

焊后热处理对热丝 TIG 焊接 10Cr9Mo1VNb 锅炉用钢组织性能的影响

赖春明¹, 李 琴¹, 周家林², 吴兴欢¹, 黄 艳³

- (1. 湖南化工职业技术学院 机械工程学院, 湖南 株洲 412011;
2. 武汉科技大学 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081;
3. 湖南化工设计院有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要:对 10Cr9Mo1VNb 锅炉用钢进行了热丝 TIG 多层多道焊接试验,并对焊接接头进行不同温度(740 ~ 790 °C)和不同时间(1 ~ 4 h)的焊后热处理,采用硬度、金相、室温拉伸以及夏比摆锤冲击、SEM 等试验手段分析了焊后热处理对接头组织性能的影响。结果表明,焊后热处理可以把焊接过程中接头形成的马氏体转变为回火马氏体,从而使接头各个区域的组织性能的均匀性得到明显改善。在 740 °C 下进行热处理,随着热处理时间增加,强度小幅度降低,塑性与韧性均得到进一步改善。而在 790 °C 下进行热处理,强度、塑性和韧性会随着时间的增加而降低,这主要是因为接头中 $M_{23}C_6$ 型碳化物发生了粗化。

关键词:焊后热处理;热丝 TIG 焊;10Cr9Mo1VNb 锅炉用钢;显微组织;力学性能

中图分类号: TG441.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2024)09-0169-07

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2024.09.027

Effect of post weld heat treatment on microstructure and properties of hot wire TIG welded 10Cr9Mo1VNb boiler steel

Lai Chunming¹, Li Qin¹, Zhou Jialin², Wu Xinghuan¹, Huang Yan³

- (1. School of Mechanical Engineering, Hunan Chemical Vocational Technology College, Zhuzhou Hunan 412011, China;
2. Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430081, China;
3. Hunan Chemical Engineering Design Institute Co., Ltd., Changsha Hunan 410007, China)

Abstract: Hot wire TIG multi-layer and multi pass welding tests were conducted on 10Cr9Mo1VNb boiler steel, and the welded joints were subjected to post weld heat treatment at different temperatures (740-790 °C) and time (1-4 h). The effects of post weld heat treatment on the microstructure and properties of the joints were analyzed using hardness, metallography, room temperature tensile testing, Charpy impact testing, SEM and other experimental methods. The results show that the post weld heat treatment can transform the martensite formed in the welding process into tempered martensite, which can significantly improve the uniformity of the microstructure and properties of each zone of the joint. When subjected to heat treatment at 740 °C, the strength slightly reduces with the increase of heat treatment time, while both the plasticity and toughness further improve. However, when subjected to heat treatment at 790 °C, the strength, plasticity and ductility decrease with the increase of time, mainly due to the coarsening of carbides such as $M_{23}C_6$ in the joint.

Keywords: post weld heat treatment; hot wire TIG welding; 10Cr9Mo1VNb boiler steel; microstructure; mechanical properties

热丝 TIG 焊(Tungsten inert gas welding)是在传统 TIG 焊的基础上,增加一个热丝电源对焊丝进行预热,从而显著提升焊丝的熔覆速率和焊接速度^[1-3]。热丝 TIG 焊的热丝方式主要有 3 种,即电阻加热、感应加热

和电弧加热,其中电阻加热由于加热设备简单、成本低、容易控制等特点,应用范围最广泛。相比于传统 TIG 焊接,热丝 TIG 焊具有效率高、焊接成形质量好以及焊接变形小等优点,在压力容器、造船工业以及航空

收稿日期:2024-03-17

修订日期:2024-07-06

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目优秀青年项目(23B0966);湖南省自然科学基金科教联合基金(2022JJ60042)

作者简介:赖春明(1989—),男,讲师,硕士,主要研究方向为金属材料成形工艺与组织性能控制,E-mail:laichunming@foxmail.com。通信作者:周家林,副教授,硕士,E-mail:zhoujialin@wust.edu.cn

引文格式:赖春明,李 琴,周家林,等. 焊后热处理对热丝 TIG 焊接 10Cr9Mo1VNb 锅炉用钢组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(9): 169-175.
Lai Chunming, Li Qin, Zhou Jialin, et al. Effect of post weld heat treatment on microstructure and properties of hot wire TIG welded 10Cr9Mo1VNb boiler steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(9): 169-175.

航天等领域都有应用^[4-6]。10Cr9Mo1VNb 钢是我国在 ASTM 标准 T91 钢的基础上研发出来的一种合金结构钢,由于其在高温下具有良好的力学性能、耐腐蚀性和抗氧化性,因此被广泛应用于石化、电力、核电站等领域的高温、高压设备和管道,如催化裂化装置、高压锅炉过热器管道、直接蒸汽发生器等^[7-9]。

由于化学成分和性能特点,10Cr9Mo1VNb 钢的焊接性能较差,在焊接时对焊接热输入敏感性较高,容易产生裂纹、接头的力学性能不稳定等问题^[10-11]。此外,10Cr9Mo1VNb 钢通常在正火和回火条件下供应和使用,此时,马氏体板条和原奥氏体晶界上有大量 $M_{23}C_6$ 和 MX 类型的析出相^[12],这种析出相能够产生强烈的晶界钉扎效应,是这种钢材良好、稳定的高温性能的主要保障。然而,焊接过程中,由于热循环的影响,接头处析出相的形态尺寸以及分布等也可能会发生变化,从而影响接头的性能。在实际焊接过程中,一般需要通过适当的预热和焊后热处理(Post weld heat treatment, PWHT)来改善温度均匀性和调控接头的组织性能^[13-17],但这也依赖于正确选择的焊后热处理参

数条件,否则容易出现焊接接头性能不达标的情况。目前,国内关于 10Cr9Mo1VNb 钢焊前预热以及焊接工艺参数对其焊接成形以及接头组织性能的影响已经有了较为充分的认识^[8-9],但关于焊后热处理对 10Cr9Mo1VNb 钢热丝 TIG 焊接接头组织性能的影响还没有相关研究。为此,本文对 10Cr9Mo1VNb 钢热丝 TIG 焊的焊接接头进行了不同的焊后热处理,分析热处理参数对接头组织性能的影响规律,可为制定相关工艺提供参考,并进一步了解 10Cr9Mo1VNb 钢工艺-组织-性能的基本关系。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

