

碳和硼含量对低碳冷镦钢连铸坯高温力学性能的影响

段路昭 苏玉辉 崔娟 李永超 刘超

(邢台钢铁有限责任公司,河北省线材工程技术研究中心,邢台 054027)

摘要 试验的低碳冷镦钢($\% : 0.14 \sim 0.20\text{C}, \leq 0.20\text{Si}, 0.3 \sim 1.0\text{Mn}, \leq 0.030\text{P}, \leq 0.035\text{S}, 0 \sim 0.0019\text{B}$)连铸坯的生产流程为80 t BOF-LF-280 mm \times 325 mm 坯连铸工艺。通过Gleeble-3500热模拟机研究了0.14% ~ 0.20% C和0 ~ 0.0019% B对该冷镦钢600 ~ 1 200 $^{\circ}\text{C}$ 力学性能的影响。结果表明,该钢第III脆性区为700 ~ 900 $^{\circ}\text{C}$,当钢中C含量较高时,最低塑性的温度较低,硼促使该钢700 ~ 950 $^{\circ}\text{C}$ 脆性区出现两个低谷,但当硼含量增加到0.0019%时,该钢的高温塑性得到改善。在850 ~ 1 200 $^{\circ}\text{C}$,各试验钢的塑性良好,适合较大程度的变形,矫直温度和热加工温度宜控制在850 $^{\circ}\text{C}$ 以上。

关键词 碳 硼 低碳冷镦钢 连铸坯 高温力学性能

Effect of Carbon and Boron Content on Mechanical Properties of Casting Bloom of Low Carbon Cold Heading Steel at Elevated Temperature

Duan Luzhao, Su Yuhui, Cui Juan, Li Yongchao and Liu Chao

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

Abstract The production flowsheet for casting bloom of test low carbon cold heading steel ($\% : 0.14 \sim 0.20\text{C}, \leq 0.20\text{Si}, 0.3 \sim 1.0\text{Mn}, \leq 0.030\text{P}, \leq 0.035\text{S}, 0 \sim 0.0019\text{B}$) is 80 t BOF-LF-280 mm \times 325 mm bloom casting process. The effect of 0.14% ~ 0.20% C and 0 ~ 0.0019% B on mechanical properties of the cold heading steel at 600 ~ 1 200 $^{\circ}\text{C}$ has been studied by using Gleeble-3500 thermal simulation machine. Results show that the III brittle zone of the steel is 700 ~ 900 $^{\circ}\text{C}$, as the C content in steel is higher the temperature of minimum plasticity of steel is lower; the boron promotes to occur of two valleys in 700 ~ 950 $^{\circ}\text{C}$ brittle zone, but as the B content in steel is up to 0.0019%, the elevated temperature plasticity of steel is improved. At 850 ~ 1 200 $^{\circ}\text{C}$ each test steel has better plasticity to be suit for larger deformation, therefore straightening and hot-working temperature should be controlled at more than 850 $^{\circ}\text{C}$.

Material Index Carbon, Boron, Low Carbon Cold Heading Steel, Casting Bloom, Mechanical Properties at Elevated Temperature

钢铁材料在连铸生产过程中容易产生横向裂纹和角部裂纹等众多表面缺陷,这与不同材料的高温力学性能有密切关系^[1-2]。研究表明,材料在高温条件下存在3个脆性温度区^[3]。而连铸坯在矫直或线材在轧制过程中,钢坯表面温度在700 ~ 1 050 $^{\circ}\text{C}$,在此温度区间内,材料存在高温脆性区,容易产生表面缺陷。因此对连铸坯在不同温度条件下的高温力学性能的研究具有重要意义。本文主要通过Gleeble-3500热模拟机研究了5种不同碳含量和硼含量的冷镦钢的高温力学性能。

1 试验材料及方案

高温力学性能试验的试样取自连铸坯次表层,加工为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的两端带螺纹的棒状样品,在Gleeble-3500热模拟试验机上进行试验。铸坯的生产流程为:炼铁 \rightarrow 80 t转炉 \rightarrow LF精炼 \rightarrow 280 mm \times 325 mm 坯连铸。5种成分的试验材料分别被命名为1#、2#、3#、4#和5#试样,其中1#、4#和5#钢均为SWRCH15A,只是B元素含量递增,分别为0、

