、580、600、620 和 640 °C,保温时间分别为 20、30 和 40 min 回火后空冷。

力学性能测试:截取拉伸试样(焊缝处于中间位置),拉伸试样长 145 mm,直径 $\Phi 16$ mm,按 GB 6397-1986 要求加工。在 CMT5305 微机控制电子万能试验机上进行,在室温条件下拉伸,拉伸速率为 5 mm/min。

按 GB 2650-1989 要求加工成夏氏 V 型缺口标准冲击试样,规格为(缺口在焊缝处):10 mm × 10 mm × 55 mm。冲击试验机为 JBD-30 型摆锤式冲击试验机,冲击能量为 30/15 kg · m。

硬度测试:采用数显 HRS-150 洛氏硬度机测定焊缝区的硬度,试样标准按照 GB/T 230-1991《金属

洛氏硬度试验》要求制作。为提高测试结果的准确性,测试面与底面去除氧化层,两面保持平行,每个试样取 5 个测试点,结果取算术平均值,试样制备过程为:水磨(除去氧化层)→1#至 4#金相砂纸精磨→精抛光。

2 试验结果与讨论

2.1 循环淬火对焊缝区力学性能的影响

研究表明,循环淬火与一次淬火相比,焊缝区具有更小尺寸的奥氏体晶粒,因此得到的板条马氏体更加细小^[11],板条马氏体组织塑性和韧性优于孪晶马氏体^[12]。因此,循环淬火后的硬度与强度都明显高于一次淬火后的硬度与强度,塑性指标变化不大,所以本试验选择循环淬火工艺。试样分别经 880、900、920、940 和 960 °C 各保温 30 min 循环淬火后,均在 600 °C 回火 30 min,冷却方式为空冷,研究不同淬火温度下焊缝区的力学性能。

焊缝区经过不同淬火温度后在 600 °C 回火温度下保温 30 min 后的显微组织,如图 1 所示,可以看到组织均是回火索氏体。循环淬火温度为 920 °C 时,原奥氏体晶粒较为细小,高温回火后能得到对应的细小的回火索氏体。

从表 3 可见,在一定的温度范围内,当淬火温度不断升高,淬火温度的变化对焊缝区硬度与强度的影响不大。在经过淬火工艺和回火工艺处理后,焊缝区拥有优良的综合力学性能,抗拉强度超过 1 000 MPa,屈服强度在 1 000 MPa 左右,延伸率在

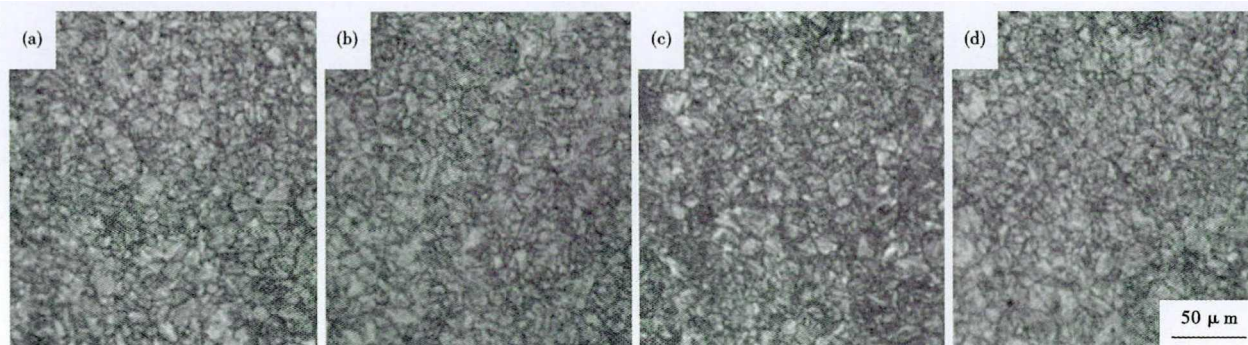


图 1 22MnCrNiMo 钢焊缝区淬火回火的金相组织:(a) 880 °C + 880 °C,(b) 920 °C + 920 °C,(c) 940 °C + 940 °C 和 (d) 960 °C + 960 °C 淬火,600 °C 30 min 回火

