

## 热处理对 40CrNiMoA 钢板焊接接头组织及力学性能的影响

刘艳梅<sup>1</sup>, 陈静<sup>2</sup>, 王铁钢<sup>1</sup>, 赵美兰<sup>3</sup>, 赵夕夕<sup>1</sup>, 戴慧花<sup>1</sup>

(1 天津职业技术师范大学天津市高速切削与精密加工重点实验室, 天津 300222;

2 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016; 3 天津重型装备工程研究有限公司, 天津 300457)

**摘要** 本文研究了调质工艺对 40CrNiMoA 钢板焊接接头显微组织及力学性能的影响。试验结果表明, 经 830 ~ 870 °C + 550 ~ 650 °C 调质处理后, 40CrNiMoA 钢 3 mm 板 90 A 10 V 焊接接头的焊缝区、热影响区、母材区的硬度差异显著减小, 形成了回火索氏体组织。调质处理温度越高, 焊接接头的焊缝区、热影响区与母材区的组织越均匀, 且组织中的碳化物颗粒尺寸增大。40CrNiMoA 钢焊接板经 850 °C 油淬、600 °C 回火后, 具有较高的强度 (905 MPa) 和塑性 (13.5%), 综合力学性能最优。

**关键词** 40CrNiMoA 钢 焊接接头 热处理 组织 性能

## Effect of Heat Treatment on Microstructures and Properties of 40CrNiMoA Steel Plate Welded Joint

LIU Yanmei<sup>1</sup>, CHEN Jing<sup>2</sup>, WANG Tiegang<sup>1</sup>, ZHAO Meilan<sup>3</sup>, ZHAO Xixi<sup>1</sup>, DAI Huihua<sup>1</sup>

(1 Tianjin University of Technology and Education, Tianjin Key Laboratory of High Speed Cutting and Precision Processing, Tianjin 300222; 2 Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

3 Tianjin Heavy Equipment Engineering Research Co Ltd, Tianjin 300457)

**Abstract** Effect of quenching and tempering process on the microstructure and mechanical properties of 40CrNiMoA steel welded joints was studied in this paper. The test results indicated that by quenching + tempering at 830 ~ 870 °C + 550 ~ 650 °C the 40CrNiMoA steel 3 mm plate at 90A 10V welded joint hardness difference between weld zone, heat affected zone, and base metal zone is reduced significantly, and tempered sorbite structure is formed. The higher quenching and tempering temperature, the more uniform microstructure among the weld zone, heat affected zone and base metal of welded joint, and the cementite particle grew up in structure. The 40CrNiMoA steel welded joint after oil quenching at 850 °C and tempering at 600 °C has higher strength (905 MPa) and plasticity (13.5%). In this case, the comprehensive mechanical properties are best.

**Material Index** 40CrNiMoA Steel, Welded Joint, Heat Treatment, Microstructures, Properties

40CrNiMoA 钢因具有较高的强度、韧性, 优异的淬透性、热稳定性, 适于制造强度高、截面尺寸大的重要零件, 主要用于航空航天、武器装备、汽车、轮船等领域<sup>[1-2]</sup>。但作为各种装备的关键部件, 随着 40CrNiMoA 钢越来越广泛的应用及应用环境越来越苛刻, 合金经常需要进行焊接后使用<sup>[3]</sup>。40CrNiMoA 钢经过焊接后得到的接头不同区域显微组织存在显著差异, 并且易存在较大的残余应力<sup>[4,6]</sup>。在工业生产中, 经常采用焊后热处理的调控方法改善焊缝的显微组织, 消除残余应力, 从而提高焊接接头的塑性、断裂韧性, 改善抗应力腐蚀能力<sup>[7-9]</sup>。孙兴德<sup>[10]</sup>研究了 40CrNiMoA 钢退火热处理工艺对钢组织和性能的影响, 发现经过完全退火后, 组织为铁素体 + 珠光体, 并形成了带状组织; 经

不完全退火后, 组织为粒状贝氏体, 强度较低、韧性较大。刘乐<sup>[11]</sup>采用水淬、空冷、油冷组合的工艺对 40CrNiMoA 钢进行热处理后, 钢的心部组织均匀, 为回火索氏体, 具有良好的力学性能。

