

## 回火温度对 22MnCrNiMo 系泊链钢焊缝组织与性能的影响

季峰<sup>1</sup> 李仲昱<sup>2</sup> 王晓国<sup>2</sup> 戴益波<sup>2</sup> 张艳<sup>2</sup> 郭宇航<sup>2</sup>

(1 江苏艾达通材料科技有限公司, 镇江 212003; 2 江苏科技大学材料科学与工程学院, 镇江 212003)

**摘要** 研究了不同回火温度对 22MnCrNiMo 系泊链钢(R4s)闪光焊缝区组织与性能变化的影响。淬火工艺优先采用循环淬火(水冷), 结合工厂实际生产温度及理论相变点, 淬火温度为 920℃。回火温度 300、400、500、600℃, 时间为 30 min。结果表明, 随着回火温度升高, 内应力逐渐降低, 高温 600℃回火时, 焊缝区得到回火索氏体组织, 焊缝区抗拉强度为 1 071 MPa, 屈服强度为 1 021 MPa, 延伸率达 17%, 断面收缩率为 66.60%, 此时焊缝区强度和韧性都得到最好配合。

**关键词** 系泊链钢 22MnCrNiMo 回火温度 力学性能 焊缝

## Effect of Different Tempering Temperature on Mechanical and Properties of 22MnCrNiMo Mooring Chain Steel Weld Zone

Ji Feng<sup>1</sup>, Li Zhongyu<sup>2</sup>, Wang Xiaoguo<sup>2</sup>, Dai Yibo<sup>2</sup>, Zhang Yan<sup>2</sup> and Guo Yuhang<sup>2</sup>

(1 Jiangsu Aida Tong Material Technology Co, Zhenjiang 212003;

2 School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003)

**Abstract** In order to study the effect of different tempering temperature on microstructure and properties of (R4s) 22MnCrNiMo mooring chain steel flash weld zone. Cycle quenching (water cooling) is preferred for quenching process. According to the actual production temperature and theoretical transformation point, the quenching temperature is 920℃. The tempering temperature is 300, 400, 500, 600℃, and the tempering holding time is 30 min. The results show that with the increase of tempering temperature, the internal stress gradually decreases. When tempering at 600℃, tempered sorbite structure is obtained in the weld zone, the tensile strength, yield strength, elongation and area reduction of the weld are 1 071 MPa, 1 021 MPa, 17% and 66.60% respectively, at this time, the strength and toughness of the weld zone are best matched.

**Material Index** Mooring Chain Steel, 22MnCrNiMo, Tempering Temperature, Mechanical Property, Weld

系泊链钢是海洋结构物的重要组件, 主要用于半潜式平台 Semi-submersib、移动钻井平台 MODU 等装置的定点系泊<sup>[1]</sup>。系泊链在平台端和靠近锚链端有着不可替代的作用和优势。如今海洋开发和海洋运输迅速发展, 对系泊链的需求量急剧增加。海上工程设备长期在深海恶劣环境下服役, 因此对于系泊链钢的要求不同于一般链条钢<sup>[2]</sup>, 为了保障海上作业安全性、可靠性和耐用性, 系泊链要具有较高的强度、良好的韧性、抗疲劳、耐磨损、耐海水腐蚀等特性<sup>[3-4]</sup>。

闪光焊接具有热效率高, 焊接质量好等优点, 而

且可焊的材料种类多, 被广泛应用于各个领域<sup>[5]</sup>。在系泊链的制造中也主要采用闪光焊接的方法<sup>[6]</sup>。在闪光对焊过程中, 极易出现氧化夹渣、魏氏体过烧等缺陷, 使得焊缝区性能下降<sup>[7]</sup>, 适当的工艺处理可以改善焊缝的性能。

### 1 实验方法与过程

材料是由江阴兴澄特种钢铁有限公司和正茂集团有限公司联合研制的经轧制后 R4s 级系泊链专用钢, 规格为 Φ86 mm 轧制棒材, 化学成分如表 1 所示。

表 1 R4s 级系泊链钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of R4s grade mooring chain 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

