# 高强度型钢轧后控制冷却的研究*

唐丽娟[1], 张凤明[2], 魏轶斌[2]

(1. 上海宝冶集团中冶东方工程技术有限公司, 山东 青岛 266555;
2. 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**: 采用绿色、节能、低成本、资源友好型的轧后控制冷却技术代替微合金添加将成为提高热轧型钢性能的有效手段之一。经热轧后控制冷却的产品金相组织为铁素体+珠光体, 且形态细小、性能均匀, 屈服强度提高约70~100 MPa, 抗拉强度提高约80~150 MPa。文章具体以角钢为例介绍了高强型钢轧后控制冷却的研究思路、方法、实验模拟以及应用实例。结果表明, 试验数据和模拟结果与生产实践吻合, 证明了本文提出的研究方法准确、有效, 可为角钢以及其它热轧型钢控制冷却的研究提供参考。

**关键词**: 型钢; 控制冷却; 强度
**中图分类号**: TG141.1 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2021)05-0062-06
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.05.016

# Research on Controlled Cooling Technology of High-strength Section Steel after Rolling

*Tang Li-juan*[1], *Zhang Feng-ming*[2], *Wei Yi-bin*[2]

(1. *BERIS Engineering and Research Corp. of Shanghai Baoye Group Corp., Ltd., Qingdao* 266555, *Shandong*, *China*;
2. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region*, *China*)

**Abstract**: It will be one of effective means to improve the performances of hot-rolled section steel to replace the microalloy addition with green, energy-saving, low-cost and resource-friendly controlled cooling technology after rolling. The metallographic structure of product with controlled cooling after hot rolling is ferrite + pearlite, the morphology is fine, performance is uniform, yield strength is increased by about 70~100 MPa and tensile strength is increased by about 80~150 MPa. In the paper, the research ideas, methods, experimental simulation and application examples of controlled cooling after rolling for high-strength section steel are introduced by taking angle steel as an example. The results show that the experimental data and simulated results are consistent with the production practices, which proves that the research method proposed in this paper is accurate and effective so that it can provide the reference for researching controlled cooling of angle steel and other hot-rolled section steels.

**Key words**: section steel; controlled cooling; strength.

* **收稿日期**: 2021-08-26
**作者简介**: 唐丽娟(1980-), 女, 内蒙古赤峰市人, 高级工程师, 现从事轧钢工程设计工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

我国热轧型钢行业发展历程大致经历了横列式、国外引进、国产化、大型化、自动化、规模化、绿色化、智能化过程。到目前为止，国内现有型钢生产线设计产能约 9 000 万 t。随着热轧型钢优越性的显现，在高层建筑、超高层建筑、大型场馆、道路桥梁、海洋钻井平台、装配式建筑等越来越多的领域得到大力发展，国家政策也对绿色、节能、环保提出了鼓励和支持，同时对结构用钢的性能也提出更高的要求，逐渐从 Q235、Q345 过渡到以 Q355、Q390、Q420 为主。提高型钢强度的传统手段是添加钒、钛、铌等合金元素，新兴手段是采用热轧后控制冷却，从绿色、节能、成本、可持续发展等角度看，显然后者更具有市场潜力[1]。

热轧后控制冷却手段早在 20 世纪就被提出，进入 21 世纪以来，国内外超快冷技术得到迅速发展。日本建设了所谓的 Super - OLAC( Super On - Line Accelerated Cooling) 新型加速冷却系统，具有可达极限冷却的冷却速率和极高的冷却均匀性[2]。新日铁开发了新一代控制冷却系统 CLC - μ，对原来的 CLC 系统的冷却喷嘴的形式和水量控制方法等方面进行了根本性的改变，大大提高了冷却控制水平[3]。

东北大学开发了一系列的轧后控制冷却系统，统称之为 ADCOS，在中厚板、热连轧、带肋钢筋的生产中均有应用，其针对 H 型研发了超快冷系统，可以对 H 型钢翼缘和腹板进行在线快速冷却[4]。

