

· 组织和性能 ·

## Ti-B 微合金化对 ML20Cr 冷镢钢连铸坯热塑性的影响

李永超<sup>1,2</sup> 段路昭<sup>1,2</sup> 李宝秀<sup>1,2</sup> 孔维涛<sup>1,2</sup>

(1 邢台钢铁有限责任公司, 邢台 054027; 2 河北省线材工程技术研究中心, 邢台 054027)

**摘要** 试验 ML20Cr 钢 280 mm × 325 mm 连铸坯的生产流程为 80 t 顶底复吹转炉-LF-CC 工艺。借助 Gleeble 1500 热模拟试验机测试了试验钢连铸坯的 650 ~ 1 200 °C 热塑性曲线, 并分析了添加 0.029Ti-0.0023B 对 ML20Cr 钢( /% : 0.21 ~ 0.22C, 0.22 ~ 0.23Si, 0.74 ~ 0.76Mn, 0.015 ~ 0.017P, 0.002 ~ 0.003S, 0.95 ~ 0.96Cr, 0.034 ~ 0.036Al, 0.0050 ~ 0.0051N) 热塑性的影响。结果表明, 在 650 ~ 900 °C 范围, 含 0.029Ti-0.0023B 的 ML20Cr 钢的塑性(750 °C 断面收缩率 > 70%) 优于不加 Ti-B 的 ML20Cr 钢(750 °C 断面收缩率 < 50%)。其主要原因为 TiN 优先析出, 降低了细小 AlN 析出物在第三脆性区的影响, 同时 B 元素在奥氏体晶界偏聚, 抑制先共析铁素体薄膜的形成, 从而有效改善了钢的热塑性。工业生产结果表明, 加微量 Ti-B 后 ML20Cr 连铸坯开裂率由 3.7% 降低到 0.3%。

**关键词** ML20Cr 冷镢钢 Ti-B 微合金化 280 mm × 325 mm 连铸坯 热塑性

## Effect of Ti-B Microalloying on Hot Ductility of Casting Bloom of Steel ML20Cr for Cold Heading

Li Yongchao<sup>1,2</sup>, Duan Luzhao<sup>1,2</sup>, Li Baoxiu<sup>1,2</sup> and Kong Weitao<sup>1,2</sup>

(1 Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027; 2 Hebei Engineering Research Center for Wire Rod, Xingtai 054027)

**Abstract** The production flowsheet of tested 280 mm × 325 mm casting bloom of steel ML20Cr is 80 t top and bottom combined blowing converter-LF-CC process. The hot ductility curves of casting bloom of tested steel at 650 ~ 1 200 °C are measured by Gleeble 1500 hot simulator, and the effect of adding 0.029Ti-0.0023B on hot ductility of steel ML20Cr ( /% : 0.21 ~ 0.22C, 0.22 ~ 0.23Si, 0.74 ~ 0.76Mn, 0.015 ~ 0.017P, 0.002 ~ 0.003S, 0.95 ~ 0.96Cr, 0.034 ~ 0.036Al, 0.0050 ~ 0.0051N) is analyzed. Results show that in 650 ~ 900 °C the plasticity of steel ML20Cr containing 0.029Ti-0.0023B (reduction of area > 70% at 750 °C) is better than that of steel ML20Cr un-adding Ti-B (reduction of area < 50% at 750 °C). The main reason is that the prior precipitated TiN decreases the effect of fine AlN in No III brittle zone, and the B segregate at austenite grain boundary to inhibit the formation of proeutectoid ferrite thin film, in order to effectively improve the hot ductility of steel. The commercial production results show that with adding micro Ti-B in steel ML20Cr the cracking rate of casting bloom decreases from 3.7% to 0.3%.

**Material Index** Cold Heading Steel ML20Cr, Ti-B Microalloying, 280 mm × 325 mm Casting Bloom, Hot Ductility

ML20Cr 钢属于中碳合金冷镢钢, 适用于制造心部强度要求较高, 表面能承受摩擦而载荷不大的渗碳件, 主要用于制造各种机械、汽车、摩托车的部件, 如齿轮轴、蜗杆、气门挺杆等<sup>[1]</sup>。ML20Cr 属裂纹敏感性钢种, 本文主要研究了 ML20Cr 钢的高温热塑性, 分析了微合金元素 Ti 和 B 对高温热塑性的影响, 以减轻和防止 ML20Cr 铸坯裂纹产生。