目前对 40CrNiMoA 钢同种钢焊接及焊后热处理的研究报道较少。本文对 40CrNiMoA 钢平板对接焊接接头进行不同工艺的热处理, 探索热处理工艺对接头钢显微组织和力学性能的影响, 以及提高 40CrNiMoA 钢平板对接焊接接头综合性能的方法, 为实际工程应用提供参考。

### 1 试验方法及材料

试验材料为锻态 40CrNiMoA 钢, 始锻温度 1 180 °C, 终锻温度 850 °C, 锻后空冷。其化学成分 (%) 为 0.39C, 0.71Mn, 0.78Cr, 1.56Ni, 0.19Mo,

**表 1 40CrNiMoA 钢 3 mm 板焊接接头的热处理工艺**  
**Table 1 Heat treatment process of welded joints of 40CrNiMoA steel 3 mm plate**

焊接电流/A	样品编号	方案	热处理工艺
90	90-0		未热处理
	90-1	1	830 °C 15 min, 油冷; 550 °C 150 min, 空冷
	90-2	2	850 °C 15 min, 油冷; 600 °C 150 min, 空冷
	90-3	3	870 °C 15 min, 油冷; 650 °C 150 min, 空冷

0.18Si, 余量 Fe。将厚度 3 mm, 长 50 mm, 宽 130 mm 的 40CrNiMoA 钢板进行平板对接拘束焊接, 背面氩气保护。钢板加工成 V 型坡口, 坡口角度为 30°。焊条采用宽 2 mm, 厚 1 mm 的同品质钢加工而成。焊接电流为 90 A, 焊接电压 10 V。

对焊接件进行调质处理, 热处理工艺列于表 1。利用 Wilson 402MVD 型显微硬度计测定焊接接头的维氏硬度。利用 DDL100 电子万能试验机测试焊接试样的拉伸性能。制备 40CrNiMoA 钢焊接接头的金相试样, 利用 ZEISS Axiovert 40 MAT 光学显微镜及 TESCAN VEGA II SBH 扫描电镜分析钢显微组织及拉伸断口。

**2 试验结果及分析**

**2.1 显微组织分析**

图 1 为 90A 焊接件母材处原始态的显微组织, 为贝氏体及少量铁素体。经 3 种方案热处理后母材显微组织为铁素体基体上分布粒状碳化物, 即回火索氏体(图 2a ~ c)。方案 1 热处理后碳化物分布不均匀, 且颗粒尺寸差别较大(见图 2a), 随着热处理温度升高, 碳化物颗粒尺寸更加均匀, 方案 3 热处理后碳化物颗粒显著增大(见图 2c)。

图 3 是 40CrNiMoA 钢焊接件经热处理前后的焊缝区的显微组织。焊接接头未经热处理时, 焊缝的显微组织为板条状及针状马氏体, 并含有少量的残余奥氏体, 如图 3 (a) 所示。图 3 (b ~ d) 分别经方案 1、方案 2、方案 3 工艺热处理后焊缝区的显微组织。可见, 存在于热处理前焊缝区的板条及针状结构消失, 形

成了粒状碳化物分布于铁素体基体上的显微组织, 即回火索氏体。经方案 1 热处理后, 组织分布不均匀; 经方案 2 热处理后较方案 1 热处理后接头的基体、热影响区、焊缝的显微组织中的碳化物分布均匀; 经方案 3 热处理的粒状碳化物分布最均

匀, 碳化物颗粒也最粗大。这是由于热处理温度越高, 合金奥氏体化均匀化越充分; 并且热处理温度越高, 越有利于成分扩散, 促进渗碳体颗粒长大。

图 4 是 40CrNiMoA 钢焊接件热影响区不同位置处的显微组织。图 4(a ~ e) 是未经热处理的焊接接头热影响区按照近熔合线向母材方向排列的显微组织, 图 4(a) 靠近熔合线, 图 4(b ~ d) 为依次逐渐远离熔合线、靠近母材区, 图 4(f) 为母材区。可见, 热影响区的组织差异较大, 熔合线附近热影响区为马氏体 + 残余奥氏体, 组织粗大(图 4a ~ b); 在远离熔合线方向上的热影响区的组织逐渐细化, 显微组织逐渐变为细马氏体 + 残余奥氏体(图 4c), 再逐渐演变为马氏体 + 贝氏体混合物(图 4d), 马氏体减少, 主要为贝氏体 + 少量铁素体(图 4e), 最后与母材相交, 组织为贝氏体 + 少量铁素体(图 4f)。经调质处理后, 40CrNiMoA 钢焊接接头的热影响区的显微组织如图 5 所示。40CrNiMoA 钢焊接接头经 3 种热处理工艺后热影响区的显微组织都为回火索氏体。随着调质热

