

特约专栏

## 冷却速度和卷取温度对 Nb-V-Ti 复合微合金带钢铁素体中析出的影响

沙庆云, 李桂艳, 严平沅, 熬列格, 郝 森

(鞍钢股份有限公司技术中心, 辽宁 鞍山 114009)

**摘 要:** 采用一种工业生产的 Nb-V-Ti 复合微合金钢在 Gleeble 热模拟试验机上研究了精轧后冷却速度(1~30 °C/s)和卷取温度(650~550 °C)对铁素体中析出的影响。研究表明, 在 1~5 °C/s 的冷却速度下观察到了 10~20 nm 的相间析出。在 650 °C 和 600 °C 卷取时, 随着轧后冷却速度的增加, 10 nm 以下的一般析出数量增多而尺寸减小; 而在 550 °C 卷取时, 当冷却速度为 30 °C/s 时 10 nm 以下的析出数量急剧减少, 这可能与较慢析出动力学有关。在相同的轧后冷却速度下, 当卷取温度降低时, 一般析出的体积分数增加而尺寸减小, 这与析出的热力学驱动力增加有关。

**关键词:** 冷却速度; 卷取温度; 相间析出; 均匀析出

**中图分类号:** TG142.1<sup>+</sup>3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2011)12-0023-04

## Effect of Cooling Rate and Coiling Temperature on the Precipitates in Ferrite of Nb-V-Ti Microalloyed Complex Strip Steel

SHA Qingyun, LI Guiyan, YAN Pingyuan, AO Liege, HAO Sen  
(Technology Center, Anshan Steel CO. Ltd., Anshan 114009, China)

**Abstract:** The effect of cooling rate(1~30 °C/s) and coiling temperature(650~550 °C) on the fine precipitates in ferrite was studied on Gleeble thermo-mechanical simulator with a commercial Nb-V-Ti microalloyed complex strip steel. The results shown that an inter-phase precipitation of 10~20 nm was observed under condition of 1~5 °C/s cooling rate. The general precipitates under 10 nm increase in the number, but decrease in size during coiling at 650 °C and 600 °C with increasing cooling rate after hot rolling, and the number of precipitation less than 10 nm drastically reduce during coiling at 550 °C in 30 °C/s cooling rate, which may be related to the slow precipitation kinetics. In the same cooling rate after hot rolling, when the coiling temperature is lowered, the general precipitates increase in the volume fraction, but decrease in size, which may be related to the increased thermodynamic driving force.

**Key words:** cooling rate; coiling temperature; interphase precipitate; general precipitate

### 1 前 言

微合金化钢通过微合金化和控轧控冷技术的有机结合在达到较高强度同时还能保持良好的韧性。Nb, V 和 Ti 等微合金元素在奥氏体中的析出促进了晶粒细化, 在相变过程中或相变后的铁素体中析出产生了有效的析出强化。与奥氏体中析出的大量研究相比<sup>[1~3]</sup>, 铁素体中析出的研究相对较少。这与缺乏铁素体中微合金元素的溶度积资料和铁素体中析出的尺寸细小且分布不均匀导致 TEM 观察困难有关<sup>[4]</sup>。

大多数已发表的关于铁素体中析出论文的研究重点往往放在析出的形貌、尺寸、与铁素体的位向关系和成分等方面, 定性或定量研究铁素体中 NbC 析出仍然不完全<sup>[5]</sup>。例如, 关于轧制变形后的冷却速率和卷取温度对微合金钢铁素体中析出的影响仍然知道得不多, 尤其是关于 Nb-V-Ti 复合微合金化钢更是如此。本文在 Gleeble 3800 热模拟试验机上模拟研究了冷却速率和卷取温度对铁素体中析出的影响, 其结果还用光学显微镜和透射电子显微镜进行了分析。为便于研究, 本文主要分析尺寸小于 20 nm 的析出相粒子。

### 2 实 验

本文研究了一种工业生产的 Nb-V-Ti 复合微合金化钢铁素体中的析出。研究用钢的化学成分见表 1。

收稿日期: 2011-11-02

基金项目: 鞍钢股份有限公司资助项目

通信作者: 沙庆云, 男, 1967 年生, 教授级高工

表 1 研究用钢的化学成分 (w/%)

