

热处理工艺对40CrMnMo钢低温冲击韧性的影响

张越^{1,2} 曾云^{1,2} 郑锦峰^{1,2} 陈君^{1,2} 伍伟^{1,2}

(1 大冶特殊钢有限公司技术中心,黄石 435001;2 高品质特殊钢湖北省重点实验室,黄石 435001)

摘要 通过不同的热处理制度:800、820 ℃低温淬火+600 ℃回火,880 ℃+860 ℃两次淬火+600 ℃回火和860 ℃一次淬火+600 ℃回火,对40CrMnMo钢进行热处理试验,并研究了三种热处理工艺对40CrMnMo试验钢组织和性能的影响。结果表明,三种热处理工艺的试验钢抗拉强度相近(936~951 MPa),组织为回火马氏体+铁素体,采用800、820 ℃低温淬火+600 ℃回火热处理工艺,试验钢的冲击功最高(65~69 J)。

关键词 40CrMnMo钢 热处理工艺 马氏体组织 低温冲击性能

Effect of Heat Treatment Process on Low Temperature Impact Toughness of 40CrMnMo Steel

Zhang Yue^{1,2}, Zeng Yun^{1,2}, Zheng Jinfeng^{1,2}, Chen Jun^{1,2} and Wu Wei^{1,2}

(1 Technology Center, Daye Special Steel Co Ltd;

2 Hubei Key Laboratory of High Quality Special Steel, Huangshi, 435001)

Abstract Through different heat treatment processes:800,820 ℃ low temperature quenching + 600 ℃ tempering, 880 ℃ + 860 ℃ twice quenching + 600 ℃ tempering and 860 ℃ once quenching + 600 ℃ tempering, the heat treatment experiment on 40CrMnMo steel has been carried out to study the effects of three kinds of heat treatment processes on the microstructure and properties of the 40CrMnMo steel. The results show that the tensile strength of tested steel by the three kinds of heat treatment processes is similar (936~951 MPa), and the microstructures is tempered martensite + ferrite, the impact energy of tested steel of (800,820 ℃) low temperature quenching and 600 ℃ tempering heat treatment processes is highest (65~69 J).

Material Index 40CrMnMo Steel, Heat Treatment Process, Martensitic Structure, Low Temperature Impact Property.

随着全球经济建设的快速发展,工程建设中设备之间的连接与固定需要大量的高强度紧固件,极大提高了高强度紧固件的需求量。由于许多工程建设在环境恶劣的条件下,长期受到巨大的风力作用,而且要在零下几十度的低温环境下工作,其特殊的环境和工作条件,决定其必须具备非常高的可靠性。低温脆性断裂是钢结构中最危险的破坏形式之一,断裂瞬间发生,断裂时无明显的塑形变形。因此对高强度紧固件用钢性能指标的要求不仅要求其具有高的强度,也需要具有极高的低温冲击性能,尤其是低温下服役,其低温冲击性能要求非常严格^[1]。

1 试验材料及方法

1.1 化学成分设计

降低S含量可提高钢的变形能力,降低P含量可降低钢的变形抗力,同时可通过减少P、S在晶界的偏聚而减轻晶界脆化。降低S还可以减少钢中的非金属夹杂物,改善钢的韧塑性。因此,降低钢中的P、S含量不仅可以改善钢的冷敏性能,还可以改善钢的耐延迟断裂性能^[2]。Mo元素能提高钢的淬透

性,细化晶粒,并有效阻止钢材产生第二类回火脆性,尤其是低温状态下,增加钼元素含量对提高冲击值能起到积极作用^[3]。

本次试验在满足GB/T 3077-2015标准40CrMnMo钢的成分要求基础上,通过降低钢中P、S的含量,并提高Mo元素含量的成分设计方案来达到生产纯净高性能的40CrMnMo钢产品(表1)。

1.2 试验材料冶炼及轧钢工艺

试验钢通过120 t转炉→LF精炼→RH真空脱气→大方坯连铸机浇铸为410 mm×530 mm方坯,在三辊减定径轧机上轧制成直径为50 mm的圆钢,具体轧制工艺参数为:加热温度1180 ℃保温时间2.5 h,开轧温度1090 ℃,终轧温度850 ℃。

