

焊接电流对 4Cr5Mo2V 钢 TIG 焊接头组织与性能的影响

吴少君^{1,2}, 郭 鹏^{1,2}, 左鹏鹏^{1,2,3}, 吴晓春^{1,2,3}

(1.上海大学省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室,上海 200444;
2.上海大学材料科学与工程学院,上海 200444;3.上大鑫仑材料科技(广东)有限公司,肇庆 526105)

摘 要: 在不同电流(70,130,190 A)下对 4Cr5Mo2V 钢进行钨极氩弧(TIG)焊试验,研究了焊接电流对焊接接头组织与性能的影响。结果表明:焊接接头由焊缝区、熔合区、完全淬火区、不完全淬火区和母材组成;随着焊接电流的增大,完全淬火区中回火马氏体增多,马氏体板条变粗,不完全淬火区中回火马氏体和珠光体变粗,这 2 个区域的硬度降低;随着焊接电流的增大,焊接热影响区的范围减小,焊缝区的晶粒尺寸增加,焊缝区的平均硬度降低;焊接电流为 70 A 时,焊接接头的组织细小,整体硬度最高,焊接电流为 190 A 时,焊接接头的组织粗大,整体硬度最低,但是组织均匀性较好,焊接电流为 130 A 时,焊接接头组织均匀性较好,熔合区和热影响区范围均较小。

关键词: 焊接电流;4Cr5Mo2V 钢;TIG 焊接接头;显微组织;性能

中图分类号: TG142.45

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)增刊 2-0097-06

Effect of Welding Current on Microstructure and Properties of 4Cr5Mo2V Steel TIG Welded Joint

WU Shaojun^{1,2}, GUO Peng^{1,2}, ZUO Pengpeng^{1,2,3}, WU Xiaochun^{1,2,3}

(1.State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2.College of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

3.Shangda Xinlun Material and Technology (Guangdong) Co., Ltd., Zhaoqing 526105, China)

Abstract: Tungsten inert-gas arc (TIG) welding test was applied to 4Cr5Mo2V steel at different currents (70,130,190 A). The effect of welding current on microstructure and properties of the welded joint were studied. The results show that the welded joint consisted of weld zone, fusion zone, quenching zone, partial quenching zone and base metal. With increasing welding current, the content of tempered martensite in quenching zone increased and martensite lath got thicker; the tempered martensite and pearlite in partial quenching zone got thicker; the hardness of the two zones decreased. With increasing welding current, the range of welding heat affected zone decreased, and the grain size in the weld zone increased, resulting in that the average hardness decreased. When the welding current was 70 A, the microstructure of the welded joint was fine, and the overall hardness was the highest. When the welding current was 130 A, the microstructure of the welded joint was coarse; the hardness was the lowest, but the microstructure had the good uniformity. When the welding current was 190 A, the microstructure of the welded joint had the good uniformity, and the range of fusion zone and heat affected zone of welded joint was relatively small.

Key words: welding current;4Cr5Mo2V steel; TIG welded joint; microstructure; property

收稿日期:2020-09-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0300402);广东省重点领域研发计划项目(2020B010184002)

作者简介:吴少君,男,硕士研究生,主要从事热作模具钢可焊性研究。1079895313@qq.com

导师:吴晓春教授/博导

0 引 言

4Cr5Mo2V 钢是一种具有良好抗热疲劳性能和高韧性的压铸模具钢^[1],但是其较差的可焊性限制了其在生产中的应用范围。随着研究的深入,国内某些高校已经成功使用钨极氩弧(TIG)焊对模具钢

进行焊接^[2-3]。合适的焊接参数是保证 TIG 焊接接头性能稳定的关键,而焊接电流是其中一个重要的工艺参数。研究 TIG 焊中焊接电流对 4Cr5Mo2V 钢焊接接头组织与性能的影响规律,对于 4Cr5Mo2V 钢焊接工艺的制定有重要的指导意义。