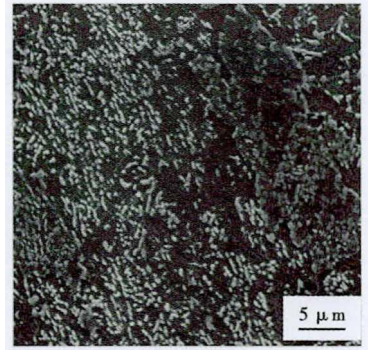


图 1 40CrNiMoA 钢 3 mm 板母材的显微组织  
 Fig. 1 Metallographic structure of base 40CrNiMoA steel 3 mm plate

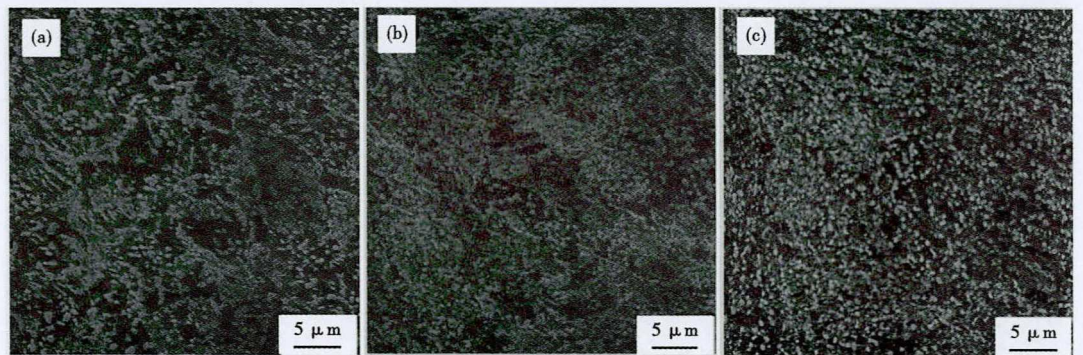


图 2 经 (a) 90-1: 830 °C + 550 °C; (b) 90-2: 850 °C + 600 °C 和 (c) 90-3: 870 °C + 650 °C 热处理后 40CrNiMoA 钢母材区的显微组织  
 Fig. 2 Metallographic structure of base zone of 40CrNiMoA steel heat treated with (a) 90-1: 830 °C + 550 °C; (b) 90-2: 850 °C + 600 °C; (c) 90-3: 870 °C + 650 °C

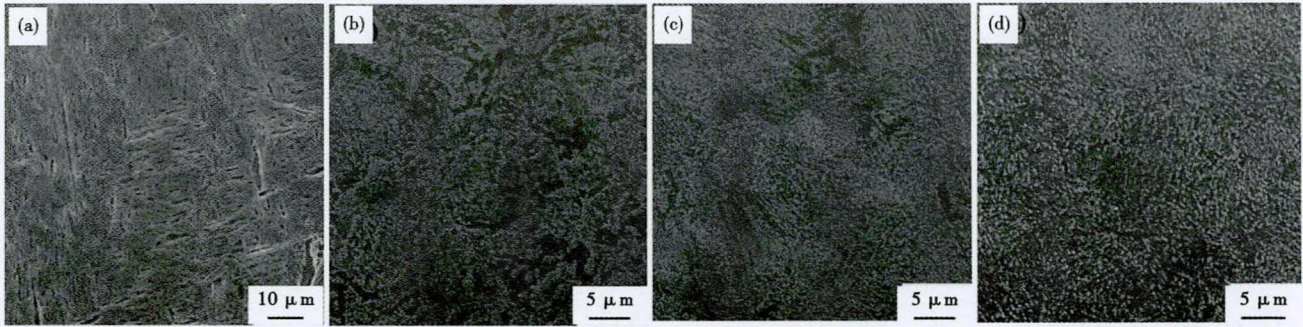


图3 40CrNiMoA 钢焊接接头处理前(a)和经90-1:830 °C + 550 °C (b);90-2:850 °C + 600 °C (c);90-3:870 °C + 650 °C (d)热处理后焊缝区的显微组织

Fig. 3 Metallographic structure of weld zone of 40CrNiMoA steel before heat treatment (a) heat treated with 90-1:830 °C + 550 °C (b); and after heat treatment 90-2:850 °C + 600 °C (c);90-3:870 °C + 650 °C (d)