通讯作者: 郭宇航, 副教授, 江苏科技大学材料科学与工程学院, 镇江 212003  
E-mail: guoyuhang@126.com

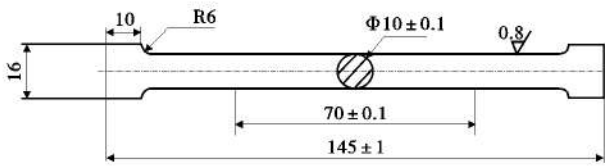


图 1 拉伸试样尺寸图  
Fig. 1 Dimension figure of tensile specimen

(1)回火工艺:为了研究回火温度对组织影响,结合工厂实际生产温度及理论相变点,试样经 920 °C 30 min + 920 °C 30 min 循环淬火后,分别在 300、400、500、600 °C 回火,保温时间为 30 min。

(2)力学性能测试:如图 1 所示(焊缝处于中间位置),截取拉伸试样,按 GB 6397-1986 要求加工。测试在 CMT5305 微机控制电子万能实验机上进行,在室温条件下以 5 mm/min 速率进行拉伸。

(3)洛氏硬度实验:本实验采用数显 HRS-150 洛氏硬度机测定焊缝区硬度,试样标准按照 GB/T 230-1991《金属洛氏硬度试验》要求制作。

(4)显微硬度实验:本实验采用 MD-5 型显微硬度试验机进行测试,试样标准按照 GB/T 4340. 1-1999《金属维氏硬度试验方法》进行制作。

2 实验结果与讨论

2.1 原始态焊缝区显微组织与力学性能

为了在闪光焊接时保持材料整体组织一致,系泊链在闪光对焊前进行 900 °C 左右的预热处理。焊接时,焊缝区迅速加热到 1 000 °C 以上熔融,闪光、顶锻、使母材对接,焊接后试样置于空气中缓慢冷却(即正火处理)。

从之前的研究中发现,高倍显微镜下观察到母材与焊缝区组织都是板条马氏体、下贝氏体和少量块状铁素体。但是焊缝区板条马氏体比母材粗大,这是因为在闪光对焊过程中,断口焊接温度达 1 000 °C 以上,晶粒迅速长大,但冷却速度相对缓慢,导致焊缝区的性能有所改变。

图 2 为焊缝区原始态组织的 XRD 图,图 3 为原始态焊缝区显微 HV 硬度值的变化图。从图 3 中可以看出,距离焊缝越近试样的显微硬度越低,说明焊缝区是系泊链环中较薄弱的地方。采取适当热处理工艺可以有效改善焊缝区组织与性能,因此研究不同热处理工艺对闪光焊接后的链条组织与性能有重要意义。

