

· 组织和性能 ·

## 40CrNiMoA 钢同质焊条焊接接头组织和性能研究

刘艳梅<sup>1</sup> 陈静<sup>2</sup> 赵美兰<sup>3</sup> 魏蓓蓓<sup>1</sup> 白亚茹<sup>1</sup> 王铁钢<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** 分析了焊接电流 70 A、80 A、90 A 对 40CrNiMoA 钢焊缝接头组织和力学性能的影响。随着焊接电流的增大,焊缝外观质量较好。随着焊接电流的增大,熔池区温度升高,奥氏体晶粒尺寸增大,导致马氏体组织粗大。焊缝的显微组织为马氏体及少量残余奥氏体。焊缝的硬度远高于母材的硬度,且波动较大。热影响区的硬度从母材向沿焊缝方向逐渐升高。焊接接头纵向应力在焊缝中心为压应力,向外压应力减小。焊接颜色区边界处纵向应力为拉应力,且该点拉应力最大。焊接接头横向应力在焊缝中心为拉应力,向外逐渐增大,焊接颜色区边界处变横向拉应力达到最大。焊接电流和热输入增大,降低了材料的韧性,组织中 ferrite 增多及焊接残余应力是诱发脆性断裂的原因。焊接电流 80 A 是 40CrNiMoA 同质焊条平板对接焊接工艺的最佳的焊接电流。

**关键词** 40CrNiMoA 钢 焊接接头 组织 性能

## Research on Microstructures and Properties of Steel 40CrNiMoA Homogeneous Electrode Welded Joint

Liu Yanmei<sup>1</sup>, Chen Jing<sup>2</sup>, Zhao Meilan<sup>3</sup>, Wei Beibei<sup>1</sup>, Bai Yaru<sup>1</sup> and Wang Tiegang<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** The effect of welding current 70 A, 80 A, 90 A on the microstructure and mechanical properties of steel 40CrNiMoA weld joint is investigated. With the increase of welding current, the appearance quality of the welding seam is better. With the increase of welding current, the temperature of molten pool and the austenite grain size increase, which lead to coarsening of martensite. The microstructure of the weld is martensite and very small amount of residual austenite. The hardness of welding seam is much higher than that of base metal, and the hardness fluctuates greatly. The hardness of the heat affected zone (HAZ) increases gradually from base metal to weld metal. The longitudinal stress at weld center is compressive, while the external compressive stress gradually decreases. The longitudinal stress at the boundary of welding color zone is tensile stress, and the maximum tensile stress is found at this point. The transverse stress of weld center is tensile stress, and it gradually increase outward. The maximum transverse tensile stress is obtained at the boundary of welding color zone, and with increasing the welding current and heat input, the toughness of the material reduces, the ferrite in the structure increases, and the welding residual stress is the cause of brittle fracture. The optimum welding current intensity of 40CrNiMoA homogeneous electrode plate butt welding process is 80 A.

**Material Index** Steel 40CrNiMoA, Welded Joint, Microstructure, Properties

40CrNiMoA 为中碳调质钢,淬透性较高、切削加工性能好,但碳量(C)<sub>eq</sub> = 0.875%,焊接性差,焊接时存在较大的热裂纹敏感性和冷裂倾向<sup>[1-2]</sup>。但作为各种装备的关键部件,随着应用越来越广泛,以及应用环境的苛刻,40CrNiMoA 合金钢经常需要进行异种材料和同种材料焊接。

有人对 40CrNiMoA 合金钢与 45 钢、Q235 和 Q690 钢等异种材料焊接工艺及组织性能已做过相关研究,但对 40CrNiMoA 钢同种材料焊接的研究还鲜有报道<sup>[1-4]</sup>。本文研究了采用同质焊条不同氩弧焊接电流对 40CrNiMoA 合金钢平板对接焊接接头组织和性能的影响。

### 1 试验方法及材料

选取 3 组 6 块 40CrNiMoA 钢试板,状态为锻后空冷。试板的尺寸为厚度 3 mm,长 50 mm,宽 130 mm。试板加工成 V 型坡口,坡口角度为 30°。40CrNiMoA 合金钢加工成宽 2 mm,厚 1 mm 焊条。采用专用夹具,拘束单面焊接,背面氩气保护。3 组试板分别采用 70 A、80 A、90 A 电流,电压 10 V 进行平板对接焊接。