处理温度升高,组织更均匀,碳化物颗粒尺寸略有增加。由图4、图5可以看出,焊接接头在热影响区的热处理之前显微组织差异很大,因此,在该区域力学性能差异也很大;经调质处理后,组织差异显著降低,使组织均匀化。

## 2.2 焊接接头力学性能分析

为了进一步了解40CrNiMoA钢焊接接头性能热处理前后的变化,

对接头进行显微硬度测量及分析。未进行热处理的40CrNiMoA钢焊接接头沿基体、热影响区、焊缝、热影响区(另一侧)、基体(另一侧)方向测量的硬度分布特点,如图6所示。可见,在焊接接头的各区域,其硬度差别非常显著,焊缝(Ⅲ区)的硬度平均值达到600HV<sub>0.1</sub>以上,母材(Ⅰ区)的硬度平均值为230HV<sub>0.1</sub>左右,焊缝的硬度远高于母材的硬度,焊缝区硬度波动较大。热影响区(Ⅱ区)的硬度从母材向焊缝方向逐渐升高,这与热影响区组织组成及组织粗细有关。焊缝区存在大量马氏体,而母材区主要组织为贝氏体,所以焊缝整体硬度高于母材的

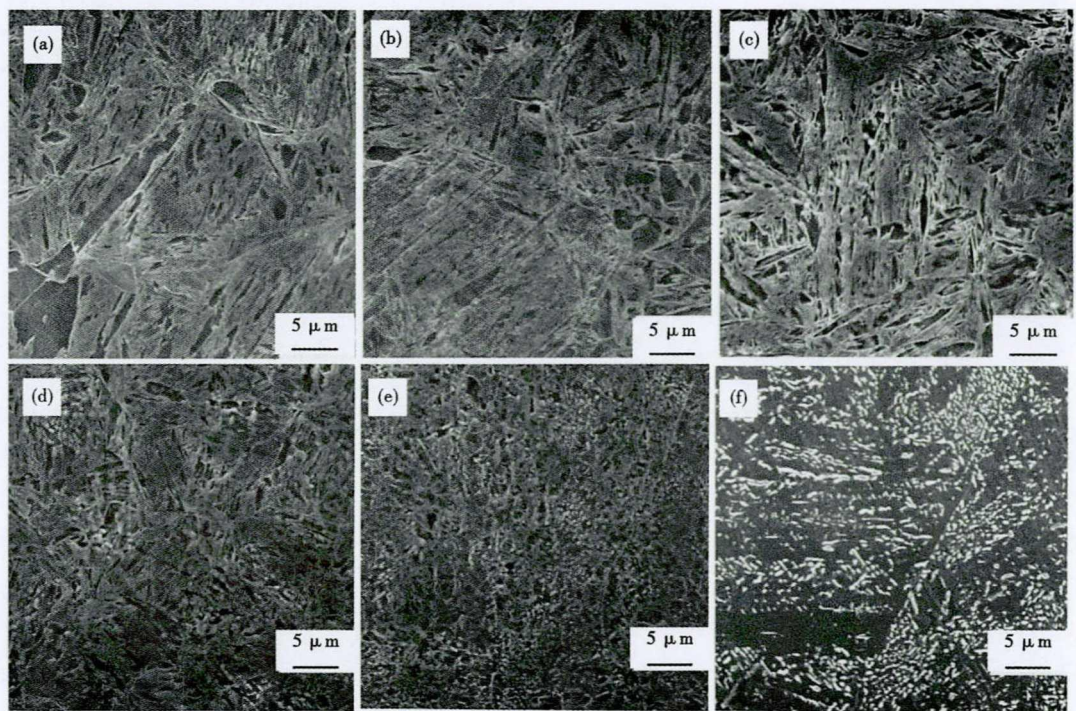


图4 40CrNiMoA 钢焊接热影响区(a)近熔合线,(b)~(f)依次远离熔合线的显微组织

Fig. 4 Heat affected zone micro-structure of 40CrNiMoA steel (a) near the bond line, (b) ~ (f) away from the bond line in turn