Table 1 The chemical composition of steel used in experiment (w/%)

C	Si	Mn	P	S	Als	Ca	N	Cu	Ni	Mo	Nb	Ti	V
0.038	0.172	1.613	0.014	0.001	0.036	0.002 7	0.002 4	0.26	0.155	0.234	0.074	0.016	0.031

热模拟试样从连铸坯上切取, 在 Gleeble 3800 上模拟 TMCP 过程。图 1 给出了热模拟工艺。Gleeble 3800 模拟试验机允许采用接近实际工业生产的较高的应变速率, 这样热模拟试验更接近实际热连轧过程, 而且较高的应变速率可以避免在奥氏体变形过程中出现应变诱导析出。沿热模拟试样纵向切开取金相样品, 经镶嵌、机械抛光和 4% Nital 腐蚀后观察组织。选择部分金相样品制作碳萃取复型在 Tecnai G<sup>2</sup> 20 透射电子显微镜下观察析出。

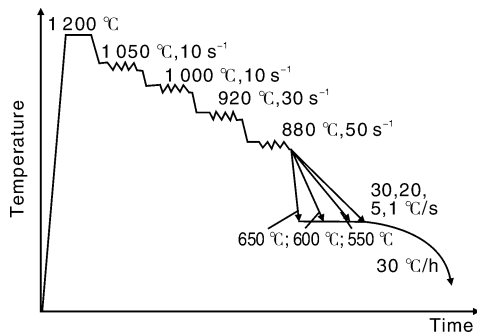


图 1 热模拟试验采用的工艺

Fig. 1 The TMCP schedule used in Gleeble 3800 thermo-mechanical simulator

### 3 结果和讨论

#### 3.1 铁素体中细小析出的特征

尺寸在 10 nm 以下出现在铁素体基体中的析出, 被称为均匀析出。在相变过程中相界上 10 ~ 20 nm 的析出被称为一般析出。

相间析出通常是相变期间在移动的相界面上形成, 大小为 10 ~ 20 nm, 如图 2a 和 2c (如黑箭头所示)。均匀析出通常分布在铁素体基体上, 尺寸一般在 10 nm 以下, 如图 2c 中的白箭头所示, 这 2 种析出通常被认为是析出强化的主要原因。图 2c 中给出的相间析出只有一个单层。这是由于与通过扩散机制形核和长大的多边形铁素体相比, 贝氏体铁素体 (见图 2d) 的形核和长大机制是无扩散的切变机制, 铁素体形核和长大速率非常快以至于相间析出没有更多的机会出现。单个的均匀析出尺寸如此之小以至于很难在薄膜样品中观察到它的选区衍射花样。对这种细小析出选区衍射花样进行分析得出的点阵常数结果表明, 它非常接近于 NbC<sup>[6]</sup>。

在 1 °C/s 和 5 °C/s 的冷却速率下观察到尺寸为 10 ~ 20 nm 的相间析出。由于样品在冷却到卷取温度前都经历了同样的热轧变形, 因此冷却速率不同将会导致冷

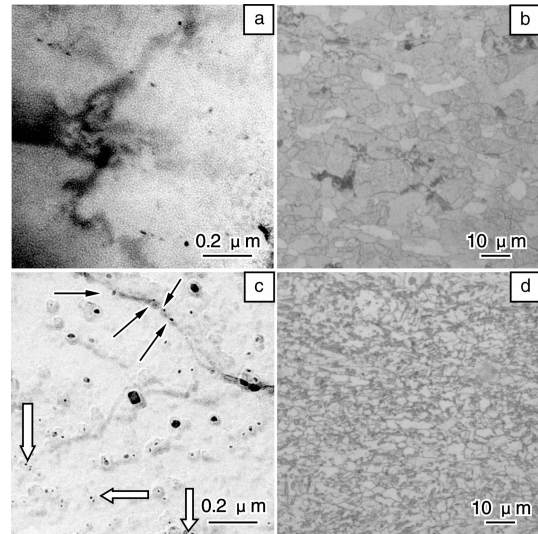


图 2 不同工艺条件下观察到的相间析出和均匀析出: (a) 和 (b) 冷却速率为 1 °C/s、卷取温度 650 °C, (c) 和 (d) 冷却速率为 5 °C/s、卷取温度 550 °C

