

亚温淬火对硼镍添加含铌低合金高强度 H 型钢组织性能的影响

Effect of Subcritical Quenching on Microstructures and Mechanical Properties of Boron-nickel Added Nb-treated HSLA H-beam

王 晓¹, 王作成¹, 王协彬¹, 李显达¹, 高俊庆², 赵修领²

(1 山东大学 材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 济南 250061;

2 莱芜钢铁股份有限公司, 山东 莱芜 271104)

WANG Xiao¹, WANG Zuo-cheng¹, WANG Xie-bin¹, LI Xian-da¹,

GAO Jun-qing², ZHAO Xiu-ling²

(1 Key Laboratory for Liquid-solid Structural Evolution & Processing of

Materials (Ministry of Education), Shandong University, Jinan 250061, China;

2 Laiwu Iron and Steel Company Ltd., Laiwu 271104, Shandong, China)

摘要: 将硼镍添加的含铌低合金高强度 H 型钢进行亚温淬火及完全淬火, 对淬火以及淬火并高温回火后的试样进行了力学性能和微观组织的研究。结果表明: 亚温淬火并回火后, 这一新钢种的屈服强度达到 512MPa, 抗拉强度达到 595MPa, 伸长率达到 27%, 韧脆转变温度达到 -88°C , 具有优异的综合力学性能。近似等轴的铁素体及其上弥散分布的细小碳化物, 使得回火时塑性大幅提高而强度下降不多; 回火碳化物钉扎晶界, 抑制了晶粒的长大, 起到了细化晶粒的效果; 不连续的细小碳化物分布在晶界上, 没有对材料的韧性造成破坏。

关键词: 低合金高强度 H 型钢; 亚温淬火; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG161 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)03-0022-06

Abstract: Microstructures and mechanical properties of subcritical/complete quenched and quenched & tempered boron-nickel added Nb-treated high strength low alloy (HSLA) H-beams were investigated. The results indicate that the subcritical quenched and tempered steel exhibits good combination of strength, plasticity and toughness. Yield strength, tensile strength and elongation of the subcritical quenched and tempered steel is 512MPa, 595MPa and 27%, respectively. Its ductile-brittle transition temperature is -88°C . The quasi-polygonal ferrite and dispersed small carbides make sure high plasticity without dramatic decrease of strength after tempering. The carbides promote grain refinement by pinning effect and have little influence on toughness.

Key words: high strength low alloy H-beam; subcritical quenching; microstructure; mechanical property

低合金高强度(HSLA)H型钢是典型的低碳低合金结构钢,它具有较高的强度、韧性和良好的焊接性能。较低的合金含量使其具有明显的价格优势,在高层建筑、船舶、桥梁、海洋石油平台等领域得到了广泛的应用^[1-3]。由于科学研究和资源开发的需要,以石油钻井平台为代表的高寒地区工程结构对低合金高强度H型钢的低温韧性提出了更高的要求^[4-6]。镍是提高钢材低温韧性的重要元素,在国标、日标、美标中都将其作为低温用钢中不可或缺的元素。但是镍元素的价格较高,每增加百分之一的镍含量,吨钢成本将增加1800元,这将严重影响低合金高强钢的价格优势,同时降低其焊接性能。因此,对于低合金高强钢来说,

采用较低成本的微量元素提高其低温韧性具有重要意义^[7-9]。利用硼原子在晶界偏聚的特性,通过在含铌Q345大H型钢中添加 10×10^{-6} 的硼,使其 -40°C 下的冲击功满足了国标要求;再利用微量硼与少量镍的复合作用,使其 -50°C 冲击功满足了国标要求^[10-12]。但是,上述结果均基于铁素体+珠光体组织的热轧态钢材,为了充分发挥这一新钢种的潜力,特别是进一步提高其低温韧性,本工作将这一硼镍添加含铌低合金高强钢进行了亚温淬火和完全淬火,并经高温回火后,对其力学性能特别是低温冲击韧性进行了系统地研究,得到了脆性转变温度为 -88°C 且具有优异综合力学性能的钢材,并从微观组织方面进行了强韧化机理