近年来,国内外学者对于焊接电流的影响开展了很多研究。AMRAEI 等^[4]研究发现,焊接电流的增加会加剧高强钢热影响区的软化。MADHAVAN 等^[5]研究发现,焊接电流的增加会导致 9Cr-1Mo 钢焊接接头中 δ 铁素体含量增加,并加剧第二相粒子的聚集。过高的焊接电流不仅会导致焊接接头的抗拉强度、硬度和晶粒度无法满足使用要求^[6],还会增大焊接热影响区的范围,使得焊缝区出现过热组织增加^[7]、柱状晶数量增加^[8]、枝晶间碳化物不均匀析出^[9]等现象。虽然过高的焊接电流会对焊接接头造成不利的影响,但是在合理的范围内提高焊接电流可提高焊接接头的性能。LIU 等^[10]研究发现,在高电流下焊接接头具有 $t_{8/5}$ (800 °C 到 500 °C 的冷却时间)高、冷却速率低、错向率高、组织粗大的特点,但是焊接接头仍具有良好的韧性。增大焊接电流可提高 304 不锈钢焊接接头的拉伸性能^[11]。高电流下双相不锈钢焊接接头中形成的二次奥氏体可在一定

程度上提高其力学性能^[12]。较高的焊接电流可补偿焊缝中合金元素的损失^[13]。QIN 等^[14]提出,低电流下冷却速率对晶粒尺寸起主导作用,高电流下热输入对晶粒尺寸起主导作用,因此随着焊接电流的增大,晶粒尺寸先减小后增大。由此推测,焊接电流对 4Cr5Mo2V 钢 TIG 焊接头组织和性能有较大的影响,而目前有关该方面的研究较少。因此,作者采用 TIG 焊接方法对 4Cr5Mo2V 钢进行堆焊,研究不同电流下焊接接头的显微组织和力学性能,为实际生产实践提供试验参考。

1 试样制备与试验方法

母材为退火态 4Cr5Mo2V 钢,尺寸为 100 mm×100 mm×30 mm,焊丝牌号为 QRO90,用 OBLF 型光谱仪测母材和焊丝的成分,结果见表 1。用线切割机在母材表面开 U 型坡口,坡口尺寸如图 1(a)所示。焊前用打磨机打磨试样并用酒精清洗坡口的铁锈、油污后,对试样进行 350 °C×2 h 预热处理,在 YC-400TX 型直流氩弧焊机上进行 TIG 试验,采用多层多道焊填满坡口,焊接电流分别为 70,130,190 A,氩气流量为 10 L·min⁻¹,焊后使用锤击法消除焊缝应力,所得焊接接头如图 1(b)所示。

表 1 母材和焊丝的成分(质量分数)

Table 1 Composition of base metal and welding wire (mass)

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
4Cr5Mo2V 钢	0.377	0.274	0.363	0.010 0	0.001 9	4.99	2.44	0.546
QRO90 焊丝	0.374	0.279	0.798	0.008 0	0.002 0	2.60	2.25	0.870

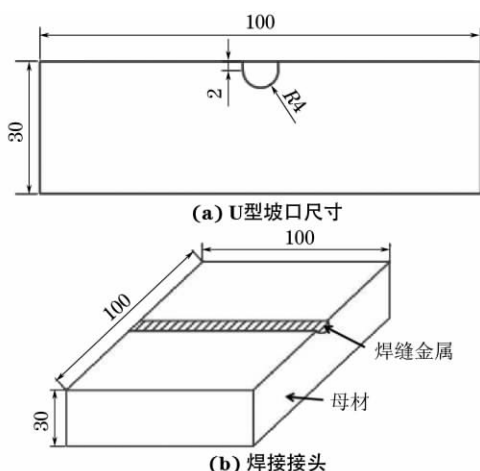


图 1 U 型坡口尺寸与焊接接头示意

Fig.1 Diagram of U-groove size (a) and welded joint (b)