## 1　轧后控制冷却技术的思路

以小型热轧型钢为主打产品的轧机布置形式多采用全连轧或半连轧，以中型 H 型钢为主打产品的轧机布置形式多采用半连轧，以大型 H 型钢为主打产品的轧机布置形式多采用开坯机加多架次往复轧制。虽然生产不同产品的轧机布置形式不同、轧制周期不同，但终轧出口温度接近，均在 900 ~ 950 ℃ 左右。对于 Q355、Q420 钢种的产品，其组织形态一致，而最终成品的金相组织要求均为细化的铁素体 + 珠光体。

轧后控制冷却技术的基本思路为: 通过试验绘制钢种的连续冷却曲线，即 CCT 曲线; 根据已获得的目标钢种连续冷却曲线制定轧后超快速冷却工艺; 建立超快冷工艺数学模型，模拟不同工艺条件下超快冷工艺; 根据工艺要求设计超快冷系统和设备; 开发轧后快冷控制软件。

## 2　轧后控制冷却技术研究的实例

本文拟以钢种为 Q355B、Q420B 的 10 号—25 号等边角钢为研究对象，介绍具体的热轧后控制冷却的研究方法。

### 2.1　基本条件

产品的规格: 10 号—25 号; 冷却产品钢种: Q355B、Q420B; 轧件出口温度: 950 ℃ 左右; 轧件运行速度: 2.0 ~ 3.5 m/s; 组织性能要求: 角钢轧件终轧后空冷，金相组织为细化的铁素体 + 珠光体，经过快冷后的金相组织要求无马氏体及其它影响产品性能的有害组织。化学成分要求见表 1，力学性能要求见表 2。

**表 1　生产中标准中 Q345B 和 Q420B 化学成分要求**( 质量分数)　　%

| 钢种 | C | Si | Mn | P、S | V | Ni | Cr、Cu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q345B | ≤0.20 | ≤0.50 | ≤1.70 | ≤0.035 | ≤0.15 | ≤0.50 | ≤0.30 |
| Q420B | ≤0.20 | ≤0.50 | ≤1.70 | ≤0.035 | ≤0.20 | ≤0.80 | ≤0.30 |

**表 2　轧件快冷后的力学性能表**

| 钢种 | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 断后伸长率/% | 夏比( V 型) 冲击功( 0 ℃) /J |
|---|---|---|---|---|
| Q345B | ≥365 | 480 ~ 620 | ≥21 | ≥60 |
| Q420B | ≥440 | 530 ~ 670 | ≥20 | ≥50 |

### 2.2　动态 CCT 曲线获得方法

试验材料选用了某大型国有企业生产的 Q355B 和 Q420B 角钢，采用碳硫分析仪和直读光谱仪测定的化学成分，符合试验要求。依据标准

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

YB/T 5127—1993《钢的临界点测定方法(膨胀法)》[5],利用热膨胀法测量Q355B、Q420B钢的相变点,试样尺寸为Φ4 mm×10 mm,试验设备为DIL805A型热膨胀仪。采用Gleeble 1500热模拟试验机,测定试验钢的动态连续冷却转变规律。按照YB/T 5128—1993《钢的连续冷却转变曲线图的测量方法(膨胀法)》[6]标准的要求,将试验结果利用Origin软件作图,绘制出Q355B、Q420B的CCT曲线,如图1、图2所示。