的分析。

1 实验材料和方法

由光谱分析得到实验钢的化学成分见表 1。实验钢由转炉冶炼之后经钢包精炼(LF),特别控制其氮、

氧含量在 0.005% 以下,以尽量减少 BN 的析出,保证有足够的硼元素以游离态存在。硼不仅作为提高热轧态下低温冲击韧性的微量元素,在冷却过程中还能起到抑制奥氏体向铁素体转变、提高淬透性的作用^[13,14]。实验钢的开轧温度为 1150℃,总压下率为 70%,终轧温度为 910℃,轧后空冷至室温。

表 1 实验钢的化学成分 (质量分数/%)

Table 1 Composition analysis of experimental steel (mass fraction/%)										
C	Si	Mn	P	S	Nb	Ni	B	N	O	Fe
0.14	0.22	1.31	0.018	0.005	0.019	0.45	0.001	0.004	0.005	Bal

利用 Gleeble1500 热模拟试验机测得实验钢以 5℃/s 的速度加热时的温度-膨胀量曲线。采用“切线法”,取膨胀量曲线上直线部分的延长线与曲线部分的分离点作为临界相变点,测定实验钢的 A_{c1} 温度为 770℃, A_{c3} 温度为 906℃,如图 1 所示。为研究亚温淬火对实验钢组织及性能的影响,同样将其以 5℃/s 加热到 870℃和 950℃,分别保温 1h 后淬火,编号为 Q1, Q2,再将两组淬火试样在 600℃回火 2h 后空冷,分别编号为 T1, T2,实验工艺如图 2 所示。另取热轧态的试样作为对照,编号为 R0。

按照相关标准,在 H 型钢翼缘上,由边部到心部 1/3 处沿轧制方向取尺寸为 15mm×20mm×320mm 的拉伸试样,室温下在万能拉伸试验机上进行单向拉伸实验。在相同位置取 10mm×10mm×55mm 的 V 型缺口夏比冲击试样,按照 GB/T 229—2007 的规定,在-100~20℃ 范围内每隔 10℃ 进行一组冲击实验;使用冲击吸收功为上平台的 50% 时所对应的温度 (ETT_{50}) 作为试样的韧脆转变温度。利用 X 射线衍射 (XRD) 测定样品的相组成。采用光学显微镜 (OM) 和显微硬度相结合的方法,确定各试样的组织组成。其中显微硬度测试使用 10g 的载荷,保压时间为 10s,确保得到的压痕在一个晶粒之内。利用扫描电镜 (SEM) 观察晶内亚结构;使用高分辨透射电镜 (HR-TEM) 对萃取的二相粒子进行观察。

2 实验结果及分析

2.1 力学性能

不同热处理工艺下实验钢的力学性能和冲击吸收功见表 2,表中所有实验数据均为三次测量的平均值。淬火试样 Q1, Q2 在拉伸时没有明显的屈服平台,因此没有给出其屈服强度。

由表可见,亚温淬火与完全淬火试样相比,抗拉强度降低了 193MPa,伸长率提高了 2.5%;亚温淬火并回火的试样与完全淬火并回火的试样相比,屈服强度和抗拉强度分别降低了 162MPa 和 150MPa,伸长率则提高了 8.5%。由于强度与伸长率之间存在着此消彼长的关系,为了反映材料的综合力学性能,采用强度与伸长率的乘积(强塑积)作为指标,它反映了材料在破坏之前所吸收能量的大小。可以看到,不论是淬火试样、淬火回火试样甚至包括原热轧态试样在内,经亚温淬火并回火后的试样具有最高的强塑积。

图 1 实验钢加热时的温度-膨胀量曲线

Fig. 1 Dilatometric curve of specimen being heated

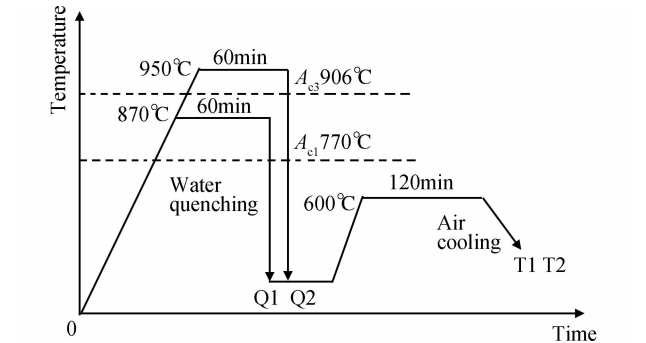


图 2 实验过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental procedure

表 2 实验钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of experimental steels

