

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.03.008

热轧低碳钒钢强韧化机制的研究

崔辰硕, 高彩茹, 苏冠侨, 高秀华
(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点试验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 采用不添加 Mo、Cr、Ni, 低成本 V-N 微合金化的成分设计, 对实验钢进行控轧控冷(TMCP)实验, 探讨其相变机理与析出行为, 利用光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)等测试手段, 系统地研究了热轧微观组织和综合力学性能。结果表明, 显微组织为针状铁素体、准多边形铁素体和粒状贝氏体及少量三角状 M/A 岛, 析出的细小 V(C, N) 粒子呈不规则的椭球状, 较均匀弥散地分布于铁素体基体内部。实验钢的屈服和抗拉强度分别为 618、701 MPa, 断后延伸率 19%, 冷弯性能合格, 扩孔率达到 94%, 延伸凸缘性能及低温冲击性能良好, 满足轮辐用钢的加工要求。细晶强化、固溶强化、析出强化、相变强化为主要强化机制。

关 键 词: 低碳钒钢; 控轧控冷; 强化机制; 贝氏体; 力学性能

中图分类号: TG 335.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)03-0341-05

Strengthening and Toughening Mechanism of Hot-Rolled Low Carbon Vanadium Steel

CUI Chen-shuo, GAO Cai-ru, SU Guan-qiao, GAO Xiu-hua
(State Key Laboratory of Rolling & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: GAO Cai-ru, E-mail: gaocr@ral.neu.edu.cn)

Abstract: Composition design of low cost V-N microalloying steel was studied without adding Mo, Cr, Ni. The thermo-mechanical control process (TMCP) test was conducted. The phase transition mechanism and precipitation behavior were discussed. The microstructure and comprehensive mechanical properties of the hot-rolled Bainitic steel were systematically studied by optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). The results indicated that the microstructure is consisted of acicular ferrite, quasi-polygonal ferrite and granular bainite and small triangular M/A island. The fine precipitates present disks and distribute dispersedly in the ferrite matrix. The yield strength, tensile strength and elongation of the steel are 618 MPa, 701 MPa and 19%, respectively. The property of cold bending is qualified, the hold-expansion ratio reaches 94%, and stretch-flangeability and the low temperature impact performance is good. The above results can meet the demand of the automotive wheel disc. The fine grain strengthening, solid solution strengthening, precipitation strengthening and phase transformation strengthening are the main strengthening mechanisms.

Key words: low carbon vanadium steel; TMCP (thermo-mechanical control process); strengthening mechanism; bainite; mechanical properties

随着汽车工业的快速发展,2014 年中国汽车产销双超 2 300 万辆,连续六年蝉联全球第一。研究表明:汽车自重减轻 10%,则燃油消耗相应下降 6%~8%,排放量下降 4%^[1-2]。传统车轮用钢的主要材料为 RCL330, 490CL 等,钢板强度低,而车身自重重大。因此,使用高强钢是实现车身轻量化,并保持安全性的重要途径。国外不同车型车轮用钢强度级别通常在 440~590 MPa,而最高强度级别可达 780 MPa^[3],如美国 SAE965X,日本 SPH780DU 等。国内也开发出了低成本综合力学

性能优良的车轮钢,如武钢 RCL550,鞍钢 LQ540.

本文在实验室条件下,不添加附加值较高的 Mo,Cr,Ni 等合金元素并简化生产工艺^[4-5],对一种新型 V-N 钢进行了控轧控冷^[6-7]试验,生产出具有良好强韧配合的 590 MPa 级 V-N 微合金钢,采用光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)等相结合的研究方法,阐述其组织特征及析出行为,同时对强化机理进行分析,并对综合力学性能进行了系统的研究.