焊后用线切割机沿试样横截面取样,经打磨、抛光,用体积分数 4% 硝酸酒精溶液腐蚀后,用 Axio Lab.A1 型光学显微镜观察焊接接头的显微

组织,用 HVS-1000M 型维氏硬度计测焊接接头的显微硬度。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

由图 2 可以看出,焊接接头包括焊缝区、熔合区、完全淬火区、不完全淬火区和母材 5 个区域,在焊缝区和熔合区之间有一条明显的白色熔合线。完全淬火区和不完全淬火区组成热影响区。完全淬火区组织主要为马氏体、回火马氏体。不完全淬火区组织为珠光体、马氏体和回火马氏体。焊缝区和完全淬火区间为熔合区,相比于完全淬火区,该区域组织异常粗大,为粗大的柱状晶;熔合区底部晶粒杂乱无章,没有明显的方向性,而熔合区顶部晶粒表现出一定的方向性。焊缝区盖面层到底底层的一次结晶形貌和晶粒尺寸都有明显的区别。盖面层顶部的晶

粒无明显的方向性且晶粒较细小,其底部的晶粒大部分为等轴晶但有明显的方向性,有向柱状晶变化的趋势,同时存在少部分等轴晶聚集而形成的粗大柱状晶。中间层为明显的柱状晶,还存在二次枝晶。打底层晶粒最粗大,依附于熔合区表面晶粒向焊缝中心生长,为明显的柱状晶,同时还有明显的晶界液化现象。盖面层组织主要为板条马氏体,中间层和打底层由于受到多层焊引起的多次回火作用而形

成回火马氏体,同时还存在板条马氏体。

由图 3 可以看出:在焊接电流为 70 A 时,完全淬火区组织较均匀,在多次回火作用下碳化物分布均匀,呈球状和短棒状;当焊接电流增大至 130 A 时,碳化物开始出现聚集、长大的现象而形成链状碳化物;在焊接电流为 190 A 时,完全淬火区存在大量的链状碳化物。随着焊接电流的增大,完全淬火区链状碳化物的数量和尺寸均增大。由图 4 可以看