No	Condition	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%	$\sigma_b \times \delta$ / MPa%	A_{kv} /J				
						20℃	-40℃	-60℃	-80℃	-100℃
R0	Hot rolled	432	515	29.0	14935	165	69.2	19.2	—	—
Q1	870℃ quenched	—	800	18.5	14800	118	42.1	32.3	—	—
Q2	950℃ quenched	—	993	16.0	15888	88.8	27.8	20	—	—
T1	870℃ quenched & 600℃ tempered	512	595	27.0	16065	220	230	234	209	45
T2	950℃ quenched & 600℃ tempered	680	745	18.5	13782	204	191	119	126	39

冲击韧性方面,图 3 是-100~20℃范围内,试样

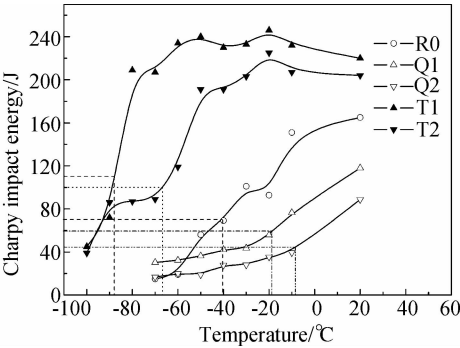


图 3 不同温度下各试样的冲击功

Fig. 3 Charpy impact energy at different temperature

的冲击功随温度变化的曲线。由图可见,在各温度下, T1 试样均具有最高的冲击功。采用 ETT_{50} 作为钢材的韧脆转变温度,可以看到, R0 试样虽然能满足 -50℃ 下冲击功高于 34J 这一国标要求,但其 ETT_{50} 仅为 -40℃; 淬火态的 Q1, Q2 试样的 ETT_{50} 最高, 分别为 -18℃ 和 -8℃; 经完全淬火并回火的 T2 试样, 其 ETT_{50} 为 -68℃, 而经亚温淬火并回火的 T1 试样的 ETT_{50} 最低, 达到 -88℃。

因此,从强塑积和韧脆转变温度两个方面来看,亚温淬火并回火的试样具有最佳的综合力学性能。各试样力学性能和韧脆转变温度的对比如图 4 所示。

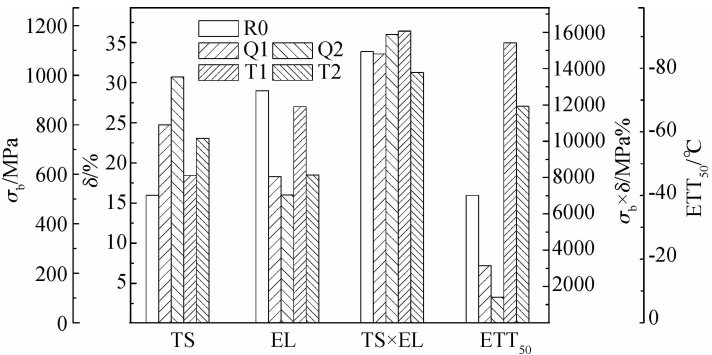


图 4 各试样的抗拉强度、伸长率、强塑积以及韧脆转变温度

Fig. 4 Tensile strength, elongation, product of strength and ductility and ductile-to-brittle transition temperature (ETT_{50}) of experimental steels

2.2 微观组织

采用 XRD 对所有试样进行物相分析,结果如图 5 所示。可以看到,所有试样的衍射图谱上只有 α 相的衍射峰,均没有 γ 相的衍射峰,说明淬火试样中没有残余奥氏体,回火试样中也没有形成回转变奥氏体。

低碳钢淬火后的组织较为复杂,采用金相观察与显微硬度相结合的方法,确定不同热处理条件下试样的组织组成。图 6(a)是亚温淬火后试样的微观组织,其中白色块状组织的显微硬度在 250~270HV 之间,由于淬火温度低于 A_{c3} ,该组织为没有溶解的残余铁素体,采用定量金相的方法,测得铁素体的含量约

