

20CrMnTiH 钢中残余硼对末端淬透性的影响及工艺控制

王芝林¹ 何国宁² 高建鹏¹ 贾羽¹ 赵海东¹

(1 西宁特殊钢股份有限公司技术质量中心, 西宁 810005; 2 北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083)

摘要 通过对特钢厂经 110 t 电弧炉 + LF/VD 精炼 + 连铸 + 热连轧工艺流程生产的 400 炉钢棒材的数据进行统计, 利用末端淬透性实验[(920 ± 10) °C 50 min 后空冷至室温, 随后(880 ± 5) °C 30 min 水淬]和光谱分析获得了 20CrMnTiH 系列钢的淬透性和化学成分, 发现淬透性与残余硼元素存在线性关系。通过对各冶炼工序的分析, 得出钢中 B 的主要来源是电弧炉下渣, 控制电弧炉出钢下渣量, 可以有效控制钢中 B 含量。此外, 还须将精炼渣中 Al₂O₃ 含量从 ~30% 降至 15% ~ 20%, 可将钢中 B 含量控制在 0.000 2% 以下。

关键词 20CrMnTiH 钢 末端淬透性 硼 线性回归

Effect of Residual Boron on Jominy Hardenability of 20CrMnTiH Steel and Process Control

Wang Zhilin¹, He Guoning², Gao Jianpeng¹, Jia Yu¹ and Zhao Haidong¹

(1 Technology and Quality Centre, Xining Special Steel Co Ltd, Xining 810005; 2 Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract The experimental data of 400 heats of steel produced by 110 t EAF + LF/VD refining + continuous casting + hot rolling in a special steel plant are statistically analyzed. The hardenability [at (920 ± 10) °C for 50 min and then air cooling to room temperature, followed by holding at (880 ± 5) °C for 30 min water quenching] and chemical composition of 20CrMnTiH steel are obtained by means of Jominy test and spectral analysis to get a linear relationship between the hardenability and the content of residual boron. By each steelmaking practice analysis it is found that the main source of B in steel is EAF tapping slag. The content of B in steel can be effectively controlled by controlling the amount of tapping slag in EAF tapping. In addition, when the amount of Al₂O₃ in the refining slag decreases from 30 % to 15% ~ 20%, the content of B in steel can be controlled below 0.000 2%.

Material Index 20CrMnTiH Steel, Jominy Hardenability, Boron, Linear Regression

20CrMnTiH 系列钢是 20 世纪 50 年代开始应用在汽车行业的, 一直延续至今。该钢用 Ti 细化晶粒, 晶粒粗化温度高^[1], 机械厂采用这种钢生产齿轮, 渗碳之后可采用一次淬火工艺, 节约能源, 工序简单。此外 Mn 是我国的富产元素, 价格比较低廉, 20CrMnTi 系列钢在齿轮钢中占到 50% 以上^[2]。钢材窄淬透性带宽、小离散度, 有利于齿轮的加工及提高其啮合精度。近年来用户对 20CrMnTiH 钢淬透性要求越来越高, 同时又提出 6 个级别(20CrMnTiH1 ~ 20CrMnTiH6) 的淬透性值, 并且标准要求淬透性带 4 ~ 6HRC, 加之 20CrMnTiH 钢的特性, 生产控制难度较大^[3]。

影响 20CrMnTi 钢末端淬透性因素较多, 其中一些因素如化学成分设计、元素偏析、热处理工艺及检验准确性等, 多年来已被广泛研究并在生产实践中得到较好的控制^[4-6]。研究表明, 残余 B 对淬透性的影响十分显著需要重点控制^[7-8], 然而在生产实践中残余 B 的控制难度很大, 残余 B 含量很低时淬透