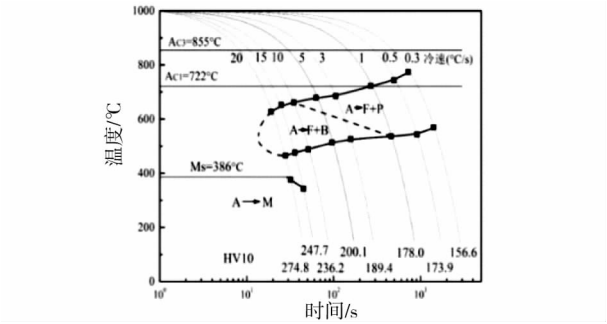



图1 Q355B动态CCT曲线

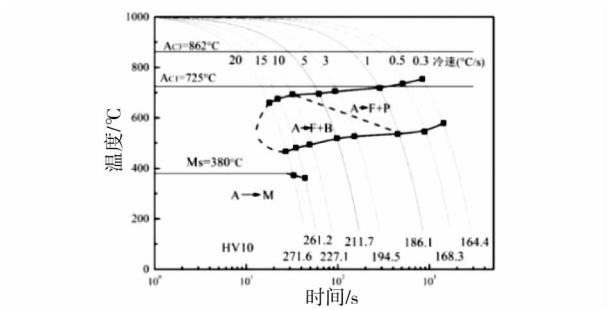



图2 Q420B动态CCT曲线

分析图2,Q420B在0.3~1.0 ℃/s范围内主要发生铁素体珠光体转变,随着冷速增加,铁素体和珠光体相变温度下降,组织也趋于细小均匀;1 ℃/s时开始出现贝氏体,且在1~10 ℃/s范围内随着冷速增加,铁素体相变温度继续下降,贝氏体增多,铁素体和珠光体逐渐减少,铁素体形态也逐渐由多边形变为准多边形或针状;15~20 ℃/s范围内开始发生马氏体转变,组织也以贝氏体和马氏体为主,仅有少量多边形和针状铁素体组织。与Q355B相比,Q420在15~20 ℃/s时马氏体含量有所增加,表明微量V的增加仍然有一定的提高淬透性作用。

### 2.3 轧后控制冷却工艺制定

热模拟试验研究表明Q355B和Q420B钢开始出现贝氏体转变的临界冷速均为1 ℃/s,分别出现了3.4%和3.9%贝氏体;开始出现马氏体转变的临界冷速为15 ℃/s,分别出现了9.9%和13.7%马氏体。

而Q355B和Q420B角钢目标组织为铁素体+珠光体,避免产生马氏体、贝氏体等其它影响产品性能的有害组织。为了获得良好的强韧性匹配,需通过变形及冷却工艺参数的调整,控制相变及组织演变,关键要实现铁素体珠光体组织的精细化和均质化控制,发挥细晶强化作用,在提高钢种屈服强度的同时,还可改善冲击韧性,降低韧脆转变温度。

因此,Q355B和Q420B角钢轧后宜采用分段冷却的控制思路:

第一段:精轧机出口温度至720 ℃,采用快冷或超快冷。

铁素体开始相变前采用快速冷却,减弱终轧变形后的回复和再结晶,将精轧变形后的形变储能遗传至相变过程,进而增大奥氏体有效晶界面积,增强相变驱动力,提高铁素体相变形核率,实现相变组织的精细化和均匀化。试验表明轧后快速冷却可起到与降低终轧温度近似的作用。

第二段:720 ℃至540 ℃,控制关键冷速不高于1 ℃/s。

铁素体珠光体相变温度区间内冷速约1 ℃/s可促进铁素体+珠光体充分相变,且组织均匀细小。如果冷速大于1 ℃/s,会造成奥氏体未能完全转变为铁素体珠光体组织,而在后续冷却过程中部分残留奥氏体发生贝氏体中温转变和马氏体低温转变。

第三段:相变完成后,空冷或缓慢冷却。

在冷床上采用相对较为缓慢的空冷方式,避免相变过程组织应力与冷却过程热应力的叠加,对最终产品的性能和几何外形造成不利影响。

### 2.4 控制冷却介质的研究

冷却介质的选择大致分为三种:水、压缩空气、水+气形成的喷雾。水是强冷却介质,目标产品易淬出马氏体,一般采用间歇热处理,即:喷水冷却→不喷水温度恢复→喷水冷却→不喷水温度恢复,以避免淬出马氏体,工艺复杂。压缩空气是软介质,可获得细小的珠光体组织,不会出现马氏体和贝氏体组织。压缩空气作为热处理介质,因其热流密度小、热处理温度范围窄,更适宜用于静态离线热处理。水+气形成的喷雾为中软介质,可获得细小的珠光体,通过控制介质流量可以很好的避免出现马氏体和贝氏体组织。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