表 2 为原始态焊缝区力学性能。挪威船级社 DNV 对 R4s 级系泊链产品的抗拉强度性能要求为大于等于 960 MPa,在温度为 -20 °C 时的最小冲击

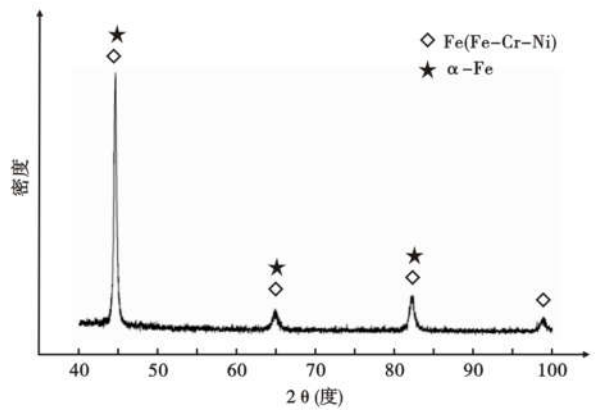


图 2 原始态焊缝区组织 XRD 图

Fig. 2 XRD diagram of structure of original primary state weld joint

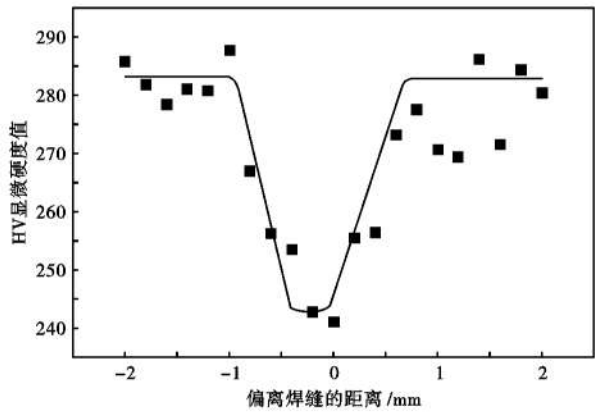


图 3 原始态焊缝区 HV 显微硬度值变化图

Fig. 3 HV microhardness number variation of original state weld joint zone

表 2 原始试样焊缝区的力学性能

Table 2 Mechanical properties of origin sample weld joint zone

工艺状态	HRC 值	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	$\psi$ /%	冲击功(A <sub>KV</sub> )/J		
						0 °C	-20 °C	-40 °C
原始态焊缝	32	856	929	13.42	51.62	59	38	16

功(A<sub>KV</sub>)为 56 J<sup>[8]</sup>。所以焊缝区原始态试样的力学性能不能满足 DNV 的性能要求。在闪光焊接的闪光过程中,焊缝区出现严重的脱碳现象。空冷后,母材与焊缝的组织 and 性能存在一定的差异。以应力为例,焊缝区有较大的焊接内应力和空冷时产生的淬火应力等残余应力。为消除或减少母材与焊缝之间的差异,需要采取适当的热处理工艺来提高材料的整体性能。

2.2 闪光焊缝区内应力研究

图 4 为使用 UVM-2 超声测速仪器检测试样残余应力的示意图(X 轴向垂直于焊缝线);图 5 为不

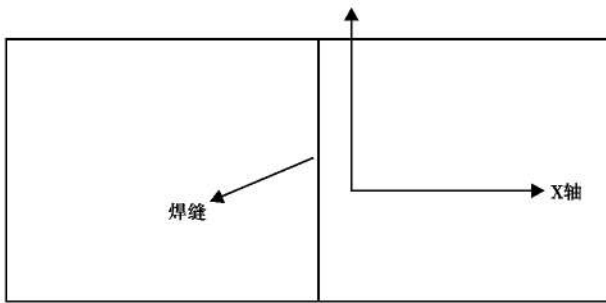


图 4 试样焊缝残余应力超声检测示意图

Fig. 4 Schematic of sample welding seam residual stress by ultrasonic detection

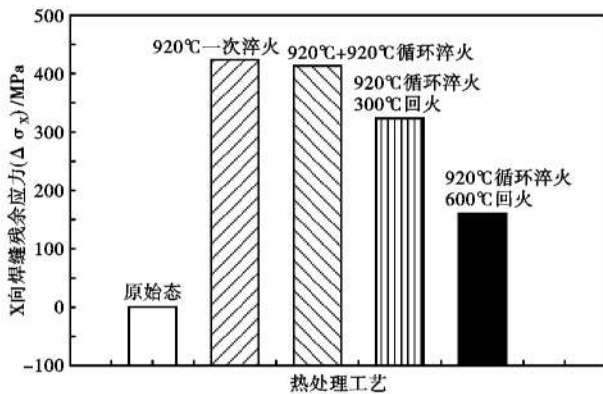


图 5 热处理对焊缝区残余应力的影响

Fig. 5 Effect of heat treatment on residual stress of welded seam zone

同热处理工艺后焊缝区的残余应力值(纵坐标为垂直于焊缝区的残余应力值)。将原始态试样的残余应力值设为 0, 热处理后的试样残余应力值均相对于原始态试样应力值计算。从图 5 可以看出, 经过 920 °C 一次淬火处理后, 焊缝区的应力值最大, 比原始态增大 450 MPa; 经过 920 °C 循环淬火处理后, 焊缝区残余应力略微降低了 10 MPa; 经过 920 °C 循环淬火 + 300 °C 低温回火处理后, 极大的降低了焊缝区残余应力, 比循环后淬火后未回火处理降低了 100 MPa; 经过 920 °C 循环淬火 + 600 °C 高温回火