性仍存在波动。本文重点讨论钢中残余 B 元素对 20CrMnTi 系列钢的影响及控制方法。

1 试验材料与方法

20CrMnTi 钢, 生产工艺流程为: 110 t EAF 冶炼 → LF + VD 精炼 → 250 mm × 280 mm 方坯连铸 → 步进式加热 → 连轧 Φ30 mm ~ Φ110 mm 棒材 → 齿条冷床冷却, 化学成分要求如表 1 所示。按照 GB/T225-2006《钢淬透性的末端淬火试验方法(Jominy 试验)》标准要求制取试样, 并检验末端淬透性。试样热处理工艺为: (920 ± 10) °C 50 min 后空冷, 随后(880 ± 5) °C 30 min 端淬, 淬火试剂为水。利用恩斯特 AT350DR-TM 数显台式自动硬度计检测端淬硬度值, 利用斯派克 LABLAVM12 光谱仪检测钢中的元素含量。

采用淬透性曲线非线性回归方程^[9]进行合金元素与端淬硬度的回归计算, 如式(1)所示。

$$J_E = J_0^2 \{ J_0 + 16 [1 + C_f \cdot E / (E_a + E)] E / (E_s +$$

$$C_f \cdot E^2 / (E_s + E) \}^{Cb} \quad (1)$$

式中: J_E -距离淬火端距离 E 的 HRC 硬度值; E -距淬火端的距离 mm; J_0 -淬火端马氏体 HRC 硬度值; C_f 、 C_b -分别为曲率系数和曲率指数, 其值大小代表端淬曲线下降速率及下限渐近线高低; E_s -半马距/mm; G -晶粒度级别, 取 7.0 级; M -合金化当量, 相当于钢中所含元素综合影响奥氏体稳定性的定量参数。式中各参数与钢中的化学元素含量相关:

$$J_0 = (4 + 212[C]^3) / (0.1 + 3.2[C]^3) - 2[C] \quad (2)$$

$$C_f = M/5 + 3[V] / (1 + 3[V]^2) + (4/3) ([Mo] + [W]) / [1 + [Mo] + ([W]^2)] \quad (3)$$

$$C_b = 4 + (170[B])^3 / (1 + 630[B])^4 / [N(0.15 + [C])] \quad (4)$$

$$E_s = [12 / (5 + G)] [M/12 + (M/8.5)^4 + 1] / [1 + 25[C]^3 / (1 + 5[C])]^4 \quad (5)$$

$$M = [C](39 - [Cr]) / (5 + [Cr]) + [Mn](4 + [Mn]) + 8[Si] / (5 + [Si]) + 0.3[Ni](5 + [Ni]) + 7[Ti] / (1 + 120[Ti]^2) + [Nb] / (0.1 + 98[Nb]^2) + 3[N] / (0.1 + 300[N]^2) + [Al] / (0.1 + 130[Al]^2) + 2[P] / (0.1 + 300[P]^2) + 9[V] / (1 + 3[V]^2) + 12([Mo] + [W]) / [1 + ([Mo] + [W])^2] + [(170[B])^3 / (1 + (630[B])^4) / [N(0.15 + [C]) - [S] + [Cu]]] \quad (6)$$

淬透性值相差可达 7.5 HRC。通过化学残余元素分析发现, 两炉钢材的 B 含量存在差异, 因此需要重点分析 B 含量对 20CrMnTi 末端淬透性的影响。利用 Originpro 2018 软件, 对 400 炉钢的实测 J9、J15 点淬透性值与 B 含量进行回归分析, 结果如图 1 所示。淬透性值 J9 与 B 含量、淬透性值 J15 与 B 含量均呈现线性关系。

2.1.2 数学模型分析

利用式(1)~(6)计算末端淬透性曲线, 化学成分 B 含量设计为 0.000 3% 和 0.000 7%, 其余元素与表 1 中 1 号钢相同, 计算结果如图 2 所示。随着 B 含量的增加, 末端淬透性值从 J5 点开始大幅增加, B 含量从 0.000 3% 增加到 0.000 7% 时, J9 点值增加 6 HRC, J15 点值增加 2 HRC。与计算值相比, 实测 B 含量对淬透性的影响更大, 因此有必要对钢中 B 含量进行追溯并对 B 含量严格控制。

