

· 组织和性能 ·

## 回火温度对 20SiMnMo 高强度钢微观组织与力学性能的影响

林文政<sup>1,4</sup> 田荣斌<sup>2</sup> 贾礼<sup>3</sup> 段宝玉<sup>1</sup> 高占勇<sup>1</sup>

(1 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010; 2 包钢钢联股份有限公司, 包头 014010;  
3 鄂尔多斯市神东天隆矿山机械设备有限公司, 鄂尔多斯 017200; 4 烟台鲁宝钢管有限责任公司, 烟台 265599)

**摘要** 采用光学显微镜、扫描电子显微镜、洛氏硬度计、万能力学试验机以及冲击试验机研究了 950 °C 淬火 220 °C、240 °C、260 °C、280 °C、300 °C 和 320 °C 3 h 回火试验对 20SiMnMo 高强度钢 (/% : 0.22C, 0.80Si, 1.00Mn, 0.40Mo, 0.72Cr, 0.20Ni) 微观组织和力学性能的影响。结果表明, 随着回火温度的升高, 试验钢的硬度、强度不断下降, 伸长率、室温冲击功先升高再降低。当 260 °C 回火时, 试验钢具有均匀细长的板条马氏体组织, 其强韧综合力学性能最佳: 硬度值 44.8HRC、 $A_{KV2}$  冲击功 75.3 J、抗拉强度 1 278 MPa、屈服强度 1 210 MPa、伸长率 15.5%。

**关键词** 高强度钢 20SiMnMo 回火温度 板条马氏体 力学性能

## Effect of Tempering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of 20SiMnMo High Strength Steel

LIN Wen-zheng<sup>1,4</sup>, TIAN Rong-bin<sup>2</sup>, JIA Li<sup>3</sup>, DUAN Bao-yu<sup>1</sup>, GAO Zhan-yong<sup>1</sup>

(1 College of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010;  
2 Baogang Incorporated Company, Baotou 014010; 3 Erdos City Shendong Tianlong Mining Machine Limited Co., Erdos 017200; 4 Yantai Lubao Steel Pipe Incorporated Company, Yantai 265599)

**Abstract** Effect of 220 °C, 240 °C, 260 °C, 280 °C, 300 °C and 320 °C for 3 h tempering on microstructures and mechanical properties of 950 °C quenched test 20SiMnMo high strength steel (/% : 0.22C, 0.80Si, 1.00Mn, 0.40Mo, 0.72Cr, 0.20Ni) are studied by means of optical microscope, scanning electron microscope, Rockwell hardness tester, universal tensile testing machine and impact testing machine. The results show that with the increase of tempering temperature, the hardness and strength of the tested steel decrease, the elongation and impact energy at room temperature increase firstly and then decrease. After tempered at 260 °C, the steel with uniform fine martensite laths microstructure has a good comprehensive properties of strength, ductility and toughness with HRC hardness number 44.8, impact absorption energy  $A_{KV2}$  75.3 J, tensile strength 1 278 MPa, yield strength 1 210 MPa and elongation 15.5%.

**Material Index** High Strength Steel 20SiMnMo, Tempering Temperature, Martensite Laths, Comprehensive Properties

低合金高强钢不仅具有优良的强度和塑性, 还具有良好的韧性和焊接性<sup>[1]</sup>, 因此已被广泛应用于国防、机械、航空、冶金、电力和桥梁建筑等工业领域, 并向着强度更高和综合性能更加优异的方向发展<sup>[2]</sup>。

低合金高强钢通常采用淬火 + 低温回火的热处理方式得到板条马氏体组织从而获得高的强度<sup>[3-5]</sup>。回火作为最后一步热处理工艺, 能够消除或减少内应力, 使组织更加均匀稳定, 从而获得高强度并改善钢的韧性与塑性<sup>[6]</sup>。但是, 马氏体高强钢随着强度的不断提升其韧性和塑性等性能会随之下降, 为了保证马氏体高强钢在使用过程中的安全稳定性, 使材料的强度得到充分的体现, 这就必须要求拥有高强度的同时具有一定的塑韧性<sup>[7]</sup>。国标中 20SiMnMo 钢经 200 °C 低温回火后, 其抗拉强度 ( $R_m$ )  $\geq 1 380$  MPa, 伸长率 ( $A_5$ )  $\geq 10\%$ ; 断面收缩率 ( $Z$ )  $\geq 45\%$ ; 冲击功  $A_{KV} \geq 55$  J。本试验在此成分基