采用 KJS-3P 应力测试仪对焊接电流为 80 A 的 40CrNiMoA 钢焊缝区域进行焊接残余应力检测。采用 YXLON DDA X 射线探伤系统对焊接接头进行 X 射线探伤。利用 Wilson 402MVD 型显微硬度计对焊

接头进行维氏硬度测定。在 DDL100 电子万能试验机上对焊接试样进行拉伸性能试验。利用 TESCAN VEGA II SBH 扫描电镜分析拉伸试样断口。在 40CrNiMoA 钢焊接接头处取样制备金相试样,利用 ZEISS Axiovert 40 MAT 光学显微镜观察样品的显微组织。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 X 射线探伤结果

对焊接电流为 70 A、80 A、90 A 焊接接板进行 X 射线探伤。结果表明,上述 3 种焊接工艺下的 40CrNiMoA 钢焊缝中无裂纹、未熔合、未熔透和条形缺陷,在焊缝任意 10 mm × 10 mm 区域内圆形缺陷数量不多于 2 个,无长径大于 2 mm 的缺陷,焊后接头能达到 I 级焊接接头标准。70 A 焊接接板焊缝中存在单个较大尺寸气孔缺陷,80 A 和 90 A 焊接接头中气孔尺寸较小,90 A 焊接接头中气孔缺陷少,尺寸小。随着焊接电流的增大,母材的热输入增大,母材熔化速度加快,焊缝成形更美观,焊缝均匀一致,波纹状明显,焊缝外观质量较好<sup>[5-6]</sup>。

### 2.2 显微组织分析

40CrNiMoA 钢焊接试板母材的状态为锻后空冷,显微组织为贝氏体及少量铁素体,见图 1。

图 2 为焊缝区显微组织。焊接熔池为熔化的局部母材和填加的焊材组成的液态区域,该区域经过凝固结晶形成焊缝柱状晶组织。焊缝区柱状晶组织由熔合线处向焊缝中心生长,随着焊接电流的增大,焊缝区的晶粒尺寸逐渐增大,并且组织粗大,显微组织为马氏体及少量残余奥氏体。随着焊接电流增大,金相组织中的马氏体组织逐渐粗大,其原因是熔池区温度升高,奥氏体晶粒尺寸增大,导致马氏体组织粗大。

图 3 为热影响区的显微组织。熔合线附近热影响区为粗大马氏体 + 残余奥氏体,如图 3 (a~c) 所示。在远熔合线的热影响区组织逐渐细化,组织逐渐变为为细马氏体 + 残余奥氏体。如图 3 (d~f) 所示,在热影响区与母材交界处可见明显的变色

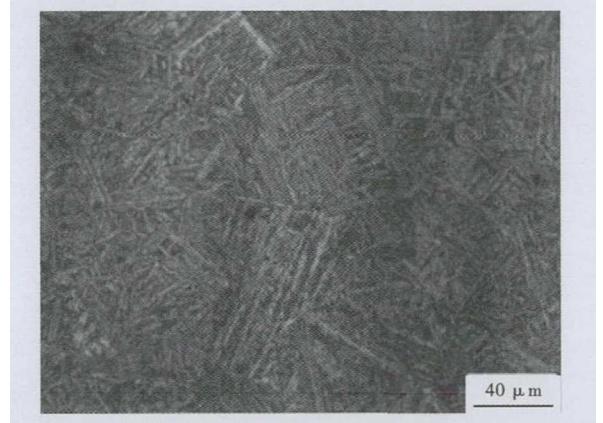


图 1 40CrNiMoA 钢母材的金相组织

Fig. 1 Metallographic structure of base metal of steel 40CrNiMoA

线。在焊接接头外表面看到的颜色区,与其对应显微组织可以看出颜色区附近是热影响区与母材的交界处,热影响区与母材的金相组织显著不同,热影响区的组织为细小粒状贝氏体 + 铁素体。随着焊接电流增大,该处热影响区中铁素体逐渐增多。随着输入热量增高,热影响区的温度升高,导致冷却速度减

