

## 热变形对 0.05C-0.13Nb 钢组织和显微硬度的影响

阴树标<sup>1,2</sup> 刘清友<sup>2</sup> 张志波<sup>2</sup> 孙新军<sup>2</sup> 雷霆<sup>1</sup>

(1 昆明理工大学材料与冶金工程学院,昆明 630091; 2 钢铁研究总院结构材料研究所,北京 100081)

**摘要** 用 Thermecomastor-Z 热模拟试验机,研究了 0.05C-0.13Nb 钢单道次 1 000 °C、2 s<sup>-1</sup> 变形 40% 和双道次 1 000 °C、2 s<sup>-1</sup> 变形 40% + 980 °C + 5 s<sup>-1</sup> 变形 40% 后冷却速度、变形量、原始奥氏体晶粒度和应变速率对组织和显微硬度(HV)的影响。结果表明,冷却速度增加,钢中粒状贝氏体逐渐增多,冷却速度达 5 °C/s 时,贝氏体含量达 93%,HV 值显著增加;当冷却速度超过 5 °C/s 时,贝氏体岛状组织形貌改变,HV 值增加较小;随原始奥氏体晶粒尺寸减小和变形量增大,HV 值减小,应变速率对 HV 值无显著影响。

**关键词** 0.05-0.13Nb 钢 热变形 组织 HV 值

## Effect of Hot Deformation on Structure and Microhardness of 0.05C-0.13Nb Steel

Yin Shubiao<sup>1,2</sup>, Liu Qingyou<sup>2</sup>, Zhang Zhibo<sup>2</sup>, Sun Xinjun<sup>2</sup> and Lei Ting<sup>1</sup>

(1 School of Material and Metallurgy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 630091; 2 Institute for Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** The effect of cooling rate, reduction, original austenite grain size and strain rate of 0.05C-0.13Nb steel after single pass-reduction 40% with 2 s<sup>-1</sup> at 1 000 °C or two pass-reduction 40% with 2 s<sup>-1</sup> at 1 000 °C + reduction 40% with 5 s<sup>-1</sup> at 980 °C on structure and microhardness HV has been studied by Thermecomastor-Z thermal simulation test machine. Results indicated that with increasing cooling rate the granular bainite gradually increased, of which the content was up to 93% as cooling rate was to 5 °C/s, and the HV value obviously increased, while cooling rate was more than 5 °C/s the morphology of bainite island structure was changed and the HV value increased little; with decreasing original austenite grain size and increasing reduction the HV value decreased; but the effect of strain rate on HV value was not appreciable.

**Material Index** 0.05C-0.13Nb Steel, Hot Deformation, Structure, HV Value

关于含铌低碳微合金钢的相变研究,许多学者的研究工作主要集中在铌含量在 0.05% 左右,碳含量也偏高,同时相变后显微硬度与热变形参数之间关系没有详细系统的论述。随着近些年 HTP(High Temperature Press)技术的迅速发展,尤其最近我国西气东输二线 X80 管线用钢,对采用铌含量超过 0.05% 的低碳 HTP 轧制板卷成功进行了螺旋焊管试制<sup>[1,2]</sup>。试验选择含碳 0.05%、含铌 0.13% 钢种,通过不同热变形参数和控冷条件,得到相变后组织,结合金相组织观察,系统地测定了显微硬度变化规律,以期对 HTP 技术的应用提供数据支持。

### 1 试验材料及方案

试验用钢取自实验室真空感应炉冶炼所得,其化学成分为(%):0.05C、0.13Nb、1.44Mn、0.006N、0.002S、0.010P、0.18Si。在切割成 Thermecomastor-Z 试验机所用的 Φ8 mm × 12 mm 试样前,依据固溶度积公式计算,试样在 1 280 °C 固溶处理 1 h。

试验方案为:以 10 °C/s 升温到设定温度,保温 300 s,然后以 5 °C/s 降温至变形温度,再次保温 5 s,

采用不同参数热变形,随后以不同冷却速度冷却至 200 °C,观察相关的显微组织。利用 FM300 数字显微硬度计进行显微硬度值测定,试验所用的载荷为 0.1 kg,标注为 HV0.1。

### 2 试验结果及分析

#### 2.1 冷却速度对显微硬度的影响

在 Thermecomastor-Z 试验机上将试样升温到 1 350 °C,然后以 5 °C/s 降温至 1 000 °C,分别采用未变形、单道次 2 s<sup>-1</sup> 变形 40% (1 000 °C)、双道次 2 s<sup>-1</sup> 变形 40% (1 000 °C) + 5 s<sup>-1</sup> 变形 40% (980 °C),道次间隔时间为 10 s。测定 HV 值见图 1(a)。