焊接管材选自某钢铁企业生产的 10Cr9Mo1VNb 钢无缝管,外径为 $\phi 63.5$ mm,壁厚为 12 mm。管材的热处理状态为 1050 °C 正火 + 790 °C 回火,其化学成分如表 1 所示。选择直径为 $\phi 0.8$ mm 的 ER90S-B9 耐热钢焊丝进行焊接试验,焊丝的主要化学成分如表 1 所示。

表 1 10Cr9Mo1VNb 钢及 E9015-B9 耐热钢焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the 10Cr9Mo1VNb steel and E9015-B9 heat-resistant steel welding wire (mass fraction, %)

材料	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Nb	Al	N	S	P
母材	0.10	0.35	0.51	9.05	0.95	0.18	0.20	0.095	0.011	0.06	0.003	0.018
焊丝	0.09	0.20	0.60	9.00	1.10	0.60	0.20	0.05	—	0.04	<0.01	<0.01

1.2 试验方法

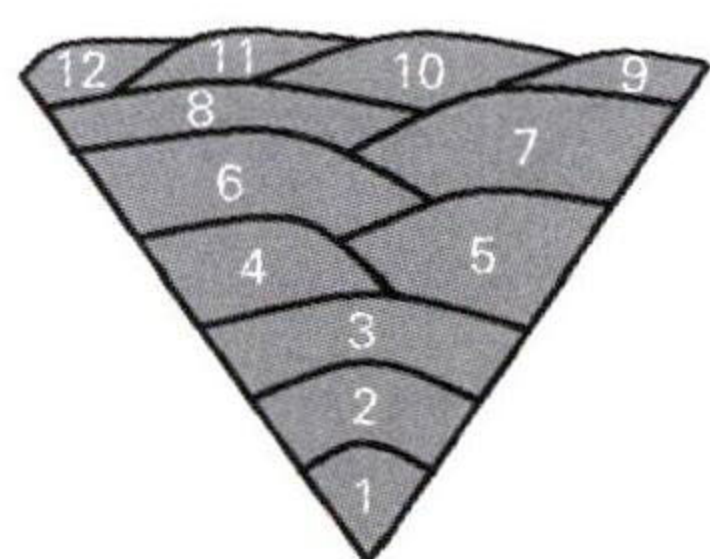
使用锯切机切割 10Cr9Mo1VNb 钢管,制成长度为 200 mm 的焊接试样,采用 V 型剖口,角度为 75°。焊接前对管材试样进行预热,预热温度为 220 °C。选用热丝 TIG 焊接工艺对制备好的管材试样进行焊接,共包含 7 层和 12 道焊缝,具体的焊接顺序如表 2 所示。其中打底层由 3 层单道次焊接完成,填充层由两道次焊接构成,道次间重叠 25%~30%,以避免层间熔合不足,盖面层包含 4 道次焊接,以使余高边缘光滑过渡。

各焊道的具体焊接参数如表 2 所示,所有焊道的平均热输入约为 0.92 kJ/mm。焊接过程中,严格控制道次间温度为 200~300 °C,以防止出现冷裂纹和热裂纹。焊接完成后,采用高温箱式电阻炉对焊接试样进行热处理,加热温度分别为 740 °C 和 790 °C,保温时间分别为 1、2 和 4 h。加热时,加热速度约为 150 °C/h,保温完成后,试样随炉冷却至 400 °C 再空冷至室温。为了确保热处理温度的准确性,在焊后热处理之前,使用 K 型热电偶对熔炉进行了校准。

表 2 各道次焊接的焊接参数

Table 2 Welding parameters for each welding pass

焊接参数	第 1 道	第 2 道	第 3 道	第 4~12 道
峰值电流/A	125	140	160	150
基值电流/A	110	110	135	120
电压/V	11.5	11.2	11.5	11.5
焊接速度/(mm·min ⁻¹)	100			
热丝电流/A	30			



焊后热处理完成后,采用线切割切割焊缝横截面,进行焊缝宏观结构分析和硬度测试。硬度测试采用的设备为 HV-1000A 显微维氏硬度计,加载载荷为 0.5 kg,加载时间 15 s,测试位置为焊缝 1/2 厚度处,每隔 1 mm 测试一次。在接头不同位置制取金相试样,将样品进行研磨、抛光和腐蚀后进行金相观察(OM),腐蚀剂为 Vilella 试剂(1 g 苦味酸、5 mL 盐酸、100 mL 甲醇),设备为 Meta-X3D 金相分析系统。拉伸试验参照 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》进行,拉伸试样长度方向为焊缝的宽度方向,试验设备为 WEW-300B 万能拉伸试验机,拉伸速率约为 2 mm/min。夏比摆锤冲击试验参照 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》进行,试验设备为 Byes-300J 冲击试验机,沿焊缝横截面制备 55 mm × 10 mm × 10 mm 的 V 型缺口标准试样,缺口深度为 2 mm,摆锤锤刃宽度为 2 mm。采用 Zwick Sigma 扫描电镜(SEM)观察分析冲击试样的断口形貌,并采用 EDS 对断口中存在的碳化物进行成分分析。

2 试验结果与分析

2.1 焊接接头宏观形貌与硬度分布

10Cr9Mo1VNb 钢焊接接头的宏观形貌如图 1 所示。接头与母材以及各个焊道之间充分熔合,成形良好,整个断面内未发现有明显的裂纹、气孔等焊接缺陷,说明所采用的焊接参数比较合理。接头沿焊缝中心两侧基本对称,焊缝、热影响区和母材界线比较清晰。其中,打底层儿几道焊缝热影响区较宽,可能是由于打底层位于焊缝底部,散热较差,温度梯度较小的原因。

