

钒对高强度汽车大梁钢组织细化的影响

李永亮¹⁾, 王福明^{1)✉}, 李长荣²⁾, 杨占兵¹⁾, 何煜天¹⁾, 郑亚旭¹⁾

1) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083 2) 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: wangfuming@metall.ustb.edu.cn

摘 要 利用 Gleeble-3500 热模拟试验机、扫描电镜、透射电镜、电子背散射衍射技术等手段研究 V 对 700 MPa 级高强度汽车大梁钢组织细化的影响。在冷却速度 $2 \sim 7^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 显微组织为针状铁素体 + 粒状贝氏体组织。V 添加提高粒状贝氏体体积分数, 细化粒状贝氏体组织, 并明显降低粒状贝氏体中 M/A 岛的尺寸。与无 V 钢相比, 含 V 钢中大角度晶界比例提高 18.2%, 对提高钢的韧性有利。由于 C 含量过低, 在实验钢中未观察到单独的 VC 析出, 由此推测 V 主要固溶在基体中, 以合金化方式促进钢的贝氏体相变, 使组织得到有效细化。

关键词 高强度钢; 钒; 显微组织; 晶体学取向; 大角度晶界

分类号 TG142.1

Influence of vanadium on the microstructure refinement of high strength automobile beam steel

LI Yong-liang¹⁾, WANG Fu-ming^{1)✉}, LI Chang-rong²⁾, YANG Zhan-bing¹⁾, HE Yu-tian¹⁾, ZHENG Ya-xu¹⁾

1) School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: wangfuming@metall.ustb.edu.cn

ABSTRACT The effects of vanadium on the microstructure refinement of automobile beam steel with a yield strength of 700 MPa were investigated by Gleeble-3500 Thermo Simulator, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy and electron back-scattered diffraction. The results show that a mixture structure of acicular ferrite and granular bainite can be obtained in a cooling rate range of 2 to $7^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$. It is recognized that the volume fraction of granular bainite increases and the microstructure can be refined by adding vanadium. After the addition of vanadium, the size of M/A islands decreases obviously. Compared to the V-free steel, high angle grain boundaries in the V-bearing steel increases by 18.2%, indicating a potential improvement in toughness. No VC precipitation is observed in the tested steel due to low carbon content, so it can be deduced that V in the solid solution can promote the bainite transformation and refine the microstructure.

KEY WORDS high strength steel; vanadium; microstructure; crystal orientation; high angle grain boundaries

传统汽车大梁钢为铁素体 + 珠光体组织, 虽然具有较好的韧和塑性, 但强度提升的空间有限, 无法满足车体减重对强度和韧性的进一步要求^[1-4]。研究指出针状铁素体 (acicular ferrite, AF) 形成温度略高于上贝氏体, 属于切变和扩散混合型相变机制, 主要由高密度

位错的铁素体组成; 粒状贝氏体 (granular bainite, GB) 为块状铁素体或条状铁素体基体上分布着的 M/A 岛组成^[5-8]。AF 和 GB 按照一定的比例组成, 能有效提高钢的强韧性匹配, 是高强度发展的方向^[9]。该组织现多用于 X80 级别管线钢方面^[10-11], 在汽车大梁用钢

中应用还少有报导. 通过 Nb 和 B 复合添加,可以使大梁钢过冷奥氏体在连续冷却条件下获得 AF + GB 的混合组织^[12-13]. 随着高纬度、极寒地区的开发,结构钢在极端环境中应用越来越广泛^[14]. 合金元素、组织细化和第二相粒子析出对高强度贝氏体钢的低温韧性的影响应该受到特别的关注. GB 和 M/A 岛的增加可以提高钢的强度,但是组织粗大和 M/A 岛的粗化将恶化钢的低温韧性^[15-16]. 因此,细化组织和降低 M/A 岛尺寸,是改善含粒状贝氏体钢的强度和韧性的前提条件. 组织细化使钢中大角度晶界比例增多,作为有效晶粒,大角度晶界能阻碍微裂纹扩展,提高钢的韧性^[17]. 通过对比粒状贝氏体组织、M/A 岛尺寸及大、小角晶界分布状况,可以对钢的性能进行比较.

