

## 焊后热处理对 07MnCrMoVR 钢热影响粗晶区 -20 °C 冲击韧性的影响

冯路路<sup>1,2</sup> 乔文玮<sup>3</sup> 鲁修宇<sup>4</sup> 周 峰<sup>5</sup>

(1 荆楚理工学院 机械工程学院, 荆门 448000; 2 武汉科技大学高性能钢铁材料及其应用省部共建协同创新中心, 武汉 430081; 3 江苏华能电缆股份有限公司, 高邮 225613; 4 武汉钢铁(集团)研究院, 武汉 430080; 5 佛山职业技术学院机电工程学院, 佛山 528137)

**摘 要** 采用光学显微镜、扫描显微镜、透射电镜和冲击韧性试验机对 07MnCrMoVR 钢热影响粗晶区在 460 ~ 660 °C 2 h 焊后热处理工艺下的组织性能进行了分析。结果表明,随着焊后热处理温度的升高,焊缝热影响粗晶区 -20 °C 冲击韧性呈现先降低再升高的现象。焊后热处理钢在 580 °C 和 620 °C 出现再热裂纹倾向,冲击试样为脆性断口,解理断裂,沿着晶界出现了微裂纹,主要是因为碳化物沿着晶界析出并长大弱化了晶界的结合能,导致低温冲击韧性出现降低。≥620 °C 焊后热处理,07MnCrMoVR 钢出现再结晶的现象,位错消失,铁素体晶粒合并长大使其低温冲击韧性又重新升高。该钢最优焊后热处理为 460 ~ 500 °C 2 h。

**关键词** 焊后热处理 07MnCrMoVR 钢 热影响粗晶区 韧性 碳化物

## Effect of Post-Weld Heat Treatment on -20 °C Impact Toughness of Heat Affected Coarse Grain Zone of Steel 07MnCrMoVR

Feng Lulu<sup>1,2</sup>, Qiao Wenwei<sup>3</sup>, Lu Xiuyu<sup>4</sup> and Zhou Feng<sup>5</sup>

(1 School of Mechanical Engineering, Jing Chu University of Technology, Jingmen 448000; 2 Collaborative Innovation Center on Advanced Steels, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 3 Jiangsu Huaneng Cable Co Ltd. Gaoyou 225613; 4 Research Institute of Wuhan Iron & Steel Group, Wuhan 430080; 5 School of Mechanical and Electrical Engineering, Foshan Polytechnic, Foshan 528137)

**Abstract** The microstructure and properties of the heat affected coarse grain zone of steel 07MnCrMoVR with post-weld heat treated at 460 ~ 660 °C for 2 h are analyzed by means of optical microscope, scanning microscope, transmission electron microscope and impact toughness tester. The results show that with increase of post-weld heat treatment temperature, the -20 °C impact toughness of post-weld heat affected coarse-grained zone decreases firstly and then increases. The steel with post-weld heat treatment between 580 °C to 620 °C can occur reheat cracks tend, the impact specimen is brittle fracture, cleavage fracture and microcracks along grain boundary, the main reason is that the carbide precipitates along the grain boundary and grows up to weaken binding energy of the grain boundary, which leads to the decrease of the impact toughness at low temperature. With post-weld heat treated ≥620 °C, recrystallization occurs in 07MnCrMoVR steel, dislocation disappears, and the low temperature impact toughness of the steel increases again due to the combined growth of ferrite grains. The optimum post-weld heat treatment of steel is 460 ~ 500 °C 2 h.