硬度。焊缝区硬度波动较大,除了测量过程中不可避免的测量误差之外,主要是由于该区组织由马氏体及残余奥氏体等不同的相组成,硬度压痕位于不同的相上时,硬度值存在差异。近焊缝的热影响区(Ⅱ区)硬度显著低于焊缝区(Ⅲ区)硬度。这是由于随着输入电流的增大,焊缝的输入热增大,从而热影响区的组织粗大,导致该区的硬度降低。

经热处理后,焊缝区、母材区及热影响区的硬度最高400HV<sub>0.1</sub>,硬度最低300HV<sub>0.1</sub>左右,硬度差异显著减小,这是由于经过热处理后3个区域的组织发生转变,虽然组织粗细及分布均匀程度略有差异,但都

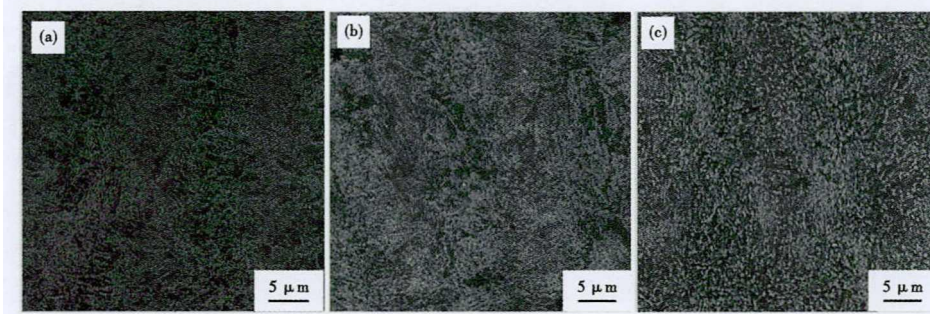


图 5 经(a)90-1:830 °C + 550 °C ;(b)90-2:850 °C + 600 °C ;(c)90-3:870 °C + 650 °C 热处理后 40CrNiMoA 钢焊接热影响区的显微组织

Fig.5 Heat affected zone micro-structure of 40CrNiMoA steel after (a)90-1:830 °C + 550 °C ; (b)90-2:850 °C + 600 °C ;(c)90-3:870 °C + 650 °C heat treatment

裂位置可知,90-0 试样拉伸断裂在热影响区。这是因为焊接电流为 90 A 时,热影响区的强度低于母材及焊缝区,这与焊接接头的显微组织及应力状态有关<sup>[5,12-13]</sup>。经热处理后,焊接接头抗拉强度均达到 800 MPa 以上,拉伸断面收缩率达到 22% 以上,并且拉伸试样都断裂在母材区。可见,热处理提高了焊接接头的强度,焊接件

拉伸样品的断面收缩率由热处理前的 5.9% 提高到 22.6% 以上,塑性显著提高。焊接电流为 90 A 的焊接接头经热处理后拉伸试样断裂在母材区,说明试样的焊缝及热影响区的强度都高于母材区<sup>[13]</sup>。

焊接接头热处理前拉伸断口是准解理与韧窝状的混合断口,为脆性断口<sup>[14]</sup>;经 3 种方案热处理后断口呈韧窝状,为典型的韧性断口。根据拉伸性能的面缩率及拉伸断口的微观形貌可知,焊接电流为 90 A 的焊接接头经 3 种不同工艺热处理,均减小了材料的脆性。

根据材料的塑性及断口可知,经 3 种热处理方案均使热影响区的力学性能得到显著改善。焊接件经调质方案 1 处理后,强度较高,但塑性略低;调质方案 3 处理后焊接件的强度较低,但塑性较大;调质方案 2 处理后,焊接件的强度较高、塑性也好,达到较好的综合力学性能。

### 3 结果分析与讨论

40CrNiMoA 钢采用同质焊条,在 90 A 焊接电流下进行焊接,焊接接头的焊缝区、热影响区、母材区的显微组织和力学性能存在显著差别<sup>[5]</sup>。焊接接头焊缝区的硬度最高,从焊缝向母材方向的热影响区的硬度逐渐降低,母材区的硬度最低,且焊缝及热影响区硬度显著高于母材区的硬度。这是由于焊缝区的组织主要为马氏体,近焊缝的热影响区也以马氏体为主。向母材区方向的热影响区的组织中马氏体逐渐减少,贝氏体增加,所以硬度显著下降。焊接电流为 90 A 时,近焊缝熔合线的热影响区的硬度显著低于焊缝的硬度。这是因为焊缝的输入热较大,导致因冷却速度热影响区的组织粗大,最终导致硬度降低<sup>[15]</sup>。热影响区在靠近焊缝熔合线处的组织为粗大的马氏体 + 残余奥氏体,向母材方向组织逐渐变细,组织由