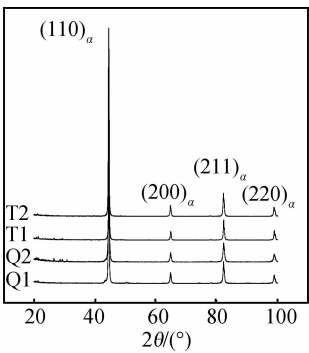


图 5 各试样的 X 射线衍射图

Fig. 5 XRD patterns of experimental steels

15%；靠近白色铁素体的羽毛状结构的显微硬度在 350~380HV 之间，为贝氏体组织；黑色粒状组织的显微硬度在 430HV 左右，判断其为马氏体组织。图 6(b)是完全淬火后试样的微观组织，没有发现硬度较低的区域，说明没有残余铁素体，羽毛状的贝氏体分布在颜色较浅的大块板条马氏体之间。

亚温淬火并高温回火后的试样中，贝氏体、马氏体均发生了分解，不再具有板条结构，形成了碳化物弥散分布在铁素体基体上的组织，其显微硬度在 255HV 左右，如图 6(c)所示。完全淬火并高温回火后的试样仍保留了板条状的组织，其显微硬度在 260~280HV 之间，如图 6(d)所示。

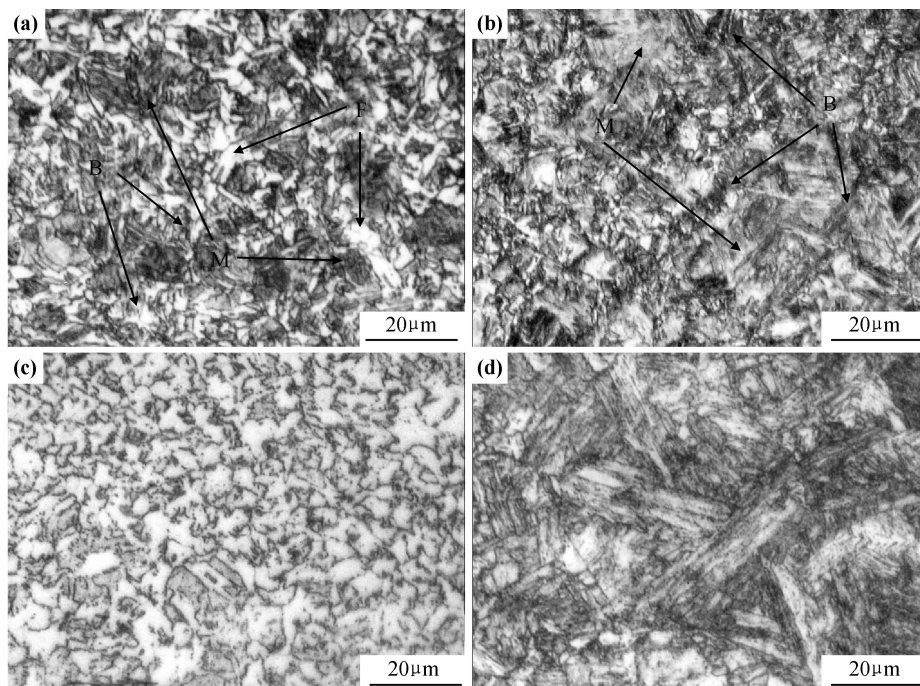


图 6 不同热处理工艺下实验钢的光学显微组织

(a)870℃ 淬火；(b)950℃ 淬火；(c)870℃ 淬火+600℃ 回火；(d)950℃ 淬火+600℃ 回火

Fig. 6 Optical micrographs of experimental steels with different heat-treatment processes

(a)870℃ quenched; (b)950℃ quenched; (c)870℃ quenched+600℃ tempered; (d)950℃ quenched+600℃ tempered