1 试验方法

试验钢化学成分(质量分数,%)为:C 0.12, Si 0.17, Mn 1.56, N 0.021, S 0.002, P 0.01, V 0.09, Al 0.03, Fe 余量. 由本钢真空感应炉熔炼并浇铸,经锻造后加工成 $H \times B \times L = 80\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 的坯料. 在 $\phi 450\text{ mm}$ 二辊可逆热轧试验机上进行热轧试验,将坯料加热至 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 充分奥氏体化,然后经 9 道次热轧到厚度 4 mm ,终轧温度控制在 $750 \sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$,轧后以 $20\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 冷速进行层流冷却,终冷温度控制在 $500 \sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$,缓冷至室温.

将试样在中心处沿轧制方向切开,磨平、抛光,取位置为钢板的横向 $1/4$ 处,经 4% 硝酸酒精试剂腐蚀处理后,采用 Leica DM 2500M 显微镜和扫描电镜(SEM,FEI Quanta-600)进行组织观察,用透射电镜(TEM,FEI TecnaiG²F20)进行微观结构和析出情况的观察及分析. 根据 GB/T228—2002 制取拉伸试样,在 WDW-300 电子万能试验机上进行,拉伸速率 3 mm/min ;冷弯试

验按照 GB/T232—2010 的规定取样并进行冷弯试验. 冲击试验采用 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 55\text{ mm}$ 试样,在冲击试验机(Instron 9250HV)开展,试验温度为 $20, 0, -20, -40, -60, -80\text{ }^{\circ}\text{C}$. 并用 FEI Quanta-600 扫描电镜观察冲击试样断口组织形貌. 本试验采用平底凸模法(即 KWI 法)测定试验钢的扩孔性能,试样尺寸为 $3\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,中心预制孔径 10 mm ,凹模内径为 50.9 mm . 其扩孔率 λ 的计算公式为 $\lambda = (d - d_0)/d_0 \times 100\%$. 式中, d 为试验终止时的中心孔径, d_0 为试样的原始孔径.

2 试验结果与分析

2.1 热轧组织

热轧显微组织如图 1 所示,为针状铁素体、准多边形铁素体和粒状贝氏体,沿多边形铁素体周围分布着渗碳体和三角状粗大 M/A 岛. 可观察到晶粒组织较为细化,未有明显粗大相. 铁素体晶粒直径 $4 \sim 8\text{ }\mu\text{m}$,贝氏体板条束内亚板条宽 $0.3 \sim 0.6\text{ }\mu\text{m}$. 由于在奥氏体未再结晶区轧制,压下变形促使奥氏体晶粒被压扁伸长^[8],产生大量变形带和位错等缺陷储存较高变形能,同时这些缺陷为新相铁素体的生成提供了有效形核位置. 各铁素体晶粒长大存在竞争而受到抑制,同时高密度位错也对晶粒的长大起到阻碍作用,促使铁素体晶粒细化. 在终冷后缓冷过程中,率先形成贝氏体铁素体,导致剩余的奥氏体内部富 C,增强了稳定性. 残余奥氏体在后续冷却中转变为马氏体或残余奥氏体的机械混合物.

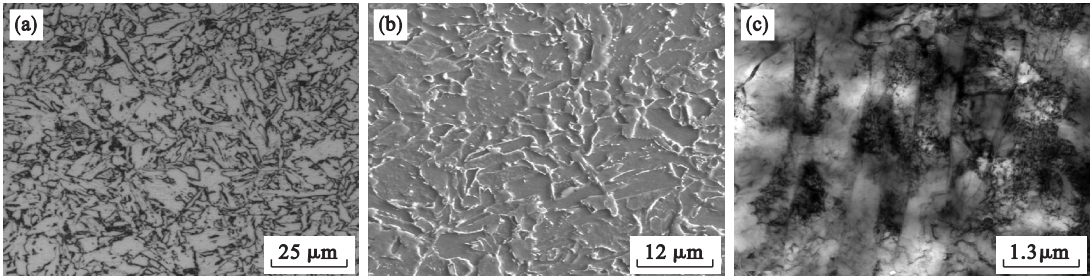


图 1 热轧组织
Fig. 1 Microstructures of hot-rolled steel
(a)—OM; (b)—SEM; (c)—TEM.