2.1.3 B 对淬透性影响原因分析

B 在钢中存在形式有: 固溶硼、碳硼化物、氮化硼、氧化硼、金属化合物等, 只有偏聚于晶界的固溶硼才对钢的淬透性起作用。当钢中 B 以化合物存在时, 将失去 B 的有效作用^[10]。20CrMnTiH 钢中存在 Ti 和 N(Ti 0.05% ~ 0.07%, N < 0.008%), 冶炼时钢中会形成 TiN、TiO, 其形成温度较高, 因此钢中

表 1 实验 20CrMnTiH 钢的化学成分及末端淬透性

Table 1 Chemical composition and hardenability of experimental 20CrMnTiH steel

编号	化学成分/%									端淬 HRC 硬度值	
	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Al	B	N	J9	J15
1	0.188	0.24	0.90	0.011	1.11	0.028	0.034	0.0007	0.0062	40.0	33.0
										41.0	33.0
2	0.193	0.24	0.90	0.008	1.10	0.030	0.028	0.0003	0.0065	33.5	27.0
										34.5	27.0

2 实验结果与分析

2.1 钢中 B 含量对淬透性影响

2.1.1 实测数据分析

采用同一标准、同一生产工艺、同一热处理工艺生产 400 炉 20CrMnTi 钢, 进行末端淬透性 J9、J15 点检验, 并检验化学成分。抽样选取了同一批次、相同工艺、同一规格、化学主成分相近的两炉钢材, 其检验结果见表 1。可以看出, 两者的 J15 点

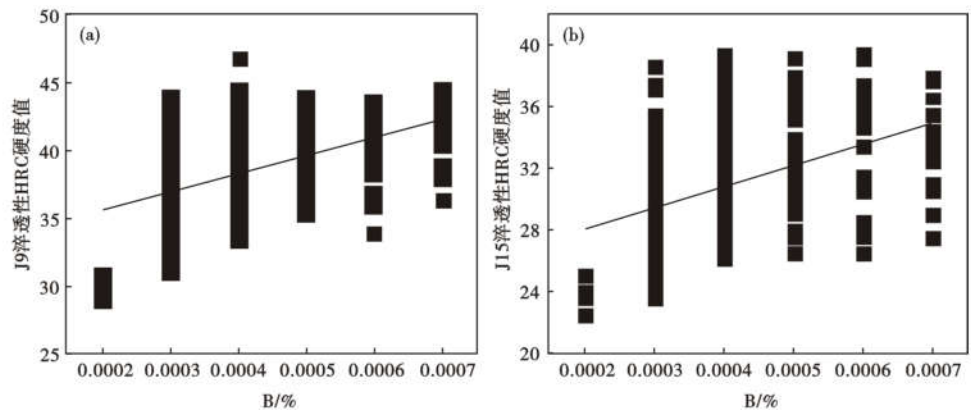


图 1 20CrMnTiH 钢 B 含量对 (a)J9 和 (b)J15 淬透性 HRC 硬度值的影响

Fig.1 Effect of B content on HRC hardness number of J9 (a) and J15 (b) hardenability of 20CrMnTiH steel

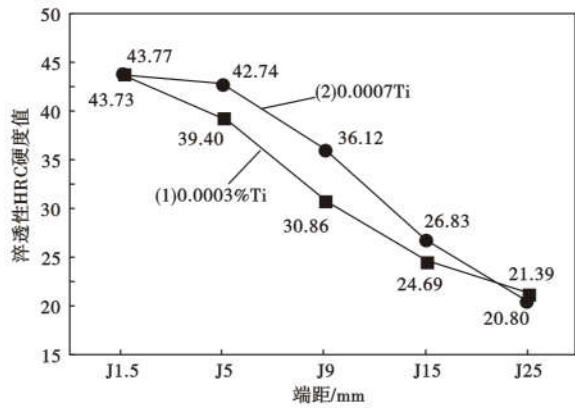


图 2 (1)0.0003% Ti 和(2)0.0007% Ti 20CrMnTi 钢淬透性曲线计算值

Fig. 2 Calculated hardenability curve of (1)0.0003% Ti and (2)0.00075% Ti 20CrMnTi steel