**Material Index** Post-Weld Heat Treatment, Steel 07MnCrMoVR, Heat Affected Coarse Grain Zone, Toughness, Carbide

水电站用 07MnCrMoVR 钢需要大量的焊接成型,要求具有较低的焊接裂纹敏感系数<sup>[1]</sup>。通常承压设备用的钢材在焊接后需要进行焊接接头热处理来消除焊接残余应力<sup>[2]</sup>,获得优异的综合力学性能和组织<sup>[3]</sup>。软化焊接接头的淬硬区,改善焊接热影响粗晶和细晶区的组织等<sup>[3]</sup>。低焊接裂纹敏感性钢板的焊接接头热影响粗晶区的低温冲击韧性明显偏低<sup>[4-5]</sup>。焊接热输入和热循环次数对 07MnCrMoVR 钢焊接热影响区的组织性能有影响,

需要在焊接成型后对焊缝或整体设备进行热处理<sup>[6-7]</sup>。不当焊后热处理会引起焊接热影响区出现脆化断裂,引起再加热裂纹的出现<sup>[8]</sup>。刘俊松等对 07MnNiMoDR 钢的再热裂纹敏感性进行了试验,认为出现再热裂纹的焊后热处理温度在 600 °C 左右,但是未对实际焊接后焊缝组织等进行低温冲击韧性试验<sup>[9]</sup>。本文对 07MnCrMoVR 钢焊后热处理试验后的焊接热影响粗晶区的组织和低温冲击韧性进行了分析。

1 试验材料及方法

试验用钢为商业化生产的 07MnCrMoVR 水电钢,厚度 38 mm,调质状态交货,其化学成分如表 1 所示,其焊接裂纹敏感指数(Pcm)值为 0.19。采用斜 Y 坡口焊接成型的方式,利用二氧化碳气体保护焊机进行焊接,焊丝采用直径为 Φ1.2 mm 的 CHW-

80C1 气体保护焊丝(四川大西洋公司生产),化学成分为(%)C ≤ 0.11、Si 0.65 ~ 0.95、Mn 1.80 ~ 2.10、Cr ≤ 0.20、Ni ≤ 0.30、S ≤ 0.030、P ≤ 0.030、Cu ≤ 0.50。焊接工艺为:采用斜 Y 坡口(坡口深 20 mm)进行焊接,保护气氛为 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>,气体流量为 5 ~ 15 L/min,焊接电压为 20 V,焊接速

表 1 试验用钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of test steel

化学成分/%											Pcm
C	Si	Mn	P	S	Al <sub>t</sub>	Nb	V	Ti	Cr	Mo	
0.068	0.24	1.41	0.009	0.003	0.035	0.029	0.048	0.015	0.18	0.25	0.19

其中:Pcm = [C] + [Si]/30 + [Mn + Cu + Cr]/20 + [Ni]/60 + [Mo]/15 + [V]/10 + 5[B]

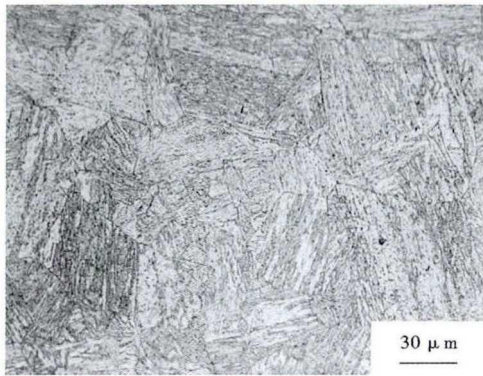


图 1 试验钢热影响粗晶区的光学显微组织

Fig. 1 Optical microstructure of heat affected coarse grain zone of tested steel

度为 20 ~ 30 m/h,焊丝伸出长度 10 ~ 15 mm。热影响粗晶区的金相显微组织如图 1 所示,组织为粒状贝氏体,-20 °C 低温冲击韧性为 90 J。焊后热处理工艺为:460 °C、500 °C、540 °C、580 °C、620 °C、660 °C 2 h,出炉后空冷至室温。焊后热处理完成后,采用光学显微镜(Olympus, PEM3-3)观察热影响粗晶区的金相显微组织,按照 GB/T 229-2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》测试热影响粗晶区 -20 °C 低温冲击韧性,采用扫描电子显微镜(SEM, Sirion 200)观察冲击断口形貌,同时采用喷碳萃取的方法利用透射电镜(TEM, JEM-2010F)观察热影