Fig. 1 Microstructures of 22MnCrNiMo steel weld zone quenched and tempered ;quenched at (a) 880 °C + 880 °C,(b) 920 °C + 920 °C,(c) 940 °C + 940 °C,(d) 960 °C + 960 °C and tempered at 600 °C for 30 min

表3 两次淬火温度对 600 °C 30 min 回火 22MnCrNiMo 钢焊缝区力学性能的影响

Table 3 Effect of double quenched temperature on mechanical properties of weld seam zone of 22MnCrNiMo steel tempered at 600 °C for 30 min

淬火/°C (×30min)	回火/°C (×30min)	HRC 硬度值	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{0.2}$ /MPa	延伸率 A_5 /%	断面收缩 率 Z/%	冲击功 A_{kv} /J
880 + 880	600	31	1032	983	15.41	59.57	100
900 + 900		32	1052	984	16.91	65.82	104
920 + 920		34	1071	1021	17.00	66.60	108
940 + 940		33	1057	1014	16.76	65.65	118
960 + 960		32	1087	1028	17.56	65.69	124

17%左右,断面收缩率也较高,说明这种材料的延展性好。这些试样的力学性能都远高于 DVN, ABS 以及 LR 三个船级社规范对 R4s 级系泊链产品的性能要求^[13]。材料具有较高的强度以及冲击韧性,说明该材料的淬火温度可控范围较宽,在实际生产中适合连续生产易于控制。尤其是在 920 °C + 920 °C 循环淬火时,综合力学性能最好。

从表 3 可见,随着淬火温度升高,抗拉强度和屈服强度也随之升高。但在 940 °C 时呈下降趋势;随着淬火温度升高,焊缝区的延伸率和断面收缩率逐渐上升,在 880 °C 到 900 °C 时,增长幅度较大。超过 900 °C 后上升趋势变小。在 920 °C 时,焊缝区强度较高,塑性最好。在一定的淬火温度范围内,淬火温度升高时,焊缝区的晶粒会不断细化,强度和塑性得到提升,但是当淬火温度过高时,原奥氏体晶粒会互相吞并,较大的奥氏体晶粒不断吞并相邻的较小的奥氏体晶粒,不断粗化长大,经过回火后得到粗大的回火索氏体组织,塑性和强度降低。940 °C 到 960 °C 焊缝区强度有提升,因为奥氏体晶粒长大速度加快,碳化物能够充分溶于并且均匀的分布在奥氏体内部,回火后得到均匀的组织。

2.2 回火工艺对焊缝区力学性能的影响

闪光对焊焊缝区在 920 °C 30 min + 920 °C 30 min 水淬后,在不同温度下进行回火,研究回火工艺对焊缝区力学性能的影响。回火温度为:560、580、600、620、640 °C,同时再分别保温:20、30 和 40 min。

从表 4 可见,在回火温度一定时,随着回火时间的增加,焊缝区的硬度总体呈下降趋势;回火时间一定时,随着回火温度的升高焊缝区的硬度和强度变化趋势不同。

随着回火温度的升高和回火时间的增加,焊缝区的抗拉强度和屈服强度都是递减趋势,且递减幅度逐渐增大。在回火时间为 20 min 和 30 min 时,回火温度从 600 °C 升至 620 °C 时,出现了短暂的平台,升高到 640 °C 时,强度大幅度降低。是因为温度越高组织越容易进行回复,出现短暂平台说明在该温度下焊缝区组织完全回复,得到了较稳定的回火索氏体,较好的消除了内应力。但是回火温度继续升高时,析出的粒状渗碳体聚集球化长大,生成粗大的粒状渗碳体和铁素体混合机械组织,导致焊缝区强度大幅度降低。焊缝区在 600 °C 回火时,屈服强度

表4 22MnCrNiMo 钢焊缝区调质后的力学性能

Table 4 Mechanical properties of 22MnCrNiMo steel weld seam zone quenched and tempered

淬火温度/°C	回火		HRC 硬度值	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{0.2}$ /MPa	延伸率 A /%	断面收缩 率 Z/%
	温度/°C	时间/min					
920 + 920	560	20	38	1172	1133	13.11	59.36
		30	37	1148	1123	14.59	60.15
		40	36	1123	1077	14.92	62.55
	580	20	35	1135	1086	14.36	62.38
		30	34	1120	1073	15.76	64.32
		40	32	1080	1028	16.70	65.64
	600	20	35	1089	1043	15.85	64.56
		30	34	1071	1021	17.00	66.60
		40	34	1050	996	17.06	65.58
620		20	33	1090	1045	14.86	62.14
		30	32	1061	1010	15.72	64.83
		40	31	999	948	16.93	65.36
640	20	32	1017	978	17.63	66.09	
	30	31	988	937	18.62	69.13	
	40	29	955	899	19.35	69.69	

