硼对Q690D钢CCT曲线的影响

白雅琼,张 娜,杨维宇

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 利用Formastor-F全自动相变仪测定了不同硼含量Q690D钢的临界点Ac_1、Ac_3,并绘制Q690D钢的连续冷却转变曲线。结果表明:硼的加入,使Q690D钢的Ac_3、Ac_1略有提高,使Ms点及Bs点有所降低,使Q690D钢的临界冷速降低,淬透性明显提高。硼对Q690D钢先共析铁素体转变及贝氏体转变均有不同程度的推迟作用,抑制了先共析铁素体的析出,在很宽的冷速范围可以得到完全的贝氏体组织。

关键词: 硼元素; Q690D钢; 连续冷却转变曲线; 显微组织

中图分类号: TG142.13 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2017)01-0040-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.01.013

Effect of Boron on Continuous Cooling Transformation Curve of Q690D Steel

BAI Ya-qiong, ZHANG Na, YANG Wei-yu

(*Technical Center of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp., Baotou* 014010, *Nei Monggol, China*)

Abstract: In this paper, the critical points Ac_1 and Ac_3 of Q690D steels with different boron content were measured by Formastor-F automatic phase change meter, and the continuous cooling transformation curve of Q690D steel was drawn. The result shows that the addition of boron made the Ac_3 and Ac_1 of Q690D steel increased slightly, Ms point and Bs point reduced, the critical cooling rate of Q690D steel decreased, however the hardenability improved obviously. Boron in Q690D steel has different degrees of delayed effect on proeutectoid ferrite transformation and bainite transformation, which inhibits the precipitation of proeutectoid ferrite. The complete bainite structure can be obtained in a wide range of cooling rate.

Key words: Boron; Q690D steel; continuous cooling transformation curve; microstructure

地壳中分散着大量的硼元素,若使硼充当钢中的合金元素,就能减少贵金属在钢中的使用,并且获得极佳的综合力学性能。这对我国的钢铁行业的意义尤为重要[1]。Q690D钢通常是在控轧控冷或热处理后使用,但其相变规律研究甚少,尤其是含硼Q690D钢的奥氏体的转变规律研究未见报道。本文重点对不含硼元素和含有硼元素的Q690D试验钢的过冷奥氏体连续冷却转变曲线进行了对比分析,对制定和改进轧制及热处理工艺,改善材料的组织提供依据。

1 试验材料及方法

试验采用Q690D钢中厚板,其化学成分如表1所示。其中试验钢1采用Q690D钢中厚板的成分,不含硼元素;试验钢2是在试验钢1化学成分的基础上加入微量的硼元素,用化学法对试验钢2进行硼的质量分数测定,确定其硼固溶含量为0.001 7%。

收稿日期: 2016-12-06

作者简介: 白雅琼(1982-)女,内蒙古包头市人,工程硕士,工程师,主要从事金属材料的物理检测工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　Q690D 钢的化学成分(质量分数)　%

C	Si + Mn	Nb + V + Ti + Ni + Cr	P, S
0.11	1.72	0.35	≤0.01

将 Q690D 试验钢加工成 Φ3 mm × 10 mm 试样，试样一端开一个 Φ2 mm × 2mm 的小孔，依据 YB /T 5128—1993,《钢的连续冷却转变曲线图的测量方法(膨胀法)》标准[2]，采用 Formastor – F 全自动相变仪，将试样以 0.05 ℃/s 的升温速率加热来测定试验钢的临界点 Ac_1 和 Ac_3；再以 10 ℃/s 的加热速率将试样加热到奥氏体化温度 950 ℃，保温 10 min 进行奥氏体化，奥氏体化后的试样以不同的冷却速率冷却至室温，用切线法确定各连续冷却曲线上的相变开始点和相变结束点，记录时间、膨胀量和温度数据，具体冷却工艺见表 2。将各冷速下试样的热电偶焊接面作为金相组织观察的断面，经磨制、抛光，然后采用 4% 硝酸酒精浸蚀，利用 Axio observer D1M 型蔡司光学显微镜观察不同冷却速度条件下的组织形貌。最后，以温度为纵坐标，以时间为横坐标，将相同性质的相变开始点和结束点分别连接成曲线，绘制出试验钢的连续冷却转变曲线。