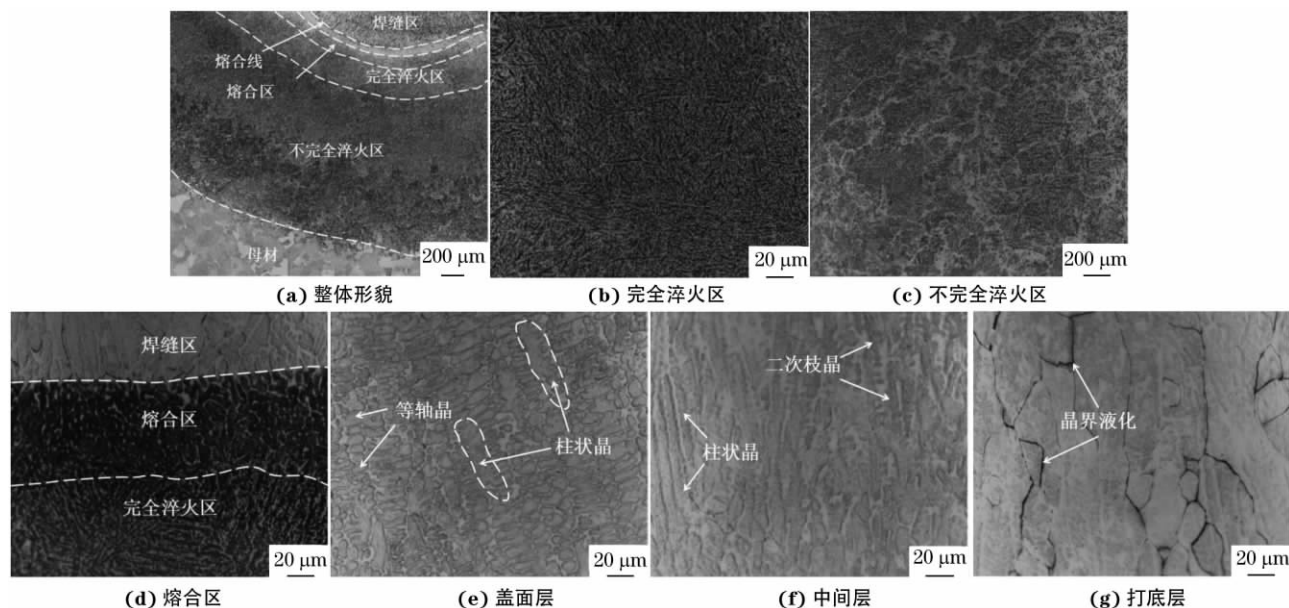


图 2 焊接接头的显微组织(焊接电流 70 A)

Fig.2 Microstructures of weld joint (welding current of 70 A): (a) overall morphology; (b) quenching zone; (c) partial quenching zone; (d) fusion zone; (e) capping layer; (f) middle layer and (g) bottom layer

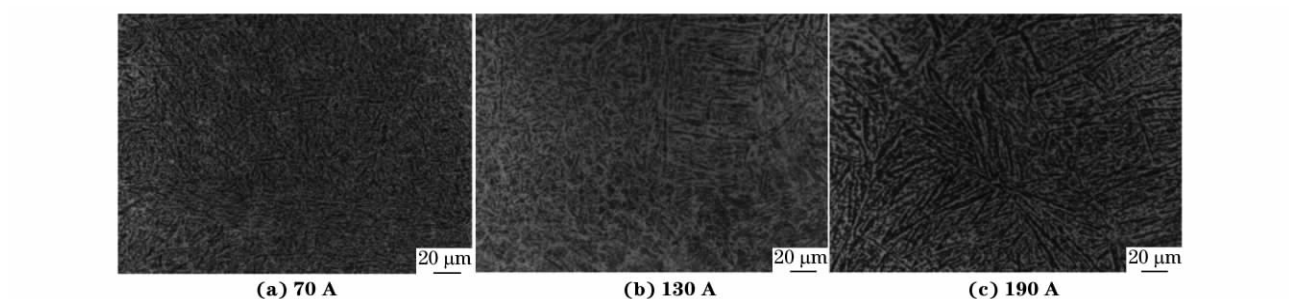


图 3 不同焊接电流下焊接接头完全淬火区的显微组织

Fig.3 Microstructures of quenching zone in welded joint at different welding currents

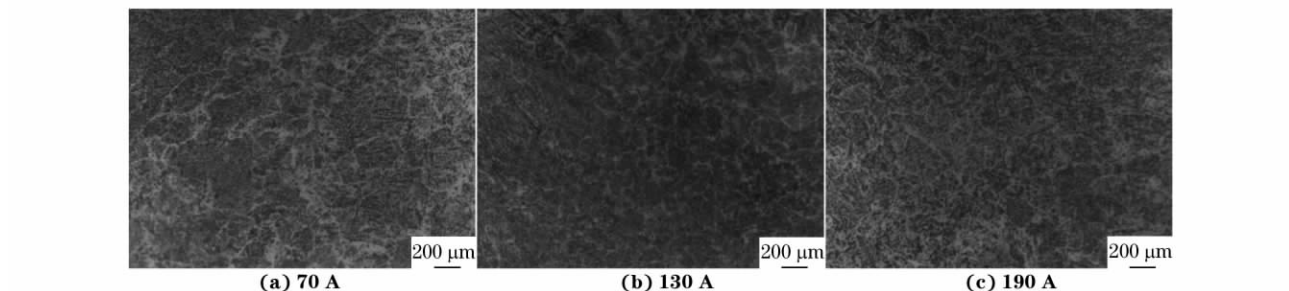


图 4 不同焊接电流下焊接接头不完全淬火区的显微组织

Fig.4 Microstructures of partial quenching zone in welded joint at different welding currents