图 2 为透射电镜下观察到的析出粒子形貌及 EDX 能谱分析,析出粒子在视野内基本都呈现均匀弥散分布. 析出粒子直径分布主要集中在 $4 \sim 10\text{ nm}$ 之间,析出粒子间距约为 $18 \sim 28\text{ nm}$. 图 2b

为析出粒子的能谱分析,根据 V 和 N 的峰值可确定析出粒子为 V(C,N). 在析出总量相当的情况下,尺寸相对细小、数量多并且分布越弥散的析出粒子^[9],对强度贡献量越多,析出强化效果越好.

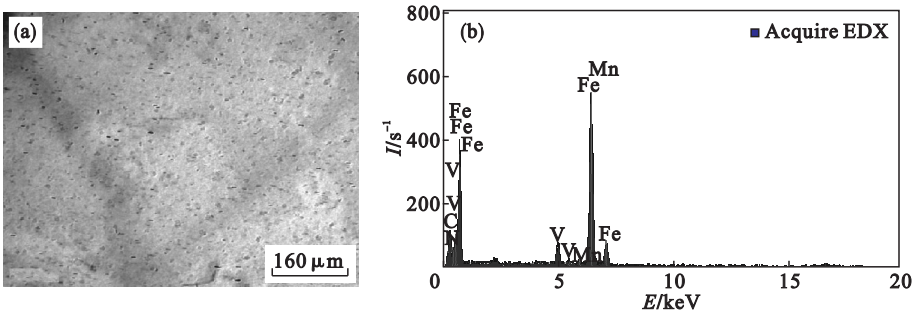


图 2 析出物粒子的形貌及能谱分析
Fig. 2 Morphologies and EDX spectra of precipitates
(a)—析出物形貌；(b)—EDX 能谱分析.

2.2 力学性能

试验钢的力学性能如表 1 所示,屈服强度达到 618 MPa,抗拉强度达到 701 MPa,断后延伸率良好,韧性塑性令人满意,因此满足抗拉强度 590 MPa 级的要求,并且屈服比控制有较大余地.铁素体组织较为均匀,一定体积分数的贝氏体与碳化物的弥散分布均有利于强度的提高,显著改善了综合性能,且扩孔性能达到 94%,较好地符合车轮用钢性能要求.图 3 为 180° 横向冷弯后试样形貌,可以观察到,冷弯试样表面没有出现裂纹,具有良好的塑性和冷加工成型性能.

表 1 试验钢的力学性能 Table 1 Mechanical properties of hot-rolled steel					
编号	R_{el}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	n 值	屈服比
1 [#]	599	689	17.5	0.10	0.87
2 [#]	618	701	19.0	0.08	0.88

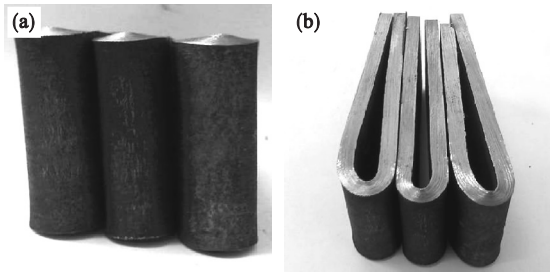


图 3 180 ° 横向冷弯试样
Fig. 3 Samples of 180° cold bending
(a)—外表面；(b)—侧表面.

由于冲击韧性与温度有关,随温度的降低而减小,为模拟实际生产需求本试验选取温度点为 20, 0, -20, -40, -60, -70 °C. 试验钢低温系列夏比冲击试验所得结果如表 2 所示. 研究表明:试验钢的冲击功未发现明显的韧脆转变温度拐点,冲击韧性比较稳定.