使用扫描电镜进一步观察试样的晶内亚结构发现，亚温淬火试样中的贝氏体组织由贝氏体铁素体(BF)和马氏体岛组成，粒状马氏体具有明显的板条结构，如图 7(a)所示。完全淬火试样主要由板条马氏体构成，不同板条方向的马氏体晶粒之间存在少量的贝氏体组织，贝氏体的板条间距较大，如图 7(b)所示。高温回火后的亚温淬火试样中，碳化物主要分布在铁素体晶界上，在晶粒内分布较少；而完全淬火并高温回火后的试样中，碳化物更加细小，分布也更加弥散，碳化物不仅分布在原贝氏体、马氏体晶界上，在原板条界上也有所分布，如图 7(c)，7(d)所示。

使用高分辨透射电镜观察从高温回火后试样中萃取的第二相粒子，如图 8 所示。结果发现，T1 试样中的碳化物尺寸在几十到一百纳米之间，碳化物颗粒呈椭圆形或沿晶界方向延伸的短棒形；而 T2 试样中的碳化物颗粒较小，在 10~20nm 之间，没有发现棒状的较大碳化物。这是因为亚温淬火时，奥氏体中的碳含

量较高，所以导致碳化物更加粗大。

2.3 性能与微观组织的关系

XRD 分析显示，淬火试样以及淬火回火试样中均没有 γ 相，试样的性能主要受微观组织形态的影响。与完全淬火试样相比，亚温淬火试样中铁素体、贝氏体含量较多，马氏体含量较少，因此其强度较低，伸长率较高。高温回火后，原亚温淬火试样中的铁素体呈块状，而完全淬火并回火试样中的铁素体仍保持板条形态，因此，前者在变形时晶粒之间的相对滑动较容易，同时，块状铁素体与板条状铁素体相比，其形态更接近于球形，其比表面积较小，因此晶界数量相对较少，也减轻了位错在晶界处的塞积，使其强度较低、塑性较高。

强塑积方面，高温回火使亚温淬火试样中的贝氏体、马氏体组织分解，强度下降，但分解产生的碳化物一方面阻碍了回火过程中晶界的迁移，使得回火后的晶粒不至过分长大，保持了细晶强化的作用，另一方

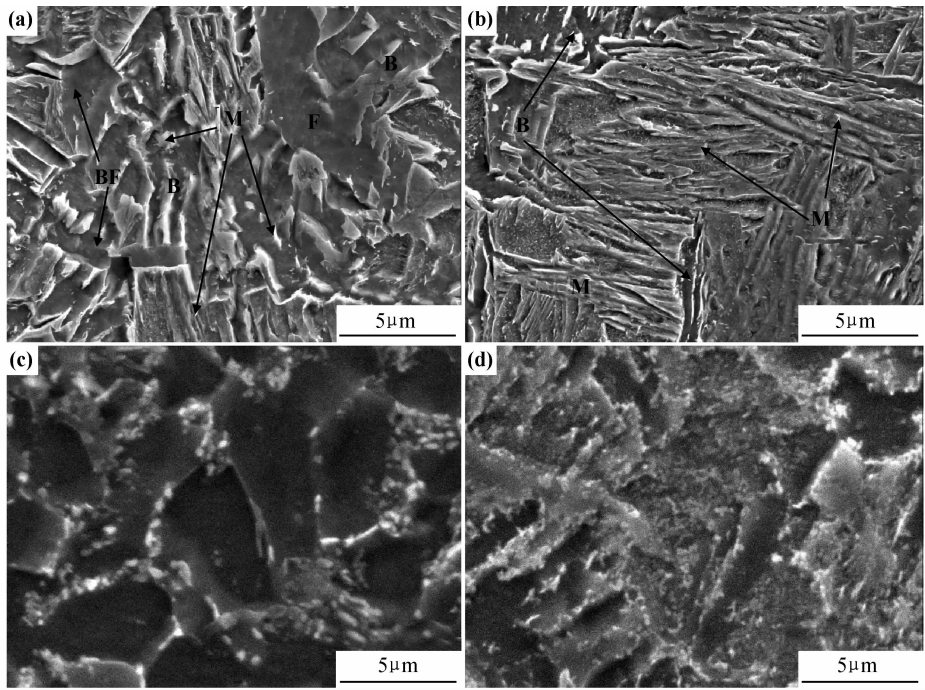


图 7 不同热处理条件下实验钢的 SEM 形貌

(a)870℃ 淬火;(b)950℃ 淬火;(c)870℃ 淬火+600℃ 回火;(d)950℃ 淬火+600℃ 回火

Fig. 7 SEM micrographs of experimental steels with different heat-treatment processes