出,随着焊接电流的增加,不完全淬火区中的回火马氏体和珠光体数量增加,组织变均匀。

由图 5 可以看出:当焊接电流由 70 A 增大至 130 A 时,熔合区的平均宽度由 65.7 μm 增大至 70.5 μm ,增加幅度较小,当焊接电流增大至 190 A 时,熔合区的平均宽度为 129.5 μm ,增加幅度较大。

在焊接电流为 70 A 时,靠近熔合区的焊缝打底层晶粒尺寸较小但是晶界液化现象明显;在焊接电流为 190 A 时,晶界液化现象减少,熔合界面组织更加均匀。

由图 6 可以看出:在焊接电流为 70 A 时,焊缝盖面层晶粒有一定的方向性,并且晶粒尺寸较小;随

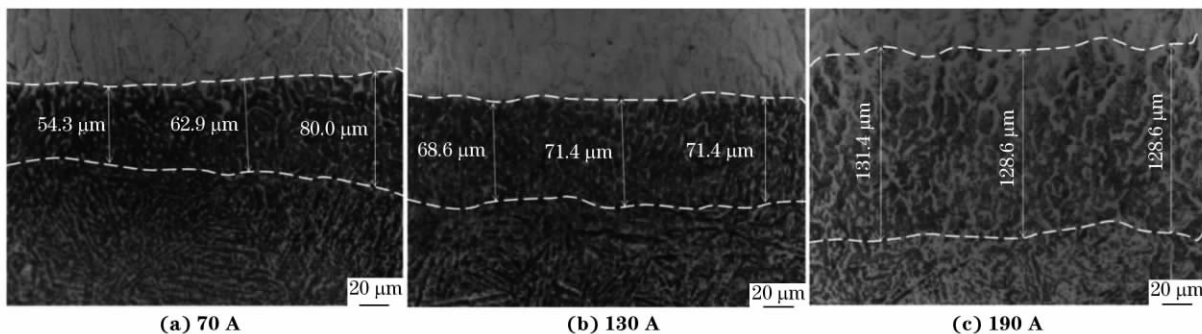


图 5 不同焊接电流下焊接接头熔合区的显微组织

Fig.5 Microstructures of fusion zone in welded joint at different welding currents