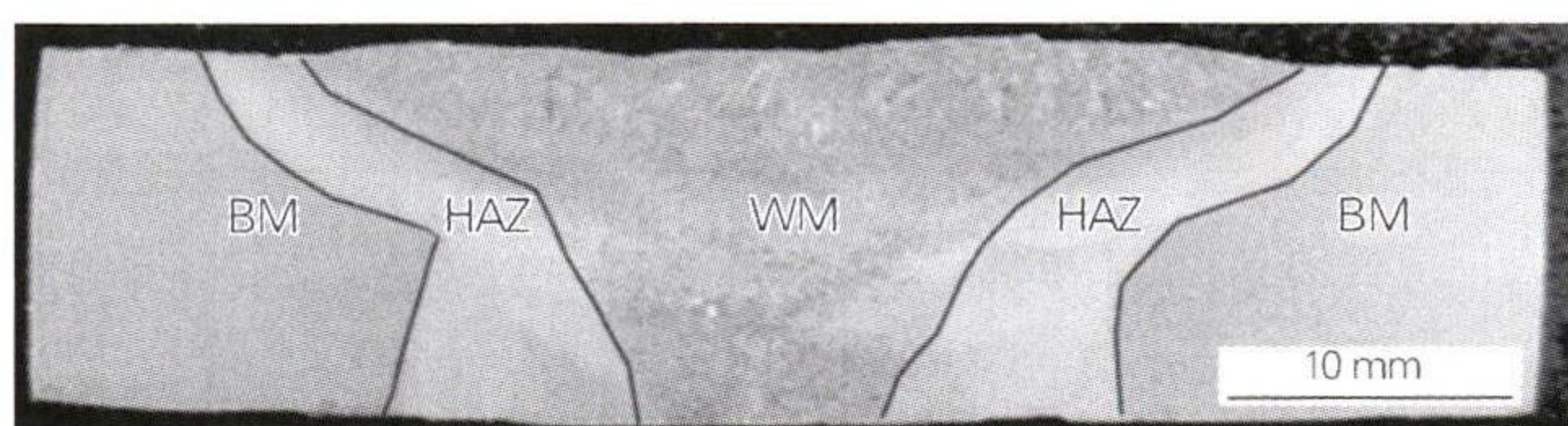


图 1 10Cr9Mo1VNb 钢热丝 TIG 焊接接头的宏观形貌
Fig. 1 Macro morphology of hot wire TIG welded joints of the 10Cr9Mo1VNb steel

焊接接头焊后热处理前后的硬度分布情况如图 2 所示。可以看出,热处理前焊接接头各个区域的硬度值存在非常大的差异,焊缝区以及靠近焊缝侧的热影响区明显高于母材,最高硬度值达 402 HV0.5。经过 740 °C × 1 h 保温处理之后,焊缝区域的硬度下降程度较大,其余区域基本略有降低,随着保温温度和时间的增加,各个区域的硬度逐渐降低,且整个焊接接头的温度分布

趋于均匀。比如经过 790 °C × 4 h 处理后,焊接接头各个位置的硬度差值最大为 40 HV0.5 左右,而热处理前该值将近 200 HV0.5。

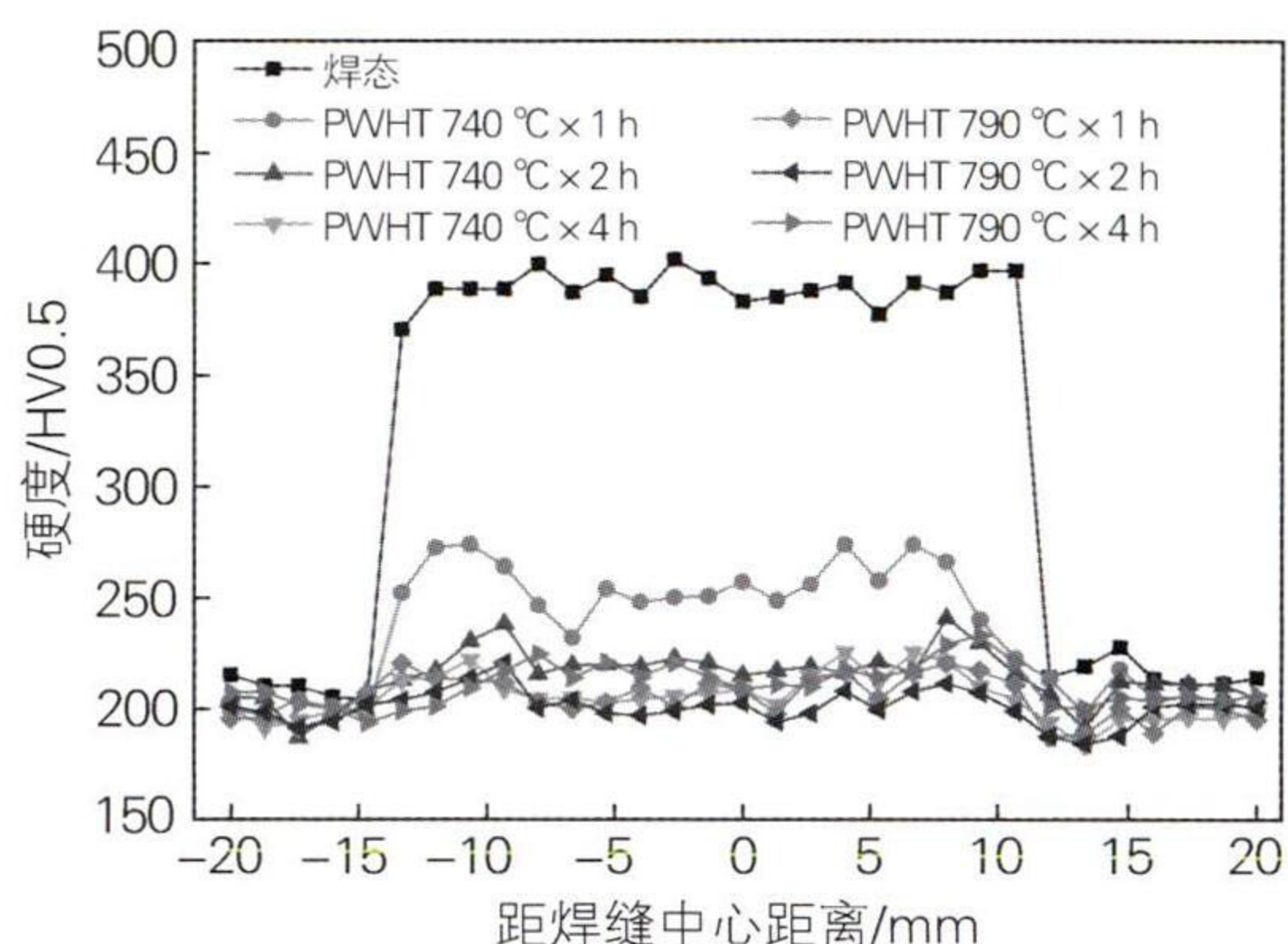


图 2 焊后热处理前后 DP980 钢焊接接头的硬度分布
Fig. 2 Hardness distribution of the DP980 steel welded joints before and after post weld heat treatment

