

· 组织和性能 ·

## 10B21 合金冷镦钢连铸坯动态连续冷却转变曲线的测定和分析

马立国<sup>1</sup> 郭大勇<sup>1</sup> 王秉喜<sup>1</sup> 高航<sup>1</sup> 张博<sup>1</sup> 金泽宏<sup>2</sup>

(1 鞍钢集团钢铁研究院, 2 鞍钢股份公司市场营销中心, 鞍山 114009)

**摘要** 10B21 钢 280 mm × 380 mm 连铸坯(∕% : 0.19C, 0.05Si, 0.79Mn, 0.017P, 0.002S, 0.17Cr, 0.032Ti, 0.0020B, 0.025Als)的冶金工艺流程为 100 t BOF-LF-VD-CC。利用 Gleeble-3800 热模拟试验机,测定了 10B21 钢冷却速度 0.2 ~ 50 °C/s 的膨胀曲线,结合热膨胀法和金相-硬度法,获得了该钢的动态连续冷却转变(CCT)曲线。结果表明,在冷却速度 0.2 ~ 1 °C/s 时,该钢组织为铁素体(F)和珠光体(P);5 ~ 20 °C/s 可能是魏氏组织(W)形成的冷却速度范围;>5 °C/s 时,实验钢开始出现贝氏体(B)组织;>10 °C/s 时,实验钢的组织出现马氏体(M)组织;>25 °C/s 实验钢的组织主要由 B + M 组成;>50 °C/s 时,得到单一的 M 组织。

**关键词** 10B21 合金冷镦钢 热模拟 动态连续冷却转变 组织

## Measurement and Analysis on Dynamic Continuous Cooling Transformation Curves of Casting Bloom of Alloy Cold-Heading Steel 10B21

Ma Ligu<sup>1</sup>, Guo Dayong<sup>1</sup>, Wang Bingxi<sup>1</sup>, Gao Hang<sup>1</sup>, Zhang Bo<sup>1</sup> and Jin Zehong<sup>2</sup>

(1 Iron and Steel Research Institute, Ansteel Group; 2 Marketing Center, Angang Steel Co Ltd, Anshan 114009)

**Abstract** The metallurgical process flowsheet of 280 mm × 380 mm casting bloom of steel 10B21 (∕% : 0.19C, 0.05Si, 0.79Mn, 0.017P, 0.002S, 0.17Cr, 0.032Ti, 0.0020B, 0.025Als) is 100 t BOF-LF-VD-CC. By using Gleeble-3800 thermo-mechanical simulator, the dilatometric curves steel 10B21 with cooling rate 0.2 ~ 50 °C/s has been measured and to combined with thermal dilation method and metallography-hardness method the continuous cooling transformation (CCT) curves are obtained. Results show that with cooling rate 0.2 ~ 1 °C/s the structure of steel is ferrite (F) and pearlite (P); the cooling rate 5 ~ 20 °C/s may be the cooling rate range to form Widmannstatten (W) structure; with >5 °C/s, the bainite structure (B) initially occurs in tested steel; with >10 °C/s, the martensite structure (M) occurs in steel; with >25 °C/s the main structure in steel consists of B + M; and with >50 °C/s it is obtained M structure in steel.

**Material Index** Alloy Cold-Heading Steel 10B21, Thermal Simulation, Dynamic Continuous Cooling Transformation, Structure

10B21 合金冷镦钢是近年来用于冷镦工艺生产紧固件的新钢种,主要用于生产强度级别为 8.8、9.8、10.9 的高品质紧固件,广泛应用于汽车、机械、电子、机械等行业。硼是最有效的提高淬透性的元素,极微量的硼( $5 \times 10^{-6} \sim 35 \times 10^{-6}$ )就能增大钢材的可淬透尺寸,或者提高淬火后钢材截面内组织和性能的均匀性<sup>[1]</sup>,并可节约大量昂贵的 Ni、Cr、Mo 等合金元素,经济效益明显。同时国内硼资源极其丰富,有效开发利用硼资源对国家具有重要的意义。

钢的动态 CCT 曲线是描述热变形后过冷奥氏体在连续冷却过程中发生相变,在不同冷却速度下,转变产物、转变量和硬度之间的关系图,它反映了材料在高温下发生塑性变形,相变所得到的室温显微组织类型<sup>[2]</sup>。通过热模拟试验来模拟实际生产中的控制轧制及控制冷却过程来确定钢的动态 CCT 曲线,对确定钢合适的轧制工艺及轧后冷却工艺。以