表 2　试验钢的连续冷却工艺

试验钢	升温速度 /(℃·s^{-1})	保温时间 /min	冷却速度 /(℃·s^{-1})											
1	10	10	60	50	40	30	20	15	10	8	5	2	1	0.5
2			50	30	20	15	10	8	5	4	3	2	1	0.1

2　试验结果与分析

2.1　硼元素对试验钢连续冷却转变曲线的影响

表 3 为测得的 Q690D 试验钢的临界点温度，可见，由于硼元素的加入，Q690D 试验钢 2 的 Ac_1、Ac_3 温度相比没有加入硼元素的 Q690D 试验钢 1 略有提高，而 Ms 降低了 19℃。

表 3　试验钢的临界点温度　℃

试验钢	Ac_1	Ac_3	Ms
1	682	853	472
2	686	862	453

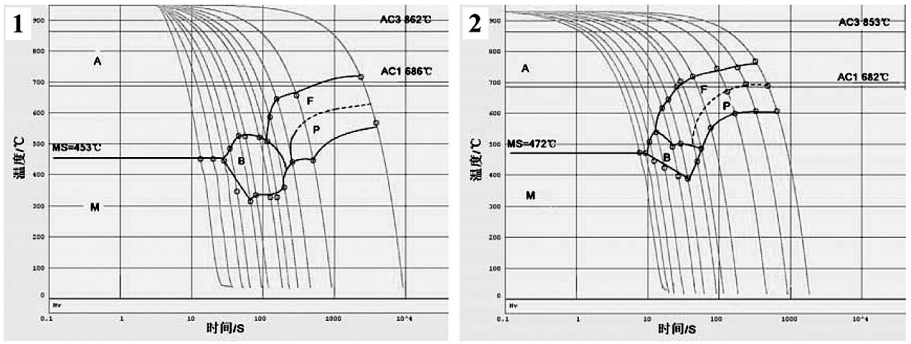


图 1　Q690D 试验钢的连续冷却转变曲线

图 1 为试验钢 1 和 2 的连续冷却转变曲线。由试验钢 1 的连续冷却曲线可以看出，在冷却速度小于 8 ℃/s 时，冷却曲线从左上方向右下方移动，首先跨过了先共析铁素体转变区，发生了先共析铁素体的析出，紧接着冷却曲线与珠光体转变开始线相交，跨过了珠光体转变区，发生了珠光体转变，室温下得到了先共析铁素体与珠光体的混合组织。冷速在 8 ℃/s 到 15 ℃/s 的冷却速度范围进行连续冷却时，冷却速度曲线首先与先共析铁素体转变开始线相交，由于大大提高了冷却速度，使先共析铁素体的转变开始的温度大大降低，在随后的冷却过程中，与 Bs 线相交，未转变的奥氏体将转变为贝氏体，在此冷速范围内得到的室温组织为铁素体和贝氏体的混合组织。随着冷却速度的继续增大，冷却速度曲线依次与铁素体转变开始线、Bs 线、Ms 线相交，冷却速度大于 30 ℃/s 后，冷却曲线最先与 Bs 线相交，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

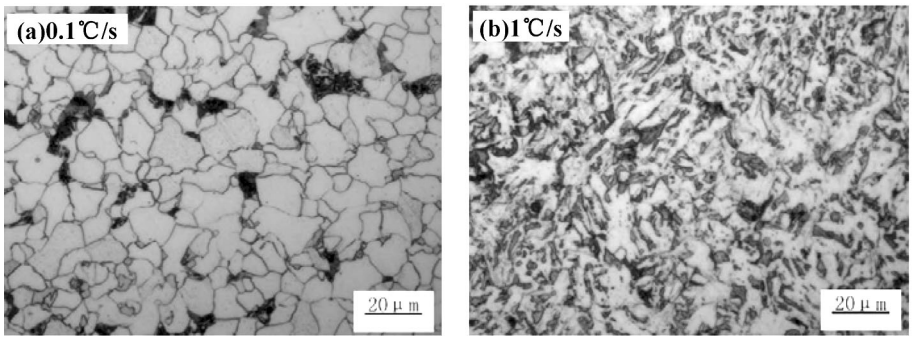
之后与 M_s 线相交，得到了贝氏体与马氏体的混合组织，且随着冷速的加快，发生了马氏体的转变量会越来越多。得到完全马氏体的临界冷却速度为50 ℃/s。