当前对 V 的研究除了其沉淀硬化效果外,还涉及到对相变的影响^[18-22]. V 在低碳钢中的研究重点是其析出强化作用,而其对低碳微合金钢中粒状贝氏体显微组织细化以及 M/A 岛细化的机理还需进一步分析. 本文重点对以上问题进行研究,并对相关的机理进行探讨.

表 1 实验材料的化学成分(质量分数)
Table 1 Composition of the experimental steels

钢种	C	Si	Mn	Cr	N	B	Nb	Ti	Ni	V
No. 1	0.09	0.33	1.58	0.12	0.0017	0.0020	0.04	0.04	0.33	0
No. 2	0.09	0.33	1.57	0.12	0.0012	0.0015	0.04	0.04	0.33	0.08

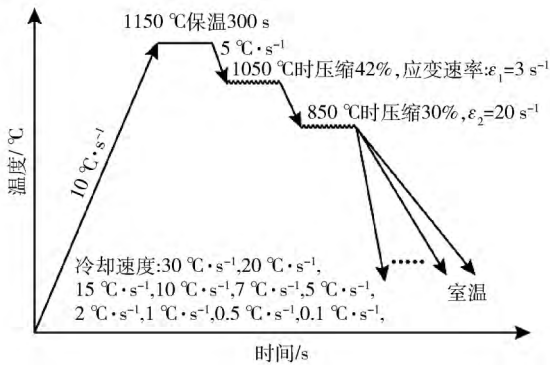


图 1 热模拟工艺路线

Fig. 1 Schematic illustration of thermo mechanical simulation process

2 实验结果与分析

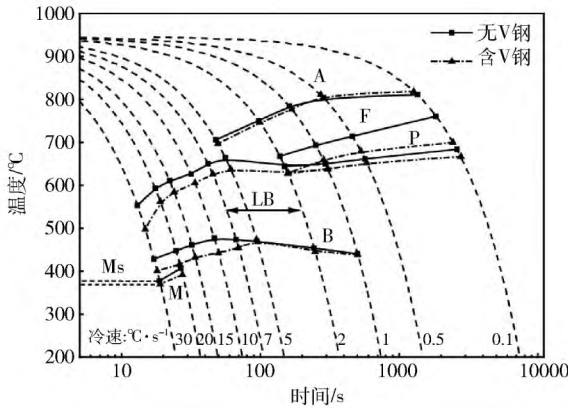
2.1 过冷奥氏体连续冷却转变曲线

为了探讨 V 对钢相变行为的影响,用切线法测量热膨胀曲线上相变的临界开始和终了温度,利用 Origin 9 绘图软件,绘制无 V 钢和含 V 钢的动态连续冷却转变曲线(dynamic continue cooling transformation curve, dynamic CCT curve),并结合金相分析和显微硬度分析对 CCT 曲线的相变区间进行了核对,结果如图 2 所

1 实验材料及方法

实验钢化学成分检验结果如表 1 所示. 将实验钢加工成热模拟压缩试样,用 Gleeble-3500 热模拟试验机进行双道次压缩试验,工艺流程如图 1 所示. 为了使钢中碳化物充分溶解,将试样加热至 1150 °C 保温 5 min 后进行压缩;结合实际生产中大梁钢板的轧制工艺参数,设计本次热模拟的形变参数. 由于钢中加入了痕量 B 元素,使得在相对较低的冷速即可获得贝氏体和马氏体组织,因此选取形变后冷速范围为 0.1 ~ 30 °C · s⁻¹. 利用光学显微镜、JSM-6701F 场发射扫描电镜和 TecnaiF30 透射电镜对试样的显微组织形貌进行观察. 将压缩后的试样垂直压缩方向切开,经机械抛光制备金相试样,光学显微镜和扫描电镜金相用 4% 硝酸乙醇溶液腐蚀,电子背散射衍射试样经抛光后,在常温下用 5% 高氯酸乙醇溶液进行电解腐蚀,透射电镜试样经机械减薄后在 -20 °C 用 10% 高氯酸乙醇溶液进行“双喷”减薄. 利用 ImageJ 对金相组织中粒状贝氏体尺寸分布、M/A 尺寸进行测量和统计.