Fig. 2 Interphase precipitates and general precipitates observed on different conditions: (a) and (b) cooling rate is 1 °C/s, coiling temperature is 650 °C, (c) and (d) cooling rate is 5 °C/s, coiling temperature is 550 °C observed on different conditions

却过程中不同的相变温度。较快的冷却速率将会产生较低相变温度, 结果是析出更加细小, 并且相变产生的位错密度更高。由于较低相变温度产生较大的相变驱动力, 使得相间析出跟不上  $\gamma/\alpha$  界面的快速移动。因此, 相间析出不可能出现在较快的冷却速率情况中。

#### 3.2 冷却速率的作用

图 3 给出了卷取温度为 600 °C 和 550 °C 时冷却速率对均匀析出的影响。在卷取温度为更高的 650 °C 和 600 °C 时, 轧后冷却速率对铁素体中细小析出的影响是相同的。当冷却速率增加时, 析出的尺寸减小而析出的体积分数增加, 如图 3a ~ 3d。当卷取温度为 550 °C 时, 1 ~ 20 °C/s 的轧后冷却速率对铁素体中析出的影响与卷取温度为 600 °C 时相同, 但在冷却速率为 30 °C/s 时, 很难看见铁素体基体中的均匀析出, 如图 3h 所示。在所有研究样品中, 卷取温度为 550 °C、冷却速率为 30 °C/s 的组织中针状铁素体比例最高, 位错密度也最高。这些高密度位错理应为铁素体中析出提供更多的形核位置, 本应形成更多的均匀析出, 但可能由于卷取温度低且轧后冷速快, 实际冷却过程不能满足扩散控制的析出动力学, 因此均匀析出很少。

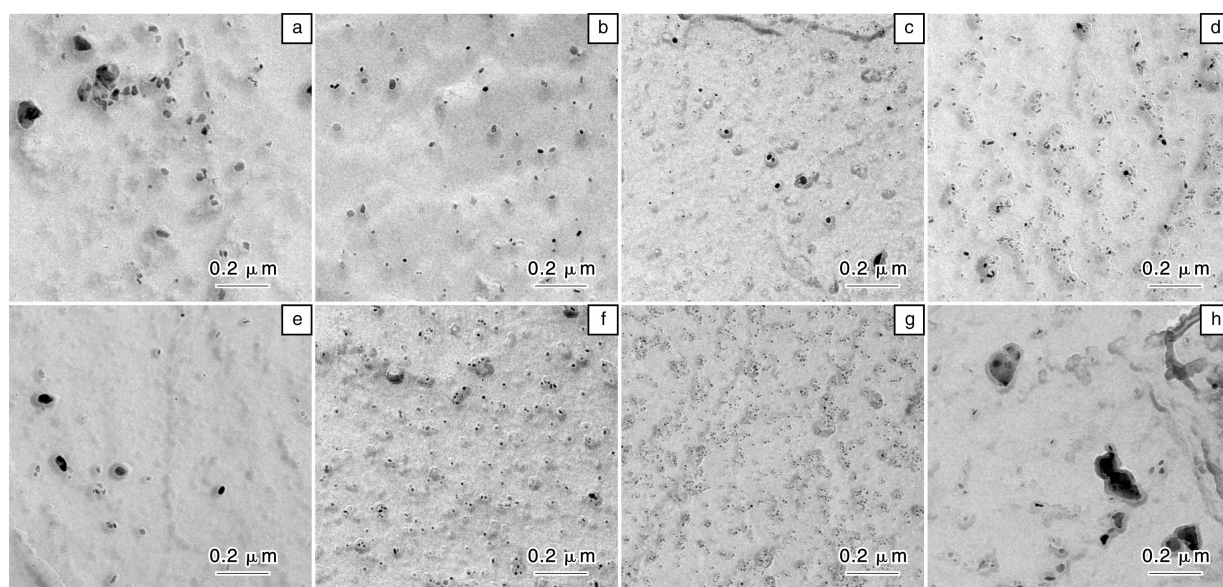


图 3 卷取温度为 600 °C (a~d) 和 550 °C (e~h) 时冷却速率对均匀析出的影响: (a) 和 (e) 1 °C/s, (b) 和 (f) 5 °C/s, (c) 和 (g) 20 °C/s, (d) 和 (h) 30 °C/s