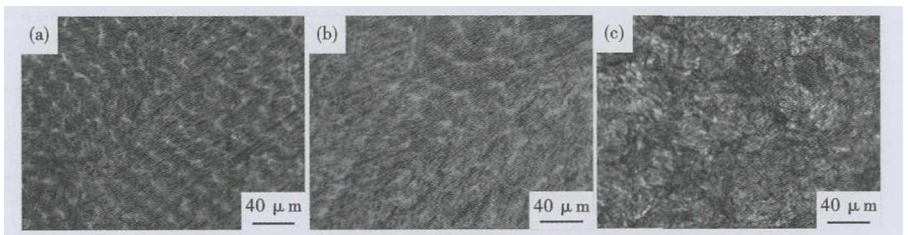


图 2 焊缝区的金相组织:焊接电流:(a)70 A;(b)80 A;(c)90 A

Fig. 2 Metallographic structure of weld zone, welding current: (a)70 A;(b)80 A;(c)90 A

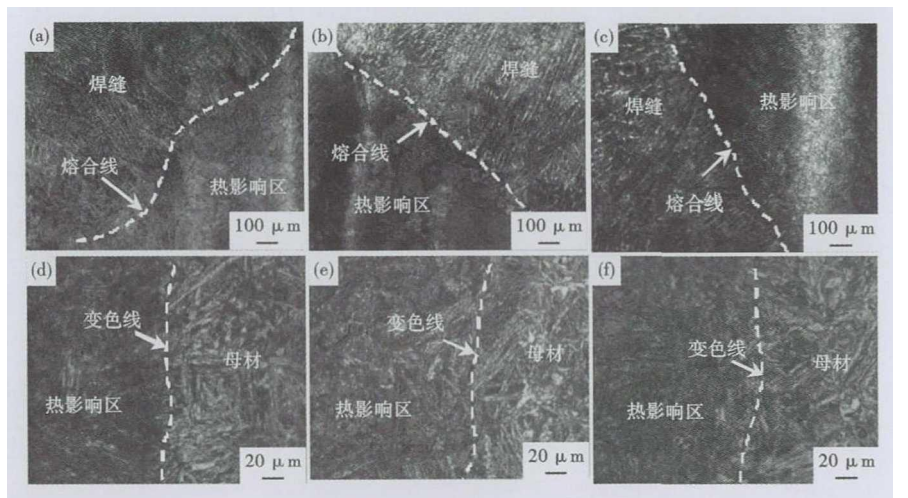


图 3 热影响区的金相组织:(a)70 A 熔合线;(b)80 A 熔合线;(c)90 A 熔合线;(d)70 A 变色线;(e)80 A 变色线;(f)90 A 变色线

Fig. 3 Metallographic structure of heat affected zone:(a)weld fusion line of 70 A;(b)weld fusion line of 80 A;(c)weld fusion line of 90 A;(d)weld color zone of 70 A;(e)weld color zone of 80 A;(f)weld color zone of 90 A