由试验钢2的连续冷却曲线可以看出，当以小于3 ℃/s的冷却速度进行连续冷却时，形成先共析铁素体与珠光体组织。在4 ℃/s到8 ℃/s的冷却速度范围进行连续冷却时，冷却曲线仅跨过了贝氏体转变区，形成贝氏体组织。以冷速大于10 ℃/s进行连续冷却时，冷却曲线最先与 B_s 线相交，之后与 M_s 线相交，得到了贝氏体与马氏体的混合组织，且随着冷速的加快，发生了马氏体的转变量会越来越多。得到完全马氏体的临界冷却速度为20 ℃/s。

比较分析试验钢1、2的CCT曲线发现，硼元素的加入使试验钢的淬透性明显提高，连续冷却曲线整体向右下方移动，试验钢1形成先共析铁素体的的临界冷却速度为30 ℃/s，形成珠光体的临界冷速为10 ℃/s；试验钢2形成先共析铁素体的的临界冷却速度为4 ℃/s，形成珠光体的临界冷速为2 ℃/s。而且试验钢2的先共析铁素体的析出温度明显低于试验钢1的，可见硼元素抑制了先共析铁素体的析出，这是由于硼元素在奥氏体晶界非常容易偏聚，使碳原子在晶界上的偏聚浓度有所降低，从而抑制了先共析铁素体的析出，其作用机制主要有四种解释[3]：①硼偏聚在奥氏体晶界，减少了铁素体优先形核的位置；②硼减少了铁在晶界上的自身扩散系数，使铁素体的形核速度降低；③当硼偏聚于晶界后，占据了铁素体在晶界上形核的位置，故这些优先形核的位置将会消失；④铁素体难以在硼化物与基体之间的界面上形核，这是由于细小的硼化物沿晶界形成并与基体相互关联。另外在贝氏体转变过程中，试验钢1的贝氏体转变上限温度Bs的范围在537～490 ℃之间，而含硼Q690D试验钢2的贝氏体转变上限温度Bs的范围在524～483 ℃之间，Q690D试验钢在加入硼元素之后，Bs有所降低。

2.2 含硼试验钢在连续冷却过程中的组织分析

由于合金元素硼的加入，Q690钢的连续冷却转变过程中，组织形式较为复杂，冷却速度为0.1 ℃/s连续冷却时，转变产物主要为多边形铁素体和珠光体，多边形铁素体晶粒形状比较规则，晶界上分布有形状数量不等的珠光体组织。冷却速度提升到1 ℃/s时，由于过冷度增加，导致钢的相变驱动力有所提高，从而增加了相变时铁素体的形核率，细化了铁素体组织，此时铁素体晶粒的形状也发生了明显的变化，变得不规则、晶界凹凸不平、不再连续，珠光体已经开始退化，如图2(a)、(b)所示。



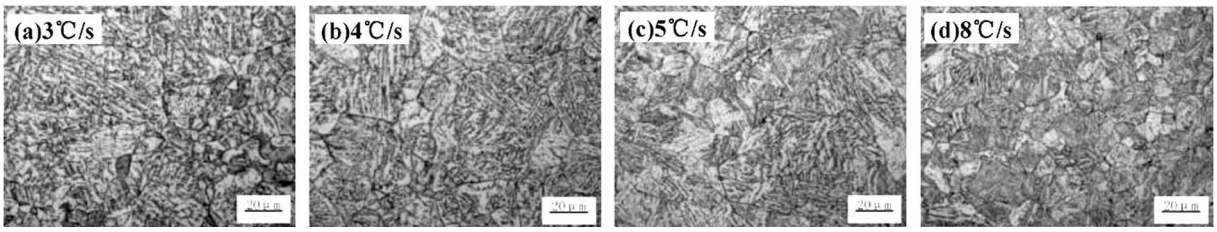
(a) (b)