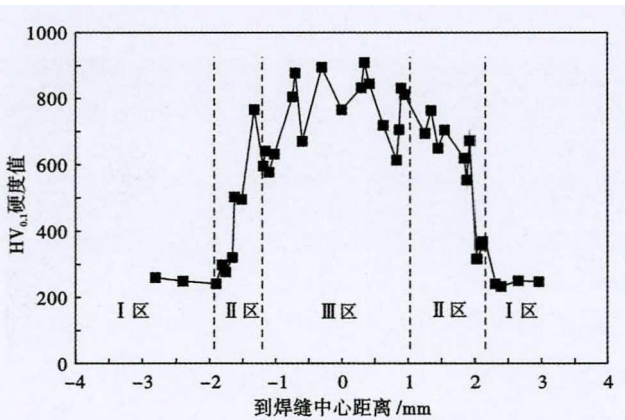


图 6 未热处理的 40CrNiMoA 钢焊接接头硬度曲线

Fig.6 Hardness curve of welded joints of non-heat-treated 40CrNiMoA steel

形成了回火索氏体组织,所以力学性能差异较热处理前显著减小。焊接件在经过方案 2 热处理后,焊缝区、母材区及热影响区的硬度差异较小,说明该热处理制度使焊接接头不同区域的性能趋于均匀一致。

可以得出,未处理前,焊接件在焊缝区、母材区及热影响区的硬度差异显著,焊缝及焊缝附近的热影响区的硬度较高,而远离焊缝的热影响区及母材硬度较低;调质处理后焊缝区、母材区及热影响区的硬度差异显著减小。

表 2 是 40CrNiMoA 钢焊接接头热处理前后的拉伸性能,为两个拉伸样品取平均值。热处理前 90-0 样品的抗拉强度为 665 MPa。根据拉伸试样断

表 2 40CrNiMoA 钢焊接接头的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of welded joints of 40CrNiMoA steel

编号	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
90-0	665	9.5	5.9
90-1	936	12.1	22.6
90-2	905	13.5	25.7
90-3	834	35.7	41.3

马氏体 + 残余奥氏体向马氏体 + 贝氏体 + 残余奥氏体 + 少量铁素体转变,与母材区相交处变为贝氏体 + 少量铁素体。

40CrNiMoA 钢焊接接头经不同工艺调质处理后,焊缝区、热影响区、母材区 3 个区域的显微硬度差异均显著减小。这是由于经过热处理后 3 个区域的组织发生转变,虽然组织粗细及分布均匀程度略有差异,但都形成了回火索氏体组织,所以力学性能差异较热处理前显著减小。因此,对焊接件的调质处理,达到了焊接件不同区域的显微组织和力学性能均匀化的作用。随着调质处理温度升高组织更加均匀,碳化物颗粒增大,硬度略有下降。这是由于调质过程中,淬火温度越高,越促进奥氏体的成分更均匀;而回火温度越高,马氏体中的过饱和的碳析出越充分,促进析出的碳化物的颗粒长大;而碳化物颗粒的粗化,会降低索氏体的硬度<sup>[16-17]</sup>。焊接件在经过方案 2 热处理后,焊缝区、母材区及热影响区三个区域的硬度差异较小,该热处理工艺使得焊接件各区域性能趋于均匀一致。

40CrNiMoA 钢焊接接头未热处理时,拉伸试样在热影响区断裂。这是由于焊接接头有较大的热输入造成热影响区晶粒粗大和性能脆化,并且组织中铁素体增多及焊接残余应力,最终导致拉伸试样在热影响区发生脆性断裂。焊接接头经过 3 种工艺的调质处理后,拉伸试样断裂在母材区,抗拉强度由热处理前

的 665 MPa 提高到 800 MPa 以上,并且表现出良好的塑性。表明经 3 种工艺调质处理后,焊接接头的力学性能均得到显著改善。焊接电流为 90 A 的焊接件经热处理后,消除了影响材料塑性的焊接残余应力及铁素体,塑性显著改善,材料由拉伸脆性转化为塑性。焊接件经调质方案 1 处理后,强度较高,但塑性略低;调质方案 3 处理后焊接件的强度较低,但塑性较大;调质方案 2 处理后,焊接件的强度较高,塑性也好,达到好的综合力学性能,为最佳热处理方案。