由单道次变形 40% 数据分析,随着冷却速度的增加,HV 值随之增加,这是因为在较低的冷却速度下,相变的产物主要是高温转变的先共析铁素体和少量珠光体,因此硬度值较低。随着冷却速度增加,粒状贝氏体逐渐增多,达到 5 °C/s 冷速时,已经有 93% 的贝氏体组成,其 HV 值显著增加。冷速大于 5 °C/s 后,组织变化主要发生在贝氏体的岛状组织形貌上,因此 HV 随冷速变化不是很大。而 0.05C-

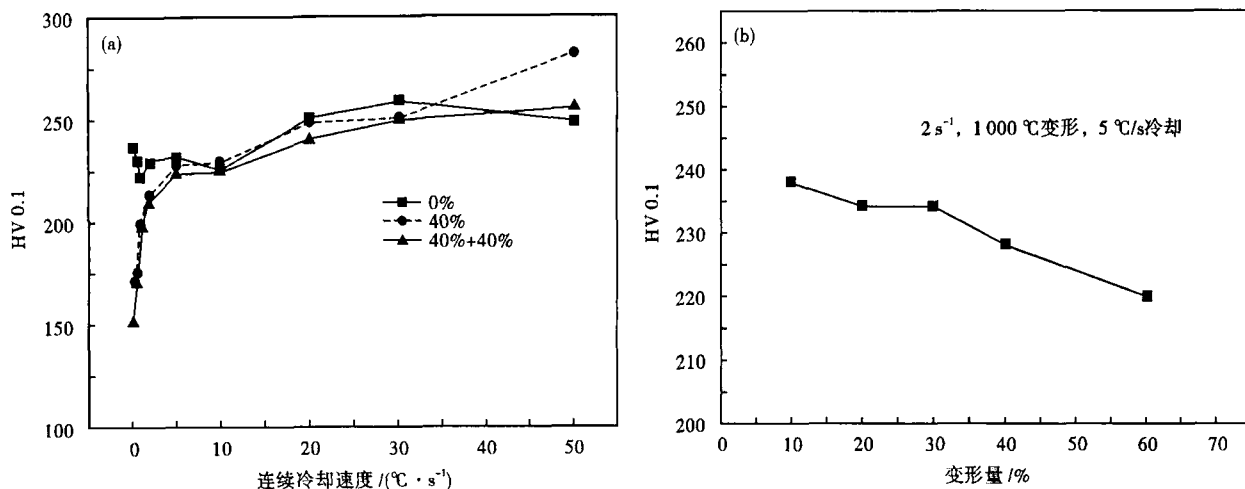


图 1 冷却速度(a)和变形量(b)对 0.05C-0.13Nb 钢 HV 值的影响  
Fig. 1 Effect of cooling rate (a) and reduction (b) on HV value of 0.05C-0.13Nb steel

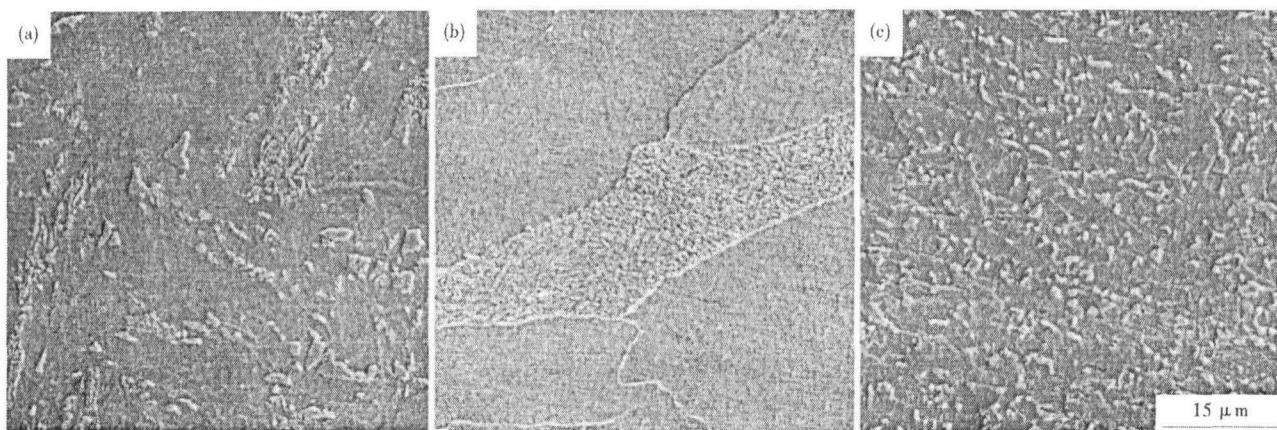


图 2 冷却速度对 0.05C-0.13Nb 钢显微组织的影响:(a)变形 0% ,0.1 °C/s;(b) 变形 40% ,0.1 °C/s;(c) 变形 40% +40% ,10 °C/s  
Fig. 2 Effect of cooling rate on structure of 0.05C-0.13Nb steel: (a) reduction 0% ,0.1 °C/s; (b) reduction 40% ,0.1 °C/s; (c) reduction 40% + 40% ,10 °C/s