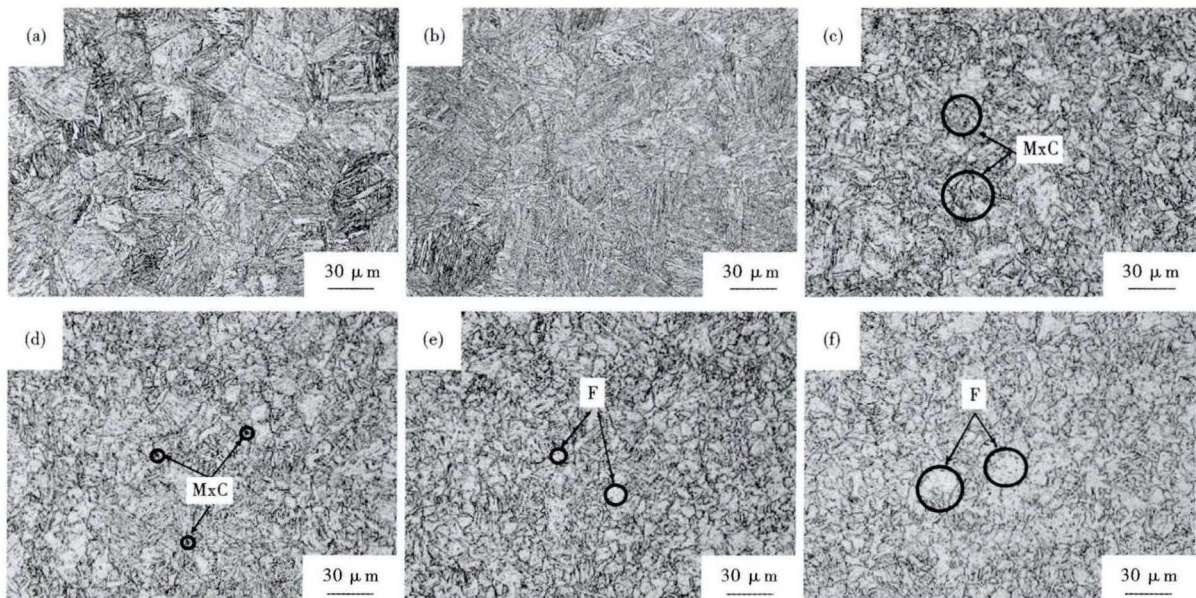


图 2 07MnCrMoVR 钢(a) 460 °C;(b) 500 °C;(c) 540 °C;(d) 580 °C;(e) 620 °C (f)和 660 °C 2 h 焊后热处理热影响粗晶区的光学显微组织

Fig. 2 Optical microstructure of heat affected coarse grain zone of steel 07MnCrMoVR post-weld heat-treated at 460 °C (a), 500 °C (b), 540 °C (c), 580 °C (d), 620 °C (e) and 660 °C (f) for 2 h

响粗晶区碳化物的分布。

### 2 试验结果与讨论

#### 2.1 焊后热处理热影响粗晶区的显微组织

焊后热处理温度为 460 °C 的金相显微组织如图 2(a) 所示,组织仍然为粒状贝氏体组织与焊后热处理之前并没有明显的变化,由于焊后热处理的温度较低,溶质元素无法进行扩散,仅仅只是发生了部分焊接应力的消失,而未发生组织变化<sup>[10-11]</sup>。500 °C 时,热影响粗晶区的金相显微组织仍然为粒状贝氏体组织,如图 2(b) 所示,但是有部分碳元素开始发生扩散<sup>[12-13]</sup>,焊接应力进一步消失。当焊后热处理温度升高至 540 °C 时,随着温度的升高,碳扩散的速