图2 低冷速下含硼Q690D钢的珠光体类组织

富碳的奥氏体随冷却速度的增加，往往来不及转变为珠光体便被保留到贝氏体转变区域，转变成为粒状贝氏体组织，随冷却速度的进一步提高，粒状贝氏体逐渐减少，就会出现下贝氏体或马氏体组织[4]。如图3所示，冷却速度达到3 ℃/s时，组织中出现了部分贝氏体，室温下组织表现为贝氏体和铁素体的混合产物，随着冷却速度的提高，铁素体量越来越少，直至消失，贝氏体量则越来越增多，在冷却速度4～10 ℃/s的冷速范围内，室温下的组织全部为贝氏体。

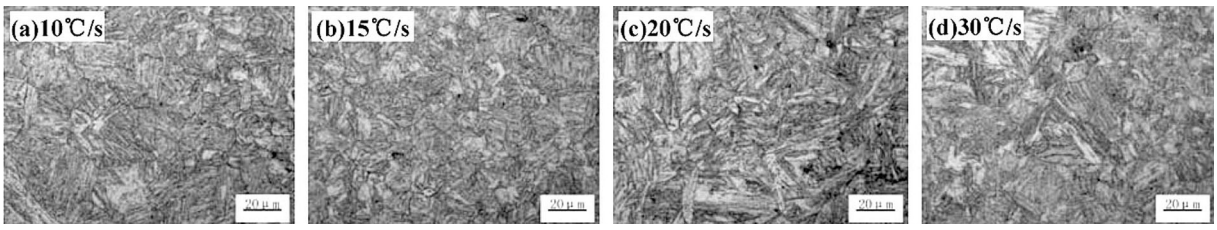
当冷却速度达到10 ℃/s时，开始生成马氏体组织，室温组织为马氏体和贝氏体混合组织。随着冷却速度的增加，马氏体逐渐增多，贝氏体逐渐减少，当冷速达由20 ℃/s时，贝氏体消失，组织全部转变为板条状马氏体，如图4所示。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)　(b)　(c)　(d)

图 3　中冷速下含硼 Q690D 钢的贝氏体类组织



(a)　(b)　(c)　(d)

图 4　高冷速下含硼 Q690D 钢的马氏体类组织

3　结论

(1) 硼的加入，使 Q690D 钢的 Ac_3 和 Ac_1 略有提高，使 Ms 点及 Bs 点有所降低。

(2) 硼的加入，使 Q690D 钢的临界冷速降低，淬透性明显提高。

(3) Q690D 钢中硼元素的加入，对先共析铁素体转变及贝氏体转变均有不同程度的推迟作用，抑制了先共析铁素体的析出，在很宽的冷速范围可以得到完全的贝氏体组织。

参　考　文　献

[1] 刘仲礼，李言祥，陈祥，等. 硼、碳含量对高硼铁基合金组织和性能的影响[J]. 钢铁，2007，46(2)：78－82.

[2] YB/T 5128—1993，钢的连续冷却转变曲线图的测量方法(膨胀法)[S].

[3] 袁辉，李永东，陈伟庆. 低碳含硼钢的开发历史及发展现状[J]. 首钢科技，2005，6(2)：21－24.

[4] 刘金泉，田世永，夏佃秀. 70 kg 级低碳贝氏体钢相变规律研究[J]. 山东冶金，2011，33(6)：33－35.

(上接第 27 页)

减少设备事故率，并且能够规范冷却水泵的操作方法，实现操作方法标准化，提升设备管理工作。

5　结束语

经核算 2 台机组每年可为包钢公司节约 90 余万元用电费用，具有应用推广价值。1#、2#机组在 2011 年、2012 年分别进行技术改进及试验，煤气冷却水泵单泵运行能够保证机组正常运行；而 3#、4#机组于 2014 年 11 月至 2015 年 9 月份至今在使用中。对于国内所使用的三菱机组，煤气冷却系统中均使用两台煤气冷却水泵同时运行的生产方式，包头钢铁集团公司的四套机组是国内首家进行技术改进的机组，改进后进组的运行稳定，能耗降低，此应用适合在其他机组中推广使用。

参　考　文　献

[1] 杨顺虎. 燃气－蒸汽联合循环发电设备及运行[M]. 北京：中国电力出版社. 2003.

[2] 焦树建. 燃气－蒸汽联合循环[M]. 北京：机械工业出版社. 2000.

[3] 吴玉进. 大型联合循环发电机组安装调试关键技术与应用研究[D]. 南京：东南大学，2006.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net