后, 比仅一次淬火的焊缝区残余应力降低 300 MPa, 比 300 °C 回火试样的残余应力降低 200 MPa。从图 5 中也能看出, 随着试验热处理工艺的改变, 其对应的焊缝区残余应力呈阶梯下降。因此试样淬火后进行适当的回火处理能够减少或消除焊缝区的残余应力, 提高系泊链钢焊缝区的综合性能。

### 2.3 回火温度与焊缝显微组织

试样经 920 °C 30 min + 920 °C 30 min 循环淬火后, 分别在 300, 400, 500, 600 °C 下回火并保温 30 min, 研究回火温度对焊缝区组织与性能的影响。

图 6 显示了不同回火温度下焊缝区金相显微组织图。300 °C 低温回火时, 碳原子从马氏体晶格间隙位置脱溶且短程扩散, 而淬火后板条马氏体存在大量位错, 碳原子扩散至位错线处钉扎, 如图 6 (a) 所示, 马氏体畸变能与正方度减小。在该温度下, 少量 M-A 岛发生分解, 生成回火马氏体组织。马氏体的比容远大于奥氏体的比容, 在分解过程中含碳量高的残余奥氏体具有较高的稳定性得以保留, 提高了韧性; 淬火内应力并未消除, 位错密度较大, 碳原子也易进入马氏体晶格刃型位错的张应力区, 位错的钉扎和组织的转化共同提高了焊缝区的综合性能, 硬度和强度得到提高, 塑性有所降低, 因为钢的强度与位错密度的平方根成正比<sup>[9-10]</sup>。回火温度提高到 400 °C 时, 淬火内应力得到进一步的释放, 碳原子从马氏体中脱溶并产生回火马氏体组织。从图 6 (b) 可以看出, M-A 岛聚集长大, 呈半连续状, 铁素体条变粗大, 焊缝区硬度与强度均降低; 400 °C 时, 碳原子扩散能力进一步增强, 低碳 α 相增多且浓度趋于平衡, 马氏体正方度接近于 1, 位错密度减少较快, 碳的固溶强化作用减弱, 部分残余奥氏体发生分解, 转变为马氏体或下贝氏体<sup>[11]</sup>。在图 6 (b) 中可以看出为针状马氏体组织, 这主要是细小的针片状的 ε 碳化物在位错处起钉扎强化作用, 但 ε 碳化物

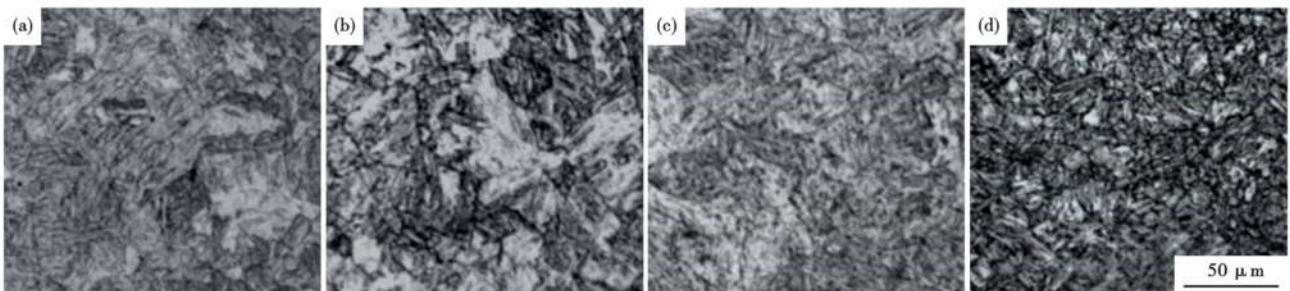


图 6 920 °C 30 min + 920 °C 30 min 循环淬火, (a) 300 °C, (b) 400 °C, (c) 500 °C 和 (d) 600 °C 回火时焊缝区显微组织形貌  
Fig. 6 Microstructure morphology of welding seam zone 920 °C 30 min + 920 °C 30 min cycle quenched and tempered at (a) 300 °C, (b) 400 °C, (c) 500 °C and (d) 600 °C