基本保持在 1 040 MPa 以上,因此实际生产中在 600 ℃左右回火较好。回火温度过低焊缝区塑性较差,回火温度过高焊缝区强度降低且浪费热能。

在相同的淬火条件下,经过不同的高温回火后,板条组织的基本形貌没有发生改变,焊缝区主要是回火索氏体,没有出现马氏体的再结晶。焊缝显微组织虽然随着温度的升高而变化,但是 580 ℃时已没有明显变化,在光学显微镜下不能进一步区分。经过循环淬火后,焊缝区组织为高位错密度的板条马氏体,经过高温回火后,得到了相应的回火索氏体,能够提高焊缝区的塑性。

从表 4 可见,随着回火温度的升高或者回火时间的延长,焊缝区塑性指标均有上升的趋势。回火时间为 20 min 时,塑性指标均低于其他回火时间的

塑性指标,这表明此时的马氏体没有完成回复过程,塑性较低;回火时间增加到 40 min 时的塑性指标与回火 30 min 比较提升已经不明显,甚至在回火温度 600 ℃时低于回火时间 30 min 的塑性。综合强度与塑性考虑,回火时间 30 min,回火温度 600 ℃,焊缝区性能较好。

2.3 回火工艺对焊缝区拉伸性能及断口的影响

静载拉伸试验结果显示 90% 的试样均在焊缝处发生断裂,说明虽然经过上述的热处理工艺后,焊缝区的组织与性能得到提升,但系泊链环中最薄弱的地方仍是焊缝区。

图 2 为原始态焊缝拉伸断口 SEM 形貌图。原始态焊缝宏观断口呈现出灰色,图 3 为回火处理后,拉伸断口宏观及微观 SEM 形貌图。可以看出三种

类型试样的断口中有明显的剪切唇和纤维区,试样为韧性断裂。随着回火时间的增加,断口形貌韧窝状面积逐渐增大且韧窝深度逐渐变深,拉伸断口的横向裂纹变小。在闪光对焊过程中,母材在高温下瞬间熔化,在之后顶端挤压中,焊缝区的熔融物被挤出,碳化物迅速扩

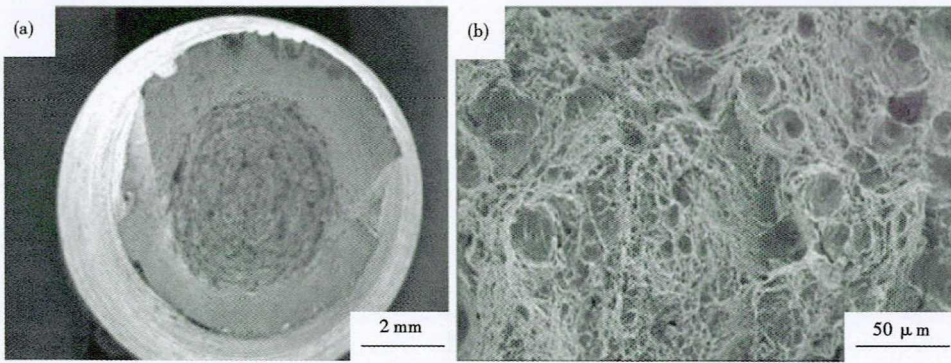


图 2 原始态 22MnCrNiMo 钢焊缝拉伸断口形貌
Fig. 2 Tensile fracture morphology of original state of 22MnCrNiMo steel weld seam