础上, 通过添加 Cr、Ni 元素增加其淬透性、提高冲击韧性, 以满足制造大尺寸耐冲击高强度零件要求。

回火温度是实现高强钢强韧性结合的关键工艺, 因此研究回火温度对低合金高强钢综合力学性能的影响十分必要<sup>[8]</sup>。通过对不同回火温度的处理试验, 建立回火温度与高强钢力学性能及显微组织的关系, 为高强钢的强韧化提供工艺技术方案。

### 1 试验钢和试验方法

经 ZG-30 真空中频感应炉中用 14 kg 的坩埚冶炼 12 kg 试验钢 20SiMnMo, 然后进行浇铸, 浇铸锭形为圆柱体, 其化学成分如表 1 所示。

表 1 试验 20SiMnMo 钢的化学成分 / %  
Table 1 Chemical Composition of experiment steel 20SiMnMo / %

C	Si	S	P	Mn	Mo	Cr	Ni
0.22	0.80	0.002	0.003	1.00	0.40	0.72	0.20

将浇铸成型的钢锭去头去尾后锻造成 55 mm × 55 mm × 400 mm 的长方体,初锻温度为 1 200 ℃,终锻温度为 850 ℃,然后空冷至室温,再切割成热处理试样进行热处理实验。热处理工艺如图 1 所示,将试样加热至 950 ℃,保温 0.5 h 后使用浓度 12.5% PAG 淬火剂淬火。本试验所用 PAG 淬火剂是质量分数为 12.5% 的 PAG 共聚物 and 87.5% 的水组成,不添加其它辅助成分。淬火试样经不同温度的回火处理后空冷,其中回火温度 ( $T$ ) 分别为 220、240、260、280、300、320 ℃,保温 3 h。热处理后,加工成标准力学试样,分别进行冲击、拉伸和硬度测试。并对冲击后的断口进行分析。

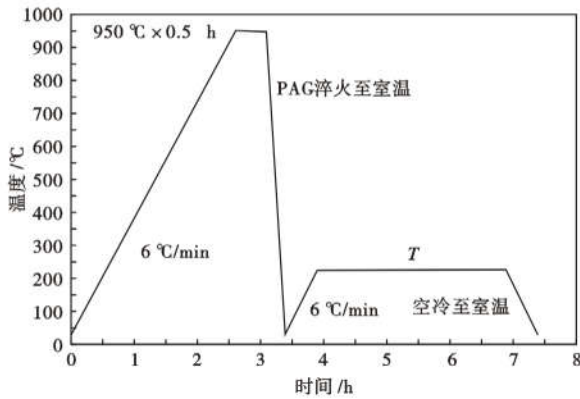


图 1 试验钢 20SiMnMo 的热处理工艺

Fig. 1 Heat treatment process of experiment steel 20SiMnMo

## 2 试验结果分析

### 2.1 显微组织分析

应用扫描电镜 (SEM) 和光学显微镜 (OM) 对热处理后的试样进行金相分析,分别如图 2、图 3 所示。其中,图 2 为 OM 观察组织图,由图 2 可看出, M 标注的簇状板条的为马氏体,其中偏黑灰色的为回火马氏体典型特征。白色块状的为马氏体转变不完全性而残留的残余奥氏体。黑色点状为从淬火马氏体中析出的碳化物颗粒,因 OM 放大倍数受限,析出的碳化物颗粒需要进一步观察。试样随着回火温度的增高,淬火马氏体板条状的组织特征逐渐减弱,最终得到回火马氏体组织。马氏体基体上分布着大量的碳化物。在 220 ℃ 至 320 ℃ 回火时有大量的碳化物颗粒析出,析出量随着温度升高而增加,且呈细小态分布。随回火温度升高到 260 ℃ 以上,组织虽然差别不大,从淬火马氏体中析出变化量也不大,但碳化物的颗粒明显增大。