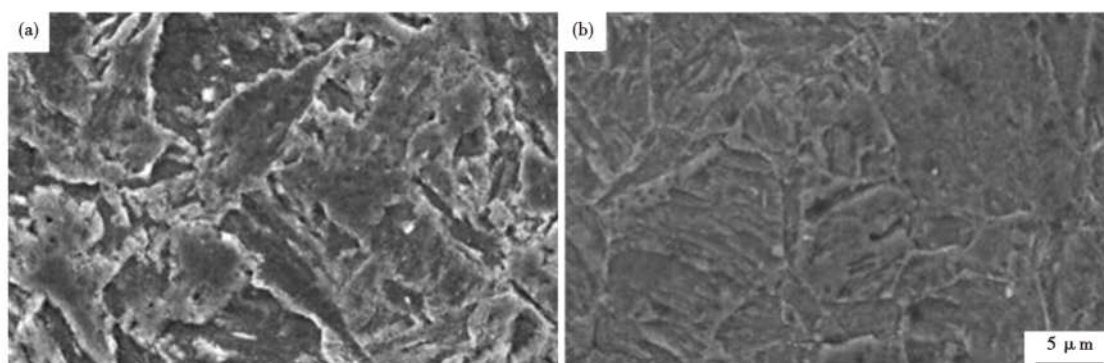


图 7 焊缝区 500 °C (a) 和 600 °C (b) 回火的 SEM 形貌

Fig. 7 SEM morphologies of welding seam zone tempered at (a) 500 °C and (b) 600 °C

析出较少,对整体的强化作用不明显,碳的固溶强化作用减弱,因此焊缝区的抗拉强度与屈服强度大幅降低,抗拉强度降低了 150 MPa,但残余奥氏体的大量分解提高了焊缝区的韧性,相对于 300 °C 回火,延伸率和冲击功略有提升。

图 7 为不同回火温度下焊缝区金相组织 SEM 图。结合图 6 与图 7 分析,500 °C 回火时,M-A 岛中的马氏体和残余奥氏体分解程度进一步增大,碳化物析出量增多[图 7(a)中白色颗粒是析出的细粒的渗碳体],位错密度降低,碳的固溶强化作用再次降低,焊缝区强度和硬度降低,塑性提高;此温度下碳化物析出量增多,位错钉扎强化作用比 400 °C 回火时大,抗拉强度和屈服强度略有降低。从图 6(b, c)中看出,500 °C 回火时 M-A 岛数量少于 400 °C 回火时 M-A 岛数量,而在 600 °C 回火时 M-A 岛已经完全分解。从图 6(d)中看出,600 °C 时,碳化物完全析出生成渗碳体,碳化物从细小针状逐渐球化为细粒状。马氏体的分解,碳化物出现聚集球化,降低了  $\alpha$  相的晶格畸变能,导致焊缝区强度和硬度降低;此温度下板条马氏体发生回复, $\alpha$  相中位错胞和晶胞内的位错线逐渐消失,因此晶体的位错密度减少,位错线也变得平直,使得焊缝区的冲击韧性提高。而剩余位错重新排列成稳定组态的位错墙,发生多边形化,产生的亚晶粒逐渐长大,亚晶界移动形成大角度晶界,从图 7(b)可以看出  $\alpha$  相仍保留板条状,且析

出的碳化物基本分布在铁素体边缘和原奥氏体晶界上,焊缝强度得到提高,使得焊缝区强度缓慢降低。600 °C 回火后,焊缝区组织主要是回火索氏体,弥散强化为主要强化作用<sup>[9-10]</sup>。回火索氏体在不降低焊缝区的硬度和强度的前提下提高焊缝区韧性,得到强度和塑性综合性能最好的焊缝。