2.2 焊后热处理对焊缝组织的影响

由于接头共有 12 道次的焊接,下一道次焊接对前序道次焊缝产生的热影响非常复杂,使得整个焊缝区域的组织分析比较困难。根据前述分析,焊后热处理前后硬度值变化最大的是焊缝区域,为此,仅对焊缝宽向和厚向中间区域的显微组织进行了观察和对比,结果如图 3 所示。

10Cr9Mo1VNb 锅炉用钢由于合金元素含量比较高,因此具有非常好的淬透性,一般要在正火或回火的状态下进行使用,微观组织由完全回火马氏体组成,如图 3(a)所示,形成回火马氏体可以获得材料所需的综合力学性能。同时,高淬透性也意味着即使在缓慢冷却的条件下,马氏体也很容易在焊缝和热影响区中形成,因此,在焊接之后,接头中心位置的焊缝区域的组织以淬火马氏体为主,并且受后续焊道的影响,获得部分回火马氏体,如图 3(b)所示。通过焊后热处理,形成的淬火马氏体会逐渐转变为回火马氏体,如图 3(c~h)所示。热处理温度和时间是影响马氏体回火程度的主要因素,当热处理温度较低、时间较短时,回火不能充分进行,回火马氏体所占比例较低。

2.3 焊后热处理对接头拉伸性能的影响

焊接母材和不同热处理状态下焊接接头的拉伸试验结果如图 4 所示。母材具有良好的强度和塑性,抗拉强度为 768 MPa,断后伸长率为 25%。相比于母材,焊接接头的强度略有降低,为 746 MPa,焊接系数为 97.14%,但塑性非常差,断后伸长率仅为 3%。经焊后热处理后,总体而言焊接接头的强度有所降低,但是塑性均得到较大程度的改善。焊后热处理的温度和时间

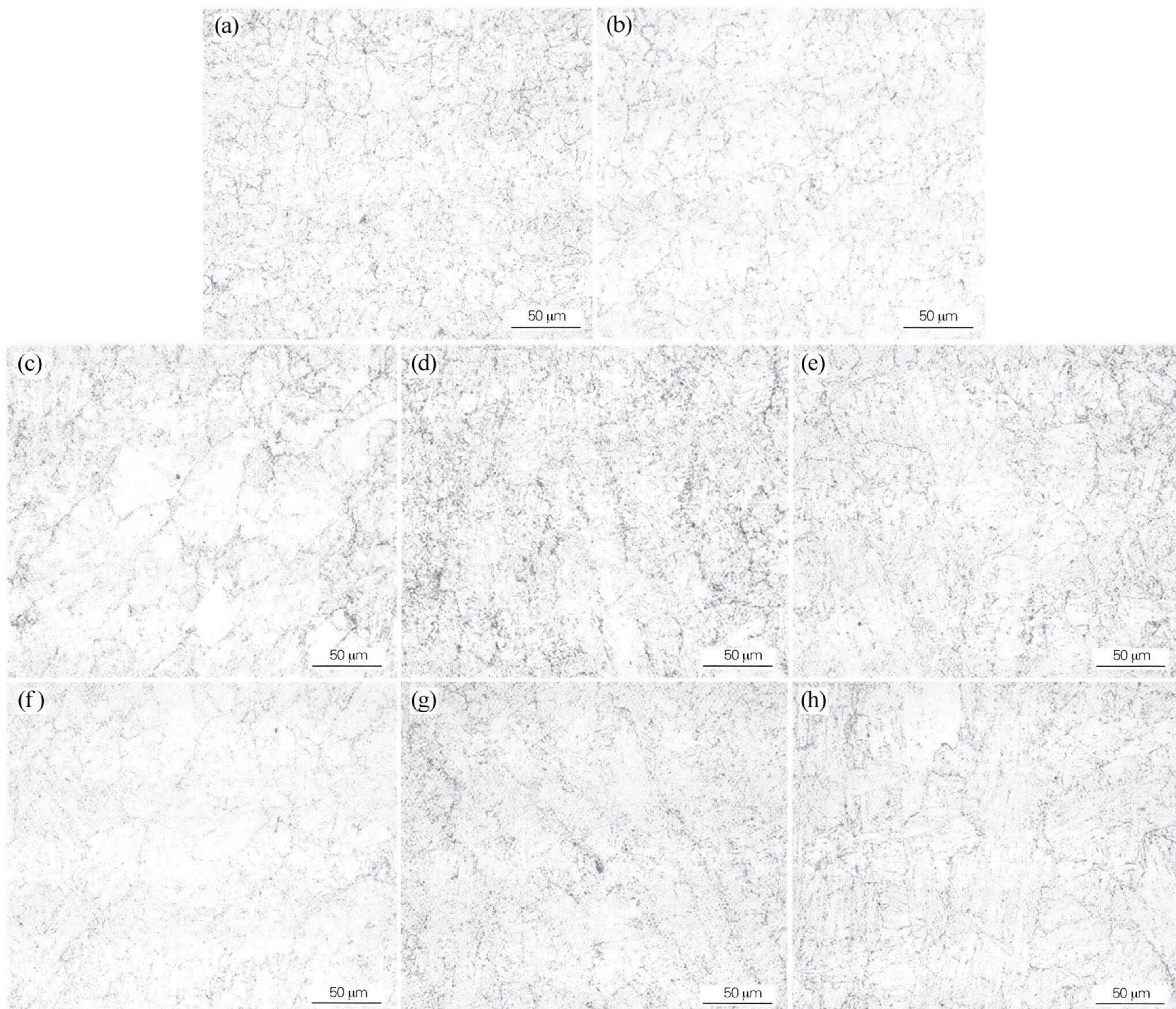


图3 母材以及焊后热处理前后焊接接头焊缝区域的典型显微组织

(a)母材;(b)未热处理;(c)740 °C × 1 h;(d)740 °C × 2 h;(e)740 °C × 4 h;(f)790 °C × 1 h;(g)790 °C × 2 h;(h)790 °C × 4 h

Fig. 3 Typical microstructure of the base metal and welded zone before and after post weld heat treatments

(a) base metal; (b) untreated; (c) 740 °C × 1 h; (d) 740 °C × 2 h; (e) 740 °C × 4 h; (f) 790 °C × 1 h; (g) 790 °C × 2 h; (h) 790 °C × 4 h