表1 试验冷镦钢化学成分/ $\%$

Table 1 Chemical composition of test cold heading steels / $\%$

| 炉号 | C | Si | Mn | P | S | B |
|----|------|-------------|-----------|--------------|--------------|---------|
| 1# | 0.14 | ≤ 0.20 | 0.3 ~ 0.6 | ≤ 0.030 | ≤ 0.035 | - |
| 2# | 0.16 | ≤ 0.20 | 0.5 ~ 0.8 | ≤ 0.030 | ≤ 0.035 | - |
| 3# | 0.20 | ≤ 0.20 | 0.7 ~ 1.0 | ≤ 0.030 | ≤ 0.035 | - |
| 4# | 0.15 | ≤ 0.20 | 0.3 ~ 0.6 | ≤ 0.030 | ≤ 0.035 | 0.001 0 |
| 5# | 0.14 | ≤ 0.20 | 0.3 ~ 0.6 | ≤ 0.030 | ≤ 0.035 | 0.001 9 |

10×10^{-6} 和 19×10^{-6} ;2#钢为SWRCH18A;3#钢为SWRCH22A(表1)。

以10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的速度将试样加热至1 100 $^{\circ}\text{C}$,保温5 min,然后以3 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的速度降温(或升温)到600、650、700、750、800、850、900、950、1 000、1 050、1 100、1 150、1 200 $^{\circ}\text{C}$ 等不同温度保温3 min,然后以0.01 s^{-1} 应变速率在这些温度下加载拉伸,直至断裂,并测定其断面收缩率和抗拉强度。

2 试验结果及分析

图1和图2为不同碳含量、硼含量的冷镦钢的

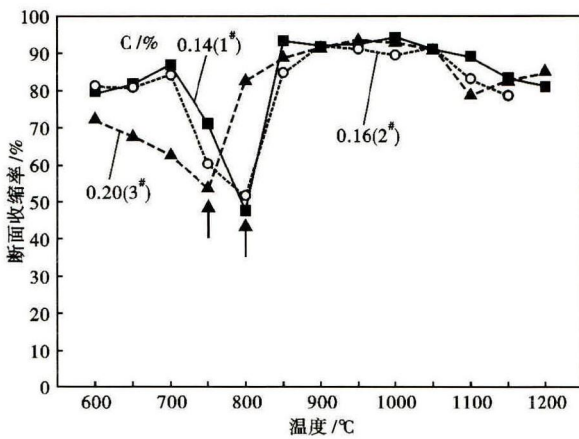


图 1 碳含量对冷镦钢高温断面收缩率的影响

Fig. 1 Effect of carbon content on reduction of area of cold heading steel at elevated temperature

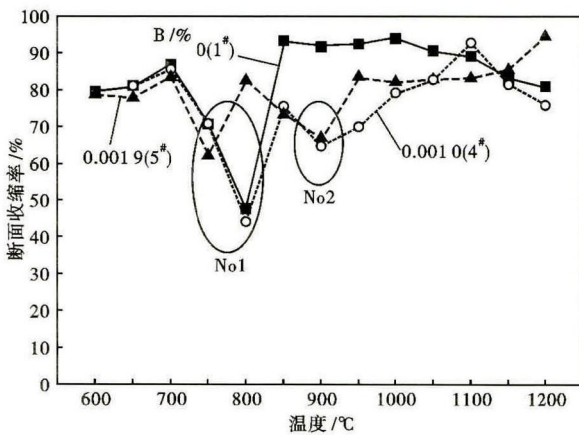


图 2 硼含量对冷镦钢高温断面收缩率的影响

Fig. 2 Effect of boron content on reduction of area of cold heading steel at elevated temperature

高温塑性对比。

图 1 显示, 1#、2# 和 3# 钢表现出明显的第 III 脆性, 温度区间为 700 ~ 850 °C。此温度区间, 3 种钢的断面收缩率随温度的变化波动幅度大, 呈现出深“V”型, 谷底位置断面收缩率接近 50%, 文献[4]试验表明, 断面收缩率低于 60% 时将会显著增加铸坯的裂纹倾向, 因此无论是矫直还是轧制都应当避开此温度区间。研究表明, 第 III 脆性区通常是由奥氏体低温脆性和两相区 ($\alpha + \gamma$) 脆性共同造成的, 低温奥氏体区的脆性与碳氮元素的析出物有密切关系, 而两相区脆性与冷却过程中铁素体的形成有关^[5-7]。两相区温度内, 铁素体在奥氏体晶界形核, 呈薄膜状长大, 又因其强度低, 只有奥氏体抗拉强度的 1/4, 因此塑性变形主要在铁素体中集聚, 随着变形的进行, 逐渐形成微小孔洞, 并发生聚合、长大, 最后导致断裂, 因此会出现双相区脆性^[8-9]。