950 ℃ 淬火后,试样在 220 ℃ 至 320 ℃ 回火时,属于低温回火,组织形态基本保持回火马氏体形态。

图 3 是试样在 950 ℃ 淬火不同温度回火时的扫描电镜组织形貌,从图 3 可以看出,经过 260 ℃ 回火后试样中马氏体板条束的形貌清晰。马氏体板条束由位向差较小的大致平行的板条组成,板条束尺寸

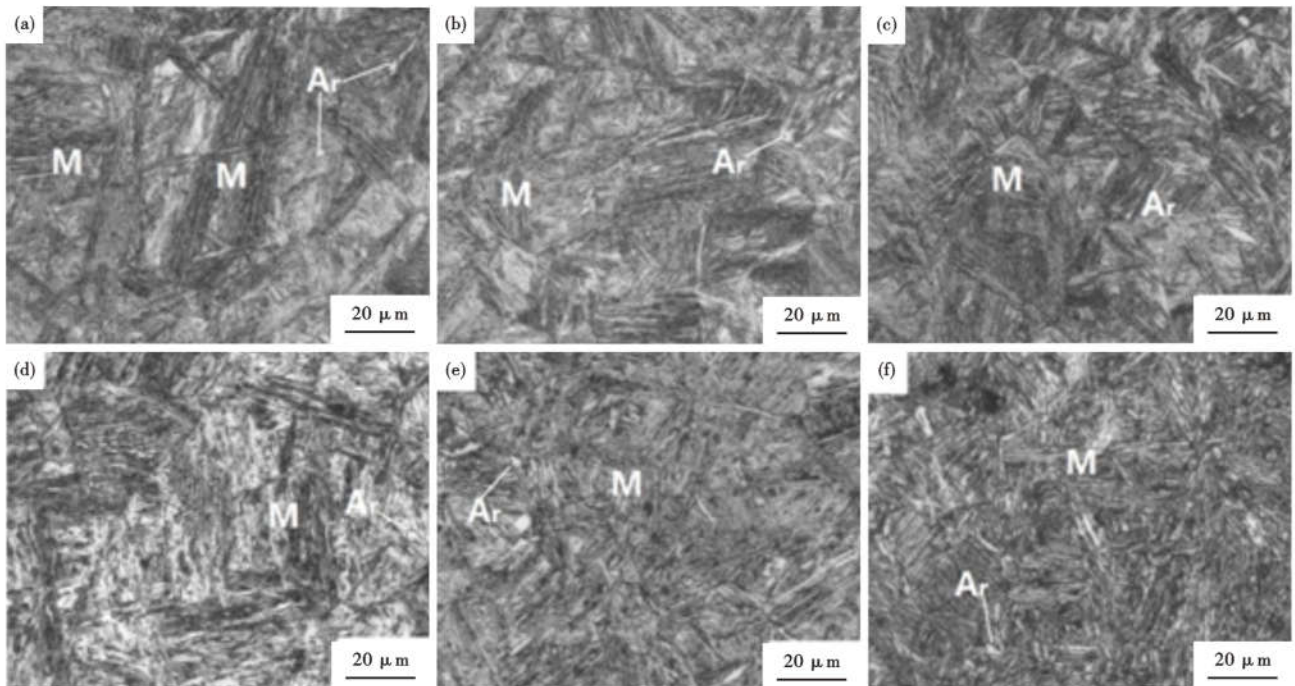


图 2 试验 20SiMnMo 钢 950 ℃ 淬火 (a) 220 ℃; (b) 240 ℃; (c) 260 ℃; (d) 280 ℃; (e) 300 ℃; (f) 320 ℃ 回火 3 h 的显微组织  
Fig. 2 Microstructure of test 20SiMnMo steel quenched at 950 ℃ and tempered at (a) 220 ℃; (b) 240 ℃; (c) 260 ℃; (d) 280 ℃; (e) 300 ℃; (f) 320 ℃ for 3 h