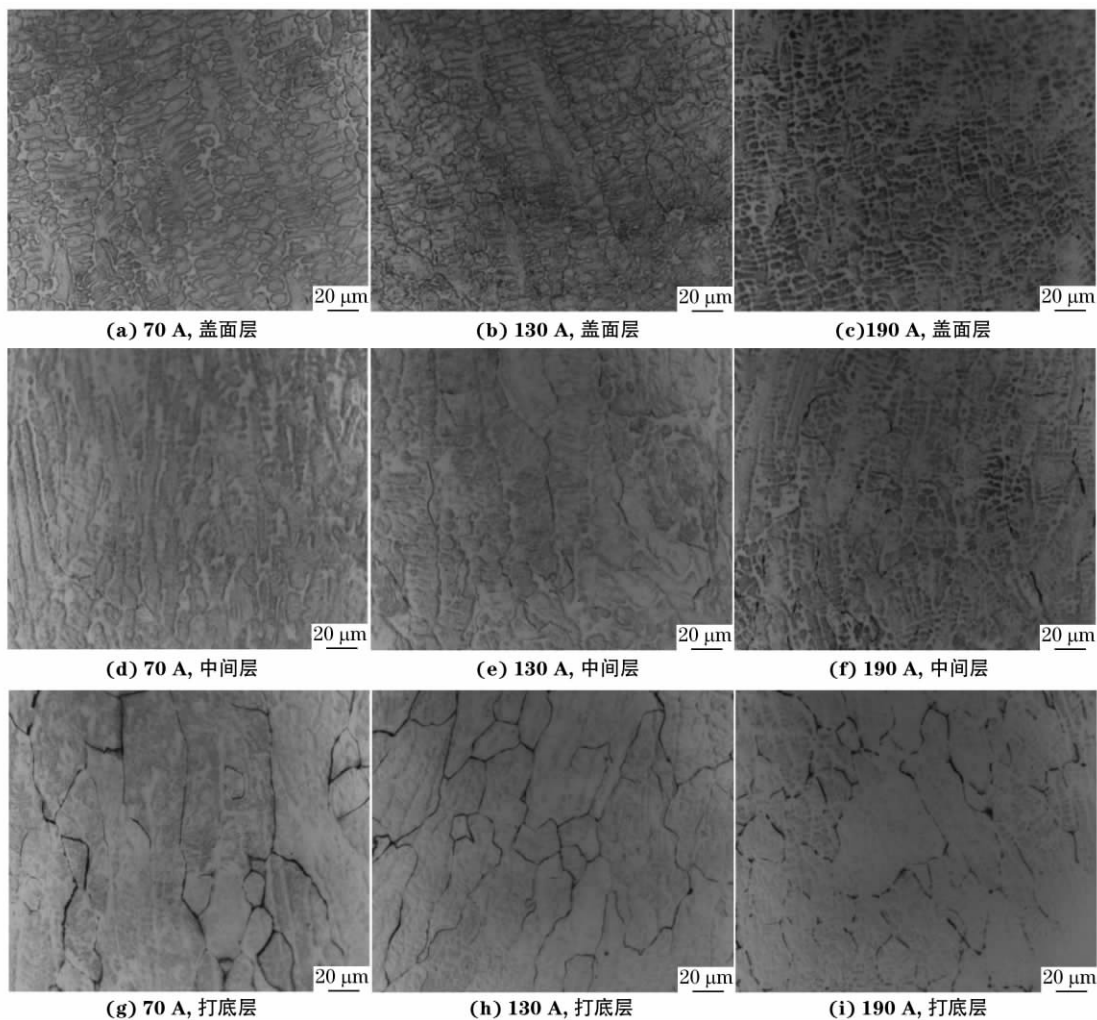


图 6 不同焊接电流下焊接接头焊缝不同区域的显微组织

Fig.6 Microstructures of different regions in the weld of the welded joint at different welding currents: (a—c) capping layer; (d—f) middle layer and (g—i) bottom layer

着焊接电流增加到 130 A 时,晶粒向某一方向生长形成柱状晶;在焊接电流为 190 A 时,晶粒向四周生长而具有形成更大等轴晶的倾向。随着焊接电流的增大,焊缝中间层和打底层柱状晶的形貌越来越明显,晶粒尺寸增大。

2.2 力学性能

由图 7(a)可以看出:焊接接头完全淬火区的硬度最高,这是因为其组织中存在大量的板条马氏体和回火马氏体;完全淬火区中靠近熔合线的位置硬度较高,这是因为该区域为过热区,在焊接过程中大量合金元素和碳化物溶入奥氏体中,焊后形成粗大的高碳马氏体,因此该区域具有较高的硬度;完全淬火区中远离熔合线的位置硬度较低,这是因为该区域的焊接峰值温度较低,相当于淬火温度较低,导致该区域固

溶效果较差,冷却后形成细小马氏体,因此硬度较低。不完全淬火区的硬度明显低于完全淬火区的,这是因为该区域除了存在马氏体和回火马氏体外,还有珠光体,并且距熔合线距离越远区域中马氏体和回火马氏体的占比越低,因此远离熔合线处的不完全淬火区的硬度降低,并逐渐趋近于母材硬度。焊缝打底层在距熔合线 0~1 mm 范围内,盖面层在距熔合线 5~6 mm 范围内。由图 7(b)可以看出:打底层的硬度最低,盖面层的硬度最高。盖面层为等轴晶形貌且晶粒较细小,在细晶强化的作用下该区域硬度较高。打底层和中间层都为柱状晶形貌,中间层和打底层由于受到后层焊道的回火影响而形成部分回火组织,因此这 2 个区域的硬度较低。中间层的柱状晶尺寸小于打底层的,因此中间层的硬度较高。

