

· 组织与性能 ·

## 热处理对40CrMnSiB低合金超高强度钢组织和性能的影响

李建新 王飞 翟羽佳 王瑞

(抚顺特殊钢股份有限公司技术中心, 抚顺 113001)

**摘要** 采用OM、SEM、JMatPro7.0分析技术,研究了热处理工艺(860~950℃淬火+200~400℃回火)对新型中碳40CrMnSiB低合金超高强度钢(0.41C,0.84Cr,0.76Mn,1.44Si,0.006B)微观组织及力学性能的影响。结果表明:920℃淬火和300℃回火钢的力学性能达到最佳强韧性匹配,即抗拉强度为1943MPa、屈服强度为1931MPa、延伸率为9%、断面收缩率为39.5%、冲击吸收功为44J、HRC硬度值为52.7。

**关键词** 低合金超高强度钢 40CrMnSiB 硼 奥氏体化温度 回火

## Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of 40CrMnSiB Low Alloy Ultra-High Strength Steel

Li Jianxin, Wang Fei, Zhai yujia and Wang rui

(Technology Center, Fushun Special Steel Group Co. Ltd, Fushun 113001)

**Abstract** The effects of heat treatment (quenched at 860~950℃ + tempered at 200~400℃) on the microstructure and mechanical properties of a new medium carbon 40CrMnSiB low alloy ultra-high strength steel (0.41C, 0.84Cr, 0.76Mn, 1.44Si, 0.006B) are investigated by OM, SEM and JMatPro7.0 analysis techniques. The results show that with quenched at 920℃ and tempered at 300℃, the mechanical properties of the steel reach the best toughness matching, that is, the tensile strength 1943 MPa, the yield strength 1931 MPa, the elongation 9%, and the reduction of area 39.5%, the impact absorption work 44 J, and the HRC hardness value 52.7.

**Material Index** Low Alloy Ultra-High Strength Steel 40CrMnSiB, Boron, Austenitizing temperature, Tempering

在新型中碳40CrMnSiB低合金超高强度钢中加入微量B元素不仅节约了大量Ni、Co、Mo等昂贵金属元素,而且可以保证钢优异强韧性,B原子极易偏聚在晶界附近,抑制了铁素体形核、具有提高贝氏体及马氏体淬透性<sup>[1-3]</sup>、净化合金晶界、强化铁素体耐热钢晶界等作用。当0.001% < B < 0.005%时,40MnB钢的退火组织为均匀的铁素体、珠光体和少量硼化物<sup>[4,5]</sup>,低碳含硼(0.005%)高强度钢细小板条贝氏体及极少量针状铁素体的混合组织保证了强韧性<sup>[6]</sup>,硼含量超过0.007%时,组织中出现的共晶型含硼相恶化了钢的塑性和韧性<sup>[7]</sup>,而中碳(0.42%)含硼(1.2%)钢网状分布的棒状和细片状硼化物且改善了其合金的韧性<sup>[8]</sup>,中碳低合金钢加入B元素后晶界之间的碳分布不均得到改善进而提高了冲击韧性<sup>[9]</sup>。

### 1 试验材料和热处理工艺

试验钢采用6t真空感应冶炼+6t真空自耗重熔冶炼超纯净钢锭,真空自耗锭Φ660mm,其化学成分见表1。真空自耗锭经1140~1160℃保温240min后经3150t快锻开坯、1800t精锻锻成

Φ150mm的棒材,一组试样经860℃、890℃、920℃、950℃1h淬火处理,油冷,待冷却到室温,之后经过300℃2h回火处理;二组金相试样只经过860℃、890℃、920℃、950℃1h淬火处理,油冷处理,三组试样经920℃1h淬火处理,油冷,待冷却到室温,之后经过200~400℃2h回火处理,拉伸试样为Φ5mm,标距长25mm的标准试样,冲击试样尺寸为10mm×10mm×55mm“U”型缺口试样。

### 2 试验结果与分析

#### 2.1 热处理对力学性能的影响

860~950℃,随淬火温度升高,抗拉强度快速提高,屈服强度出现谷值和峰值,由860℃时的1851MPa降到890℃时的1815MPa,之后又上升到920℃时的1931MPa,随后又降低到1873MPa[图1(a)]。

经920℃淬火,在200~400℃区间回火,抗拉强度快速下降而屈服强度先迅速提高后又呈下降趋势,屈服强度由200℃回火的1720MPa上升到300℃回火的1804MPa,随后降低到400℃回火的1584MPa;经300~400℃回火处理,断面收缩率和延伸率呈线性上升趋势,分别由39%、9%增加到55%、18%[图1(b)]。