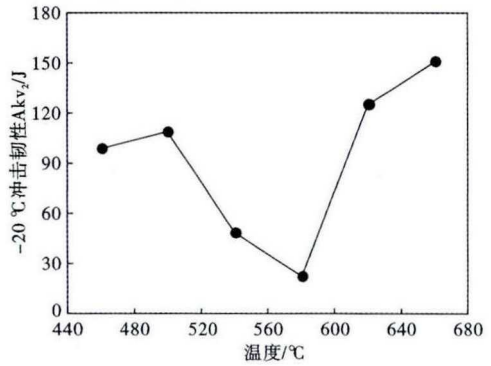


图 3 焊后热处理温度对 07MnCrMoVR 钢热影响粗晶区冲击韧性的影响

Fig. 3 Effect of post-weld heat treatment temperature on impact toughness of steel 07MnCrMoVR heat affected coarse grain zone

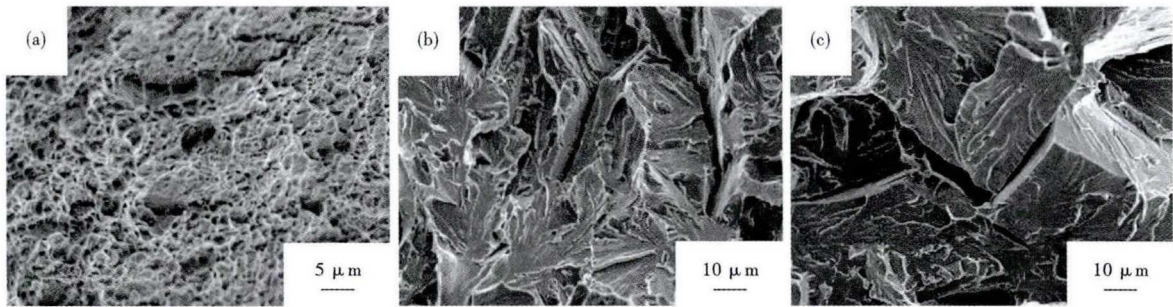


图 4 (a) 500 °C ;(b) 540 °C ;(c) 580 °C 2 h 焊后热处理 07MnCrMoVR 钢冲击断口形貌,SEM

Fig. 4 Morphology of impact fracture of steel 07MnCrMoVR post-weld heat-treated at 500 °C (a), 540 °C (b) and 580 °C (c) for 2 h, SEM

度加快,粒状贝氏体开始消失,碳化物开始析出<sup>[14]</sup>,如图 2(c) 所示。580 °C 时,析出的碳化物数量急剧增加,部分碳化物开始聚集长大,呈现粗化的现象<sup>[15]</sup>,如图 2(d) 所示。620 °C 时,大量的碳化物析出后,铁素体内部的位错胞和胞内的位错线逐渐消失,位错密度降低,位错缠结解开、相互抵消、具有小角度边界的条片合并成宽板条<sup>[16]</sup>,如图 2(e) 所示。当焊后热处理温度达到 640 °C,此时碳具有长程迁移的能力,基体组织发生再结晶,小角度边界的板条晶逐步变成位错密度很低的多边形铁素体,其内部的位错进一步减少,板条痕迹已经不易分辨,转变为大块的多边形或不规则形状的形貌<sup>[16]</sup>,如图 2(f) 所示。

#### 2.2 焊后热处理热影响粗晶区的冲击韧性

不同焊后热处理温度下热影响粗晶区 -20 °C 的低温冲击韧性如图 3 所示,其低温冲击韧性呈现先降低再升高的现象,460 °C 和 500 °C 温度下进行焊后热处理,其热影响粗晶区的低温冲击韧性分别为 98 J 和 108 J 对比未焊后热处理之前(90 J)略有提高,主要是因为低温焊后热处理过程中部分焊接应力消失,提