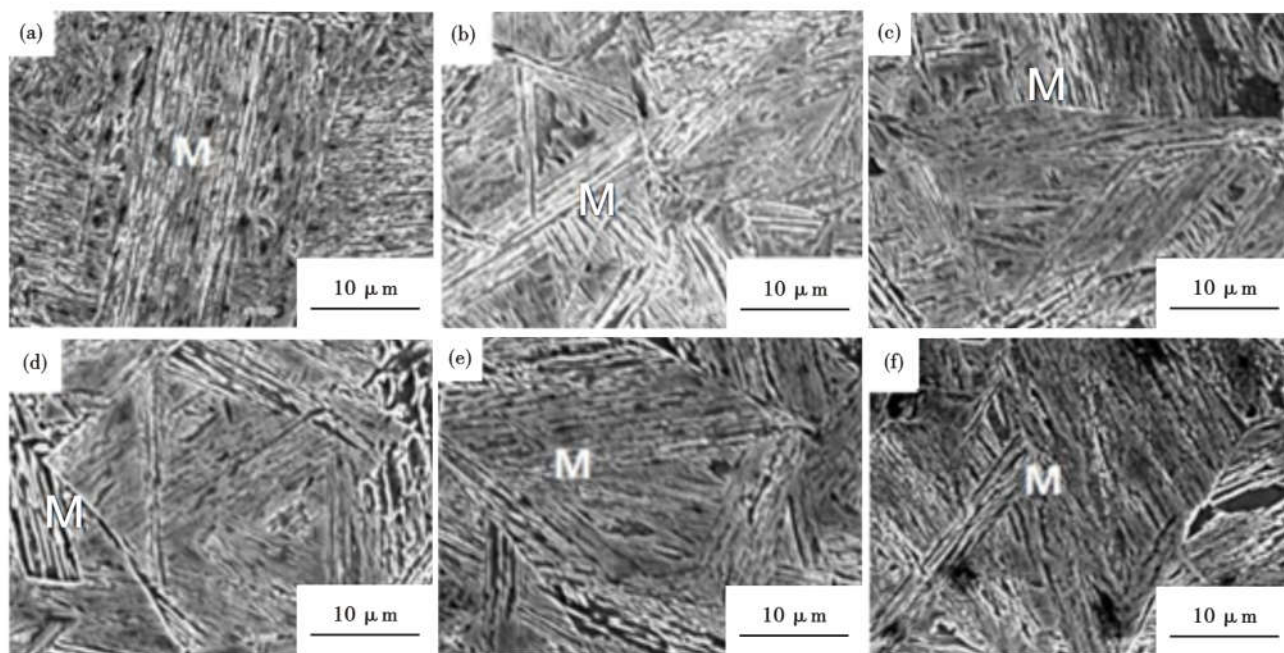


图 3 试验 20SiMnMo 钢 950 °C 淬火(a)220 °C;(b)240 °C;(c)260 °C;(d)280 °C;(e)300 °C;(f)320 °C 回火 3 h SEM 组织形貌  
Fig.3 SEM structure morphology of test 20SiMnMo steel quenched at 950 °C and tempered at (a) 220 °C;(b) 240 °C;(c) 260 °C;(d) 280 °C;(e) 300 °C;(f)320 °C for 3 h

较大,平行排列的趋势很明显,残余奥氏体薄膜是连续的,在冲击时能吸收较大的冲击能,而板条束宽度是对强度和硬度起作用的组织控制单元<sup>[9]</sup>,因此,在该温度回火时,硬度和冲击韧性均理想,达到最佳配合。

当回火温度为 280 °C 时,如图 3(d) 所示,试样中马氏体板条基本保持平行,但位向差较大,残余奥氏体形态不再保持连续薄膜状,因此冲击韧性下降。

当回火温度达到 320 °C,从图 3(f) 中可以看出,马氏体形貌杂乱无序,出现块状马氏体,残余奥氏体被马氏体分割成小段,不再连续,因此在受到冲击时,不能有效地吸收冲击功,韧性达到最低。

### 2.2 力学性能测试及结果

经如图 1 工艺热处理后,按照不同力学试验国标要求,对热处理试样用线切割加工成为标准力学试样,分别进行冲击性能、拉伸试验及洛氏硬度值测定,结果如图 4、图 5 所示。图 4 为试样的硬度及冲击韧性随回火温度的变化曲线,从图 4 中可以看出,在回火温度 220 ~ 320 °C,随着回火温度升高,硬度逐渐下降。结合图 2 和图 3 组织分析可知,这是因为淬火形成的过饱和和高硬度马氏体在热力学上是不稳定的状态,马氏体中大量碳化物呈弥散状析出,导致碳和合金元素脱溶,致过饱和度不断降低<sup>[10]</sup>;在回火温度为 220 °C 的时候硬度值达到最高,为 44.8HRC,此时碳原子大多偏聚于位错处,它比析出