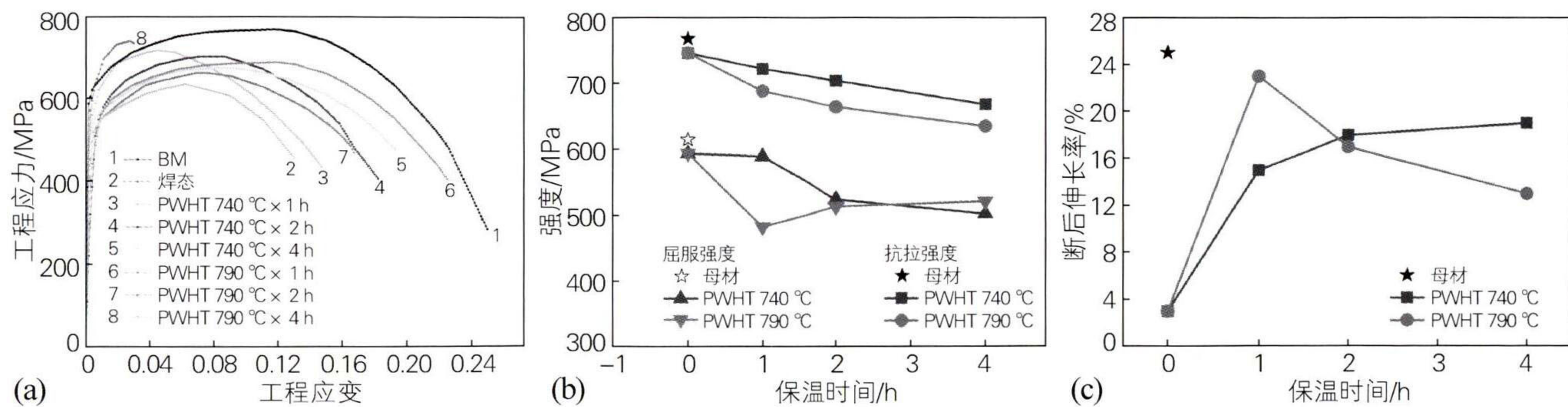


图4 焊后热处理对焊接接头力学性能的影响

(a)工程应力-应变曲线;(b)强度;(c)断后伸长率

Fig. 4 Effect of post weld heat treatment on the mechanical properties of welded joints

(a) engineering stress-strain curves; (b) strength; (c) elongation after fracture

间都会影响接头性能。热处理温度越高,强度降低的程度越大。不同热处理温度下,接头力学性能随热处

理时间的变化趋势有所差异。热处理温度为 740 °C 时,接头的强度随热处理时间的增加而降低,塑性则逐渐改善,但都程度较小。而当热处理温度为 790 °C 时,随着时间的增加,接头的屈服强度略有提升,抗拉强度和塑性则逐步下降。

2.4 焊后热处理对接头冲击性能的影响

图 5 显示了经过不同焊后热处理的母材和焊接接头的夏比摆锤冲击试验结果。未热处理焊接接头的冲击吸收能量相较于母材大幅度降低,仅有母材的 41.92%。经焊后热处理后,总体而言,接头的冲击吸收能量得到提高,且热处理温度越高,其冲击性能越好。其中,热处理温度为 740 °C 时,随着热处理时间的增加,其冲击吸收能量逐步提升。相比于初始的焊接接头,经 4 h 热处理后,冲击吸收能量提高了 70%。而热处理温度为 790 °C 时,随着热处理时间的增加,其冲击吸收能量反而略有下降,当热处理时间为 4 h 时,其冲击吸收能量比 740 °C × 4 h 低。相比母材,接头韧性的降低主要是由于焊接熔池中的高冷却速度会在焊缝位置形成淬火马氏体,而经焊后热处理后,淬火马氏体会转变为回火马氏体,因此韧性会得到较大程度的改善,且焊后热处理温度越高、保温时间越长,马氏体回火程度越高,接头的韧性越好。此外,由于 10Cr9Mo1VNb 钢中 Cr、Mo 等元素的含量较高,基体中会存在大量碳化物,当热处理温度较高时(如 790 °C),保温时间过长可能会使得碳化物粗化,从而使得接头的冲击性能反而降低。