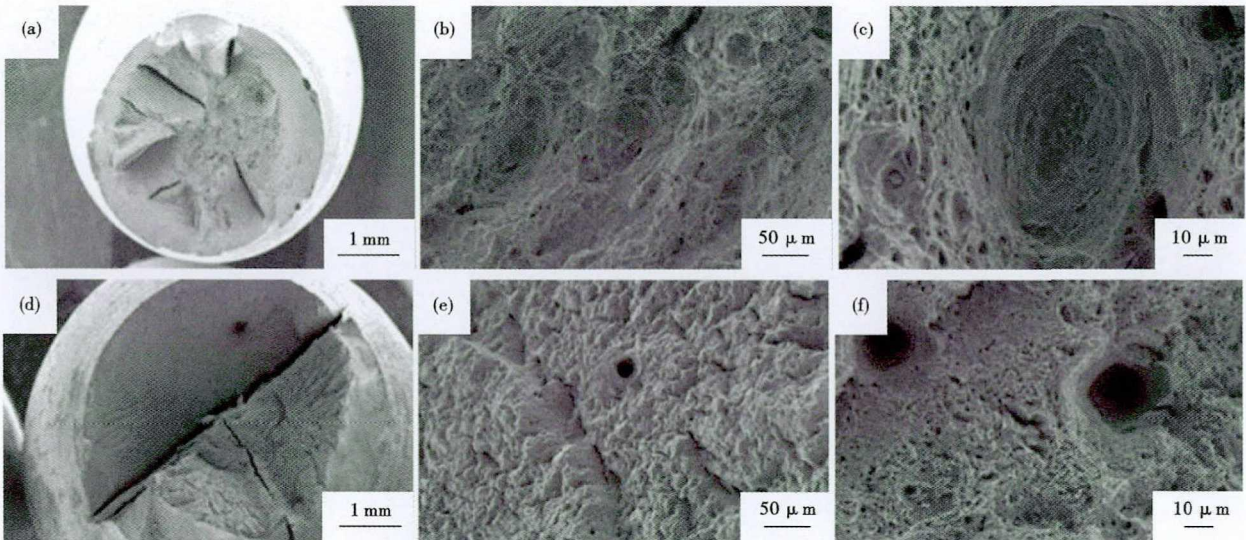


图 3 22MnCrNiMo 钢焊缝拉伸断口宏观及微观 SEM 形貌图:920 ℃ + 920 ℃ 淬火 + 600 ℃ × 30 min 回火:(a) (b) (c) 920 ℃ + 920 ℃ 淬火 + 600 ℃ 20 min 回火:(d) (e) (f)

Fig. 3 Macroscopic and microscopic SEM morphology of 22MnCrNiMo steel weld seam tensile fracture:quenched at 920 ℃ + 920 ℃ + tempered at 600 ℃ × 30 min:(a) (b) (c);quenched at 920 ℃ + 920 ℃ + tempered at 600 ℃ 20 min:(d) (e) (f)

散长大,在空气中缓慢冷却后,粗大的碳化物扩散速度降低,碳化物等第二相粒子扩散不均匀,在位错处钉扎,焊缝区有极大的内应力^[14]。在调制处理后,焊缝区的板条马氏体比原始焊缝板条马氏体小很多,碳化物也在高温下溶解或细化,比母材原始态焊缝更难产生裂纹。

2.4 回火工艺对焊缝区冲击性能及断口的影响

在0℃时,不同回火时间下低温冲击宏观断口均为韧窝形貌。随着冲击温度降低,断口的塑性变形逐渐下降,断口膨胀值也呈下降趋势,冲击断口形貌的韧窝面积逐渐减少,准解理断裂面积增大,剪切口百分比增加,断口形貌从韧窝状转变为韧窝和准解理断裂混合的断口形貌。回火时间为20 min时,在0℃冲击下,断口形貌均为韧窝状,断口膨胀值为1.21 mm;在-20℃下冲击,断口形貌为韧窝和准解理断裂混合的形貌,断口膨胀值为1.12 mm,剪切断口百分比达到79%;在-40℃冲击时,韧窝区面积减少,准解理断裂面积增大,断口膨胀值为0.64 mm,剪切断口百分比为61%。回火时间为30 min时,在0℃和-20℃时,断口形貌均全部为韧窝断口。在冲击温度低至-40℃时,才出现准解理断裂,断口膨胀值为1.17 mm,剪切断口百分比为61%。回火时间30 min的冲击韧性明显高于回火时间20 min时的冲击韧性。