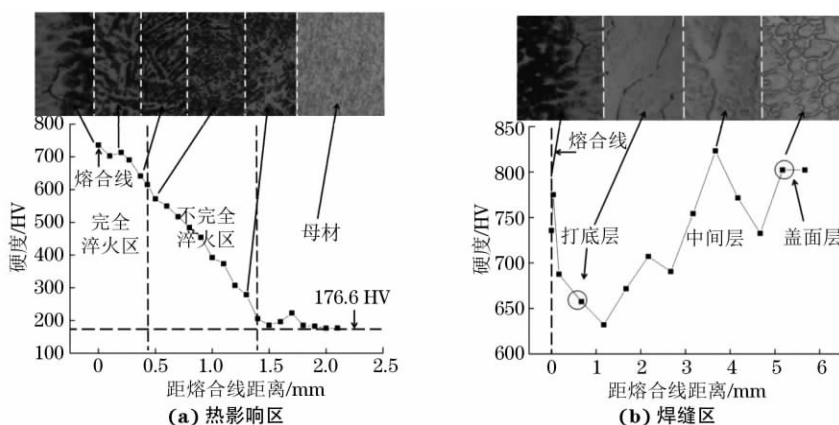


图 7 焊接接头热影响区和焊缝区的硬度分布曲线(焊接电流 70 A)

Fig.7 Hardness distribution curves of heat affected zone (a) and weld zone (b) in the welded joint (welding current of 70 A)

由图 8(a)可以看出:随着焊接电流的增加,完全淬火区和不完全淬火区的硬度都降低,完全淬火区的软化是因为焊接电流的增大导致回火组织的增多和马氏体板条的粗化,而不完全淬火区的软化是因为焊接电流的增大导致回火组织和珠光体的粗化;随着焊接电流的增大,焊接热影响区的范围减小,这是因为在高电流下焊丝的熔化速率更快,焊接

过程中焊炬的移动速率增加,单位面积热影响区的焊接热输入减少,因此热影响区的面积也随之减小。由图 8(b)可以看出:随着焊接电流的增加,焊缝区的平均硬度降低,这是因为随着焊接电流的增加,焊缝区的晶粒尺寸增加,同时由于多层多道焊导致中间层和打底层出现更多的回火组织而使得这 2 个区域出现明显的软化现象。

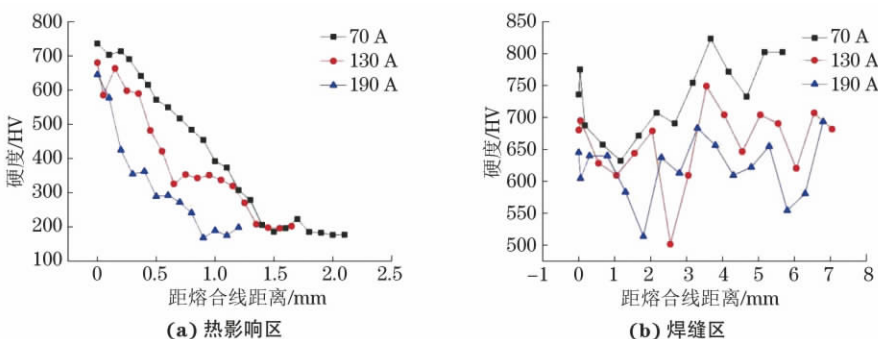


图 8 不同焊接电流下焊接接头热影响区和焊缝区的硬度分布曲线

Fig.8 Hardness distribution curves of heat affected zone (a) and weld zone (b) in the welded joint at different welding currents