表 1 40CrMnSiB 钢的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of 40CrMnSiB steel /%

C	Mn	Si	Cr	V	B	S	P	O	N	H
0.41	0.76	1.44	0.84	0.39	0.006	0.001	0.002	0.0015	0.0015	0.0001

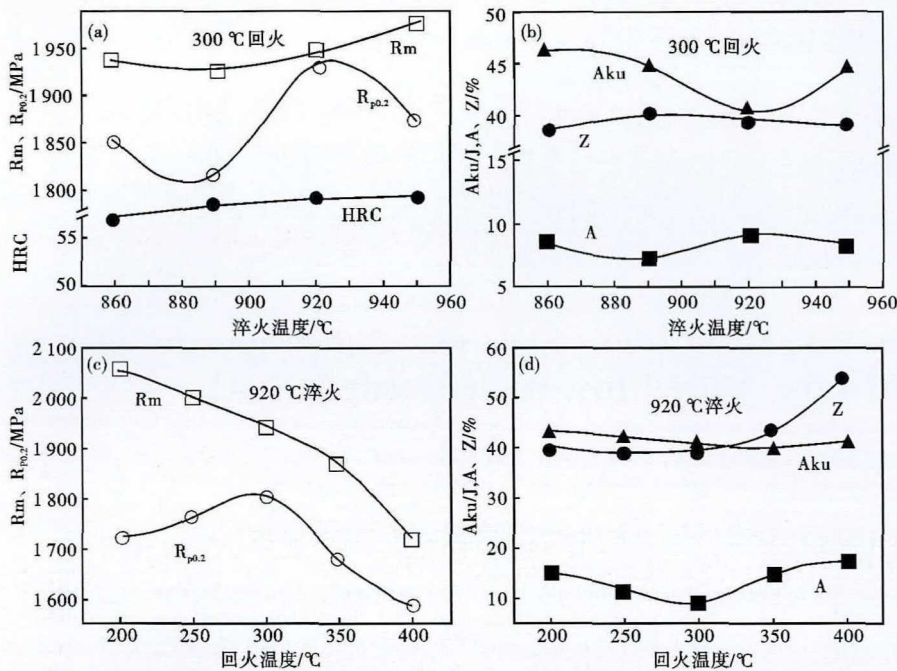


图 1 淬火温度(a)(b)和回火温度(c)(d)对 40CrMnSiB 钢力学性能的影响  
Fig. 1 Effect of quenching temperature (a) (b) and tempering temperature (c) (d) on mechanical properties of 40CrMnSiB steel

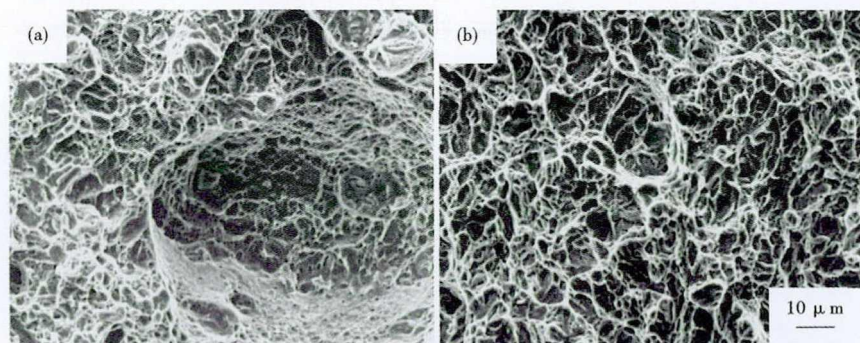


图 2 (a) 860 °C 1 h 油冷 + 300 °C 2 h 回火; (b) 920 °C 1 h 油冷 + 300 °C 2 h 回火的 40CrMnSiB 钢冲击试样断口 SEM 形貌  
Fig. 2 SEM morphology of impact samples fracture: (a) 860 °C 1 h, oil quenched + 300 °C 2 h tempered and (b) 920 °C 1 h, oil quenched + 300 °C 2 h tempered, 40CrMnSiB steel

2.2 冲击试样断口形貌

在 860 ~ 920 °C 随淬火温度的提高, 冲击性能快速上升, 冲击试样在预制缺口根部形成裂纹, 随着外界冲击力迅速扩展至试样断裂, 不同温度奥氏体化试样裂纹扩展区均为韧窝形貌, 但奥氏体化温度较低的试样除夹杂物等缺陷引起的一次韧窝外, 还有未溶第二相粒子形成的二次韧窝形貌[图 2(a)],