升了其低温冲击吸收功,但是由于组织未发生明显的变化,对其低温冲击韧性没有明显的提高<sup>[17]</sup>。540 °C 时,热影响粗晶区的低温冲击韧性明显降低,仅有 48 J,在此温度下碳具备了较大的能量发生了扩散,开始析出碳化物,达到 580 °C,低温冲击韧性进一步降低到只有 22 J 的水平,高温状态下碳化物大量的析出聚集、长大粗化可能进一步恶化热影响粗晶区的低温冲击韧性<sup>[18]</sup>。620 °C 时,其 -20 °C 低温冲击韧性出现了明显的上升,达到了 125 J,基体组织的再结晶,大量的位错消失,块状铁素体的出现使低温冲击韧性得到了提升。660 °C 时, -20 °C 低温冲击韧性达到了最大值,为 150 J,此时块状铁素体出现了合并,进一步提升了热影响粗晶区吸收冲击功的能力,提升了低温冲击韧性<sup>[19]</sup>。

#### 2.3 冲击试样断口形貌观察

500 °C 焊后热处理,热影响粗晶区的低温冲击试样断口为如蜂窝煤的韧窝状断裂,如图 4(a) 所示,而低温冲击韧性较差的断口形貌为脆性的解理状断裂,而且低温冲击韧性值越低,其脆性断裂的现象越明

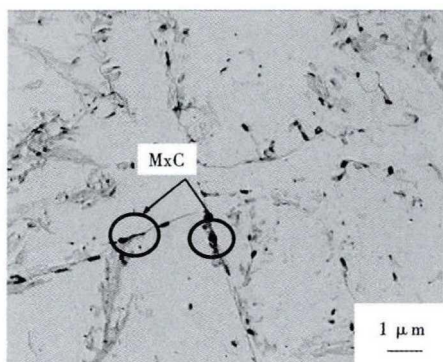


图5 焊后热处理的07MnCrMoVR钢中碳化物在晶界上偏聚  
Fig.5 Segregation of carbides in post-weld heat-treated steel 07MnCrMoVR at grain boundaries

显,如图4(b)和4(c)所示。

对-20℃低温冲击韧性最差的试样取样采用喷碳萃取的方法利用透射电镜观察其碳化物的分布,如图5所示,可以看到其碳化物出现了聚集长大,并且于晶界处偏聚,弱化了晶界之间的结合能,导致基体吸收冲击能量的能力下降,恶化其低温冲击韧性<sup>[20]</sup>。

### 3 结论

(1) 07MnCrMoVR焊后热处理温度为460~500℃时不会改变热影响粗晶区的微观组织形貌,当

温度达到540℃时,开始出现碳化物的析出,随着温度升高至580℃时碳化物出现聚集长大,发生粗化。当温度达到620℃基体组织开始出现再结晶,板条状贝氏体转变为不规则铁素体,当温度达到660℃,不规则铁素体进一步合并长大为块状铁素体。

(2) 07MnCrMoVR钢焊后热处理温度为460~500℃时,热影响粗晶区的低温冲击韧性对比焊后热处理前变化不大,当温度达到540~580℃时,-20℃低温冲击韧性出现急剧下降,当温度升高至620~660℃时,低温冲击韧性又重新升高,整体呈现先降低再升高的现象。

(3) 热影响粗晶区在焊后热处理温度为540~580℃时低温冲击韧性出现急剧下降是因为碳化物不断析出并长大,偏聚于晶界处且发生粗化导致热影响粗晶区冲击断面呈现解理断裂,实际生产中应避免在此温度区间进行焊后热处理。而580~660℃铁素体再结晶形成的块状铁素体将降低热影响粗晶区的其余性能,因此最优的焊后热处理温度为460~500℃。

荆楚理工学院校级科学研究项目(PY202004, YB201902)