及掌握其最终组织具有十分重要的意义<sup>[3]</sup>。本文利用 Gleeble-3800 热模拟试验机,用膨胀测量法和金相-硬度法模拟了 10B21 合金冷镦钢的热加工和在线加速冷却过程。研究了该钢不同冷却速度下的显微组织、硬度,并绘制了动态 CCT 曲线,为制定轧制和热处理工艺提供指导和依据。

### 1 实验材料及方法

#### 1.1 实验材料

10B21 合金冷镦钢冶炼及轧钢工艺:100 t 转炉 → LF → VD → 280 mm × 380 mm 方坯连铸(结晶器 + 凝固末端电磁搅拌) → 155 mm × 155 mm 钢坯连轧

表 1 实验 10B21 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of tested steel 10B21 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	B	Als
0.19	0.05	0.79	0.017	0.002	0.17	0.032	0.002 0	0.025

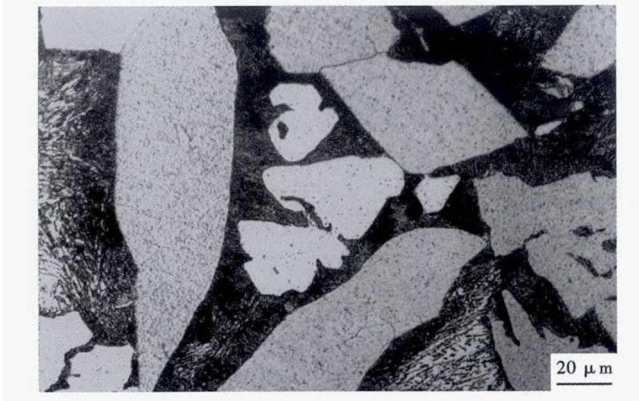


图 1 10B21 钢 280 mm × 380 mm 铸坯的组织形貌  
Fig.1 Morphology of structure of 280 mm × 380 mm casting bloom of steel 10B21

→高线轧制。取 280 mm × 380 mm 断面尺寸的铸坯,用于相变点和热模拟试样的制备,试样的原始组织如图 1。

1.2 实验方法

使用 10B21 合金冷镦钢 280 mm × 380 mm 铸坯制备 Φ6 mm × 60 mm 的相变点试样和 Φ10.13 mm × 85 mm 的动态 CCT 试样,并将动态 CCT 试样中心加工成 Φ6 mm × 20 mm 的变形部分,以便于试样在热模拟试验机夹具夹持,并提高实验过程中的加热、冷却和变形速率。试样数量为 11 个。

使用 Gleeble-3800 热模拟试验机将试样以 10 °C/s 的加热速率加热到 1 120 °C 并保温 5 min,然后以 5 °C/s 冷却速率冷却至 1 050 °C 进行第 1 次变形,变形速率为 20 s<sup>-1</sup>,变形量为 40%;再以 10 °C/s 冷却速率冷却至 960 °C 进行第 2 次变形,变形速率为 25 s<sup>-1</sup>,变形量为 40%。实验采用轴向压缩,此为控制轧制部分,为了使钢获得更好的综合性能,还需进行冷却速度的控制,即分别以 0.2,0.5,1,5,10,15,20,25,30,40,50 °C/s 的冷却速度冷却至室温,并测

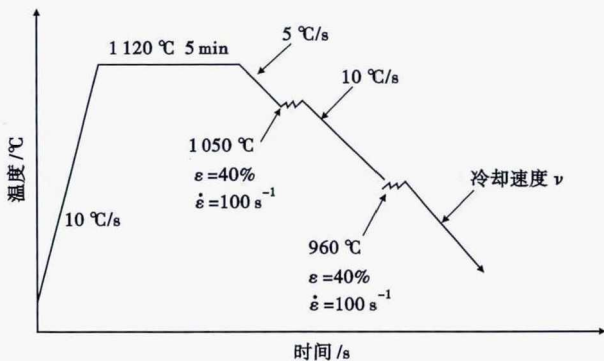


图 2 实验工艺简图  
Fig.2 Schedule of testing process

得试样在冷却过程中的温度-应变膨胀曲线。

测完动态 CCT 曲线的试样经过镶嵌,打磨,抛光后,用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀,然后在光学显微镜下观察其微观组织形貌 (500 X)。最后,采用维氏显微硬度计 (HV5) 测定各冷却试样的硬度。

2 实验结果及分析

2.1 10B21 合金冷镦钢相变临界点的测定

本实验在 LINSEIS L78 RITA 相变仪上进行。试样奥氏体化温度 870 °C,保温时间为 10 min。实验测得 10B21 合金冷镦钢的临界点 Ac<sub>1</sub> 716 °C;Ac<sub>3</sub> 826 °C;Ar<sub>3</sub> 775 °C;Ar<sub>1</sub> 658 °C;Ms 440 °C。