结合 JMatPro7.0 非平衡态相模拟计算及 EDS 能谱分析该粒子富 Fe 和 Cr 的  $M_{23}C_6$  型合金碳化物[图 3(a)], 以其为核心形成的韧窝所需的能量较低, 恶化了试验钢的冲击韧性。继续提高淬火温度,  $M_{23}C_6$  型合金碳化物在 875 °C 完全回溶到基体组织里[图 3(b)], 冲击试样裂纹扩展区韧窝内未溶粒子大量减少, 冲击性能得到改善, 由 860 °C 奥氏体化的 36 J 提高到 44 J [图 2(b)]。

2.3 奥氏体化(淬火)温度对微观组织的影响

奥氏体化温度较低的金相试样, 淬火组织基体为粒状贝氏体 + 板条马氏体组织形貌, 其基体上存在未溶第二相[图 3(a)], EDS 能谱分析未溶第二相富 Fe 和 Cr 合金元素, 与图 2(a) 韧窝内的粒子成分相近。800 ~ 950 °C 奥氏体化存在  $(Cr, V)CN$ , 800 ~ 875 °C 奥氏体化存在  $M_{23}C_6$ , 875 ~ 895 °C 存在  $Fe_3B$ , 随着奥氏体化温度的提高,  $M_{23}C_6$  中的碳逐渐被硼元素置换形成含硼碳化物, 或者通过共晶反应得到  $Fe_3B$  化合物[图 3(b)], 由于  $M_{23}C_6$  和  $Fe_3B$  均属于脆相且分布在晶界附近<sup>[7]</sup>, 导致晶界附近应力集中, 与基体产生空穴或裂纹源, 为裂纹扩展提供通道, 进而严重恶化了钢的强韧性。

2.4 回火温度对微观组织的影响

由图 4 可知, 经 920 °C 淬火处理后, 不同回火温度下试样基体组织均是板条马氏体 + 少量粒状贝氏体微观形貌, 随着回火温度的提高, 板条马氏体束逐渐粗化分解, 低温回火时析出的  $\epsilon-Fe_3C$  碳化物弥散在基体组织上, 提高了试验钢的强度, 当回火温度超过 300 °C 时, 马氏体开始分解形成粗大的渗碳体, 恶化了钢的强韧性, 400 °C 回火时,  $\alpha$  相得到回复, 钢

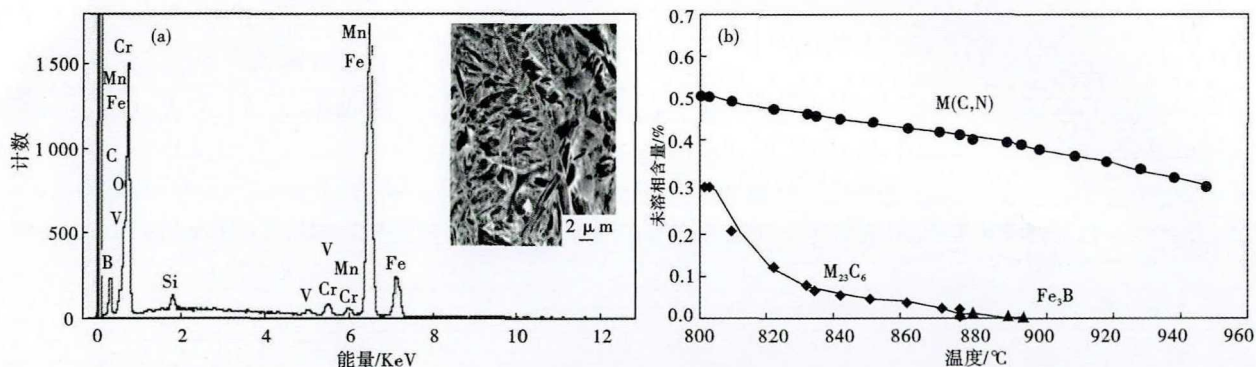


图3 860 °C奥氏体化的40CrMnSiB钢SEM形貌及EDS能谱图(a)和未溶相模拟计算图(b)

Fig.3 SEM morphology and EDS spectrum of austenitizing at 860 °C (a) and simulated calculation of un-dissolved phase (b), 40CrMnSiB steel