#### 4 结论

(1) 40CrNiMoA 钢焊接接头经不同调质工艺处理后,焊缝区、热影响区、母材区 3 个区域的硬度差异均显著减小,都形成了回火索氏体组织。

(2) 40CrNiMoA 钢焊接件经 870 °C 油淬;650 °C 回火调质处理后,焊缝区、热影响区与母材 3 个区域的显微组织最均匀,且渗碳体颗粒尺寸增大。

(3) 40CrNiMoA 钢焊接件经 850 °C 油淬;600 °C 回火调质处理后,焊接件的强度、塑性较高,达到了很好的综合力学性能,为最佳热处理方案。

国家自然科学基金(51301181, 51875555);天津市科技重大专项(18ZXJMTG00050);天津市自然科学基金(19JCYBJC17100);天津市科技特派员项目(20YDTPJC01460);天津市教委科研项目(2021ZD005)资助

#### 参考文献

- [1] 娄宇航,梁华伟,杜波,等. 40CrNiMoA 钢与 45 钢焊接接头组织性能研究[J]. 焊接技术, 2018, 47(5): 26-29 + 8.
- [2] 王敬忠,李科元,刘阿娇,等. 40CrNiMo 钢国内外研究现状[J]. 钢铁, 2018, 53(5): 1-10.
- [3] 冒建国,张贤,田国祥. 40CrNiMoA 调质钢 MAG 焊接工艺探讨与应用[J]. 机械工人, 2006, 47(9): 47 + 50.
- [4] 常川川,李菊,张田仓,等. 焊后热处理对高氧 TC4/TC17 钛合金线性摩擦焊接头组织及性能的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(10): 10109-10113.
- [5] 刘艳梅,陈静,赵美兰,等. 40CrNiMoA 钢同质焊条焊接接头组织和性能研究[J]. 特殊钢, 2020, 41(3): 59-63.
- [6] Shen Wei, Qiu Yu and Xu Linzhi, et al. Stress concentration effect of thin plate joints considering welding defects [J]. Ocean Engineering 2019, 184(1): 273-288.
- [7] 周杰. 热处理工艺对爆炸焊接 C276/Q345R 金属复合板性能的影响[J]. 金属世界, 2021(3): 18-21.
- [8] Zhang Min, Zhang Tao and Cai Junqing, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of Explosive Welding Clad Plate of TA1/Q345 [J]. China Welding, 2018, 27(1): 26-31.
- [9] 白凤臣,马文妹,于彦东,等. 热处理对 TP304H/R102 异种钢焊接接头组织和性能的影响[J]. 焊接, 2020(7): 55-60 + 63-64.
- [10] 孙兴德. 40CrNiMo 钢退火热处理工艺与性能的研究[J]. 金属制品, 2014, 40(3): 19-22.
- [11] 刘乐. 40CrNiMo 钢辊轴的热处理工艺[J]. 金属热处理, 2013, 38(10): 84-85.
- [12] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 北京:机械工业出版社(第二版), 2008: 62-68, 72-130.
- [13] 刘旭辉,张波,肖爱达,等. 工程机械用 960QT 钢焊接粗晶区组织及性能研究[J]. 特殊钢, 2019, 40(1): 63-67.
- [14] Tang Wenshen, Yang Xinqi and Li Shengli, et al. Microstructure and Properties of CLAM/316L Steel Friction Stir Welded Joints [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 189-201.
- [15] 刘畅,邓彩艳,王胜,等. EH36 钢埋弧焊焊缝金属组织临界断裂韧性[J]. 焊接学报, 2019, 40(3): 107-110 + 165-166.
- [16] 张小岩,王强,陈涛,等. 40CrNiMo 钢亚温淬火强化机理的研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(22): 218-220.
- [17] 梅珍,蒋波,董正强,等. 热处理参数对 40CrNiMo 钢硬度和韧性的影响[A]. 中国金属学会、宝钢集团有限公司.“第十届中国钢铁年会暨”第六届宝钢学术年会”论文集[C]. 中国金属学会、宝钢集团有限公司:中国金属学会, 2015: 5.

刘艳梅(1976-),女,副教授,硕士(2011年中国科学院金属研究所),材料分析和变形高温合金工艺研究。

E-mail: ymliu@tute.edu.cn

收稿日期: 2021-12-31