1.3 热处理工艺参数

截取350 mm长钢材在SX2-10-13型箱式电阻炉内进行整体热处理,热炉装料,保温1 h后即在15 ℃水中冷却淬火;钢材冷却至室温后,热炉装料回火,保温1 h后空冷至室温,见表2。

按GB/T2975-2018标准对热处理后的钢材进

表1 试验用40CrMnMo钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of test steel 40CrMnMo/%

项目	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	N	H	O
GB/T3077-2015	0.37~0.45	0.90~1.20	≤0.030	≤0.030	0.17~0.37	0.90~1.20	0.20~0.30	-	-	-
试验钢	0.42	0.95	0.010	0.010	0.30	1.00	0.27	0.008 0	0.000 2	0.006 2

表2 试验钢热处理工艺参数
Table 2 Heat treatment process parameters of test steel

工艺	热处理参数
低温淬火+回火(工艺 I)	800, 820 °C 淬火, 水冷+600 °C 回火, 空冷
两次淬火+回火(工艺 II)	880 °C 淬火+860 °C 淬火, 水冷+600 °C 回火, 空冷
一次淬火+回火(工艺 III)	860 °C 淬火, 水冷+600 °C 回火, 空冷

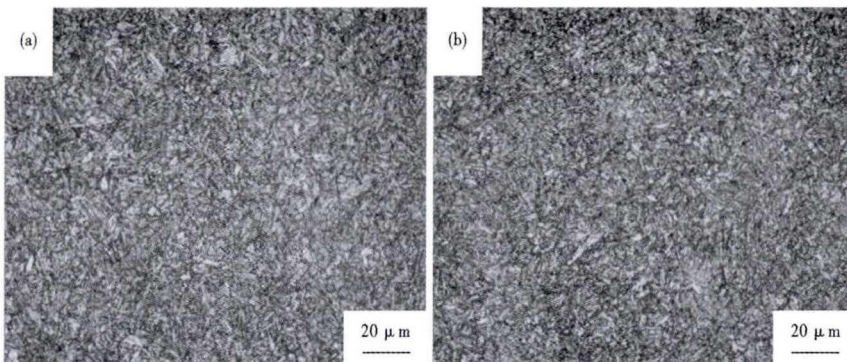


图1 试验钢 800 °C (a)、820 °C (b) 低温淬火+600 °C 回火(工艺 I)的显微组织
Fig. 1 Microstructure of tested steel heat treatment by 800 °C (a)、820 °C (b) low temperature quenching + 600 °C tempering (process I)

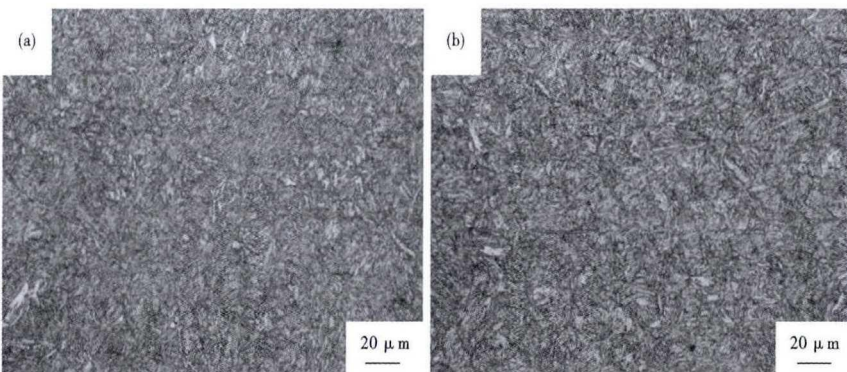


图2 试验钢经过 880 °C + 860 °C 两次淬火+600 °C 回火(工艺 II)的显微组织
Fig. 2 Microstructure of tested steel heat treatment by 880 °C + 860 °C double quenching + 600 °C tempering (process II)