值得注意的是, 3# 钢断面收缩率谷底对应的温度值为 750 °C, 低于 1# 和 2# 钢谷底对应的温度值 800 °C, 如图 1 中箭头所指。主要的原因是 1# 和 2# 钢的碳含量要低于 3# 钢的碳含量 (0.20%), 并且 3# 钢锰含量要高于 1# 和 2# 钢, 尤其比 1# 钢的锰含量要高出 0.50%。碳锰均为稳定奥氏体元素, 两者含量的增加扩大了相图中奥氏体区域, 减小了 $\alpha + \gamma$ 两相区域, 降低了 A_3 线, 使得铁素体的形成温度降低, 因此其断面收缩率谷底出现的温度要比 1# 和 2# 钢低。

图 2 为不同含硼量的 3 种钢断面收缩率随温度的变化曲线。曲线显示, 1# 钢的断面收缩率仅在 800 °C 出现了深“V”型低谷 (圈 No1 处), 断面收缩率不足 50%; 4# 钢同样在 800 °C 出现了深“V”型低谷 (圈 No1 处), 断面收缩率不足 50%, 900 °C 低谷 (圈 No2) 表现的不明显; 而 5# 钢的断面收缩率在 750 °C 和 900 °C 均出现了低谷 (圈 No1 和圈 No2), 表现为“W”型, 但整体塑性良好。

试验材料含硼量在 0.002 0% 范围内, 硼元素对低碳冷镦钢的断面收缩率有较为明显的影响, 主要体现在 700 ~ 950 °C。硼的添加, 使得试验材料在 700 ~ 950 °C 温度区间逐渐体现出两个低谷 No1 和 No2, 且随着硼含量的升高, No1 谷底向低温移动, No2 谷底更明显。但是硼元素的添加使得材料的高温塑性的整体水平得到了提升, 断面收缩率保持在 60% 以上。这些变化产生的原因为, 硼元素与氮元素的结合能力要大于铝元素与氮元素的结合能力, 阻止了氮化铝的析出, 并且硼的氮化物更加细小, 对奥氏体的动态再结晶行为有着明显的阻碍作用, 且硼元素能够偏聚在奥氏体晶界, 降低了奥氏体晶界的晶界能, 不仅使得奥氏体动态回复再结晶困难, 也使得铁素体形成受阻, 从而提高了 No1 处的断面收缩率^[10-12], 并降低了其对应的温度。

在 850 ~ 1 200 °C, 5 种试验钢断面收缩率值均在 60% 以上, 具有良好塑性。

图 3 和图 4 为不同碳含量和硼含量的低碳冷镦钢高温强度对比, 整体而言, 5 种试验冷镦钢的抗拉强度随温度的升高整体表现为下降的趋势, 但并不是单一的线性关系。

当变形温度低于 850 °C 时, 材料的成分对 5 种钢抗拉强度的影响较为明显。图 3 显示, 600 ~ 850 °C, 相同温度条件下, 3# 钢具有最大的抗拉强度, 2# 钢抗拉强度次之, 1# 钢具有最低的抗拉强度, 这与其成分是相对应的。因为 3# 钢具有最大的碳锰

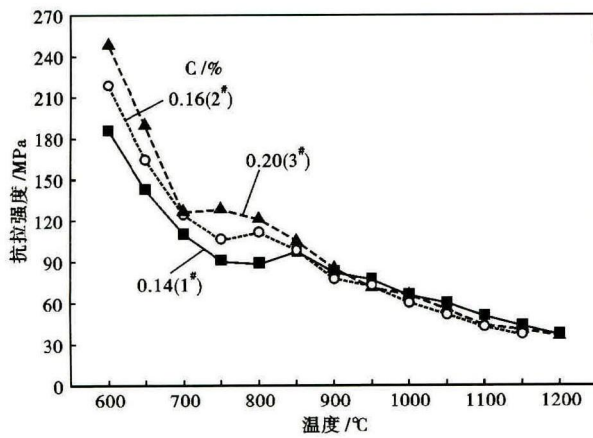


图3 碳含量对冷镦钢高温抗拉强度的影响

Fig. 3 Effect of carbon content on tensile strength of cold heading steel at elevated temperature