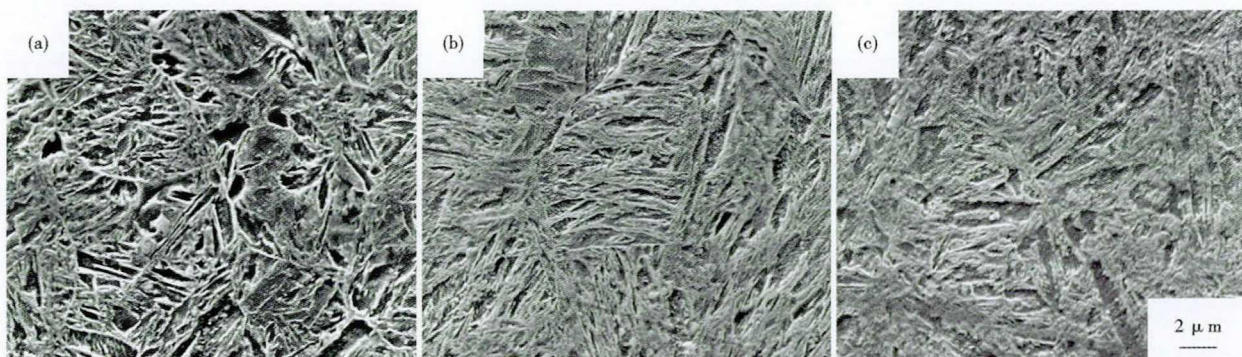


图4 920 °C淬火,(a) 200 °C;(b) 300 °C和(c) 400 °C回火的40CrMnSiB钢组织形貌

Fig.4 Morphology of structure of 40CrMnSiB steel quenched at 920 °C + tempered at 200 °C (a); 300 °C (b) and 400 °C (c)

的塑性得到改善[图1(d)]。

## 2.5 结果分析

在900 °C以下,晶粒度均达8级,钢的强韧性主要受未溶颗粒的影响,在较低奥氏体化温度下,固溶强化占主导作用,但随着奥氏体化温度的提高,未溶颗粒回溶到基体中,晶粒度逐渐粗化,920 °C和950 °C的晶粒度分别为6.5级、5.5级,屈服强度由920 °C时的1 931 MPa,随着晶粒的粗化而降低到950 °C时的1 873 MPa,因此920 °C淬火+300 °C回火后,纳米级(Cr,V)CN和BN弥散分布在基体上<sup>[6-8]</sup>(图4),起到弥散强化作用,钢的强韧性达到最佳匹配度。

## 3 结论

(1)奥氏体化温度较低的低合金超高强度钢存在大量的M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>型合金碳化物和Fe<sub>3</sub>B化合物,极大的恶化了低合金超高强度钢的强韧性。

(2)920 °C淬火和300 °C回火钢力学性能达到最佳强韧性匹配,即抗拉强度1 943 MPa、屈服强度1 931 MPa、延伸率9%、断面收缩率39.5%、冲击吸收功44 J、HRC硬度值52.7。

## 参考文献

- [1] Nishibata T, Kojima N. Effect of Quenching Rate on Hardness and Microstructure of Hot-Stamped Steel [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 577 (S1): S 549-554.
- [2] 居殿春, 刘家琪, 卢军辉, 等. 淬火硼对高强度低合金钢机械性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(3): 38-41.
- [3] 颜慧成, 曹慧泉, 罗登, 等. 钛、铌、硼对低碳贝氏体钢组织与性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(5): 55-58.
- [4] 贾善顺, 吕迎, 李俊刚, 等. ZG40MnB钢的制备及组织研究[J]. 煤炭技术, 2010, 29(2): 187-188.
- [5] 张杨, 赵宗鼎. 硼含量及其分布对40MnB钢冲击韧性的影响[J]. 天津理工学院学报, 2000, 16(1): 23-27.
- [6] 王克鲁, 鲁世强, 康永林, 等. 硼对高强度低碳贝氏体钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2009, 34(3): 6-9.
- [7] 赵黎明, 郭铁明, 季根顺, 等. 微量元素硼对碳钢、不锈钢组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(8): 56-59 + 63.
- [8] 王琦环, 郭长庆. Kelly P M. Fe-Cr-B合金的显微组织[J]. 金属热处理, 2004, 29(5): 30-32.
- [9] 陈博时. 硼和热处理参数对钢机械性能的影响[J]. 上海钢研, 1999(2): 63-64.

李建新(1971-),男,高级工程师(技术中心副主任),1995年辽宁工学院(本科)毕业,超高强度钢研发及生产。  
E-mail: Lijianxin2009@163.com

收稿日期:2019-09-11