3 结 论

(1) 4Cr5Mo2V钢焊接接头分为焊缝区、熔合区、完全淬火区、不完全淬火区和母材区,熔合区组织粗大,硬度最高,约为700 HV,焊缝区和完全淬火区组织主要为马氏体和回火马氏体,硬度大于600 HV,不完全淬火区组织为珠光体、马氏体和回火马氏体,硬度在200~600 HV,热影响区的硬度随着距熔合线距离的增加而降低,焊缝区的硬度随着距熔合线距离的增加而升高。

(2) 随着焊接电流的增大,完全淬火区中回火马氏体组织增多,马氏体板条变粗,不完全淬火区中回火马氏体和珠光体变粗,这2个区域的硬度降低;随着焊接电流的增大,焊接热影响区的范围减小,焊缝区的晶粒尺寸增加,焊缝区的平均硬度降低;焊接电流为70 A时,焊接接头的组织细小,整体硬度最高,焊接电流为190 A时,焊接接头的组织粗大,整体硬度最低,但是组织均匀性较好,焊接电流为130 A时,焊接接头组织均匀性较好,熔合区和热影响区范围均较小。

参考文献:

- [1] 夏书文,左鹏鹏,吴晓春.国内外压铸模具钢发展概述[J].模具制造,2017,17(7):93-99.
- [2] 陈城洋.H13热作模具钢的焊接修复工艺研究[D].长春:长春工业大学,2017.
- [3] 孔祥瑞.新型冷作模具钢5Cr5MoV焊接接头组织与性能研究[D].长春:吉林大学,2018.
- [4] AMRAEI M, AHOLA A, AFKHAMI S, et al. Effects of heat input on the mechanical properties of butt-welded high and ultra-high strength steels[J]. Engineering Structures, 2019, 198:109460.
- [5] MADHAVAN S, KAMARAJ M, ARIVAZHAGAN B. A comparative study on the microstructure and mechanical properties of fusion welded 9 Cr-1 Mo steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2):2223-2229.
- [6] CHENNAIAH M B, KUMAR P N, RAO K P. Experimental investigation of microstructure and mechanical properties of IS2602-EN31 MIG welded joint [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27:2896-2900.
- [7] 林忠英. 焊接工艺参数对焊缝成型及组织性能的影响研究[J]. 内江科技, 2018, 39(7): 122-123.
- [8] 宋雨来,孔祥瑞,李悦,等.焊接电流对Cr12MoV冷作模具钢焊缝组织性能的影响[J].汽车工艺与材料,2017(8):20-22.
- [9] 闵晓峰,赵宗合,李亚丽等. 焊接工艺参数对9Ni钢焊接接头组织及弯曲性能的影响[J]. 电焊机, 2019, 49(6): 41-44.
- [10] LIU F Y, TAN C W, GONG X T, et al. A comparative study on microstructure and mechanical properties of HG785D steel joint produced by hybrid laser-MAG welding and laser welding[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 128:106247.
- [11] SRIDHAR P V S S, BISWAS P, MAHANTA P. Influence of welding current on bead profile and mechanical properties of double sided submerged arc welding of AISI 304 austenitic stainless steel[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 19: 831-836.
- [12] LUCHTENBERG P, DE CAMPOS P T, SOARES P, et al. Effect of welding energy on the corrosion and tribological properties of duplex stainless steel weld overlay deposited by GMAW/CMT process[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 375:688-693.
- [13] ABIOYE T E, ARIWOOLA O E, OGEDENGBE T I, et al. Effects of welding speed on the microstructure and corrosion behavior of dissimilar gas metal arc weld joints of AISI 304 stainless steel and low carbon steel[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 17:871-877.
- [14] QIN B, YIN F C, ZENG C Z, et al. Microstructure and mechanical properties of TIG/A-TIG welded AZ61/ZK60 magnesium alloy joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(9):1864-1872.