(a)870℃ quenched;(b)950℃ quenched;(c)870℃ quenched+600℃ tempered;(d)950℃ quenched+600℃ tempered

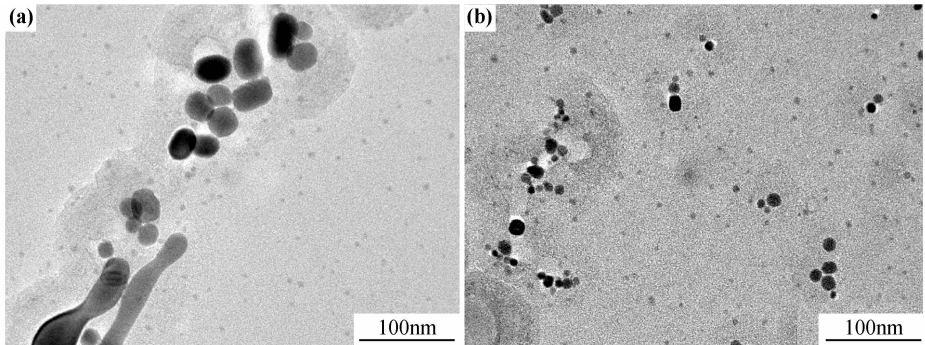


图 8 淬火回火试样中萃取第二相的 TEM 形貌

(a)870℃ 淬火+600℃ 回火;(b)950℃ 淬火+600℃ 回火

Fig. 8 TEM morphologies of extraction replica of quenched and tempered specimens

(a)870℃ quenched+600℃ tempered;(b)950℃ quenched+600℃ tempered

面,碳化物还能起到弥散强化的作用;而回火后形成的近似等轴的铁素体组织,晶粒之间的滑动容易,位错塞积程度较小,使塑性得到了很大的提高。因此亚温淬火并回火的试样在强度下降 25% 的情况下,伸长率增加了 31%。而完全淬火后的试样,在回火后仍保持了板条结构,使其在强度同样下降 25% 的情况下,伸长率只增加了 14%。因此,亚温淬火的试样与完全淬火试样相比,回火时强度的下降程度基本一致,而塑性的增加速度较快,使其具有了更高的强塑积。

冲击韧性方面,由于亚温淬火或完全淬火的试样

中含有大量的马氏体、贝氏体等具有高位错密度的切变组织,晶体缺陷较多,在受到冲击载荷时,缺陷部位易产生裂纹,因此淬火试样的冲击韧性普遍偏低,韧脆转变温度较高。回火过程中,碳原子从贝氏体、马氏体中析出,得到了较柔韧的近似等轴的铁素体组织,减轻了晶格畸变,使晶体的缺陷减少,因而受冲击载荷时不容易产生裂纹,提高了试样的冲击韧性。完全淬火并回火的试样虽然也具有较高的韧性,但由于其马氏体板条结构没有完全消除,晶界比较尖锐,对韧性的提高不利,因此其韧性不如亚温淬火并回火的试样。

值得注意的是,亚温淬火并回火后的试样中,碳化物分布在晶界上。一般来说,沿晶碳化物会使韧性降低,但该试样却具有最高的韧性,说明这些晶界碳化物没有对韧性造成不利影响。这是由以下两方面的因素造成的:第一,这些碳化物本身非常细小,仅几十到一百纳米,并且它们多为球形,没有尖锐的棱角,不易形成裂纹;第二,这些碳化物并非沿晶界连续析出,而是在回火过程的低温阶段先析出了碳化物,在高温阶段晶界迁移到碳化物处被钉扎下来,形成了类似沿晶析出碳化物的形态,并且碳化物之间并不连续,没有完全充满晶界并隔断晶粒,没有形成会造成沿晶脆断的网状形态,如图 8 所示。甚至有文献认为,这种碳化物可以抑制裂纹在晶粒之间的传播,抑制磷、硫等造成脆性的元素在晶界的偏聚,不仅无害而且有利于韧性的提高^[15,16]。