0.13Nb 钢在未变形情况下,相变组织较为单一,主要由粒状贝氏体组成,只是较低冷速下,在晶界上有少量铁素体,晶内有部分离散珠光体形成,所以 HV 值变化不大。上述影响 HV 值变化的扫描组织如图 2 所示。

### 2.2 变形量对显微硬度的影响

由图 1(b) 所示, HV 值随着变形量增加而降低,变形量小于 30% 时, HV 值变化不是很显著,当变形量超过 30% 以后, HV 值随变形量增加明显下降。由图 3 观察,这种现象是由于先共析铁素体量随变形量增加而明显增加的原因;当变形量为 30%、40%、60% 时,先共析铁素体的量分别为 3.5%、7.0%、35%,由于铁素体比较软,因而 HV 值随着铁素体量的增加而降低。先共析铁素体量增加是因为变形增加了奥氏体内部的空位浓度、位错等晶体缺陷,引起非均匀形核点增多,导致奥氏体的稳定性降

低,促进了铁素体形核,增加了铁素体转变量。

### 2.3 原始奥氏体与应变速率对显微硬度的影响

原始奥氏体晶粒尺寸对 HV 值的影响见图 4(a)。伴随奥氏体晶粒尺寸下降, HV 值随之降低,但是当奥氏体晶粒比较大时, HV 值下降不明显,当晶粒尺寸小于 140 μm,即奥氏体化温度低于 1250 °C,显微硬度值显著下降。分析其原因主要有两方面:(1)晶粒粗大奥氏体比晶粒较为细小的奥氏体稳定性要强,不易变形诱导发生相变,而细晶粒稳定性差,易于变形诱导形成铁素体;(2)原始奥氏体晶粒细小组织是奥氏体化温度不够高的原因所致,当温度低于铌的全固溶温度时,依据固溶度积,钢中的部分铌不能溶解,将以析出物的形式存在,随着奥氏体化温度的降低,原始奥氏体晶粒尺寸逐渐减小,而析出物却逐渐增加,许多纳米级析出物为奥氏体向铁素体转变提供了更多的形核地点,有利于铁素体

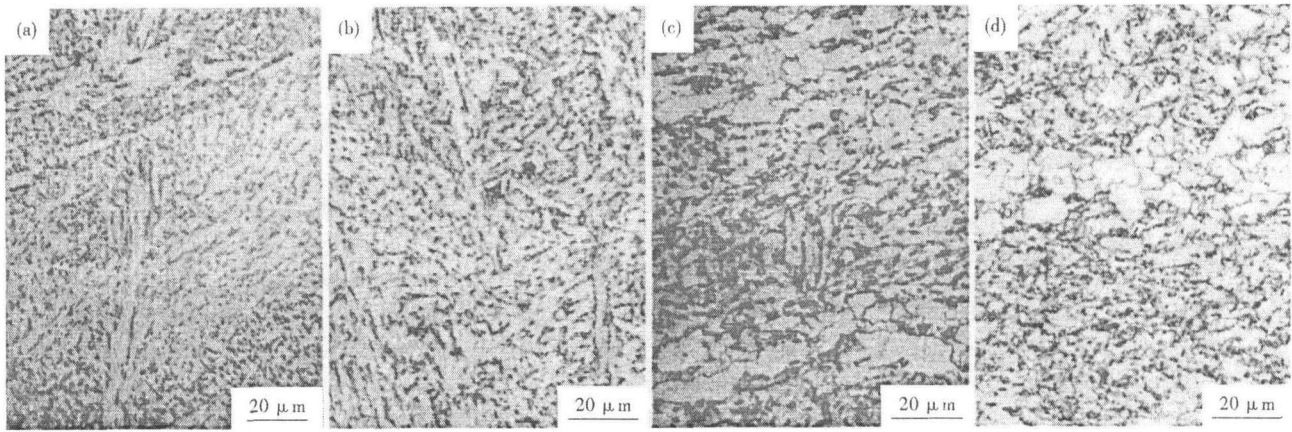


图3 变形量对0.05-0.13Nb钢显微组织的影响:(a) 0%;(b) 20%;(c) 30%;(d) 40%  
Fig.3 Effect of reduction on structure of 0.05-0.13Nb steel; (a) 0%; (b) 20%; (c) 30%; (d) 40%