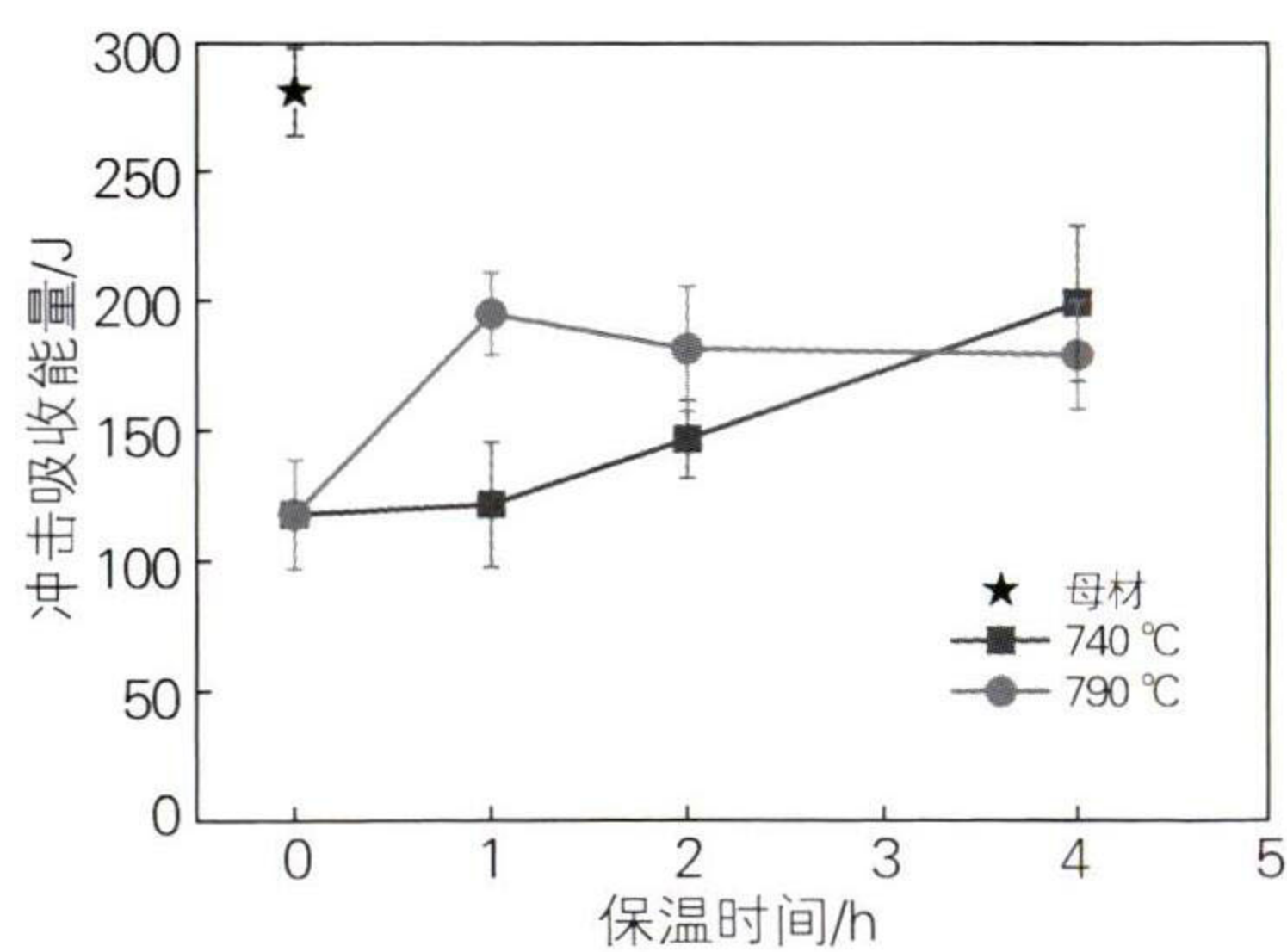


图 5 焊后热处理后焊接接头的冲击性能
Fig. 5 Impact property of the welded joint after post weld heat treatment

为了研究不同焊后热处理样品的断裂行为,对冲击试样的断口形貌进行分析,结果如图 6 所示。母材的断裂表面包含大量大小均匀、接近等轴的韧窝,这是韧性断裂的标志。焊后热处理前后的焊接接头冲击断口内仍然分布有大量韧窝,未见明显的解理面或撕裂棱,说明接头仍然是以韧性断裂为主。在所有的断口中,都可以观察到在断裂韧窝的底部存在由球状或接

近球状的析出物(如图 6(b)和图 6(g)中黑色箭头所指位置)。使用 EDS 对断口析出物成分进行分析,结果表明析出物中 Mn、Cr 和 Mo 的含量较高,如图 7 所示,推断为 $M_{23}C_6$ 碳化物(M 为 Cr、Mn、Fe 等)。

3 讨论

焊后热处理通常用于克服焊接部件微观结构和力学性能的不均匀性。10Cr9Mo1VNb 钢焊接接头的硬度试验结果表明,焊接完成后,接头各个区域的硬度分布存在非常大的差异,焊缝区以及靠近焊缝侧的部分热影响区硬度明显高于其他区域,结合组织分析,这一方面是由于焊缝区形成了马氏体,另一方面可能是因为这区域能达到较高温度(焊缝区高于熔点温度,靠近焊缝侧热影响区高于 A_{c3}),基体中存在的 $M_{23}C_6$ 以及 MC 类碳化物会溶解至基体,使得形成的组织产生更强的固溶强化效果,导致硬度提升。焊后热处理可以有效改善接头硬度分布的均匀性。当进行 740 °C × 1 h 热处理时,焊缝以及靠近焊缝侧热影响区的硬度虽然大幅度降低,但还是明显高于其他区域,说明此工艺参数组合不足以使马氏体充分转变为母材的回火马氏体。而随着时间的增加或者温度的提高,接头的硬度分布趋于一致,说明回火马氏体转变比较充分,焊缝区热处理前后的显微组织观察结果验证了这一分析。结合硬度试验结果也表明,为改善接头组织性能的均匀性,焊后热处理温度的变化比时间更有效。

过低的焊后热处理温度由于回火程度不够从而达不到组织性能均匀一致的要求,但是过高的热处理温度或者太长的时间又可能会导致碳化物的粗化,从而使接头的强度、塑性以及冲击性能变差。冲击断口分析表明,断口韧窝底部存在大量 $M_{23}C_6$ 型碳化物,由于此类碳化物变形能力非常差,在基体发生变形时,容易与基体参数变形不协调,使得与基体之间的结合界面处容易萌生微观裂纹,最终导致韧窝撕裂。如果热处理温度太高,随着热处理时间的增加,析出物可能会发生粗化,如图 6(g)所示,当进行 790 °C × 4 h 热处理时,析出物的直径最大达到近 3 μm。 $M_{23}C_6$ 碳化物越大,对材料的冲击性能越不利,这是热处理温度太高,接头冲击性能随热处理时间增加而变差的主要原因。740 °C 下进行热处理,随着保温时间的增加,冲击性能并未变差,而是逐步提升,说明 740 °C 下对接头进行保温,不足以使这类碳化物发生粗化。因此,为了获得良好的综合力学性能应综合考虑热处理温度和时间的影响,在本文的工艺参数范围内,740 °C × 4 h 是获得良好综合力学性能的最佳工艺参数组合。