行取样和制样,进行组织性能检验,在金相显微镜下观察组织形貌,在 INSTRON 5500R1186 型万能电子拉伸试验机上进行拉伸试验,试验按照 GB/T 228.1-2010“金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法”进行,加载速度为 2 mm/min。将试样在液氮中保温后取出,在 NCSI-500 型智能仪器化冲击试验机进行 -40 °C 的低温纵向冲击试验,试验按照 GB/T 229-2007“金属材料夏比摆锤冲击试验方法”进行,冲击速度为 5.23 m/s;高速冲击,释放角度为 149.9°;采样频

率为 1 MHz。

2 试验结果及分析

2.1 显微组织

试验钢经低温淬火+回火(工艺 I)处理后的显微组织如图 1 所示,回火后钢的组织主要为回火马氏体+铁素体,实际晶粒非常细小,有利于提高韧性。

试验钢经两次淬火+回火(工艺 II)处理后的显微组织如图 2 所示,经过二次淬火后,钢的组织更加均匀,但由于淬火温度升高,导致晶粒更加粗大,同时二次淬火加热使部分铁素体得以保留,组织中依然存在少量铁素体,回火后钢的最终组织主要为回火马氏体+少量铁素体。

试验钢经一次淬火+回火(工艺 III)处理后的显微组织如图 3 所示,试验钢在经过一次淬火后,组织主要为回火马氏体。

2.2 力学性能

三组不同热处理的试验钢力学性能如表 3 所示。从表 3 可以看出,钢的抗拉强度在 936~951 MPa,其中采用低温淬火+回火(工艺 I)时,屈服强度较低,但 -40 °C 平均冲击值最高(平均 ≥ 60 J)。采用两次淬火+回火(工艺 II)低温 -40 °C 的冲击值也可以

达到 50 J 以上,而一次淬火+回火(工艺 III)测定的 -40 °C 冲击值则在 50 J 以下。

一次淬火所获得的马氏体为片状马氏体。由于其孪晶亚结构的作用,使之强度高,而韧性和塑性变低。低温淬火得到的铁素体组织,能起到缓冲应力及阻碍裂纹扩展的作用。因此,在低温淬火时,所获得的马氏体+铁素体的复相组织,强度稍低但塑性较高,低温冲击性能优异,其综合力学性能较好^[4]。

2.3 冲击断口形貌观察

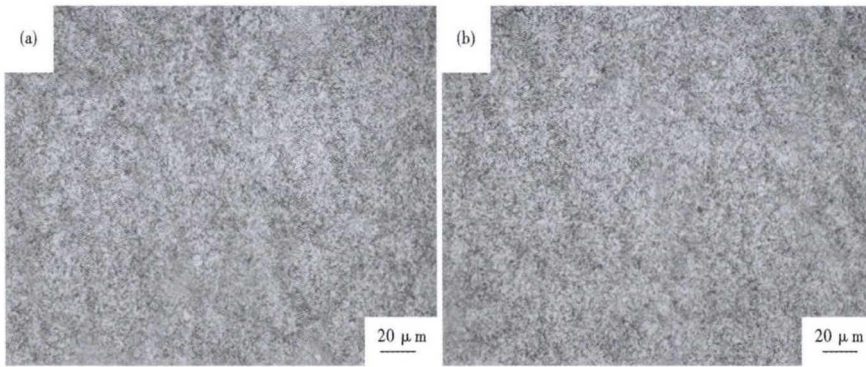


图 3 试样经过 860 °C 一次淬火 + 600 °C 回火(工艺 III)的显微组织
 Fig. 3 Microstructure of tested steel heat treatment by 860 °C once quenching + 600 °C tempering (process III)