2.2 10B21 合金冷镦钢动态 CCT 曲线的测定

根据不同冷速下的各种相变起始点温度和终止点温度,结合显微组织分析结果,在时间-温度坐标中做出钢在压缩变形后的连续冷却转变曲线,即动态 CCT 曲线<sup>[4]</sup>。该钢奥氏体以不同速度连续冷却时,在 CCT 曲线中存在四种相变区:先共析铁素体 (F) 的析出、珠光体 (P) 转变、贝氏体 (B) 转变以及马氏体 (M) 转变。见图 3。

2.3 不同冷却速度下的显微组织

利用 ZEISS Axioert 200 MAT 光学显微镜观察不同冷速下实验钢的显微组织,结果见图 4。冷却速度为 0.5 °C/s 时,实验钢的室温组织为晶粒大小不均的多边形先共析铁素体 (F) 和少量珠光体 (P);冷却速度增加到 1 °C/s 时,先共析 F 晶粒细化,P 组织相对长大,组织均匀性较好,这是 10B21 合金冷镦钢合理的显微组织;当冷却速度为 5 °C/s 时,F 组织晶粒细小,P 组织明显长大,P 晶粒直径大于 F 晶粒,并出现了少量的魏氏体组织 (W) 如图 4 (c) 所

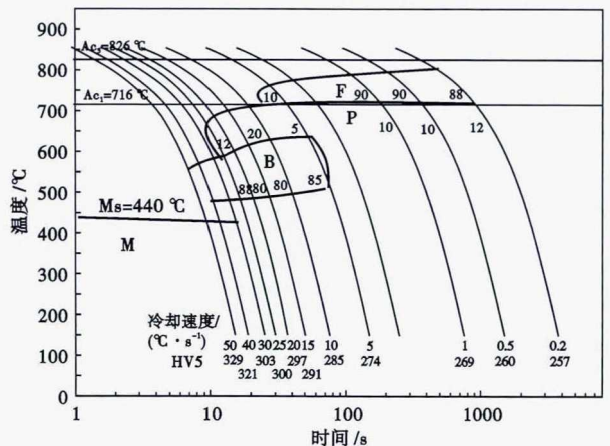


图 3 实验 10B21 钢的动态连续冷却转变 (CCT) 曲线  
Fig.3 Dynamic continuous cooling transformation (CCT) curves of tested steel 10B21

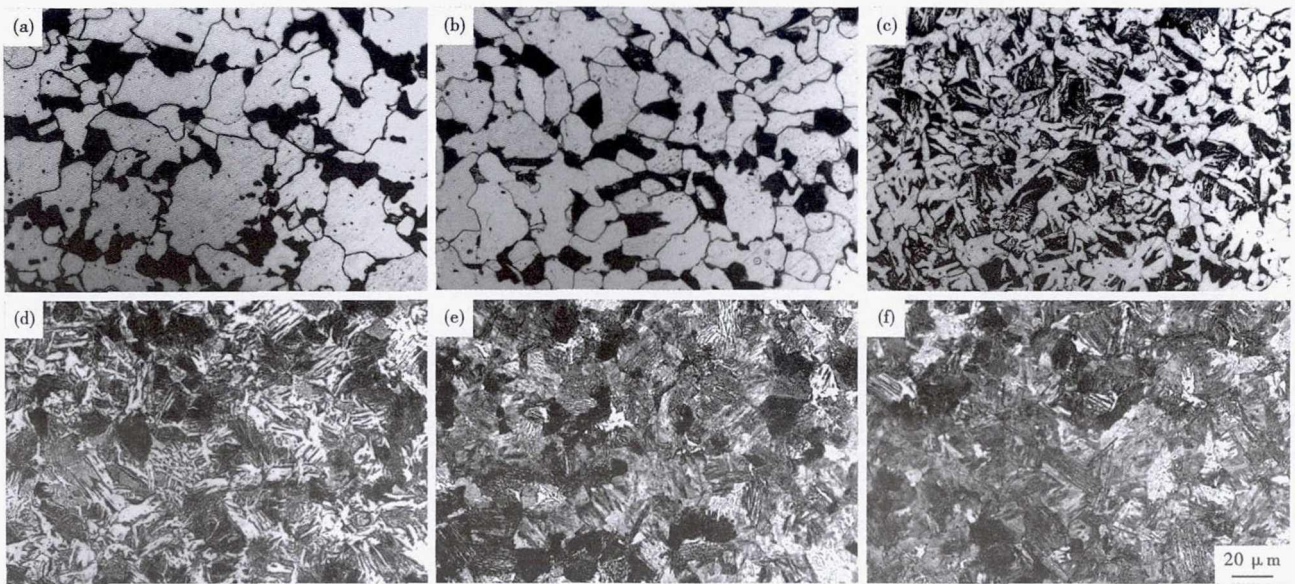


图4 实验 10B21 钢铸坯在冷却速度/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$ : (a)0.5, (b)1, (c)5, (d)15, (e)30, (f)50 的组织形貌