#### 2.4 焊缝区力学性能

表 3 为试样经过 920 °C 30 min + 920 °C 30 min 循环淬火,水冷后,在不同回火温度下焊缝区的力学性能。

从表 3 中可以看出,随着回火温度的升高,焊缝区硬度值逐渐下降,在中低温回火时下降幅度不大,硬度的降低与组织的变化有关。

图 8(a)为不同温度下的焊缝强度。从图 8(a)中可以看出,随着回火温度升高,焊缝区抗拉强度逐渐下降,屈服强度先下降后上升,在 300 °C 时强度最高,屈服比较低,在 500 °C 时屈服强度最低,抗拉强度也较低。回火温度从 300 °C 升温到 400 °C 时,焊缝区强度下降最大,抗拉强度降低了 50 MPa;回火温度从 400 °C 升高到 600 °C 时,抗拉强度逐渐降低,仅降低了 10 MPa,屈服强度则先降低后升高,在 600 °C 时达到 1 021 MPa,屈服比达到最大。图 8(b)为不同回火温度后,试样在室温条件下的冲击韧性。随着回火温度升高,焊缝区冲击韧性逐渐提高。回火温度从 300 °C 升至 400 °C 时,冲击功提升幅度较大,但延伸

表 3 920 °C 30 min + 920 °C 30 min 循环淬火,300 ~ 600 °C 回火焊缝区的力学性能

Table 3 Mechanical properties of welding seam zone 920 °C 30 min + 920 °C 30 min cycle quenched and tempered at 300 ~ 600 °C

淬火(30 min)/ °C	回火(30 min)/ °C	HRC 硬度值	抗拉强度 ( $\sigma_b$ )/MPa	屈服强度 ( $\sigma_{0.2}$ )/MPa	延伸率 ( $\delta$ )/%	断面收缩率 ( $\psi$ )/%	冲击功( $A_{KV}$ )/ J
920 + 920	300	40	1126	1035	14.22	56.75	68
	400	39	1085	1010	14.43	58.96	82
	500	38	1080	1007	14.80	62.82	90
	600	34	1071	1021	17.00	66.60	108

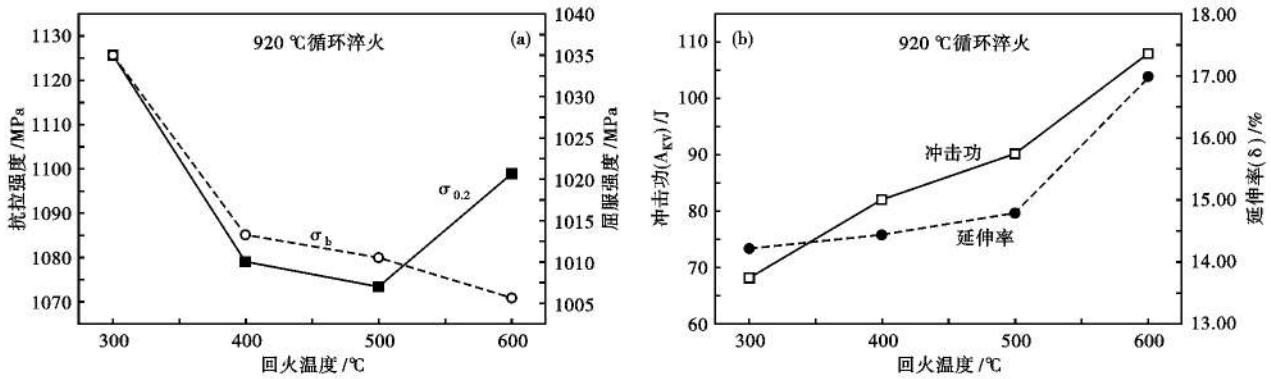


图 8 回火温度对焊缝区力学性能影响

Fig. 8 Effect of tempered temperature on mechanical properties of welding seam zone