无法生成 BN、B₂O₃ 等化合物,从而使 B 处于固溶态,最大限度发挥了 B 提高淬透性的作用。如果钢中 N 全部被 Ti 固定,则必须的 Ti 含量为^[11]:

$$Ti_{\text{必须}} = 5(N - 0.003) \quad (7)$$

式中:N-钢中的氮的质量分数,因此钢中过剩 Ti 为:

$$Ti_{\text{过剩}} = Ti_{\text{总}} - Ti_{\text{必须}} = Ti_{\text{总}} - 5(N - 0.003) \quad (8)$$

根据目前 20CrMnTiH 的 N 含量及 Ti 含量的控制情况,通过式(8)计算,钢中过剩 Ti ≥ 0.025%,钢中有效硼含量达到最大值,钢的淬透性指标处于峰值^[12]。过剩钛基本在此范围内,因此应控制钢中硼含量 ≤ 0.00025%。B 含量从 0.0003% 增加到 0.0007% 时,固溶 B 含量提高,发挥了提高淬透性的作用,导致 20CrMnTiH 系列钢的淬透性明显增加。

2.2 钢中 B 含量的追溯

2.2.1 冶炼过程分析

钢厂电弧炉铁水配比为 90%,经检测,铁水中

的 B 含量为 0.0005% ~ 0.0010%,钢液中的 B 含量主要来自于铁水。以抽选的两炉钢为研究对象,分析在电弧炉、精炼、连铸等工序后钢中的 B 含量变化情况,结果如表 2 所示。可以看出,经过电弧炉的吹氧冶炼,电弧炉出钢 B 含量 ≤ 0.0003%, B 含量降至 0.0003% 附近达到平衡后,要将 B 含量再吹炼氧化至更低的水平,则变得非常困难。而 VD 后 B 含量上升至 0.0005%,由此判断钢中的 B 含量与最初铁水中的 B 含量无关。此外同一连浇炉次 B 含量增加量区别较大,但同一连浇所加入合金、渣料等原辅材料均相同,即 B 含量的增加与所加合金及渣料关系不大,钢中的 B 含量是在精炼中后期增加的。

2.2.2 精炼渣与钢中 B 含量的关系

重点分析电弧炉出钢至精炼过程中 B 含量的变化,发现 P 含量与 B 含量存在线性关系,结果见图 3 所示。随着精炼过程钢中 P 含量增加, B 含量也会增加,钢中 P 含量增加主要原因是电弧炉出钢时下渣,因此推测 B 含量的增加与电弧炉出钢下渣也有一定关系。图 3(a) 中 1 号炉在生产时出现下渣,因此 B 含量存在波动,并且在 VD 精炼后 B 含量明显上升,而图 3(b) 中 2 号炉正常生产未出现下渣,因此 B 含量稳定。

电弧炉出钢时间越短,电弧炉出钢时下渣倾向越大,因此分析了电弧炉出钢时间与熔炼 B 含量的关系,并进行拟合,结果如图 4 所示。通过拟合发

表 2 冶炼过程 20CrMnTiH 钢中的 B 含量/%
Table 2 B content of 20CrMnTiH steel in steelmaking process/%

编号	电弧炉	全分析	过程样	VD 前	VD 后	过程样	吊包
1	0.0003	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0005	0.0007
2	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004	0.0003	0.0003