仅凭冲击功的大小来评价材料的韧脆情况并不准确,只有裂纹扩展功才能较为真实地反映出

材料抵抗裂纹扩展的能力. 对断口的微观组织形貌,在透射电镜 (SEM) 下进行了观察,如图 4 所示. 在 -20 ~ 20 °C 时的冲击试样断口显微组织中有较多尺寸大而深的等轴韧窝均匀分布,说明冲击断裂前经历了较大的塑性变形,冲击吸收功较高;随着温度降低韧窝尺寸减小并且深度变浅,分布不均匀;随着温度的进一步降低,部分区域会出现解理面,但小于 50% 的解理断口比例,如图 4f 所示,试验钢在使用范围内具有良好的韧性.

表 2 试验钢夏比冲击试验数据 Table 2 Charpy impact results of test steel						
编号	冲击功值/J					
	20 °C	0 °C	-20 °C	-40 °C	-60 °C	-70 °C
1 [#]	89.0	83.9	76.9	73.3	64.2	61.8
2 [#]	92.6	85.6	77.4	74.7	65.8	63.7

图 5 为 1[#] 试验钢的冲击断口中的韧窝底部粒状夹杂的能谱分析. 可以看出,在韧窝底部常有颗粒状夹杂物 CaSO_4 , MnS 和 Al_3O_2 等,是韧窝小孔形成的原因,不利于试验钢的韧性提高. 在金属熔炼过程中混入的氧化物和硫化物等夹杂物粒子在金属基体变形时使界面结合力减弱,在拉应力的作用下发生剥离形成界面上的孔洞即为韧窝.

2.3 强韧化机制分析

对于普通低碳含锰钒钢,在热轧状态下,可忽略织构强化的影响. 根据成分、晶粒尺寸及显微组织等因素,可知细晶强化、析出强化、固溶强化、贝氏体相变强化为本试验钢的主要强化机制. 有资料显示,当钢中的碳质量分数低于 0.15% 时,可不考虑珠光体含量的影响,构造低碳钢屈服强度和显微组织关系式. 根据 Pickering 经验方程:

$$\sigma_s = 15.7[3.5 + 2.1w(\text{Mn}) + 5.4w(\text{Si}) + 1.13d^{-1/2}]$$

(1)

式中: σ_s 为钢的屈服强度, MPa; d 为铁素体晶粒直径, mm.

根据式(1)可估算晶粒细化和成分对屈服强度的影响,可看出平均晶粒尺寸减小能够显著提

升屈服强度,细晶强化既能改善钢材强度的同时,又能提高钢材韧性.