示. 可以看出,在 0.1 ~ 30 °C · s⁻¹ 范围内, CCT 曲线形状相似,分为四个相变区:铁素体相变区、珠光体相变区、贝氏体相变区和马氏体相变区. 当冷速低于 2 °C · s⁻¹ 时,主要发生铁素体 + 珠光体转变;冷速介于 2 ~ 7 °C · s⁻¹ 时能够得到铁素体和贝氏体混合组织;当冷速大于 7 °C · s⁻¹ 时,钢中主要发生贝氏体转变;进一步提高冷速到 20 °C · s⁻¹ 时,开始有马氏体相变发生. V 的



A—奥氏体; F—铁素体; P—珠光体; B—贝氏体; M—马氏体

图 2 无 V 钢和含 V 钢的动态 CCT 曲线对比

Fig. 2 Comparison between the dynamic CCT curves of the V-free and V-bearing steel

添加抑制了过冷奥氏体向珠光体的转变,尤其是在较低的冷速下,珠光体相变区间明显变小,使铁素体相变区间增大.在中等冷速下,V降低了铁素体、贝氏体相变的临界开始温度.从整体上看,V的添加使CCT曲线向右移动.

2.2 显微组织分析

图3和图4是部分光学显微镜照片.当冷速为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,V的添加使钢中珠光体明显减少,珠光体球团和铁素体晶粒明显变细;两种钢在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,均可得到粒状贝氏体、针状铁素体和少量伪晶界铁素体的混合组织.对比图3(b)和图4(b)可以发现,微合金V的添加对AF+GB组织细化效果明显,且含V钢

中粒状贝氏体数量明显增多,针状铁素体尺寸也有所降低.结合实验钢的连续冷却转变曲线可知,在冷速为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,V的添加使过冷奥氏体向粒状贝氏体转变的临界开始温度(GB_s)降低了 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,转变温度降低,使粒状贝氏体转变的驱动力增大,促进了粒状贝氏体的形核^[23].由于钢中C含量较低,且Ti和Nb的加入消耗了一定量的C,导致V析出的热力学和动力学条件不足.此外,实验钢中Mn质量分数接近 1.6% ,Mn使大部分的V仍以固溶态存在,从而对过冷奥氏体起到了稳定作用,使粒状贝氏体的转变温度降低.但是受放大倍数影响,光学显微镜观察不能对粒状贝氏体的体积分数和细化程度做定量分析.

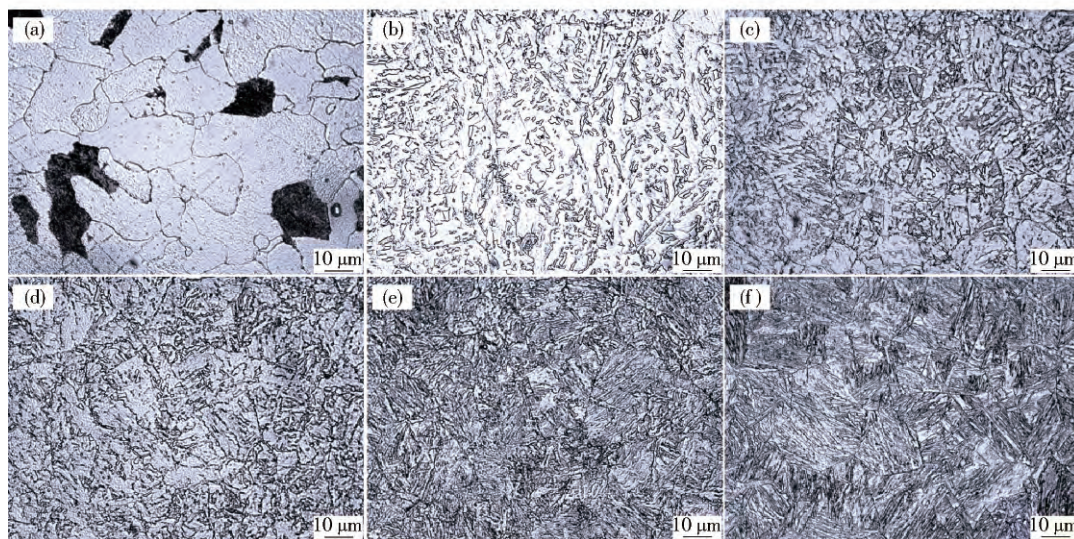


图3 不同冷速时 No.1 钢在光学显微镜下的显微组织. (a) $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (e) $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (f) $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig.3 Microstructures of Steel No.1 at different cooling rates observed by optical microscopy: (a) $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (e) $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (f) $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$