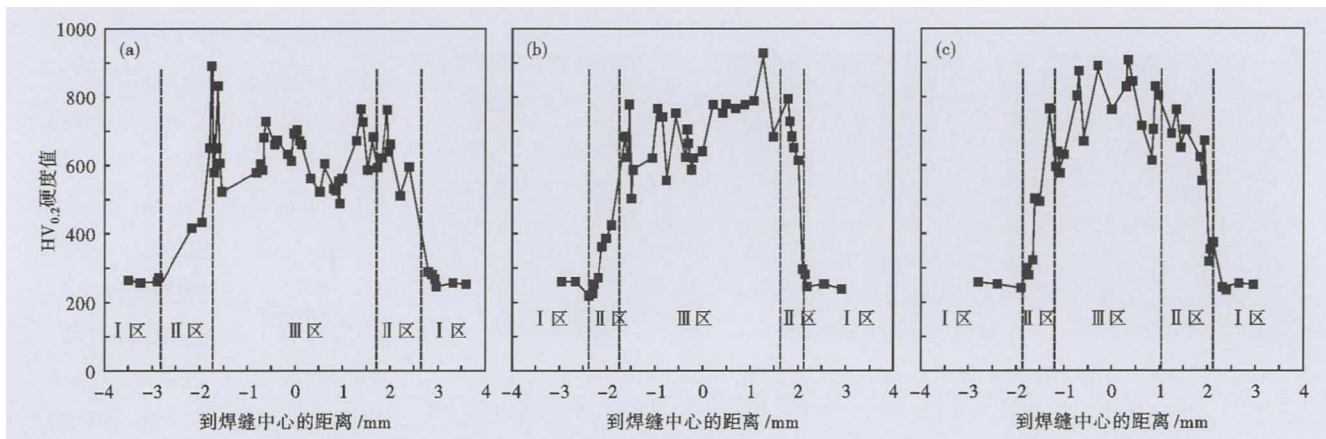


图4 焊接接头硬度曲线,焊接电流:(a)70 A;(b)80 A;(c)90 A  
Fig.4 Hardness curve of welded joints, welding current:(a)70 A;(b)80 A;(c)90 A

慢,析出了更多的铁素体。

### 2.3 焊接接头力学性能分析

为了进一步了解40CrNiMoA钢焊接接头性能的变化,对焊接接头进行了显微硬度测量及分析,沿基体、热影响区、焊缝、热影响区、基体方向测量硬度分布情况,如图4所示。由图4可见,焊接接头不同区域的硬度存在明显的变化,焊缝(Ⅲ区)的硬度达到600 HV<sub>0.1</sub>以上,母材(Ⅰ区)的硬度为230 HV<sub>0.1</sub>左右,焊缝的硬度远高于母材的硬度,且波动较大。热影响区(Ⅱ区)的硬度沿从母材向焊缝方向逐渐升高,这与热影响区的组织组成及组织粗细有关。焊缝整体硬度高于母材区硬度主要是由于焊缝区大量马氏体及粒状贝氏体的存在。硬度波动较大除了测量过程中不可避免的测量误差,焊缝及热影响区存在的马氏体、贝氏体及残余奥氏体等组织不均匀分布是主要原因。当焊接电流为70 A、80 A时,接近焊缝(Ⅲ区)的热影响区(Ⅱ区)的硬度与焊缝(Ⅲ区)的硬度相差不大,而当焊接电流为90 A时,接近焊缝(Ⅲ区)的热影响区(Ⅱ区)的硬度明显低于焊缝(Ⅲ区)的硬度。这是由于随着焊接电流的增大,焊缝的输入热增大,导致热影响区的组织粗大,最终导致硬度降低。

表1是40CrNiMoA钢焊接接头拉伸性能,为两个拉伸样品取平均值。可以看出70 A、80 A、90 A的抗拉强度分别为680、685、665 MPa。不同焊接电流板材拉伸试样断裂位置不同,焊接电流为70 A、80 A的拉伸试样在母材区,说明焊缝及热影响区的强度高于母材。塑性变形区也主要发生在母材区,而焊缝区塑性变形很小。这是由于焊缝及热影响区的组织为马氏体,马氏体强度大,塑性变形能力差<sup>[7]</sup>。焊接电流为90 A时拉伸试样断裂在焊接颜色

表1 40CrNiMoA 钢焊接接头的拉伸性能

Table 1 Tensile properties of welded joints of steel 40CrNiMoA

焊接电流/ A	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	断面收缩率/ %	断裂位置
70	680	15.0	28.6	母材
80	685	12.7	33.6	母材
90	665	9.5	5.9	热影响区

区边界处,为热影响区,说明该区的强度低于母材<sup>[8]</sup>。

图5是40CrNiMoA钢焊接接头拉伸后的断口形貌。可见,焊接电流为70 A、80 A焊接接头拉伸断口为韧窝状,是典型的韧性断口(图5a、b)。90 A焊接接头断口同时存在韧窝状的韧性断裂区及准解理脆性断裂区(图5c)。