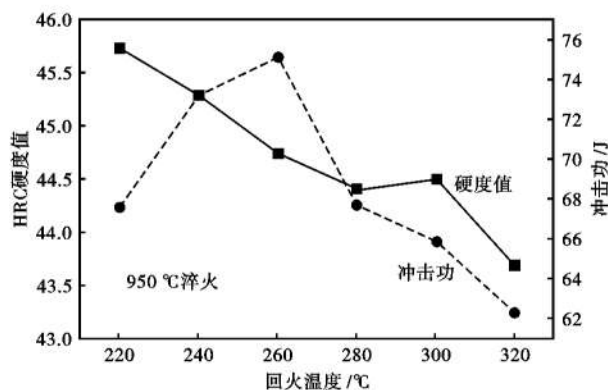


图 4 回火温度对试验 20SiMnMo 钢 HRC 硬度值和冲击功的影响

Fig.4 Effect of tempering temperature on HRC hardness number and impact energy of test steel 20SiMnMo

碳化物更加稳定,高于 220 °C 以上硬度降低,但是下降幅度不大,硬度值最低点为 320 °C 时的 43.7HRC,此时由于渗碳体析出并长大以及马氏体中碳的质量分数已经降低,虽然碳化物的析出有一定的强化效果,但远比不上固溶强化的减弱,故硬度有所下降。

不同温度回火处理后试样的冲击功呈现先升高后降低的变化趋势,在 260 °C 时达到最大的冲击功 ( $A_{KV2}$ )75.2 J,在此温度范围内,随着回火温度的提升,由于淬火内应力消除,碳化物开始聚集,以及  $\alpha$  相开始回复,冲击功也随之升高;在 260 °C 以后性能

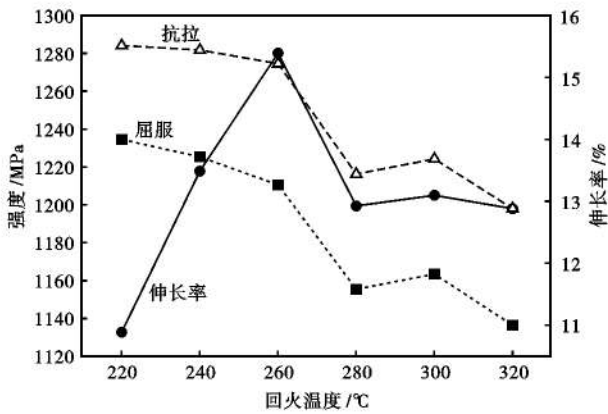


图 5 回火温度对试验 20SiMnMo 钢抗拉强度、屈服强度及伸长率的影响

Fig. 5 Effect of tempering temperature on tensile strength, yield strength and elongation of test steel 20SiMnMo

急剧下降,到 320 °C 降至 62.3 J,这个现象产生的原因是在此温度区间内产生的回火脆性,此时碳化物沿马氏体晶界析出并不断增厚,形成脆性薄壳,降低基体断裂强度。低温回火脆性不易消除,应避免在此温度区回火<sup>[12]</sup>。

应用电子万能试验机进行拉伸试验的结果如图 5 所示,图 5 为标准拉伸试样的抗拉强度、屈服强度及伸长率随回火温度的变化曲线。

由图 5 可以看出,在 220 ~ 320 °C 回火时,试验钢的抗拉强度随回火温度的升高呈现逐渐下降的趋势,回火温度为 220 °C 时,抗拉强度达到最大值,为

1 284 MPa,回火温度为 320 °C 时,抗拉强度出现最小值,为 1 200 MPa。屈服强度随回火温度的升高与抗拉强度的变化一致,回火温度为 220 °C 和 320 °C 时,分别对应的屈服强度值为 1 235 MPa 和最小值 1 130 MPa。回火马氏体使位错运动的阻碍降低,使回火马氏体强度、硬度都低于马氏体,因此,回火后强度会下降,而在 280 °C 之前强度下降缓慢,是因为回火稳定性高,回火抗力大。伸长率在回火温度低于 260 °C 时,随着回火温度的升高而增大,回火温度在 260 °C 以后,其随着回火温度的升高先减小再升高随后又下降,其中最小值为回火温度在 220 °C 时的 10.9%,当回火温度达到 260 °C 时,伸长率达到最大值,为 15.4%。