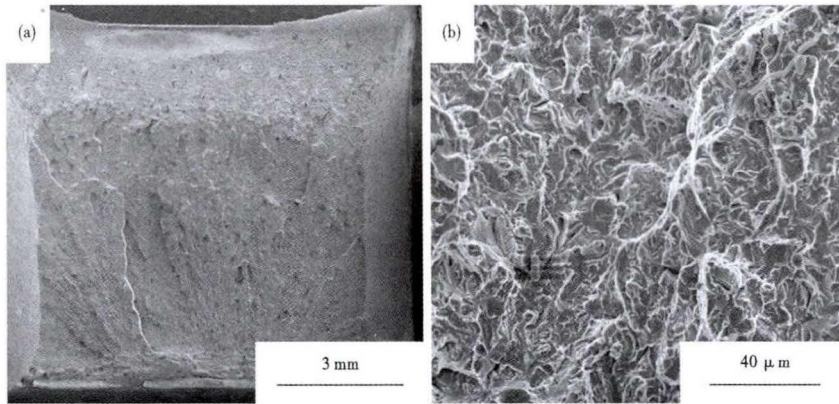


图 4 试验钢经低温淬火 + 回火(工艺 I)处理后的冲击断口形貌
 Fig. 4 Impact fractures morphology of tested steel treated by low temperature quenching + tempering (process I)

同样工艺轧制,三种不同热处理工艺,低温淬火 + 回火(工艺 I)热处理对低温冲击性能有效改善,冲击吸收能量均较高且稳定性增加,最终实现了 40CrMnMo 钢低温冲击性能的改善。图 4 为低温淬火 + 回火(工艺 I)处理后的冲击断口,微观形貌可以看出, -40 °C 时的冲击试样断口呈脆性断裂特征,断口微观下呈解理断口特征,断口上有大量的解理面,但有向准解理断裂发展的趋势,冲击吸收能量达到 60 J 以上。因此,低温淬火 + 回火(工艺 I)有助于 40CrMnMo 钢获得较高的冲击功,使断裂方式由脆性断裂向脆性的解理断裂转变^[5-6]。

3 结论

(1)降低钢材 S、P 含量,提高钢材的纯净度,同时提高钢中 Mo 含量能有效提高钢材的 -40 °C 低温冲击韧性,生产综合性能优异的 40CrMnMo 耐低温钢。

表 3 试验钢经工艺 I、II、III 热处理力学性能对比

Table 3 Comparison of mechanical properties of tested steel heat treated by process I、II、III

工艺	Rp0.2/MPa	Rm/MPa	A/%	Z/%	纵向冲击 KV2(-40 °C)/J
GB-T 3098.1-2010 标准 9.8 级螺栓性能要求	≥720	≥900	10	48	≥27J
低温淬火 + 回火(工艺 I)	840	944	20	59	65/66/69
两次淬火 + 回火(工艺 II)	851	949	20	59	62/65/64
两次淬火 + 回火(工艺 II)	846	951	20	57	53/52/54
一次淬火 + 回火(工艺 III)	861	936	21	60	46/48/45

(2)采用降低淬火温度的低温淬火方法,获得马氏体和铁素体的复相组织,在不影响强度的基础上,起到缓冲应力及阻碍裂纹扩展的作用,从而提高钢的 -40 °C 低温冲击韧性。

参考文献

[1]陈继林,刘振民. 轧制工艺对高强度螺栓钢低温冲击性能的影响[J]. 金属热处理,2017,42(1):94-98.
 [2]钟盛钢,张先鸣. 影响风电机组用高强度紧固件质量的原材料因素[J]. 金属制品,2010,36(2):66-69.
 [3]潘祖诒,赖朝彬,石荣才,等. 高强度螺栓钢的研制与应用[J]. 钢

铁,2001,36(4):47-49.
 [4]康健,袁国,王国栋. 亚温淬火下组织形态对高强低合金钢冲击韧性的影响[J]. 材料热处理学报,2015,36(12):152-157.
 [5]张先鸣. 高强度螺栓低温脆性断裂与冲击韧性:全国金属制品信息网第 23 届年会暨 2013 金属制品行业技术信息交流论文集[C]. 全国金属制品信息网,2013:210-214.
 [6]燕友增. 高强度螺栓的应用研究[D]. 青岛:山东科技大学,2011.

张越(1987-),男,工程师,2010 年武汉科技大学(本科)毕业,热处理材料的开发和研究。
 E-mail: xn224@163.com

收稿日期:2020-05-03