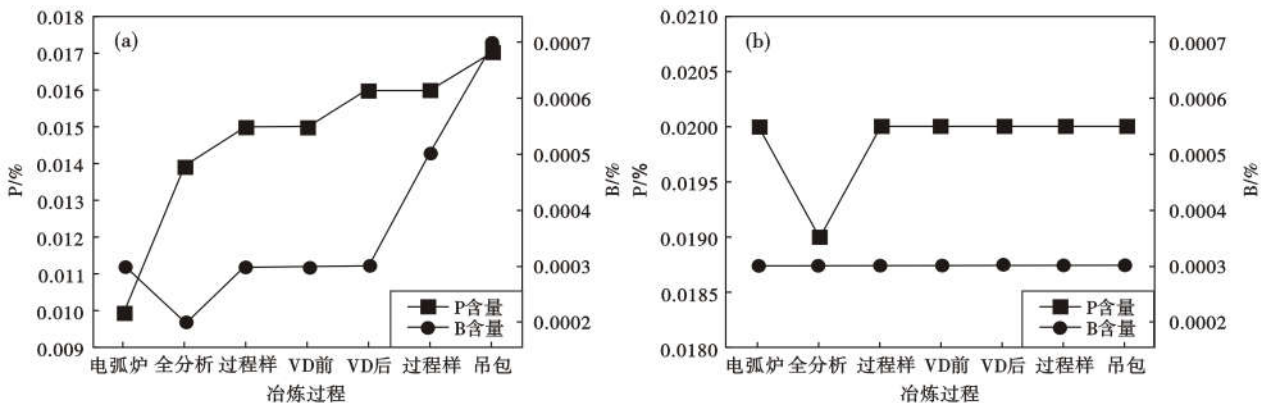


图 3 炼钢过程钢中 P 含量的变化对 20CrMnTiH 钢 B 含量的影响:(a) 炉 1;(b) 炉 2

Fig. 3 Effect of variation of P content in steel on B content of 20CrMnTiH steel in steelmaking process:(a) heat 1;(b) heat 2

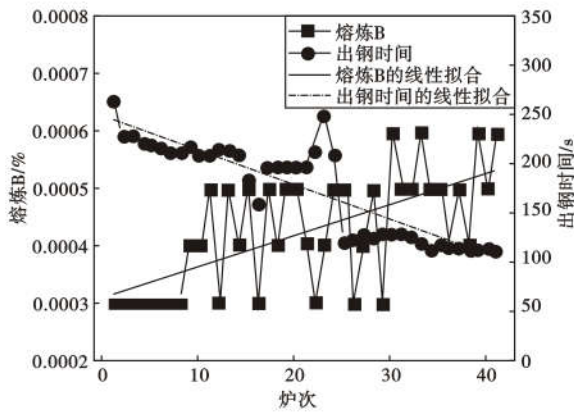


图 4 电弧炉出钢时间对精炼 20CrMnTiH 钢 B 含量的影响
Fig.4 Effect of EAF tapping time on B content in refining 20CrMnTiH steel

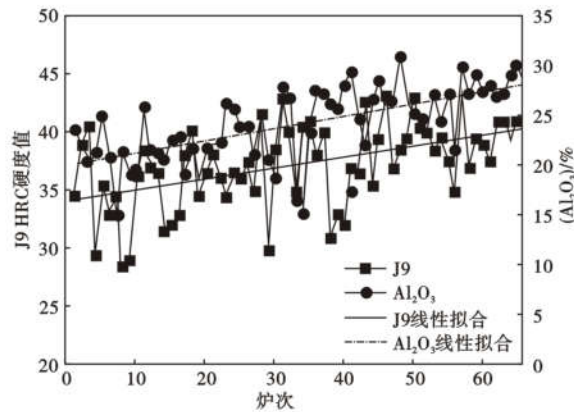


图 5 精炼渣 (Al₂O₃) 对 20CrMnTiH 钢 J9 HRC 硬度值的影响
Fig.5 Effect of refining slag (Al₂O₃) on J9 HRC hardness number of 20CrMnTiH steel