### 1 试验材料及方法

试验用钢冶金流程为: 高炉铁水 + 废钢 → 80 t 顶底复吹转炉 → LF 精炼 → 大方坯连铸 (325 mm × 280 mm) → 热送热装 → 大方坯加热 → 开坯 → 检验 → 步进梁式加热炉加热 → 高压水除磷 → 控轧控冷 → 盘条入库。

试验用钢化学成分如表 1 所示, 除微合金元素含量 (Ti 和 B) 以外, 两种试验用钢的其他成分基本相同。试验钢用

样取自 325 mm × 280 mm 方坯, 取样位置如图 1 所示; 将其加工成两端带有螺纹的 Φ10 mm × 120 mm 的热模拟拉伸试样。

试验设备是 Gleeble-1500 试验机, 按照图 2 所示工艺路线进行试验, 以 10 °C/s 将试样加热至 1 100 °C 保温 5 min, 再以 3 °C/s 降温 (或升温) 到 600 ~ 1 200 °C 保温 3 min, 然后以 0.01 s<sup>-1</sup> 应变速率拉伸。

大量研究发现, 当断面收缩率 (RA) < 60% 时, 铸坯裂纹敏感性增高。所以, 常将 RA = 60% 作为门

表 1 试验 ML20Cr 钢化学成分 / %  
Table 1 Chemical composition of tested steel ML20Cr / %

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Cr	B	Ti	Al	N
ML20Cr (含 Ti、B)	0.22	0.23	0.76	0.015	0.002	0.96	0.0023	0.029	0.036	0.0051
ML20Cr (普通)	0.21	0.22	0.74	0.017	0.003	0.95	-	-	0.034	0.0050

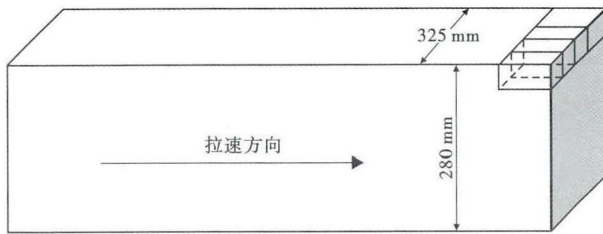


图 1 取样位置示意图  
Fig. 1 Schematics of sampling location

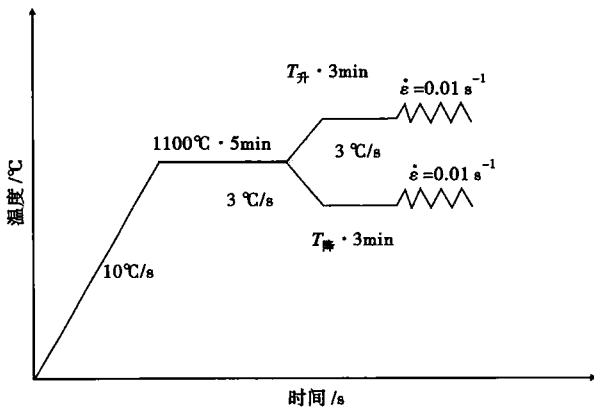


图 2 试验钢热塑性的加热与形变工艺  
Fig. 2 Heating and deforming process of hot ductility of tested steel

槛值来划分高塑性区和低塑性区的范围<sup>[2]</sup>。

## 2 试验结果

从图 3 中可以看出,在 900 ~ 1 200 °C,含 Ti、B 元素的 ML20Cr 钢与普通 ML20Cr 钢的断面收缩率相差不大,曲线趋于平稳,除在 1 200 °C 时普通 ML20Cr 钢断面收缩率为 76% 以外,其余温度范围内断面收缩率均在 80% 以上。

在 900 °C 以下变形时,随着温度的降低,普通

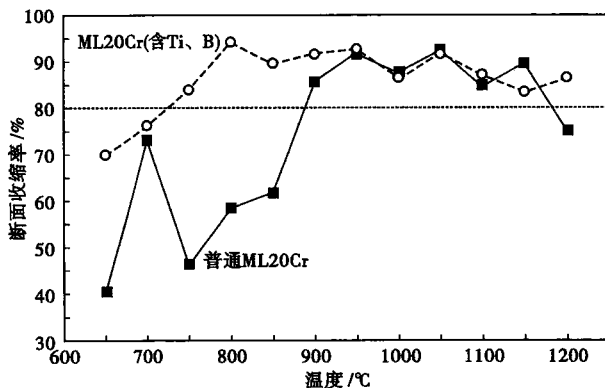


图 3 ML20Cr 钢和 Ti-B 微合金化 ML20Cr 钢的断面收缩率曲线  
Fig. 3 Curves of reduction of area of steel ML20Cr and Ti-B microalloying steel ML20Cr