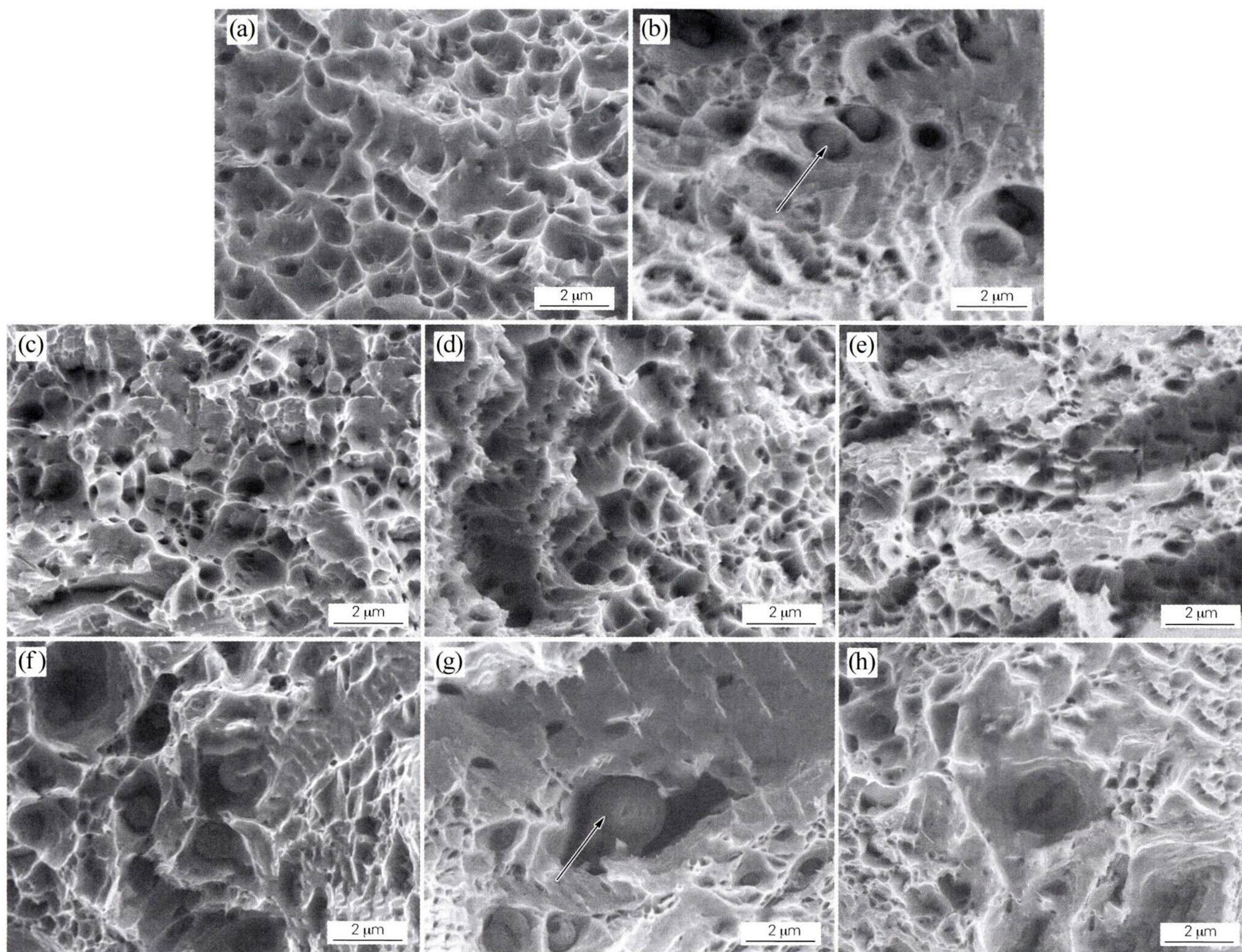


图 6 母材及不同热处理条件下焊接接头冲击断口形貌

(a)母材;(b)未热处理;(c)740 °C × 1 h;(d)740 °C × 2 h;(e)740 °C × 4 h;(f)790 °C × 1 h;(g)790 °C × 2 h;(h)790 °C × 4 h

Fig. 6 Impact fracture morphologies of the base metal and welded joints under different heat treatment conditions

(a) base metal; (b) untreated; (c) 740 °C × 1 h; (d) 740 °C × 2 h; (e) 740 °C × 4 h; (f) 790 °C × 1 h; (g) 790 °C × 2 h; (h) 790 °C × 4 h

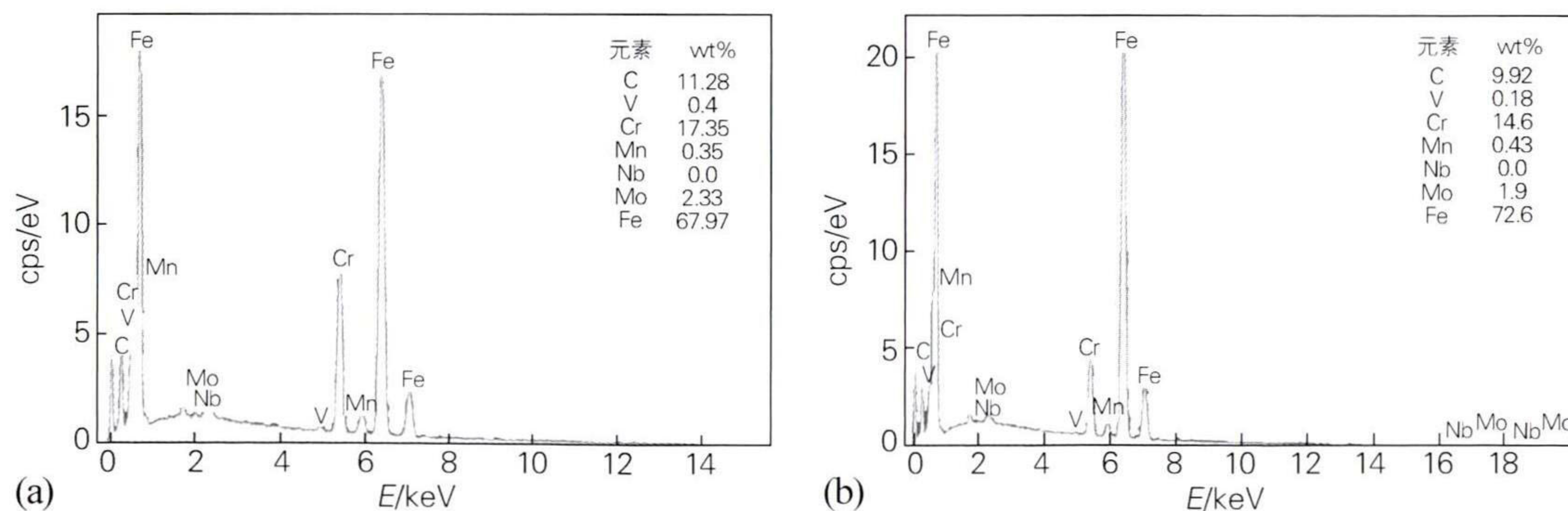


图 7 焊接接头冲击断口中析出物的 EDS 能谱分析结果

(a)图 6(b)箭头所指;(b)图 6(g)箭头所指

Fig. 7 EDS spectroscopic analysis results of precipitates in impact fractures of the welded joints

(a) marked location in Fig. 6(b); (b) marked location in Fig. 6(g)