### 2.3 冲击断口分析

对冲击断口在扫描电镜下进行断口形貌分析,220 ~ 320 °C 回火温度的断口形貌如图 6 所示。

从图 6 可以看出,冲击试样断口表面分布着大量的韧窝,表明试验钢都具有良好的室温冲击性能。在 260 °C 回火的冲击断口如图 6(c),有明显的韧窝且相较于其他回火组织断口细密,分布比较均匀,分析可知具有一定的塑性变形,为韧性断裂,冲击功数值较大;图 6(f)是 320 °C 回火后的断口形貌,对比分析发现与 260 °C 相比,有较小的准解理面,但仍有许多韧窝,主要还是个韧性断裂;图 6(a, d, e)中具有大量的韧窝,但是韧窝大小比较不均匀,不如图 6

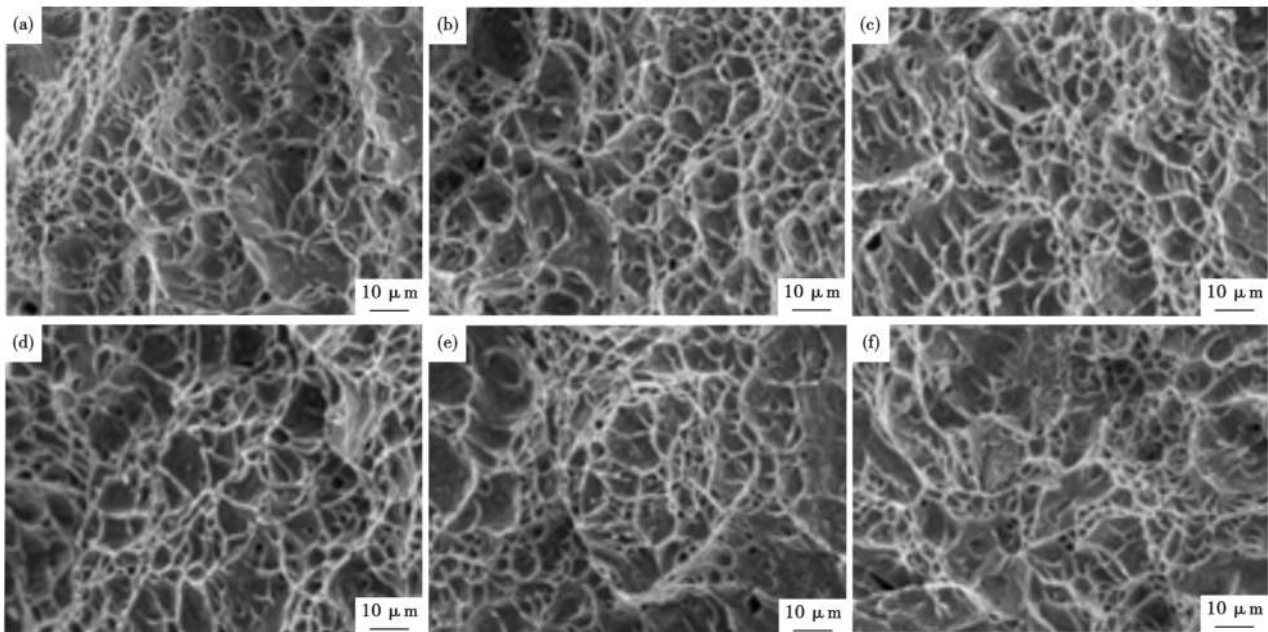


图 6 试验 20SiMnMo 钢 950 °C 淬火 (a) 220 °C; (b) 240 °C; (c) 260 °C; (d) 280 °C; (e) 300 °C; (f) 320 °C 回火 3 h 的断口形貌  
Fig. 6 Fracture morphology of test 20SiMnMo steel quenching at 950 °C and tempering at (a) 220 °C; (b) 240 °C; (c) 260 °C; (d) 280 °C; (e) 300 °C; (f) 320 °C for 3 h