ML20Cr 钢的断面收缩率呈现出迅速下降的趋势,在 700 ~ 900 °C 出现 1 个“口袋区”即第三脆性区,在 750 °C 时,断面收缩率已经下降至不足 50%,大大增加了裂纹敏感性,塑性比较差。随着温度的继续降低,断面收缩率(RA)值开始迅速回升,在 700 °C 达到 73%;而含 Ti、B 元素的 ML20Cr 断面收缩率虽然在 800 °C 之后也呈现出一定程度的下降,但是明显优于普通 ML20Cr,断面收缩率保持在 70% 以上。

## 3 分析与讨论

从图 3 中可以看出,两者断面收缩率差别主要在 700 ~ 900 °C,即第三脆性区。而脆性区间的产生主要有两个原因,即奥氏体单相低温区的脆化和奥氏体-铁素体转变高温区的脆化。

奥氏体单相低温区的脆化主要是由于  $\gamma$  晶界 AlN 和碳、氮化物等的析出,降低了晶界的结合力,应力作用下发生塑性变形时,微细晶界析出物作为应力集中源,与晶界脱开形成微孔,在晶界滑动作用下,微孔连接形成裂纹。

试验钢 Al、N 含量如表 1 所示,N 为 0.005%, Al 含量为 0.035%。根据  $[Al] \cdot [N]$  平衡关系式<sup>[3]</sup>,  $\lg [Al][N] = 1.03 - 6770/T$  可确定 AlN 平衡析出温度为 1 022 °C。而在试验中,这一温度区别并未出现塑性明显降低的情况。这是因为虽然热力学上达到了 AlN 析出条件,但在动力学上,由于 AlN 形核困难,没有足够的时间析出;即使有很少量析出,也会由于动态再结晶的影响而不会对塑性产生明显影响。随着温度的降低,在第三脆性区大量 AlN 粒子开始在晶界析出,使得试验钢塑性降低<sup>[4]</sup>。

试验钢加入 Ti 元素的作用:

(1) Ti 元素较 Al 元素优先与 N 结合形成 TiN (图 4),减少了 AlN 在奥氏体晶界的析出;

(2) 由于 TiN 的析出温度(约 1 427 °C)高于变形奥氏体的再结晶温度,所以其多存在于晶粒内部,而不会在再结晶奥氏体晶界上析出,从而保证了钢的热塑性<sup>[5-8]</sup>;

(3) 奥氏体-铁素体转变高温区的脆化是由于在  $\gamma \rightarrow \alpha$  相变时薄膜状的  $\alpha$  铁素体优先在奥氏体晶界处析出, $\alpha$  铁素体较软,在这一温度区间,其强度仅为奥氏体的 1/4。因此,在外力作用下,变形主要集中在沿奥氏体晶界分布的  $\alpha$  铁素体中,当应力超过  $\alpha$  相的临界应力时, $\alpha$  相中存在的微小孔洞和裂纹就会聚合、长大,最后导致晶界断裂,尤其当晶界处存在 Al 的氮化物或夹杂物时,还会加剧应力的集

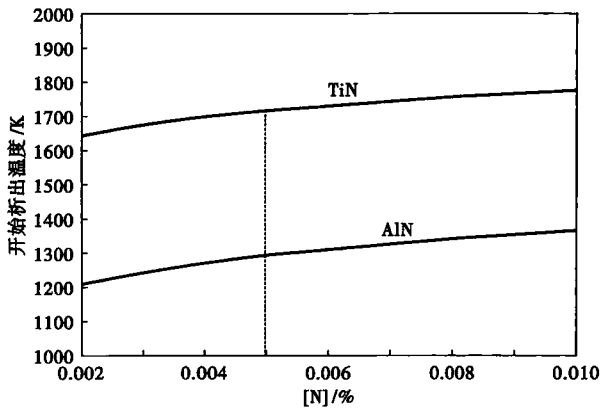


图4 ML20Cr钢TiN与AlN的开始析出温度曲线

Fig. 4 Curves of beginning precipitating temperature of TiN and AlN in steel ML20Cr

中,导致沿晶断裂<sup>[9-10]</sup>。因此,以上两方面原因共同恶化了钢的热塑性。

该试验钢由于在钛与硼加入前用Al进行了脱氧处理,按照Ti/N=3.4化学配比计算,含Ti、B ML20Cr钢中0.029%的钛元素足以固定钢中的氮元素,而B元素则以自由硼的形式存在于钢中。而自由硼元素能够以原子的形式偏聚于奥氏体的晶界,预先占有合适的形核位置,降低奥氏体晶界能,起到了净化晶界和有效抑制薄膜状铁素体形成的作用,促使高温塑性曲线上第三脆性区向低温区移动,改善了钢的高温塑性<sup>[11-14]</sup>。