当冷速提高至 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, No.1 钢以粒状贝氏体组织为主,针状铁素体数量开始明显减少,并有少量的板条状贝氏体出现;含V的No.2钢中显微组织开始以板条状贝氏体为主,并伴有少量的粒状贝氏体和针状铁素体组织.分析认为,固溶态的V可以提高钢的淬透性,是导致No.2钢在该冷速下板条状贝氏体大量出现的主要原因.进一步提高冷速至 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上时,钢中开始出现马氏体组织,此时No.1钢和No.2钢的显微组织基本上均以板条状贝氏体和块状低碳马氏体为主,但添加V的No.2钢中显微组织更加细小,贝氏体板条束和马氏体块尺寸相对细小.

图5是 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 时实验钢的扫描电镜照片.可以看到岛状组织分布在铁素体基体上.经统计, No.1 钢和No.2钢中岛状组织的体积分数分别为 14% 和 19% ,含V钢中岛状组织的体积分数增加 5% .从图5(c)的统计结果可知,V的添加使大于 $8\text{ }\mu\text{m}$ 的岛

状组织所占的百分比下降明显,说明V的添加不仅可以促进岛状组织的生成,而且使其尺寸更加细小和均匀.分析认为,V溶于C含量较高的残余奥氏体中并延缓其分解,使残余奥氏体在更低温度下形成较多的岛状组织^[19-24].从图2可以看出,V主要对贝氏体相变的影响比较明显,因此本文重点讨论V对粒状贝氏体的影响,而V对针状铁素体相变影响将另外做讨论.

图6是实验钢在冷速 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的透射电镜照片.从图6(a)可以看出,针状铁素体上分布着大量的位错,边界位错密度明显高于心部,这符合针状铁素体由位错移动形核形成的理论.图6(b)为岛状组织的精细结构,岛状组织主要由块状结构上分布的M/A岛组成,块状结构本身是具有高密度位错的铁素体,而M/A岛则主要由小于 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的残余奥氏体组成,由此可以判定图5中的岛状组织属与被铁素体分割后的残余奥氏体经二次相变形成的粒状贝氏体组织.图6(c)

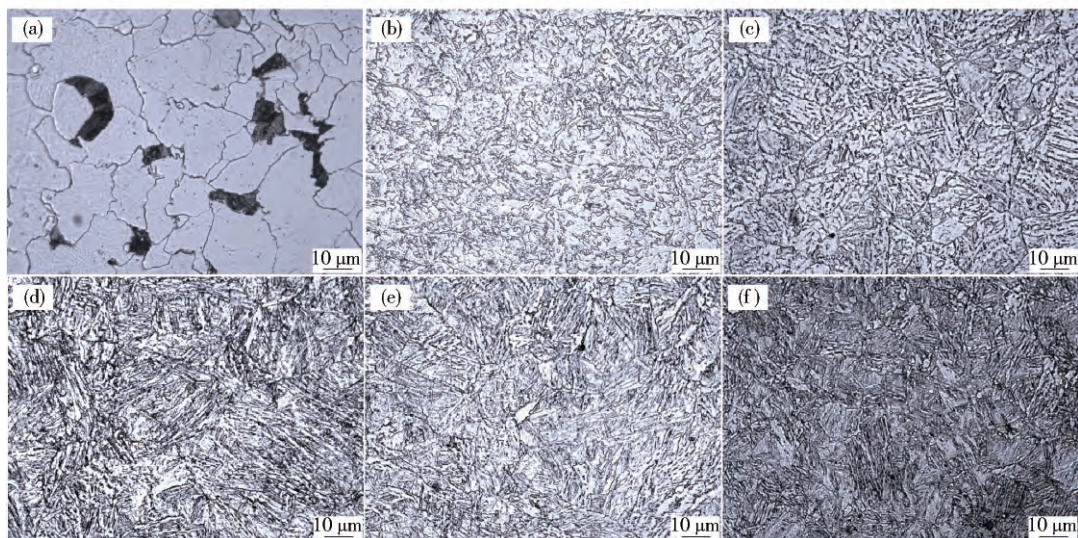


图4 不同冷速时 No. 2 钢在光学显微镜下的显微组织. (a) $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (e) $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (f) $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 4 Microstructures of Steel No. 2 at different cooling rates observed by optical microscopy: (a) $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (e) $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; (f) $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$