Fig. 3 Effects of cooling rate on general precipitates at 600 °C/s (a~d) and 550 °C (e~h) coiling temperatures: (a) and (e) 1 °C/s, (b) and (f) 5 °C/s, (c) and (g) 20 °C/s, (d) and (h) 30 °C/s

卷取温度相同时, 轧后较慢的冷却速率意味着析出可以发生在较高的温度或持续较长的时间, 这样会促进已经发生的细小析出的长大和粗化。析出的热力学驱动力与 2 个相互关联的因素有关, 即过冷度 ( $\Delta T$ ) 和溶质的过饱和度<sup>[7]</sup>。较快的冷却速率将会导致更大的过冷度和微合金溶质更高的过饱和度, 因此析出出现的温度更低, 尺寸更细小。由于微合金化元素在铁素体中的溶解

度数据十分有限, 对上述现象的解释还需要将来做进一步的研究工作。

### 3.3 卷取温度的影响

图 4 给出了轧后冷却速率为 20 °C/s 时卷取温度 (650, 600 和 550 °C) 对铁素体中细小析出的影响。可以看出, 随着卷取温度的降低, 尺寸在 10 nm 以下的析出尺寸减小, 体积分数增加。

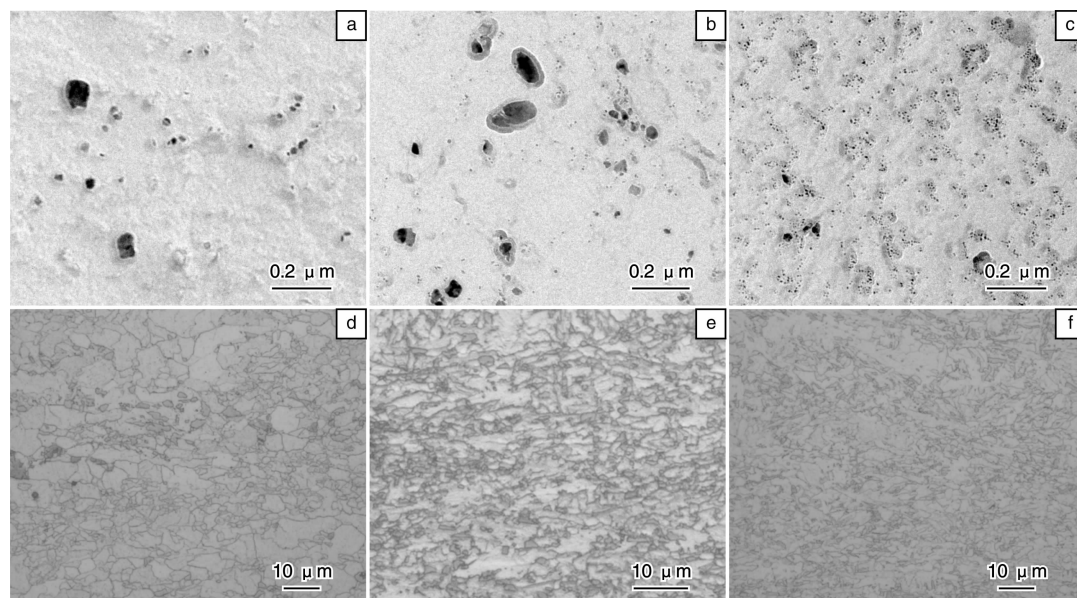


图 4 在冷却速率为 20 °C/s 时, 卷取温度对析出的影响: (a) 和 (b) 650 °C, (c) 和 (d) 600 °C, (e) 和 (f) 550 °C

Fig. 4 Effects of coiling temperatures on precipitates under cooling rate 20 °C/s: (a) and (b) 650 °C, (c) and (d) 600 °C, (e) and (f) 550 °C