#### 4 生产实践

通过成分优化后,对ML20Cr钢铸坯的开裂率进行了统计对比,见表2所示。铸坯的开裂率由原

表2 ML20Cr钢优化前和加Ti-B优化后铸坯开裂率

Table 2 Cracking rate of casting bloom of steel ML20Cr before and after adding Ti-B optimization

工艺	统计数/支	开裂数/支	开裂率/%
优化前	297	11	3.7
Ti-B微合金优化后	343	1	0.3

来的3.7%降低到0.3%,从工业实践方面也表明,Ti和B元素的添加对ML20Cr钢高温热塑性的改善效果明显。

#### 5 结论

(1)在900~1200℃,不论是否加入Ti和B,ML20Cr钢的热塑性均在80%以上,均具有较好的热塑性。

(2)在900℃以下温度变形时,普通ML20Cr钢的断面收缩率呈现出迅速下降的趋势,且至750℃时,断面收缩率已经下降至不足50%;含Ti和B的ML20Cr钢的断面收缩率尽管也呈一定的下降趋势,但在第三脆性区内断面收缩率也保持在70%以上,热塑性相对较好。

(3)在钢中加入一定量的Ti和B,有助于提高铸坯的高温热塑性,可降低了细小AlN析出物在第三脆性区的影响,抑制先共析铁素体薄膜的形成,有效提高钢的高温热塑性,增强了抵抗热应力的组织应力的能力,有利于铸坯的热送热装和避免热应力裂纹的产生。

(4)工业实践表明,加Ti和B优化后,铸坯的开裂率由原来的3.7%降低到0.3%。

#### 参考文献

- [1] 谢洪斌,刘桂生,刘振民,等. ML20Cr钢高温热塑性曲线的测量机应用[J]. 河北冶金,2013(9):5-7.
- [2] 铃木洋夫,西村哲,今村淳,等. Hot Ductility in Steels in the Temperature Range Between 900 and 600℃[J]. 铁と钢,1981,67(8):1180-1189.
- [3] 李培松,肖丽俊,谢植. 低碳钢中AlN和BN竞相析出热力学分析[J]. 钢铁研究学报,2009,21(5):16-18.
- [4] 孙彦辉,倪有金,许中波,等. 中碳钢高温力学和冶金行为[J]. 北京科技大学学报,2009,31(6):708-713.
- [5] 甘晓龙. Ti微合金化IV级螺纹钢的开发和研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2010:12-13.
- [6] 毛新平. 薄板坯连铸连轧微合金化技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2008:76-78.
- [7] 莫德敏,林娟,王怀宇. TiN技术在控轧低碳Nb钢和低碳Nb-V钢中的应用[J]. 宽厚板,2001,7(1):36-39.
- [8] 蔡可森,姚永宽,刘伟建,等. 含硼钢中硼的存在形式及控制研究[J]. 炼钢,2015,31(3):45-49.
- [9] 陈毛川,王福明,陶素芬,等. 40Cr钢的高温热塑性[J]. 材料热处理学报,2014,35(增刊):119-125.
- [10] 刘青,张建峰,张晓峰,等. 合金弹簧钢连铸坯高温力学性能分析[J]. 重庆大学学报,2012,36(5):45-50.
- [11] 赵守田,吴平,郭爱民,等. 微合金钢高温热塑性低谷区硼的偏聚[J]. 材料热处理学报,2010,31(11):85-89.
- [12] 沈冬冬,陈珊,贾涓,等. 硼对2.25Cr-1.0Mo钢热塑性的影响[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版),2001,24(4):349-352.
- [13] Cho Kyung Chul, Mun Dong Jun, Koo Yang Mo, et al. Effect of Niobium and Titanium Addition on the Hot Ductility of Boron Containing Steel[J]. Materials Science and Engineering A,2011,528:3556-3561.
- [14] Comineli O, Abushosha R, Mintz B. Influence of Titanium and Nitrogen on Hot Ductility of C-Mn-Nb-Al Steels[J]. Materials Science and Technology,1999,15:1058-1068.

李永超(1985-),男,硕士(2012年北京科技大学),工程师,2009年河北理工大学(本科)毕业,冷锻钢开发和质量控制研究。E-mail:liyongchao1220@163.com

收稿日期:2016-10-26