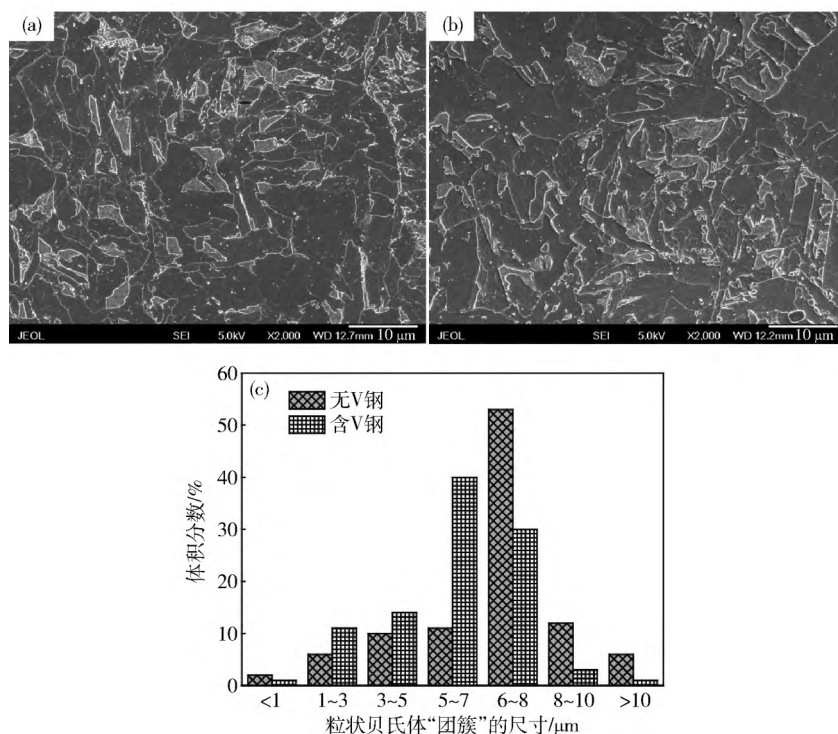


图5 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 时实验钢 No. 1 (a) 和 No. 2 (b) 的扫描电镜照片以及岛状组织尺寸统计分布(c)

Fig. 5 Microstructures of Steel No. 1 (a) and Steel No. 2 (b) observed by SEM at $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ and statistical size distribution of islands in granular bainite (c)

和(d)为实验钢中M/A岛的透射电镜照片. V的添加使M/A岛尺寸降低. 柴锋等^[16]认为粒状贝氏体中大于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的M/A岛使钢的低温冲击韧性恶化,而V的添加在提高粒状贝氏体体积分数同时细化了M/A岛,对提高钢的强度和韧性均有一定作用. 透射电镜并未观察到单独的VC析出,说明V的沉淀析出量较少,由

此可知在实验钢中V以固溶态对贝氏体相变产生促进作用.

2.3 背散射电子衍射观察

实验钢在冷速为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的晶体取向成相图和、小角晶界分布如图7和图8所示. 黑色实线代表大于 15° 的大角度晶界. 可以看出,粒状贝氏体之间为大