如前所述,当卷取温度降低时,析出的过冷度增加,微合金溶质的过饱和度增加,这将增加析出的驱动力,因此析出的体积分数增加,而且由于温度较低因此析出的尺寸细小。卷取温度降低,还会产生位错密度较高的中温相变组织(如针状铁素体等),而且在基体上分布的高密度位错可以作为铁素体基体上均匀析出的形核的优先位置。因此,卷取温度降低时,较高的热力学驱动力和较多的形核位置促使出现了更多、更细小的析出。

Itman<sup>[8]</sup>认为在铁素体中出现的 10 nm 以下的细小析出是原先存在奥氏体中的析出的继续长大。本文的研究表明,同一种钢经过相同的轧制变形过程,在不同的冷却速率和卷取温度下出现的 10 nm 以下的均匀析出的尺寸和体积分数是不同的。这说明在铁素体中出现的小于 10 nm 的析出确实是在铁素体中出现的。

## 4 结 论

用 Gleeble 热模拟试验和 TEM 研究了冷却速率和卷取温度对工业生产的 Nb-V-Ti 微合金钢铁素体中细小析出的影响,研究结果表明:

(1) 本试验用钢在 650 °C 和 600 °C 的卷取温度,随着轧后冷却速率的增加,铁素体中均匀析出尺寸减小,体积分数增加。在 550 °C 的卷取温度,轧后冷却速度从 1 °C/s 增加到 20 °C/s 时,10 nm 以下的析出体积分数增加而尺寸减小,但冷却速度增加到 30 °C/s 时,10 nm 以下的析出的数量急剧减小。这可能与较低的卷取温度和较快的冷却速度下较慢的析出动力学有关。

(2) 在相同的轧后冷却速度下,当卷取温度降低时,10 nm 以下的析出的体积分数增加,尺寸减小,这与析出的热力学驱动力增加有关。

(3) 相间析出仅在较慢的轧后冷却速度下出现。如果轧后冷却速度较快,则过冷奥氏体的转变温度也降低,这使相变的驱动力增加,完成相变的时间缩短。因

此相间析出的速度跟不上相变时相界面的移动速度,相间析出被抑制。

(4) 不同轧后冷却速度和不同卷取温度时 10 nm 以下析出的不同状态表明,这些细小析出产生于铁素体中,这与认为铁素体中细小析出是原先奥氏体中析出在卷取温度下的继续长大的观点完全不同。

## 参考文献 References

- [1] Pereloma E V, Crawford B R, Hodgson P D. Strain-Induced Precipitation Behaviour in Hot Rolled Strip Steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 299: 27-37.
- [2] Sobral M D C, Mei P R, Kestenbach H J. Effect of Carbonitride Particles Formed in Austenite on the Strength of Microalloyed Steels [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 367: 317-321.
- [3] Hong S G, Kang K B, Park C G. Strain-Induced Precipitation of NbC in Nb and Nb-Ti Microalloyed HSLA Steels[J]. *Scripta Materialia*, 2002, 46(2): 63-168.
- [4] Kestenbach H J, Campos S S, Morales E V. Role of Interphase Precipitation in Microalloyed Hot Strip Steels[J]. *Materials Science and Technology*, 2006, 22(6): 615-626.
- [5] Perrard F, Deschamps A, Donnadieu P, et al. Characterization and Modelling on NbC Heterogeneous Precipitation in Ferrite[J]. *Material Science and Technology*, 2004(1): 31.
- [6] Akhlaghi S, Ivey D G. Precipitation Behaviour of a Grade 100 Structural Steel[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2002, 41(1): 111-119.
- [7] Michael T Nagata, John G Speer, David K Matlock. Titanium Nitride Precipitation in Thin-Slab Cast High-Strength Low-Alloy Steels[J]. *Metallurgical and Material Transaction A*, 2002, 33A(10): 3 099-3 110.
- [8] Itman A, Cardoso K R, Kestenbach H J. Quantitative Study of Carbonitride Precipitation in Niobium and Titanium Microalloyed Hot Strip Steel[J]. *Materials Science and Technology*, 1997, 13(1): 49-55.