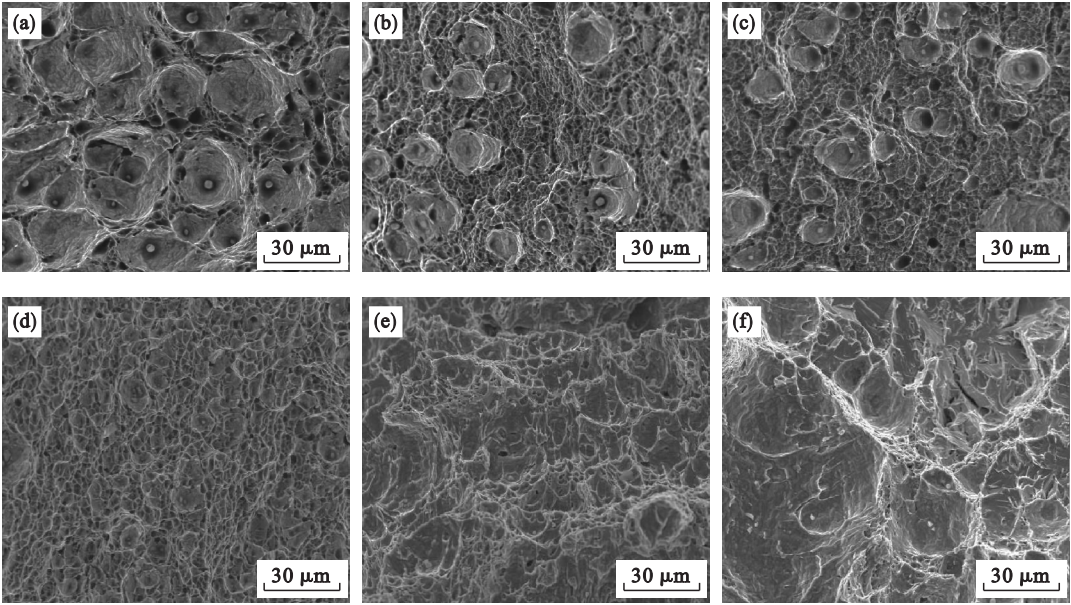


图 4 试验钢 1#不同温度下冲击试样断口微观组织形貌

Fig. 4 Microstructures of impact specimens' fracture at different temperature of 1#

(a)—20 °C; (b)—0 °C; (c)— -20 °C; (d)— -40 °C; (e)— -60 °C; (f)— -70 °C.

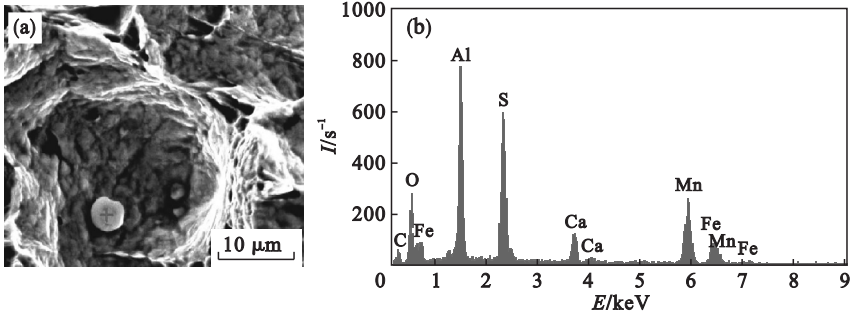


图 5 试验钢夏比冲击断口夹杂物能谱分析

Fig. 5 EDX result of inclusions in Charpy impact fracture

(a)—扫描形貌; (b)—夹杂能谱分析.

试验钢采用低碳的成分设计,低碳钢由于碳含量较低,可以减轻碳含量对钢韧性的不利影响.低碳钢通过低温大压下轧制以及快速冷却工艺,得到含高位错密度的贝氏体组织.贝氏体是硬相组织,能够有效抵抗微裂纹尖端扩展时的局部应力,阻碍微裂纹扩展.一定体积分数的贝氏体对钢材的性能改善,起着积极作用.同时,铁素体是软相组织,其强度硬度较低,在铁素体片条与裂纹尖端扩展相遇时,会产生较大塑性变形,片条越细,消耗的能量越大,从而更加有效地减弱裂纹尖端的局部应力集中,提升钢材韧性^[10-11].

钒与其他微合金铌、钛及钒相比,V(C,N)具有高溶解性,无论是轧制或是锻制的正常加热温度下均能溶解,相比溶解能力较低的 TiN,铌碳氮化物等,能够起到更好的析出强化效果.V(C,N)

粒子高温析出扎钉晶界阻碍了奥氏体晶粒的再结晶长大,同时析出粒子也可以作为铁素体形核的核心,数量众多弥散分布的析出粒子将有效地促进铁素体的形成,使最终得到的铁素体晶粒得到细化,从而显著提高钢的强韧性.

3 结 论

1) 热轧低碳钒钢的显微组织为针状铁素体、准多边形铁素体和粒状贝氏体及少量三角状 M/A 岛组成,析出的细小 V(C,N) 粒子呈不规则的椭球状于铁素体基体内部较均匀弥散地分布着.

2) 试验钢的屈服和抗拉强度分别为 618,701 MPa,断后延伸率19%,冷弯性能合格, (下转第 394 页)