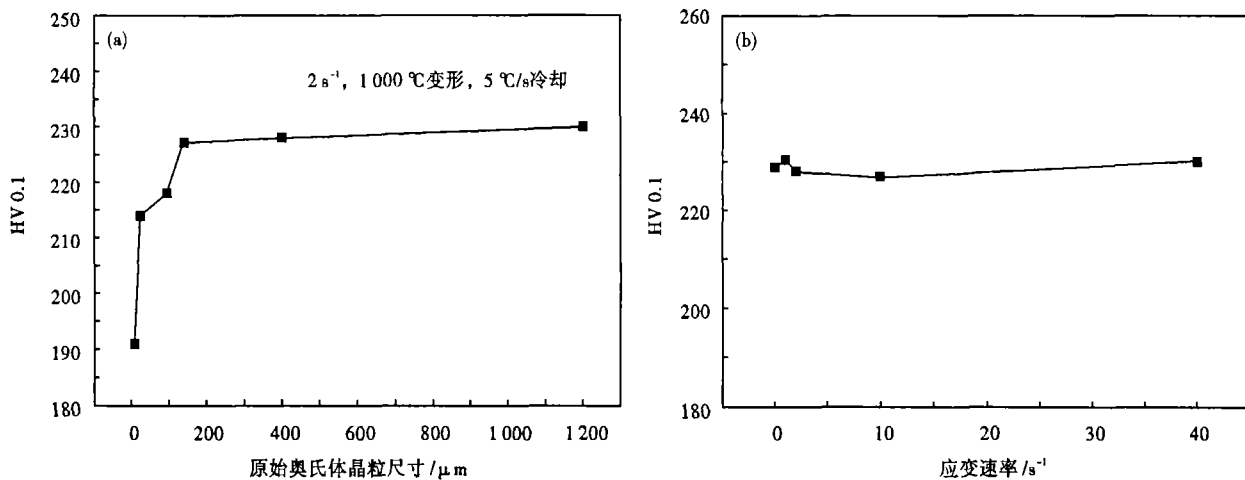


图4 原始奥氏体晶粒尺寸(a)和应变速率(b)对0.05-0.13Nb钢HV值的影响  
Fig.4 Effect of original austenite grain size (a) and strain rate (b) on HV value of 0.05C-0.13Nb steel

的形成,HV值也随着铁素体的量增加而降低。同时可得出在全固溶温度以上奥氏体化,原始奥氏体晶粒尺寸对HV值影响不大,尤其是奥氏体化温度越高,原始奥氏体晶粒尺寸越大,影响越不明显。在全固溶温度以上奥氏体化,采用不同冷却速度冷却,只有小于 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,显微硬度才有些差异<sup>[3]</sup>。

通过对3种钢种研究,张斌等人发现<sup>[4]</sup>,应变速率的变化对奥氏体相变过程没有明显影响,仅仅发现随着应变速率的升高,相变开始温度稍有升高。如图4(b)所示,针对0.05C-0.13Nb实验钢而言,在 $0.1\sim 40\text{ s}^{-1}$ 的变化范围内,HV的波动值只为3,说明了应变速率对相变组织的影响不大。

### 3 结论

(1)在变形情况下,显微硬度随冷却速度增加而增加,而在未变形时,显微硬度没有明显变化。

(2)铁素体量随着变形量的增加而增加,导致显微硬度随变形量的增加而降低。

(3)随着原始奥氏体晶粒度的降低,显微硬度值随之降低,但在全固溶温度以上奥氏体化,晶粒尺寸对其影响不大。

(4)应变速率对显微硬度没有显著影响。

973 国家重点基础研究基金资助项目(2004cb619101)

### 参考文献

- 1 郑磊,高珊,吴海凤. HTP工艺生产高强度管线钢的试验研究. 高温轧制工艺(HTP)国际研讨会暨技术讲座报告集,2006: 111
- 2 付俊岩. 钕·科学与技术. 北京:冶金工业出版社,2003
- 3 Yamamoto Sadahiro, Yokoyama Hiroyasu, Yamada Katsumi, et al. Effects of the Austenite Grain Size and Deformation in the Unrecrystallized Austenite Region on Bainite Transformation Behavior and Microstructure. ISIJ,1995,35(8):1020
- 4 张斌,张鸿冰. 形变条件对热变形过冷奥氏体形变的影响. 上海交通大学学报,2003,37(10):1522

阴树标(1977-),男,博士,含钕低碳微合金研究。

收稿日期:2007-07-09