4 结论

1) 10Cr9Mo1VNb 锅炉用钢主要由回火马氏体构成,经热丝 TIG 焊接成形后,焊缝区以及靠近焊缝侧的

部分热影响区主要由淬火马氏体和部分回火马氏体构成,使得该区域的硬度值远远高于其他部分。焊后热处理可以使在焊接过程中形成的马氏体向回火马氏体

转变,从而提高了接头组织的一致性,并最终使得接头硬度分布趋于均匀。当热处理温度高于 740 °C、保温时间大于 1 h 后,接头的硬度分布已基本趋于一致。

2) 焊接接头的强度与母材接近,焊接系数达到 97.14%,但其塑性和韧性相较于母材明显要差。焊后热处理可以有效提高接头的塑性和冲击性能,但强度有所降低。

3) 焊后热处理的温度太高或时间太长,可能会导致接头中 $M_{23}C_6$ 型碳化物发生粗化,从而降低接头的强度、塑性和冲击性能。在 740 °C 下保温不足以使碳化物粗化,使得在本文工艺参数范围内,经 740 °C × 4 h 热处理后,接头的强度、塑性和冲击性能等综合力学性能最好。

参考文献:

- [1] 唐丽,李东,刘成,等. 热丝 TIG 焊在管道焊接中的应用[J]. 焊管, 2017, 40(6): 30-33.
Tang Li, Li Dong, Liu Cheng, et al. Application of hot wire TIG welding in pipeline welding[J]. Welded Pipe and Tube, 2017, 40(6): 30-33.
- [2] Bao L L, Wang Y, Han T. Microstructure and properties of lean duplex stainless steel UNS S32101 welded joint by hot wire TIG welding[J]. Materials Science Forum, 2020, 993: 466-473
- [3] 姚宗湘,李东,王刚,等. X80 管线钢热丝 TIG 焊接接头显微组织和力学性能[J]. 电焊机, 2017, 47(8): 15-18.
Yao Zongxiang, Li Dong, Wang Gang, et al. Microstructure and mechanical properties of hot-wire TIG welded joints of X80 pipeline steel[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(8): 15-18.
- [4] 杨柳青,夏培培,孟建涛,等. L415/N08825 双金属复合管热丝 TIG 焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(7): 36-39.
Yang Liuqing, Xia Peipei, Meng Jiantao, et al. Hot wire TIG welding process of L415/N08825 bimetallic composite pipe[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(7): 36-39.
- [5] 张杰,钟正彬,杨韬君,等. 高效热丝 TIG 自动焊在电站锅炉中的应用[J]. 焊接技术, 2018, 47(11): 34-37.
Zhang Jie, Zhong Zhengbin, Yang Taojun, et al. Application of high-efficiency hot wire TIG automatic welding in power plant boilers[J]. Welding Technology, 2018, 47(11): 34-37.
- [6] 孙福成,王伟波,张志强,等. 窄间隙热丝 TIG 焊在反应堆压力容器上的应用及质量控制研究[J]. 电焊机, 2019, 49(4): 54-58.
Sun Fucheng, Wang Weibo, Zhang Zhiqiang, et al. Application and quality control of narrow gap hot wire TIG welding technology for reactor pressure vessel[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(4): 54-58.
- [7] 李勇. 服役期间 T91/TP347H 异种钢接头 TP347H 钢侧热影响区沿晶开裂分析[J]. 机械工程材料, 2022, 46(7): 82-89.
Li Yong. Intergranular Cracking analysis in heat-affected zone on TP347H steel side of T91/TP347H dissimilar steel joint in service[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022, 46(7): 82-89.
- [8] 熊义峰,杨莉,张尧成,等. 预热温度对 10Cr9Mo1VNbN 钢接头组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(15): 56-59.
Xiong Yifeng, Yang Li, Zhang Yaocheng, et al. Effect of preheating temperature on microstructure and properties of welded joint of 10Cr9Mo1VNbN steel[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(15): 56-59.
- [9] 文申柳,王非森,陈玲,等. 10Cr9Mo1VNb 钢 TLP 接头高温力学性能[J]. 电焊机, 2013, 43(9): 60-62.
Wen Shenliu, Wang Feisen, Chen Ling, et al. Research on mechanical behavior under high temperature of 10Cr9Mo1VNb steel TLP joint[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(9): 60-62.
- [10] 张仁珊,张鹏,宗晓辉,等. 时效时间对 T91 钢显微组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(1): 145-149.
Zhang Renshan, Zhang Peng, Zong Xiaohui, et al. Effect of aging time on microstructure and mechanical properties of T91 steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(1): 145-149.
- [11] 李勇. 服役期间 T91/TP347H 异种钢接头 TP347H 钢侧热影响区沿晶开裂分析[J]. 机械工程材料, 2022, 46(7): 82-89.
Li Yong. Intergranular cracking analysis in heat-affected zone on TP347H steel side of T91/TP347H dissimilar steel joint in service[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022, 46(7): 82-89.
- [12] 李报,陈思杰,刘毅辉. 焊后热处理对 T91 钢 TLP 连接接头组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(10): 56-60.
Li Bao, Chen Sijie, Liu Yihui. Effect of post-welding heat treatment on microstructure and mechanical properties of T91 steel TLP bonded joint[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(10): 56-60.
- [13] 靳达,王智春,韩哲文,等. 焊后热处理对 T92/HR3C 异种钢接头组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(10): 102-108.
Jin Da, Wang Zhichun, Han Zhewen, et al. Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of T92/HR3C dissimilar metal welded joints[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(10): 102-108.
- [14] 刘文明,张新明,程新路,等. 焊后热处理对 S30408/Q345R 不锈钢复合板耐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(1): 172-178.
Liu Wenming, Zhang Xinming, Cheng Xinlu, et al. Effect of post-weld heat treatment on corrosion resistance of S30408/Q345R stainless steel clad plate[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(1): 172-178.
- [15] Kumar R, Varma A, Kumar Y R, et al. Enhancement of mechanical properties through modified post-weld heat treatment processes of T91 and super 304H dissimilar welded joint[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 78(1): 57-70.
- [16] Zhang J W, Yu L M, Liu Y C, et al. Improving creep strength of the fine-grained heat-affected zone of novel 9Cr martensitic heat-resistant steel via modified thermo-mechanical treatment[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024 (31): 1037-1047.
- [17] 耿进锋,秦建,王德柱. 焊后热处理对 15CrMoR(H) 钢焊条电弧焊焊接头组织与性能的影响[J]. 压力容器, 2019, 36(5): 1-7.
Geng Jinfeng, Qin Jian, Wang Dezhu. Influence of postweld heat treatment on microstructure and properties of 15CrMoR(H) steel SMAW joint[J]. Pressure Vessel Technology, 2019, 36(5): 1-7.