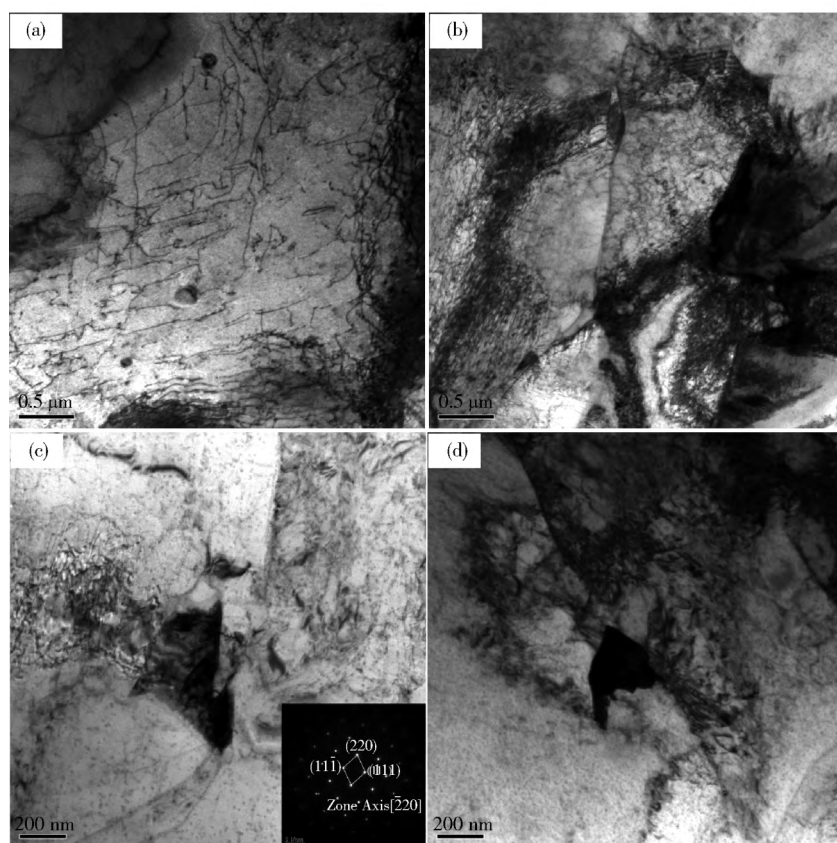


图6 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 时实验钢的透射电镜照片. (a) 针状铁素体; (b) 粒状贝氏体; (c) No.1 钢中 M/A 岛; (d) No.2 钢中 M/A 岛

Fig. 6 Microstructures of samples at $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ observed by TEM: (a) acicular ferrite; (b) granular bainite; (c) M/A island in Steel No. 1; (d) M/A island in Steel No. 2

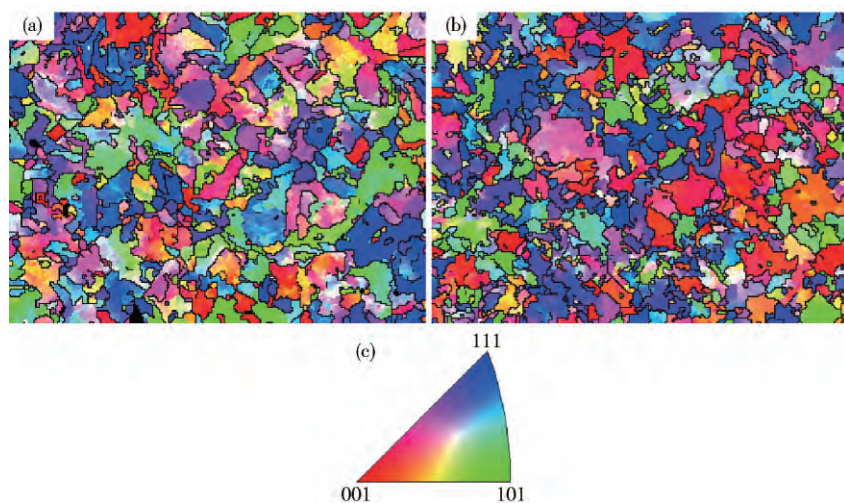


图7 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 时实验钢的电子背散射衍射观察结果. (a) No.1 钢; (b) No.2 钢; (c) 反极图

Fig. 7 Microstructural details of samples at $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ obtained by EBSD: (a) Steel No. 1; (b) Steel No. 2; (c) inverse pole figure

角度晶界. 在该冷速下,含 V 钢的粒状贝氏体组织得到了明显的细化,大角度晶界体积分数增大.