热处理工艺为920℃ 30 min + 920℃ 30 min 淬火后,焊缝区600℃回火时,随着回火时间的增加,冲击断口形貌的韧窝尺寸逐渐增大加深,韧窝数量

增加且分布逐渐密集,能够提升焊缝区的低温冲击韧性。回火时间为30 min时大的韧窝中还有小的韧窝,形状相对规则。优良的韧窝以及足够的韧窝数量能提升材料的强度以及韧性,有利于提高试样的综合力学性能。在冲击温度低至-40℃时,断口形貌为韧窝和准解理断裂的混合形貌。此时断口源区形貌为河流状断口形貌,回火时间20 min时,低温冲击断口中还出现少量二次裂纹,这些二次裂纹主要是沿晶断裂,降低了试样的韧性。

3 结论

(1)经过本试验的调质处理后,焊缝质量较好,有较高的强度,都优于规范要求。焊缝区得到的回火索氏体仍保留板条马氏体位相,所以这种钢的抗回火稳定性较好。此外,随着回火温度的升高,强化作用由固溶强化转变为弥散强化。

(2)拉伸试验表明原始态焊缝区的拉伸断口形貌呈现韧性断裂,有明显的剪切唇、放射区或纤维区,且强度以及塑性都很低。经适当的调质处理后,焊缝区的强度和塑性都得到提升。随着冲击温度的降低,塑性变形程度也逐渐下降,断口形貌由韧窝形貌变为韧窝形貌和准解理断裂混合的形貌。

(3)在920℃ 30 min + 920℃ 30 min 淬火以及600℃ 30 min 调质处理后,焊缝区得到了较高的强度和最佳的塑性。拉伸强度为1 071 MPa,延伸率为17%,具有较好的综合力学性能。

参考文献

- [1] Zarandi E P, Skallerud B H. Cyclic Behavior and Strain Energy-Based Fatigue Damage Analysis of Mooring Chains High Strength Steel[J]. *Marine Structures*, 2020, 70: 102703.
- [2] 董方, 闫瑞军, 杨宗佳, 等. 稀土钼对22MnCrNiMo钢耐腐蚀性能的影响[J]. *中国冶金*, 2019, 29(1): 30-37.
- [3] 沈雁, 刘桂香, 王红星. 系泊缆用22MnCrNiMo钢表面纳米复合镀层的制备[J]. *表面技术*, 2017, 46(10): 50-59.
- [4] 方光锦. 系泊链用R4(22MnCrNiMo)钢 CCT曲线测定及分析[J]. *金属热处理*, 2020, 45(3): 208-211.
- [5] 江怀友, 赵文智, 闫存章, 等. 世界海洋油气资源与勘探模式概述[J]. *海相油气地质*, 2008, 13(3): 5-10.
- [6] 张明, 张卫新, 李剑, 等. 高强度R6系泊链附件热处理敏感性研究[J]. *热处理技术与装备*, 2020, 41(3): 46-48.
- [7] 张明. R5系泊链热处理工艺及其性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [8] 左锦中, 曾海霞, 樊启航, 等. 海洋采油平台R4S级系泊链用钢热处理工艺研究[J]. *山西冶金*, 2017, 0(6): 42-44 + 73.
- [9] 史斗, 郑军卫. 我国石油安全与天然气开发利用问题研究[J]. *天然气地球科学*, 2003, 14(2): 148-156.
- [10] 赵贤平, 曹树卫, 万国喜, 等. 20Mn2钢圆环链脆性断裂原因分析[J]. *失效分析与预防*, 2009, 4(2): 97-100.
- [11] 王晓国. R4s级系泊链闪光焊缝组织与性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2010.
- [12] Xu Dong F, Gang Y, Lin Zhu C U I. Effect of Quenching Process Parameters on Microstructure and Hardness of 65Mn Steel[J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2009, 30(3): 70-73.
- [13] Veritas D N. Offshore Mooring Chain: Offshore Standard DNV-OS-E302[M]. DNV, Norway, 2008.
- [14] 胥永刚, 李宁, 陈天富, 等. 高温回火热处理对9Cr-1Mo钢焊缝组织韧性的影响[J]. *材料科学与工艺*, 2006, 14(1): 39-41.

李仲昱(1998-),男,江苏科技大学在读硕士,2020年上海工程技术大学(本科)毕业,特钢的焊接及焊后热处理工艺研究。E-mail: guoyuhang@126.com

收稿日期:2020-11-28