Fig. 4 Morphology of structure of tested steel 10B21 casting bloom with cooling rate / $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$ : 0.5 (a), 1 (b), 5 (c), 15 (d), 30 (e) and 50 (f)

示。魏氏体组织是沿原奥氏体特定晶面形成的具有几何学特征的冷却转变组织,经抛光和硝酸酒精腐蚀后,可在显微组织中看到白色的铁素体和黑色的珠光体,铁素体呈针状,魏氏体组织与母相之间保持严格的晶体学关系,并在试样磨面上呈现浮凸。W 组织一般只在一定的冷速范围内才能形成,经常伴生粗晶组织,会使钢的强度,尤其是塑性和冲击韧性显著下降<sup>[5]</sup>。由此看来,W 组织对 10B21 合金冷镦钢盘条组织和性能是十分有害的,属于异常组织;当冷却速度为 10 ~ 20  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时,室温组织以贝氏体(B)、板条状马氏体(M)、W 组织为主的机械混合物;当冷却速度为 25 ~ 40  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时,室温组织以板条状 M 组织和 B 组织为主;当冷却速度为 50  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时,为单一的 M 组织。

10B21 合金冷镦钢中铬、钛等微合金元素在钢中起到细化晶粒并提高钢的强度和韧性,有利于拉拔,在线材轧制前加热时保证微合金元素充分固溶,随后进行低温轧制并控制轧后冷却速度,在轧制和冷却过程中析出弥散微细的碳氮化物,能够抑制轧制过程中奥氏体晶粒的长大,获得十分细小的晶粒,从而提高强度的同时改善塑韧性,另外这些微合金元素的碳氮化物还可以起到析出强化的作用来提高强度。

加入硼的作用主要是为了改善其淬透性,硼吸附在奥氏体晶界上,降低了晶界的能量,因而抑制铁素体晶核的产生,降低了先共析铁素体和上贝氏体

晶核的形成率,延长了奥氏体分解转变的孕育期。

对于本实验钢,小于 1  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  的冷却速度,室温组织主要由 F + P 组成,在 1  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时的冷却速度时, F、P 组织均匀性、晶粒大小较好;5 ~ 20  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  的冷却速度是 W 组织形成范围;当冷却速度大于 5  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时,实验钢开始出现 B 组织;冷却速度大于 10  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  以后,实验钢的室温组织出现 M 组织;冷却速度大于 25  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  以后,实验钢的室温组织主要由 B + M 组成,随着冷却速度提高, M 含量增加,体积增大。冷却速度大于 50  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  以后,得到单一的 M 组织。

#### 2.4 显微硬度结果分析

测得实验钢不同冷却速度下的组织和显微硬度(HV5),结果见图 5 和表 2。由图 5 和表 2 可知,10B21 合金冷镦钢的维氏硬度和显微组织有很好的对应关系,受冷却速度的影响较大。在冷却速率为 0.2、0.5  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, HV5 值为 257、260,显微组织以相对较“软”的 F 和 P 为主;当冷却速度为 1  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, F 晶粒变小, P 晶粒变大,硬度提高较多, HV5 值达到 260;当冷却速度为 5 ~ 30  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, HV5 硬度值在 274 ~ 303 逐渐提高,这与组织转变中 B、M 含量提高, F 含量逐渐减少有关。当冷却速度为 40 ~ 50  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时,硬度提高幅度较大, HV5 硬度值在 321 ~ 329,此时室温 M 组织的含量和体积都有大幅提高。