现,电弧炉出钢时间越短,熔炼 B 含量增加,并且呈一定的线性关系。由于钢厂电弧炉出钢没有下渣自

参考文献

[1] 刘燕波,陈文琳,王 梁,等. 20CrMnTiH 钢奥氏体晶粒长大规律及有限元模拟[J]. 材料热处理学报,2016,37(3):235-240.
 [2] 刘海宁,王 郢,李仁兴,等. PMO 凝固均质化技术在 20CrMnTi 齿轮钢上的应用[J]. 钢铁,2019,54(6):69-78.
 [3] 王继臣,赵千水. 20CrMnTiH 齿轮钢的淬透性计算及窄淬透性带控制[J]. 特殊钢,2019,40(2):24-27.
 [4] 童家阁. 20CrMnTiH 钢末端淬透性控制[J]. 本钢技术,2018(1):18-19.
 [5] 季春生,王忠诚,刘剑辉. 改善 20CrMnTiH 淬透性的研究[J]. 北京科技大学学报,2007,29(S1):85-88.
 [6] 蒲学坤,柯晓涛,邓通武. 攀钢 120 t 转炉-LF + RH 流程 20CrMnTiH 窄淬透性带齿轮钢的试制[J]. 特殊钢,2007,28(4):50-51.
 [7] 乔晓阳,高浩然,崔 冕,等. w(B) 对 20CrMnTiH 淬透性的影响及控制措施[J]. 现代冶金,2020,48(4):12-13.
 [8] 陶建军,朱惠刚,吴小林. 碳偏析和残余 B 对 20CrMnTiH1 齿轮钢淬透性的影响[J]. 特殊钢,2007,28(5):64-65.

表 3 实验 20CrMnTiH 钢精炼渣调整前后的主要成分/%
Table 3 Main ingredient of experimental 20CrMnTiH steel refining slag before and after adjustment/%

项目	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
调整前	0.46	52.87	6.59	5.39	30.21
调整后	0.91	57.46	4.19	11.08	19.24

动检测系统,人为控制较困难,电弧炉经常出现下渣现象,因此钢中 B 含量极易出现波动,进而导致 20CrMnTiH 系列钢末端淬透性出现较大偏差。而 B 含量的增加主要是在精炼后期 (VD 后),为此需要找出精炼渣引起 B 含量波动的直接原因。

分析实验钢精炼渣中 Al₂O₃ 与末端淬透性值 J9 点的关系,结果如图 5 所示。通过拟合发现两者也存在线性关系,随着精炼渣中 Al₂O₃ 含量的增加,J9 点值也在增加。Al₂O₃ 能够还原炉渣中的 B,使得 B 进入钢水中,引起 B 含量的升高^[13]。因此,将精炼渣中 Al₂O₃ 量从 30% 左右调整至 15% ~ 20%,钢中 B 含量被稳定控制在 0.000 2% 以下。调整前后的精炼渣成分如表 3 所示。

3 结论

(1) 20CrMnTiH 系列钢由于其钢种特性,残余元素 B 含量的变化对其末端淬透性影响最大,因此钢中 B 含量是控制末端淬透性的关键。

(2) 钢中 B 的主要来源是电弧炉下渣,通过电弧炉下渣检测系统严格控制电弧炉出钢下渣量,可以有效控制钢中 B 含量。

(3) 将精炼渣 (Al₂O₃) 从 30% 左右降至 15% ~ 20%,可以将钢中 B 含量控制在 0.000 2% 以下。

[9] 余柏海. 计算淬透性及机械性能的非线性方程[J]. 钢铁,1985,20(3):43-52.
 [10] 童志博,彭其春,沈冬冬,等. 硼在钢中的作用及应用[J]. 中国冶金,2013,23(5):2-16.
 [11] 巴纳吉 S K,莫罗尔 J E. 钢中的硼[M]. 北京:冶金工业出版社,1985.
 [12] 赵西成,宋 红,马幼平. 钛含量及奥氏体化温度对 20MnMoB 钢淬透性的影响[J]. 热加工工艺,2001,3(5):3-5.
 [13] 赵成林,郭晓波,廖相巍,等. 炼钢过程硼元素冶金行为研究[J]. 鞍钢技术,2013(4):10-13.

王芝林 (1983-),男,高级工程师,2005 年青海大学 (本科) 毕业,钢铁新产品研发. E-mail:106122099@qq.com

收稿日期:2021-06-25