应力测试位置和示意图如图6(a、b)所示:①点在焊缝中心,②为熔合线,③点位于焊接颜色区边界处,焊缝宽约8 mm,①②间距4 mm,③④间距7 mm,④⑤间距5 mm,⑤⑥点间距10 mm。

表2是焊接电流为80 A的40CrNiMoA钢平板对接焊接接头的残余应力值。可见,焊接接头纵向应力在①点焊缝中心为压应力,向外压应力减小,到②点熔合线处仍为压应力;③点焊接颜色区边界处变为拉应力,并且在该处拉应力为最大值,向外拉应力逐渐减小;到达⑥点又变为压应力。焊接接头横

表2 焊接电流80 A 平板对接焊缝沿板材横向的应力(σ)  
Table 2 Transverse stress (σ) along plate by plate welding with welding current 80 A

测点	σ <sub>x</sub> /MPa	σ <sub>y</sub> /MPa
1	-99	15
2	-24	23
3	125	24
4	21	13
5	11	-2
6	-12	-19

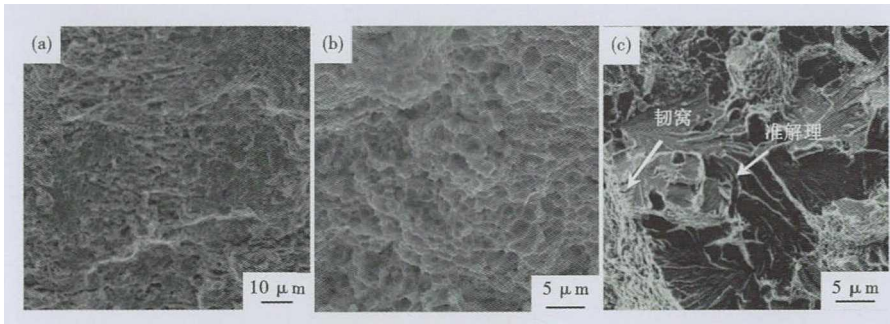


图 5 40CrNiMoA 钢拉伸断口微观形貌,焊接电流:(a)70 A;(b)80 A;(c)90 A  
 Fig.5 Microscopic morphology of tensile fracture of steel 40CrNiMoA, welding current: (a)70 A;(b)80 A;(c)90 A

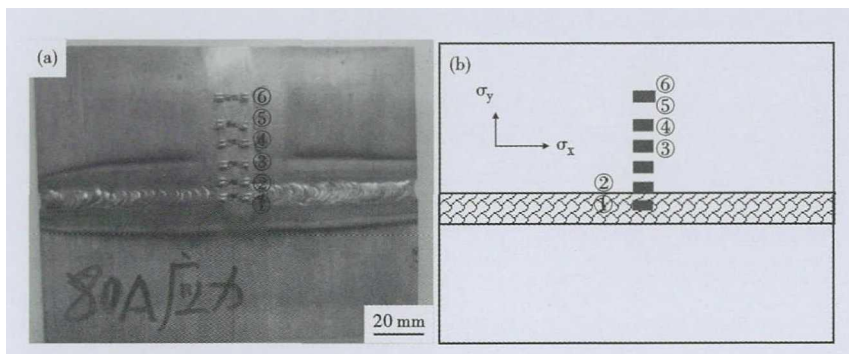


图 6 焊接接头应力测试位置图(a)和示意图(b)  
 Fig.6 Stress test location map (a) and schematic diagram (b) of welded joint

向应力在焊缝中心为拉应力,向外逐渐增大;到③点焊接颜色区边界处变拉应力达到最大,在⑤点变为压应力,向外压应力增大。由于本焊接是拘束的状态下进行的,这与在自由状态下进行的焊接有很大不同,构件内压力的分布与拘束条件有密切关系<sup>[9]</sup>。焊缝的应力是反作用内压力及焊缝收缩等产生应力的叠加<sup>[7]</sup>。本拘束焊接较大减少了试板焊接角变形,同时在焊缝背面的焊缝和近缝区,焊接时始终氩气保护,两者综合作用,使得焊缝位置出现纵向压应力。由于焊接其他条件相同,焊接电流为 70 A 与 90 A 焊接接头残余应力与 80 A 分布规律大致相同,所以只给出焊接电流为 80 A 的残余应力一组数值。