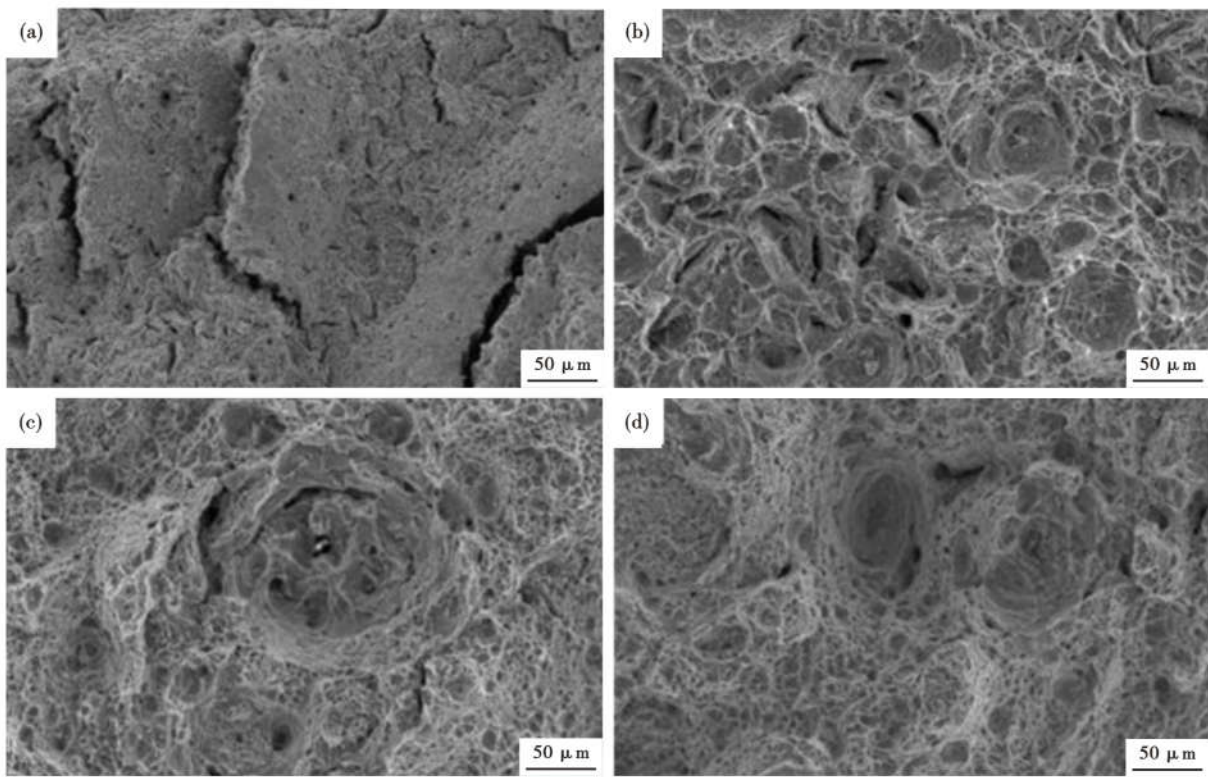


图 9 (a)300 °C, (b)400 °C, (c)500 °C 和 (d)600 °C 回火时焊缝区拉伸断口微观形貌, SEM

Fig. 9 Microstructure of the tensile fracture sample of welding seam zone tempered at (a) 300 °C, (b) 400 °C, (c) 500 °C and (d) 600 °C, SEM

率提升较小;回火温度从 500 °C 升至 600 °C 时,焊缝区冲击功提升幅度增大,延伸率增幅也较大。在 600 °C 回火时,冲击功达 108 J,拉伸断口延伸率也达到 17%。表明在低温回火时,焊缝区强度较高,但塑性较低,综合力学性能较差;高温回火时,焊缝区强度仅略有降低,塑性却得到较大提升,此时的强度和塑性得到较好的配合。焊缝区的力学性能变化与组织变化有关,而组织变化则与回火温度有关。

### 2.5 焊缝区力学性能与拉伸断口形貌

图 9 为不同回火温度下焊缝区拉伸断口微观形

貌 SEM 图。回火后焊缝区拉伸断口都有明显的剪切唇和放射区,表面即使是低温回火,拉伸断裂仍为韧性断裂。

从图 9 中可以看出,回火温度 300 °C 时,拉伸断口形貌为韧窝和准解理断裂且断口中有大量二次裂纹,韧窝有利于提高焊缝区的塑性,穿晶准解理断裂有利于提高焊缝区的强度,二次裂纹则导致焊缝区的强度和塑性降低,因此 300 °C 回火时焊缝区硬度和强度最高,塑性和韧性却最差。回火温度升高至 400 °C 时,断口中韧窝数量增多,准解理断裂面积减