室温下,铁素体组织是体心立方结构,珠光体是铁素体和渗碳体的机械混合物,强度和硬度高于铁素体组织<sup>[6]</sup>。随冷却速度增大,珠光体的所占比例

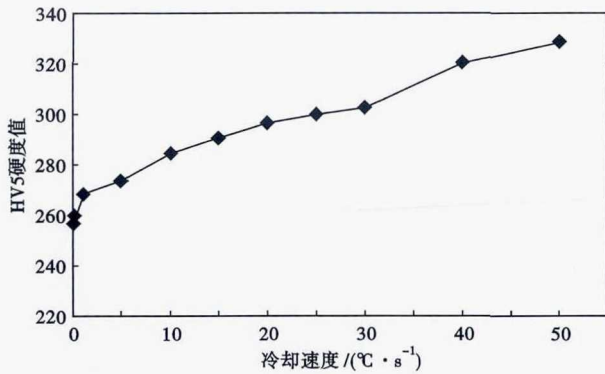


图 5 冷却速度对实验 10B21 钢铸坯 HV5 硬度值的影响  
Fig. 5 Effect of cooling rate on HV5 hardness value of tested steel 10B21 casting bloom

表 2 冷却速度对实验 10B21 钢铸坯组织和硬度的影响  
Table 2 Effect of cooling rate on structure and hardness of tested steel 10B21 casting bloom

试样号	冷却速度 / (°C · s <sup>-1</sup> )	组织	HV5 硬度值
1	0.2	F + P	257
2	0.5	F + P	260
3	1	F + P	269
4	5	F + B + W	274
5	10	B + W + M	285
6	15	B + W + M	291
7	20	B + M + W	297
8	25	B + M	300
9	30	M + B	303
10	40	M + B	321
11	50	M	329

注: F-铁素体; P-珠光体; W-魏氏体; B-贝氏体; M-马氏体

增大,有利于硬度提高。贝氏体是介于扩散性珠光体转变和非扩散性马氏体转变之间的一种中间转变产物,其强度、硬度高于珠光体,低于马氏体组织。即不同组织的硬度由大到小:  $M > B > P > F^{[7]}$ 。

### 3 结论

(1) 研究了 10B21 合金冷锻钢的热加工和在线加速冷却组织转变,并绘制了动态 CCT 曲线。对于本实验钢,小于 1 °C/s 的冷却速度,室温组织主要由铁素体和少量珠光体组成;在 1 °C/s 的冷却速度时,

铁素体、珠光体组织均匀性、晶粒大小较好;5 ~ 20 °C/s 的冷却速度可能是魏氏体组织形成范围;当冷却速度大于 5 °C/s 时,实验钢开始出现贝氏体组织;冷却速度大于 10 °C/s,实验钢的室温组织开始出现马氏体组织;冷却速度大于 25 °C/s,实验钢的室温组织主要由贝氏体和马氏体组成;冷却速度大于 50 °C/s,得到单一的马氏体组织。

(2) 10B21 合金冷锻钢在冷却速率为 0.2、0.5 °C/s 时, HV5 硬度值为 257、260;当冷却速度为 1 °C/s 时,硬度提高较多, HV5 值达到 269;当冷却速度为 5 ~ 30 °C/s 时, HV5 硬度值在 274 ~ 303 逐渐提高;当冷却速度为 40 ~ 50 °C/s 时,硬度提高幅度较大, HV5 值在 321 ~ 329。

通过对 10B21 合金冷锻钢动态 CCT 曲线、组织和硬度的实验分析,为该钢种生产实践中控制轧制、控制冷却工艺的制定提供理论依据和实践指导。

### 参考文献

- [1] 洪雷,张素萍,陈继林,等. 含硼冷锻钢 10B21 控冷工艺研究[J]. 河北冶金,2013(9):1-4.
- [2] 李桂艳,时晓光,赵宝纯,等. 热变形对 DP600 汽车用钢连续冷却转变曲线的影响[J]. 材料科学与工程学报,2009,27(2):219-222.
- [3] 赵宝纯,李桂艳,柳永浩,等. 含 Mo 低碳微合金钢 CCT 曲线的测定与分析[J]. 热加工工艺,2008,37(22):37-39.
- [4] 林慧国,傅代直. 钢的奥氏体转变曲线[M]. 北京:机械工业出版社,1988:234.
- [5] 罗雄志,陈振业,徐光. 微合金高强度钢连续冷却转变及显微组织研究[J]. 钢铁研究,2009,37(4):18-21.
- [6] 董练德,陈伟庆. 冷却速率对含硼冷锻钢 10B21 组织转变的影响[J]. 金属热处理,2010,35(11):30-33.
- [7] 崔忠圻,刘北兴. 金属学与热处理原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社. 1998:188-198.

马立国(1980-),男,硕士(2007 年沈阳工业大学),工程师,2003 年沈阳大学(本科)毕业,冷锻钢盘条研制与开发。

E-mail: mama\_01@163.com

收稿日期:2017-12-29