经统计, No.1 钢大角度晶界密度为 16.7%, 添加 V 以后大角度晶界增加到 32%. 缪成亮等^[25]认为,粒状贝氏体“团簇”起着大角晶界的作用,由于 V 的添加

使粒状贝氏体增多,这是导致大角晶界密度提高的原因之一;此外,显微组织的细化,使钢的有效晶粒增多也是大角度晶界增多的原因. 经显微硬度测试,含 V 钢硬度提高 15 HV, 根据 GB/T 1172—1999《黑色金属硬度及强度换算值》换算,含 V 钢的强度提高 45 MPa,

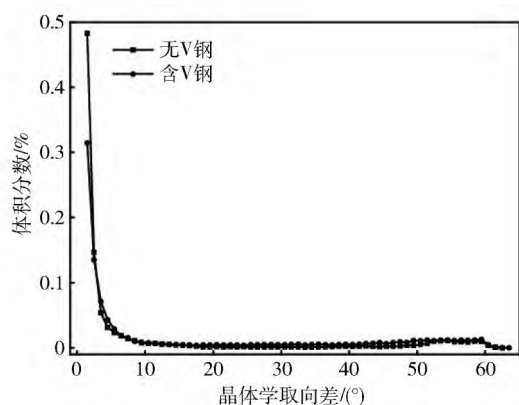


图8 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 下V元素对实验钢晶体学取向分布的影响

Fig. 8 Effect of V on the misorientation angle distributions at a cooling rate of $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$

强化效果明显。

3 结论

在冷速 $2\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围内,实验钢可以得到以针状铁素体+粒状贝氏体为主的显微组织。V的添加促进粒状贝氏体转变,细化粒状贝氏体组织,并能有效降低M/A岛尺寸。当冷速为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,含V钢的粒状贝氏体体积分数提高5%,维氏硬度比无V钢高出15HV,预测抗拉强度提高45MPa,说明V的添加可有效提高钢的强度。同时,V的添加使钢的大角晶界比例也提高18.2%,大角度晶界比例的增加与粒状贝氏体团的增加和组织的细化有关。添加0.08%的V对钢硬度和强度的影响,主要来自固溶态V对粒状贝氏体相变的促进作用和显微组织的细化。