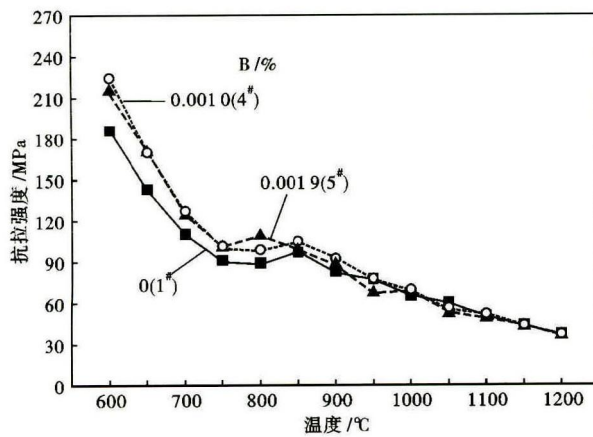


图4 硼含量对冷镦钢高温抗拉强度的影响

Fig. 4 Effect of boron content on tensile strength of cold heading steel at elevated temperature

参考文献

- [1] Mintz B. Influence of Composition on the Hot Ductility of Steels and to the Problem of Transverse Cracking[J]. ISIJ International, 1999, 39(9): 833-855.
- [2] Mintz B, Yue S, Jonas J J. Hot Ductility of Steels and its Relationship to the Problem of Transverse Cracking during Continuous Casting [J]. International Materials Reviews, 1991, 36(5): 187-217.
- [3] Suzuki H G, Nishimura S, Nakamura Y. Improvement of Hot Ductility of Continuously Cast Carbon Steels [J]. Transaction ISIJ, 1984, 24(1): 54-59.
- [4] Suzuki H G, Nishimura S, Yamaguchi S. Characteristics of Embrittlement in Steels Above 600 °C [J]. TETSU TO HAGANE, 1979, 65(14): 2038-2046.
- [5] 刘青, 张立强, 王良周, 等. 汽车用钢连铸坯的高温力学性能 [J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(2): 133-137.
- [6] Zarandi F, Yue S. Improvement of Hot Ductility in the Nb-Microalloyed Steel by High Temperature Deformation [J]. ISIJ International, 2005, 45(5): 686-693.
- [7] Zarandi F, Yue S. The Effect of Boron on Hot Ductility of Nb-Microalloyed Steels [J]. ISIJ International, 2006, 46(4): 591-598.
- [8] 程久珊, 刘静, 张云燕. HG70 钢连铸坯的高温热塑性行为分析 [J]. 钢铁研究, 2010, 38(3): 27-29.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Lopez-Chipres E, Mejia I, Maldonado C, et al. Hot Ductility Behavior of Boron Microalloyed Steels [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 460: 464-470.
- [12] 余刚, 袁武华, 刘泽亚, 等. 10B15 冷镦钢连铸坯的高温塑性 [J]. 特殊钢, 2011, 32(2): 63-65.
- [13] 宋维锡. 金属学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989: 275-276.

含量, 2# 钢次之, 1# 钢最低, 而碳锰元素是提高材料抗拉强度的有利元素, 随着碳和锰含量的增加, 抗拉强度不断增加^[13]。因此, 表现出这样的趋势。图 4 中 600 ~ 750 °C 区间, 添加硼的 4# 和 5# 钢的抗拉强度要高于无硼的 1# 钢。但是含有 0.001 0% B 的 4# 钢和含 0.001 9% B 的 5# 钢的抗拉强度相差不大。

当变形温度超过 850 °C 时, 随着变形温度的升高, 温度成为了影响材料强度的主导因素, 碳、锰和硼元素对材料强度的影响居于次位, 三者逐渐趋于相同。

3 结论

(1) 1#、2# 和 3# 三种不同碳含量试验材的 III 脆性区温度范围在 700 ~ 850 °C, 因此应当采用合理的连铸二冷制度, 使连铸坯的矫直温度应当高于 850 °C。并且在此温度区间冷却或再加热的过程中采取缓慢地降温或升温方式, 以减少内应力的产生。

(2) 碳和锰含量越高, A_3 温度越低, 试验材料在 III 脆性区最低断面收缩率对应的温度也就越低。

(3) 含硼低于 0.002 0% 的低碳冷镦钢 4# 和 5# 钢, 在 700 ~ 950 °C, 断面收缩率表现出两个低谷, 且随硼含量的增加而表现的愈加明显。但当硼含量增加到 0.001 9% 时, 材料的断面收缩率均高于 60%, 整体塑性得到改善。

(4) 5 种试验钢在 850 ~ 1 200 °C 温度区间塑性良好, 断面收缩率均在 60% 以上, 因此矫直或其他热变形应当控制在此温度区间进行。

段路昭 (1986-), 男, 硕士 (北京科技大学), 工程师, 2010 年燕山大学 (本科) 毕业, 高级冷镦钢线材产品的开发与研究。
E-mail: duanzl2006@126.com

收稿日期: 2015-02-15