### 参考文献

- [1] 江慧丰.我国压力容器用低合金调质高强度钢板的现状与发展趋势[J].热加工工艺,2015,44(4):16-24.
- [2] 冯雪娜,刘亚良,杨鑫华.Q345E钢焊后热处理残余应力模拟与试验研究[J].热加工工艺,2018,47(13):234-238.
- [3] 董家利,房务农.承压设备焊后热处理工艺[J].焊接,2018,61(12):35-41.
- [4] 兰亮云,邱春林,赵德文,等.低焊接裂敏感性钢焊接接头组织及微观力学性能[J].东北大学学报(自然科学版),2011,32(4):505-508.
- [5] 兰亮云,邱春林,赵德文,等.高强度低焊接裂敏感性钢焊接热影响区的冲击韧度[J].焊接学报,2012,33(1):55-58.
- [6] 许良红,陈延清,章军,等.焊接热循环对07MnCrMoVR钢热影响区组织及韧性的影响[J].钢铁,2011,46(2):62-68.
- [7] Xu L H, Zhang J, Chen Y Q. Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of 07MnCrMoVR Weld Joints [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(2): 207-213.
- [8] 李显峰,张育红.07MnCrMoVR钢制球罐整体热处理再热裂纹分析及控制[J].金属热处理,2010,35(10):97-102.
- [9] 刘俊松,陈学东,卜华全.07MnCrMoVR再热裂纹敏感性及其试验[J].焊接学报,2014,35(4):71-74.
- [10] Yang S, Ju L, Cong W. On the Heterogeneous Microstructure Development in the Welded Joint of 12MnNiVR Pressure Vessel Steel Subjected to High Heat Input Electro-gas Welding [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2019, 35(8): 1747-1752.
- [11] Yang H, Zhao W G, Hua Y P, et al. Weldability of 610MPa Grade High Strength Plate Steel 12MnNiVR for Oil Storage Tanks [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(Supplement 1-2): 769-772.
- [12] Vinay K Y, Vidit G, Singh I V. Effect of Post-Weld Heat Treatment on Mechanical Properties and Fatigue Crack Growth Rate in Welded AA-2024 [J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 779: 1-10.
- [13] Wi G S, Jin Y S, Ja H S, et al. Singh. Effect of Post-Weld Heat Treatment on the Microstructure and Hardness of P92 Steel in IN740H/P92 Dissimilar Weld Joints [J]. Materials Characterization, 2018, 245: 36-45.
- [14] Zhou Y L, Jia T, Zhang X J, et al. Investigation on Tempering of Granular Bainite in an Offshore Platform steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 625: 352-361.
- [15] 胡锋,张晓雪,车马俊,等.心部组织对特厚超高强海工钢力学性能的影响[J].金属热处理,2018,43(1):100-104.
- [16] Gonzaga A C, Barbosab C, Tavares S S M, et al. Influence of Post Welding Heat Treatments on Sensitization of AISI 347 Stainless Steel Welded Joints [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 234: 1-10.
- [17] 曹凯,邓先刚,吕品正,等.12Cr1MoV钢硬度超标焊缝的组织性能研究及原因分析[J].热加工工艺,2019,48(1):193-195.
- [18] 蔡昌亮,曹睿,陈剑虹,等.不同焊后热处理对耐热钢室温冲击韧性的影响[J].焊接,2019,62(5):23-26.
- [19] 耿进锋,秦建,王德柱.焊后热处理对15CrMoR(H)钢焊条电弧焊焊接接头组织与性能的影响[J].压力容器,2019,36(5):1-5.
- [20] 薄国公,孙晓杰,贺龙威.焊后热处理对X80和30CrMo钢热影响区粗晶区韧性的影响[J].热加工工艺,2018,47(21):82-85.

冯路路(1982-),男,硕士(2008年东北大学),高级工程师,2005年沈阳理工大学(本科)毕业,高性能金属材料及强化研究。E-mail:85013296@qq.com。

收稿日期:2020-05-30