3 结论

(1)与完全淬火并高温回火工艺相比,亚温淬火能使硼镍添加低合金高强度 H 型钢在回火时强度下降不大的情况下,韧性得到大幅提高,从而提高其强塑积,获得最佳的综合力学性能。

(2)该实验钢经亚温淬火并高温回火后,冲击韧性显著增加,韧脆转变温度降低到 -88°C ,低温韧性优异。

(3)亚温淬火后该成分实验钢由块状铁素体、贝氏体以及粒状马氏体组成,其中贝氏体又由贝氏体铁素体和一定量的马氏体岛组成。回火后近似等轴的铁素体基体使得塑性显著提高,而基体上分布着的碳化物起到了弥散强化和保持细晶强化的作用。

(4)回火后的碳化物虽然分布在晶界上,但其细小且不连续,不属于沿晶连续析出的情况,并未对材料的韧性造成破坏。

参考文献

- [1] FERNANDEZ J, ILLESCAS S, GUILLEMANY J M. Effect of micro-alloying elements on the austenitic grain growth in a low carbon HSLA steel [J]. *Materials Letters*, 2007, 61(11-12): 2389-2392.
- [2] Bhole S D, Nemade J B, Collins L, et al. Effect of nickel and molybdenum additions on weld metal toughness in a submerged arc welded HSLA line-pipe steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 173(1): 92-100.

- [3] 王祖滨,付俊岩. HSLA 钢冶金工艺技术的进展[J]. *特殊钢*, 2006, 27(2): 1-5.
- [4] THEODORE V G. Recent research and design developments in steel and composite steel-concrete structures in USA[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2000, 55(1-3): 289-303.
- [5] TAHER E B, MOHAMMED G, IBRAHIM M, et al. Development of carbon—Low alloy steel grades for low temperature applications[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(18): 6039-6044.
- [6] 肖光春,荆洪阳,徐连勇,等. 预应变下高强结构钢低温断裂性能[J]. *焊接学报*, 2011, 32(3): 41-45.
- [7] 李建华,方芳,习天辉,等. 微合金化 3.5Ni 钢的强化机理[J]. *材料工程*, 2010, (5): 1-4.
- [8] ZAJAC G, PACYNA J. The kinetics of phase transformations during tempering in structural steel with nickel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 162-163: 442-446.
- [9] 张小立,庄传品,吉玲康,等. 高钢级管线钢的特征参量及其与强韧性的关系[J]. *材料工程*, 2006, (8): 3-7.
- [10] LEE S H, LEE S U, MOON K I, et al. A study on the improvement of the fracture toughness of L12-type Cu-added zirconium trialuminide intermetallics synthesized by mechanical alloying[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 382(1-2): 209-216.
- [11] WANG Z C, CUI G T, SUN T, et al. Effect of boron on microstructure and mechanical properties of hot-rolled Nb-added HSLA H-section steel[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2009, 23(6-7): 1885-1890.
- [12] HWANG B, LEE C G. Influence of thermomechanical processing and heat treatments on tensile and Charpy impact properties of B and Cu bearing high-strength low-alloy steels[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(16-17): 4341-4346.
- [13] 崔怀洋,贺信莱. 晶界非平衡偏聚与晶体缺陷构型的关系[J]. *金属学报*, 1999, 35(3): 239-244.
- [14] 巴纳吉 S K,莫罗尔 J E. 钢中的硼[M]. 北京:冶金工业出版社, 1985.
- [15] 廖波,肖福仁. 针状铁素体管线钢组织及强韧化机理研究[J]. *材料热处理学报*, 2009, 30(2): 57-62.
- [16] HAN K, XIN Y, WALSH R, et al. The effect of grain boundary precipitates on cryogenic properties of aged 316-type stainless steels[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 516(1-2): 169-179.

收稿日期:2011-06-20;修订日期:2011-11-20

作者简介:王晓(1984—),男,博士研究生,从事新钢种的研究与开发工作,联系地址:山东大学材料科学与工程学院(250061),E-mail: wangxiao84319@126.com

通讯作者:王作成(1965—),男,教授,博导,联系地址:山东大学材料科学与工程学院(250061),E-mail: zcwang@sdu.edu.cn