参 考 文 献

- [1] Zhao Z Z, Liu J, Zhao A M, et al. Analysis of microstructure characteristics and precipitation behavior of automobile beam steels produced by compact strip production. *J Iron Steel Res Int*, 2010, 17(3): 56
- [2] Zhao Z Z, Kang Y L, Yu H. Microstructure and mechanical properties of automobile beam steels produced by EAF-CSP process. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2006, 13(6): 508
- [3] Yu H, Kang Y L, Zhao Z Z, et al. Study of microstructure and cementite in automobile beam steels produced by compact strip production with flexible technologies. *Mater Sci Eng A*, 2005, 408(1-2): 47
- [4] Guan M F, Yu H. Fatigue crack growth behaviors in hot-rolled low carbon steels: a comparison between ferrite-pearlite and ferrite-bainite microstructures. *Mater Sci Eng A*, 2013, 559: 875
- [5] Fang H S, Yang J B, Yang Z G, et al. The mechanism of bainite transformation in steels. *Scripta Mater*, 2002, 47(3): 157
- [6] Yang Z G, Fang H S. An overview on bainite formation in steels. *Curr Opin Solid State Mater Sci*, 2005, 9(6): 277
- [7] Fang H S, Feng C, Zheng Y K, et al. Creation of air-cooled Mn series bainitic steels. *J Iron Steel Research Int*, 2008, 15(6): 1
- [8] Madariaga I, Gutierrez I, García de Andrés C, et al. Acicular ferrite formation in a medium carbon steel with a two stage continuous cooling. *Scripta Mater*, 1999, 41(41): 229
- [9] Avishan B, Yazdani S, Nedjad S H. Toughness variations in nanostructured bainitic steels. *Mater Sci Eng A*, 2012, 548: 106
- [10] Xia D X, Wang X L, Li X C, et al. Properties and microstructure of third generation X90 pipeline steel. *Acta Metall Sin*, 2013, 49(3): 271
(夏佃秀,王学林,李秀程,等. X90 级别第三代管线钢的力学性能与组织特征. 金属学报, 2013, 49(3): 271)
- [11] He X L, Shang C J, Yang S W, et al. *High-performance Low-carbon Bainitic Steels*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008
(贺信莱,尚成嘉,杨善武,等. 高性能低碳贝氏体钢. 北京: 冶金工业出版社, 2008)
- [12] Zhang Z H, Xue X X. Bainite transformation of low-carbon and boron-containing steel under continuous cooling. *J Iron Steel Res Int*, 2014, 21(3): 359
- [13] Terzic A, Calcagnotto M, Guk S, et al. Influence of boron on transformation behavior during continuous cooling of low alloyed steels. *Mater Sci Eng A*, 2013, 584: 32
- [14] Wang T S, Yang J, Shang C J, et al. Microstructures and impact toughness of low-alloy high-carbon steel austempered at low temperature. *Scripta Mater*, 2009, 61(4): 434
- [15] Feng C, Fang H S, Bai B Z, et al. Phase transformation and strength-toughness of a F_{GBA}/B_G diphasic steel containing 0.02% Nb. *Acta Metall Sin*, 2010, 46(4): 473
(冯春,方鸿生,白秉哲,等. 0.02% Nb 空冷仿晶界型铁素体/粒状贝氏体复相钢的相变及强韧性. 金属学报, 2010, 46(4): 473)
- [16] Chai F, Yang C F, Zhang Y Q, et al. Effect of granular bainite on impact toughness of CGHAZ of ultra-low carbon copper-bearing age-hardening steel. *J Iron Steel Res*, 2005, 17(1): 42
(柴锋,杨才福,张永权,等. 粒状贝氏体对超低碳含铜时效钢粗晶热影响区冲击韧性的影响. 钢铁研究学报, 2005, 17(1): 42)
- [17] Wei C H, Zhang J, Yang S L, et al. Microstructures and mechanical properties for laser tailor welded blanks of DP590 and low carbon steels. *Rare Met Mater Eng*, 2013, 42(Suppl 2): 68
- [18] Zhang S H, Hattori N, Enomoto M, et al. Ferrite nucleation at ceramic/austenite interfaces. *ISIJ Int*, 1996, 36(10): 1301
- [19] Li W T, Li Z C, Bai B Z. Effect of V on strength and toughness of low alloyed air-cooled MnSiCr bainite/martensite multiphase steels. *At Energy Sci Technol*, 2010, 44(Suppl 1): 359
(李文韬,李正操,白秉哲. V 对低合金 MnSiCr 空冷贝氏体/马氏体复相钢强韧性的影响. 原子能科学技术, 2010, 44(增刊1): 359)
- [20] Pandit A, Murugaiyan A, Podder A S, et al. Strain induced precipitation of complex carbonitrides in Nb-V and Ti-V microalloyed steels. *Scripta Mater*, 2005, 53(11): 1309
- [21] Shanmugam S, Tanniru M, Misra R D K, et al. Microalloyed V-Nb-Ti and V steels: Part 2. Precipitation behaviour during processing of structural beams. *Mater Sci Technol*, 2005, 21(2): 165
- [22] Cheng H J, Wang F M, Pan Z B, et al. Continuous cooling

- transformation of Nb-V microalloyed medium carbon non-quenched and tempered steels. *Trans Mater Heat Treat*, 2009, 30(5): 44
(程慧静, 王福明, 潘钊彬, 等. Nb-V 复合微合金化中碳非调质钢的连续冷却转变. 材料热处理学报, 2009, 30(5): 44)
- [23] Wang F M, Li J H. Analysis on morphology of granular bainite. *Trans Met Heat Treat*, 1991, 12(3): 23
(王福明, 李景慧. 粒状贝氏体的形貌分析. 金属热处理学报, 1991, 12(3): 23)
- [24] Li Y, Yang Z M. The effects of V on phase transformation of high carbon steel during continuous cooling. *Acta Metall Sin*, 2010, 46(12): 1501
(李翼, 杨忠民. V 对高碳钢连续冷却转变时组织转变的影响. 金属学报, 2010, 46(12): 1501)
- [25] Miu C L, Shang C J, Subramanian M. Effect of ausforming and cooling rate on the distribution of high angle boundaries in low carbon bainitic structure. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2012, 34(3): 289
(缪成亮, 尚成嘉, Subramanian M. 奥氏体变形及冷却速率对低碳贝氏体组织中大角晶界分布的影响. 北京科技大学报, 2012, 34(3): 289)