(b,c)细密、均匀,虽然也为韧性断裂,但冲击功数值相对于图 6(b,c)低一些。

### 3 结论

(1)当试验钢经 950 ℃ 淬火以及 260 ℃ 回火处理后得到细长板条马氏体组织,综合力学性能达到最佳:硬度值达到 44.8HRC、冲击功 ( $A_{KV2}$ ) 达到 75.3 J、抗拉强度达到 1 278 MPa、屈服强度达到 1 210 MPa、伸长率达到 15.5%。

(2)回火温度区间在 220 ~ 320 ℃,随着回火温度升高,硬度逐渐下降,这是因为淬火形成的过饱和和高硬度马氏体在热力学上是不稳定的状态,马氏体

中大量碳化物呈弥散状析出,导致碳和合金元素脱溶,致过饱和度不断降低。

(3)回火温度在 220 ~ 320 ℃,冲击功呈现先升高后降低的变化趋势,升高是因为淬火内应力消除,碳化物开始聚集,以及  $\alpha$  相开始回复。通过断口扫描照片可知,此时有明显的韧窝,且韧窝相较于其他比较细密,分布比较均匀,为韧性断裂,冲击功数值较大;在 260 ℃ 以后性能急剧下降,是因为在此温度区间内由于碳化物析出的缘故。

鄂尔多斯市科技计划项目;内蒙古自治区应用技术研究开发与开发计划项目(201802022)

### 参考文献

[1] 高志国. 屈服强度 700 MPa 高强度低合金汽车钢板研发进展[J]. 热加工工艺, 2019, 48(7): 10-14 + 22.

[2] 董瀚, 廉心桐, 胡春东, 等. 钢的高性能化理论与技术进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 558-582.

[3] 耿文远, 高平, 王凡, 等. 热处理工艺对 30MnCrNiMo 高强度组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(1): 42-47.

[4] 温长飞, 肖爱达, 刘旭辉, 等. 回火温度对低合金超高强度钢 Q1300 组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(2): 172-177.

[5] 乔志霞, 刘永长. 低合金超高强度钢中的相变及组织控制[J]. 金属热处理, 2015, 40(1): 12-22.

[6] 李绍宏. 高强韧冷作模具钢组织设计及组织控制研究[C]. 上海: 上海大学博士学位论文, 2011: 15-21.

[7] 乔志霞, 刘永长. 低合金超高强度钢中的相变及组织控制[J]. 金属热处理, 2015, 40(1): 12-22.

[8] 罗海文, 沈国慧. 超高强度高韧化钢的研究进展和展望[J]. 金属

学报, 2020, 56(4): 494-512.

[9] 杨庚蔚. 新型超高强度马氏体钢组织超细化控制技术及机理研究[C]. 昆明: 昆明理工大学博士学位论文, 2013: 14-23.

[10] 董纪. 热处理工艺对 25CrMo48V 超高强度钢组织及碳化物演变的影响[C]. 天津: 天津大学博士学位论文, 2017: 13-18.

[11] 蔺宏涛. 高强度钢 QP980 焊接接头的组织性能与氢脆敏感性研究[C]. 北京: 北京科技大学博士学位论文, 2020: 10-16.

林文政(1995-),男,硕士(2021年内蒙古科技大学),助理工程师,高强度钢的强韧化及工艺研究。  
E-mail:15804722665@163.com

收稿日期:2021-09-17

## 《特殊钢》杂志 2022 年 “轴承与轴承钢”专刊征稿通知

轴承在现代化经济建设和科技发展中起着举足轻重的作用,制造轴承的轴承钢也是最难冶炼的特种钢之一,是公认的“钢中之王”。我国几十年来在轴承及轴承钢质量方面均获得极大提升,但在高速铁路、风电装备、航空航天等领域,关键轴承的使用寿命、可靠性与承载能力等仍是制约中国装备制造业发展的一大瓶颈。

为持续推动我国轴承及轴承钢的前沿科技交流,促进特殊钢行业高品质创新发展,《特殊钢》杂志社将于 2022 年 11 月出版一期“轴承及轴承钢”专刊(正刊),欢迎各大专院校、科研院所、特钢企业、轴承研究所,以及相关冶金材料及设备研究单位等的科技工作者以及本刊广大作者、读者踊跃投稿。