### 3 结果分析与讨论

40CrNiMoA 钢焊缝的硬度远高于母材的硬度,且波动较大。热影响区的硬度沿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。焊缝整体硬度高于母材区硬度主要是由于焊缝区大量马氏体及粒状贝氏体的存在,除了测量过程中不可避免的测量误差,焊缝及热影响区存在的铁素体、马氏体等组织不均匀分布是热影响区硬度值波动较大的主要原因。当焊接电流为 70 A、80 A 时,接近焊缝的热影响区的硬度与焊缝的硬度相差不大,而

当焊接电流为 90 A 时,接近焊缝的热影响区的硬度明显低于焊缝的硬度。这是由于随着焊接电流的增大,焊缝的输入热增大,导致热影响区的组织粗大,最终导致硬度降低。热影响区在靠近熔合线处为粗晶组织,向母材方向组织逐渐变细,组织由马氏体 + 残余奥氏体向马氏体 + 奥氏体 + 少量铁素体、马氏体 + 贝氏体 + 残余奥氏体 + 少量铁素体、贝氏体 + 少量铁素体组织逐渐转变。随着焊接电流增大,金相组织逐渐变粗大,其原因是随着焊接电流增大,输入热量增高,导致组织奥氏体粗化及冷却后的组织粗大。焊接接头纵向应力在焊缝中心为压应力,向外压应力减小,在焊接颜色区边界处为拉应力,并且在该处拉应力为最大值,向外拉应力逐渐减小。焊接接头横向应力在焊缝中心为拉应力,向外逐渐增大;到焊接颜色区边界处拉应力达到最大。拘束焊接较大减少了试板焊接角变形,同时使得焊缝上面和远离焊缝的母材位置出现纵向压应力。

在 40CrNiMoA 钢焊接接头拉伸实验中,焊接电流为 70 A、80 A 的拉伸试样断裂在母材区;焊接电流为 90 A 时拉伸试样断裂在焊接颜色区边界处,为焊接接头的热影响区。70 A、80 A 焊接接头拉伸断口为韧窝状,是典型的塑性断口。90 A 焊接接头断口同时存在韧窝状韧性断裂区及准解理脆性断裂区,这是因为在拉伸过程中在不同部位产生许多解理小裂纹,然后小裂纹不断长大,最后以塑性方式撕裂剩余连接部分,所以断口为混合型断口<sup>[10]</sup>。焊接热过程导致材料性能恶化、焊接残余应力及焊接变形、焊接缺陷等是引发脆性断裂的几个主要原因<sup>[11-12]</sup>。焊接热输入对钢材焊接接头热影响区脆性有重要影响,过大的热输入造成晶粒粗大和脆化,焊接电流增大,热输入增大,降低了材料的韧性,是导致脆性断裂的一个原因。在钢的焊接区中,受热在 Ac<sub>1</sub> 以下的区域由于焊接时经受热及应变作用也会产生韧性劣化现象。随着焊接电流的增大焊缝的输入热增大,组织中 铁素体增多,是降低该区韧性的另一个原因<sup>[13]</sup>。焊接电流为 90 A 时拉伸断裂的颜

色区边界处是焊接应力最大位置。焊接残余应力本身具有二维及三维特征,与外加应力叠加易形成三轴拉伸等不利的应力状态,所以焊接残余应力是诱发脆性断裂的重要原因。在一般焊接构件中,焊缝区的纵向拉伸残余应力峰值较高,对于某些材料来说,可以接近材料的屈服强度。当外载工作应力与其方向一致而相互叠加时,这一区域会发生塑性变形,并因而丧失了承受外载的能力,减少构件的有效承载面积。但只要材料具有足够的塑性,能进行塑性变形,则内压力的存在并不影响构件的承载能力,因而对静载强度没有影响<sup>[14]</sup>。如果材料处于脆性状态,当外载增加时,由于材料不能发生塑性变形使构件上应力均匀化,因而应力峰值不断增加,一直达到材料的抗拉强度。这将造成局部破坏,从而导致整个构件断裂<sup>[15]</sup>。也就是说,当材料塑性变形能力不足时,内压力的存在将影响构件的承载能力,使其静载强度降低<sup>[7]</sup>。