小,仍有二次裂纹存在,焊缝区强度大幅降低;而韧窝面积小且短浅,分布不均匀,对塑性影响不大。500 ℃回火时,焊缝区口形貌均为韧窝形貌,为显著的韧性断裂,韧窝面积增大提高焊缝区塑性,韧窝深度较深,但韧窝形状不规则,韧窝的不规则形状对强度降低的阻碍作用小。断裂韧窝的形状与回火过程中碳化物的析出有关<sup>[12]</sup>,500 ℃回火时部分碳化物转变,导致韧窝有些形状不规则影响了焊缝区的强度和塑性。600 ℃回火时,断口形貌均为韧窝形貌,从图 9(d)中看出,韧窝大而深,且形状规则呈等轴状均匀分布,这些韧窝在提高焊缝区抗拉强度的同时,也大幅提升了塑性,焊缝区的综合力学性能最好。从断口微观图中可以看出,断裂韧窝底部几乎都存在第二相粒子,第二相粒子的存在降低了焊缝区的塑性,对焊缝区的强度也有一定的影响。

### 3 结论

(1) R4s 级系泊链经闪光焊后焊缝区存在一定

的内应力,其中一次淬火后内应力要大于循环淬火后内应力,随回火温度的升高,内应力呈下降趋势。600 ℃高温回火时焊接内应力释放量最大,降低幅度最大,达到 200 MPa。

(2) 闪光焊焊缝区 300 ℃回火时,得到回火马氏体组织,该温度下主要是碳的固溶强化起作用,导致焊缝区强度较高,韧性却最差;中温 500 ℃回火时由于粒状碳化物弥散析出,有效改善了焊缝区强度和韧性,碳的固溶强化作用减弱,弥散强化作用增强;高温 600 ℃回火时,焊缝区得到回火索氏体组织,此时焊缝区强度和韧性都得到最好配合。

(3) 拉伸断口随着回火温度的升高,从韧窝 + 准解理断裂断口形貌转变为韧窝断口形貌,焊缝区强度随着回火温度的升高降低,韧性则随之提升,在 600 ℃回火时,在保证较高强度的同时,也有最好的韧性,焊缝区综合力学性能最优。

#### 参考文献

[1] 邵云亮,李 剑,张卫新,等. 系泊链海水疲劳性能初步研究[J]. 海洋工程,2019,37(5):127-132.

[2] 王晓国. R4s 级系泊链闪光焊焊缝组织与性能研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2010.

[3] 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,2017,40(6):42-44 + 73.

[4] Lars Johanning, George H Smith and Julian Wolfram. Measurements of Static and Dynamic Mooring Line Damping and Their Importance for Floating WEC Devices[J]. Ocean Engineering,2007,34(14):1918-1934.

[5] 冯秋元,李廷举,丁志敏,等. 闪光对焊技术研究现状及发展趋势[J]. 材料科学与工艺,2008,16(1):49-53.

[6] 李 俏,苏世杰,陈 赟,等. 基于动态时空规整的系泊链闪光焊接在线质量评估[J]. 焊接学报,2019,40(3):52-58 + 163.

[7] 原晓波. 改善船用锚链闪光焊接头组织和性能的研究[J]. 武汉造船. 2001(3):17-20.

[8] Veritas D N. Offshore Mooring Chain: Offshore Standard DNV-OS-E302[M]. DNV, Norway, 2008.

[9] 赵敬世,张利民. 300M 钢回火过程中位错密度变化[J]. 北京航空航天大学学报. 1991(1):14-17.

[10] 崔忠圻. 金属学与热处理原理(第 3 版)[M]. 北京:机械工业出版社. 2007:202-205,280-286.

[11] Liu Dongyu, Bai Bingzhe and Fang Hongsheng, et al. Effect of Tempering Temperature and Carbide Free Bainite on the Mechanical Characteristics of a High Strength Low Alloy Steel[J]. Materials Science and Engineering. 2004, 371(1-2):40-44.

[12] Salemi A and Abdollah-zadeh A. The Effect of Tempering Temperature on the Mechanical Properties and Fracture Morphology of a NiCrMoV Steel[J]. Material Scharacterization. 2008,59(4):484-487.

季 峰(1984-),男,硕士(江苏科技大学),高级工程师,金属材料工艺研究。E-mail:justjifeng@gmail.com

收稿日期:2021-07-12

## “讲文明树新风”公益广告

绿色环保  
人人有责