综上所述,焊接电流为 80 A 时,焊缝成形较美观,焊缝均匀一致,波纹状明显,焊缝外观质量较好;焊缝的显微组织为马氏体及少量残余奥氏体,热影响区的组织为细小粒状贝氏体 + 铁素体,显微组织较细;其热影响区硬度未明显下降;抗拉强度 685 MPa,伸长率为 12.7%,拉伸断口为韧性断口,抗拉强度及塑性较好。因此,80 A 是 40CrNiMoA 钢同质焊条平板对接焊接工艺的最佳的焊接电流。

#### 4 结论

(1)随着焊接电流的增大,焊缝成形越美观,焊

缝均匀一致,波纹状明显,焊缝外观质量较好。

(2)随着焊接电流的增大,熔池区温度升高,奥氏体晶粒尺寸增大,焊缝区的晶粒尺寸增大,并且马氏体组织粗大,显微组织为马氏体及少量残余奥氏体。

(3)焊缝的硬度远高于母材的硬度,且波动较大;热影响区的硬度从母材沿焊缝方向逐渐升高。

(4)焊接电流为 70 A、80 A 时,焊缝及热影响区的强度高于母材,焊接电流为 90 A 时接近母材的热影响区处的强度低于母材。

(5)焊接接头纵向应力在焊缝中心为压应力,向外压应力减小,焊接颜色区边界处为拉应力,且该点拉应力最大;焊接接头横向应力在焊缝中心为拉应力,向外逐渐增大,焊接颜色区边界处拉应力达到最大。

(6)焊接电流增大,热输入增大,降低了材料的韧性,组织中 铁素体增多及焊接残余应力是诱发脆性断裂的原因。

(7)焊接电流 80 A 是 40CrNiMoA 钢同质焊条平板对接焊接工艺的最佳的焊接电流。

天津市科技重大专项项目(18ZXJMTG00050);天津市自然科学基金项目(19JCYBJC17100);天津市高等学校创新团队培养计划项目(TD13-5096);天津职业技术师范大学校级科研项目(KJ1911)天津职业技术师范大学大学生创新创业训练项目(201710066058)资助

#### 参考文献

- [1] 姜宇航,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] 冒健国,张贤,田国祥. 40CrNiMoA 调质钢 MAG 焊焊接工艺探讨与应用[J]. 机械工人, 2006, 47(9): 47 + 50.
- [3] 孙章龙. 隧道掘进机中 40CrNiMoA 与 Q345C 异种钢的焊接工艺[J]. 焊接技术, 2016, 45(8): 45-47.
- [4] 薛强,王先龙,陈克华. Q690 钢与 40CrNiMoA 钢的焊接工艺研究[J]. 煤矿机电, 2018, 40(1): 100-102.
- [5] 赵雪勃,曹梅青. 304L 不锈钢的钨极氩弧焊工艺[J]. 焊接技术, 2011, 40(7): 20-22.
- [6] Yang Lin, Jiang Xiaohu and Wang Xiaohu. Study on Welding Process Performance of HC70D High Strength Steel Plate[J]. China Welding, 2018, 27(3): 59-64.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 毛志伟,黄涛,徐伟. 外拘束角接头旋转电弧焊接应力应变分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(3): 15-20 + 161.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Li Yanjun, Wu Aiping and Li Quan, et al. Effects of Welding Parameters on Weld Shape and Residual Stresses in Electron Beam Welded Ti2AlNb Alloy Joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(1): 67-76.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Gao Fuyang, Gao Qi and Jiang Peng, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Ti6321 Alloy Welded Joint by EBW[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2018, 1(4): 265-269.

刘艳梅(1976-),女,硕士(2011年中国科学院金属研究所),工程师,1999年长春理工大学(本科)毕业,变形高温合金组织和性能研究。E-mail:13502158963@163.com

收稿日期:2019-12-05