### 2.5　控制冷却技术参数的研究

介质系统设计的最大难点在于介质压力、流量的确定，这与热轧后控制冷却工艺要求的冷却速度有关。常规冷却的速度一般小于 25 ℃/s，根据工艺要求型钢轧后超快冷的冷却速度约为 20 ~ 60 ℃/s。为实现该区间的冷却速度应做到高压力、大流量、大覆盖面积以实现超快冷速度要求。经过多次现场数据收集、分析，根据本项目具体研究角钢的规格及辊道运行速度要求，轧后控制冷却系统的技术参数如下：

(1) 供水系统。冷却系统的供水压力：0.8 ~ 1.5 MPa；总供水量：1 000 ~ 1 800 $m^3$/h。

(2) 供气系统。冷却系统的供气压力：0.5 ~ 0.8 MPa；总供气量：800 ~ 1 200 $m^3$/h。

### 2.6　控制冷却装置的研究

控制冷却装置设计难点在于如何实现冷却的均匀性、准确性和通用性，即如何实现截面方向和沿轧件长度方向上的均匀性控制，如何实现轧件上表面、下表面、圆角三个位置冷却速度的精准性，如何实现从最小规格产品到最大规格产品使用的通用性。经过反复设计、计算最终开发了区间断面叠加法超快冷装置以及组合式喷嘴。

### 2.7　控制冷却数值模拟

以 16 mm 厚度的 16 号等边角钢为研究对象，Q355 角钢为采用 FLUENT 软件对角钢为二维横截面模拟，冷却形式采用间歇脉冲式水、空气快冷，过程不同喷冷方式对温度场变化的影响，以验证模拟结果与实际冷却过程的相符性。

#### 2.7.1　控制冷却过程数值模拟参数设置

(1) 角钢基本信息参数及几何模型。16 号等边角钢示意图如图 3 所示。厚度 16 mm，内角圆角半径为 10 mm，底部圆角半径为 2 mm。

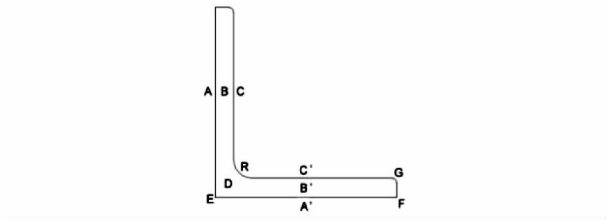



图 3　角钢几何模型及不同部位编号

角钢冷却数值模拟过程比热容及热导率等参数依据 JmatPro6.0 软件计算。

(2) 轧制工艺参数。为验证模拟结果与实践的吻合程度，轧制工艺参数采用某厂实际生产数据，终轧温度为959 ℃，轧制速度为 1.85 m/s。

(3) 冷却线布置及参数

结合试验获得的 Q355B 动态 CCT 曲线以及上文对轧后分段控制冷却的思路，冷却线宜布置在精轧机出口附近，采用第一段超快冷工艺，精轧机出口温度为 720 ℃，冷却速度控制在 15 ~ 20 ℃/s 范围内。冷却线出口设置高压风幕，防止冷却水外溢的同时快速干燥轧件。轧件出冷却线后在自然环境中开始返温，内外温差减小，接近均匀后进入轧后冷却的第二阶段，铁素体珠光体相变温度区，控制关键冷速不大于 1 ℃/s。随后的冷却第三阶段，即到相变完成之后，也应采用空冷。型钢生产线在热轧后设置有宽度较大冷床，轧后控制冷却第二阶段、第三阶段在冷床完成。生产经验表明，轧件在冷床上的自然空冷即可满足冷却速度要求。

轧后超快冷布置在精轧机出口，冷却线布置示意图如图 4 所示。冷却线长度为 20.5 m，冷却方式为喷水冷却和空冷。共计 3 大冷却组，其中 1 大组长 1.6 m，含 1 小组水冷；2 大组长 5.64 m，含 3 小组水冷；3 大组长 5.64 m，含 3 小组水冷。1 大组与 2 大组间距 5.34 m，2 大组与 3 大组间距 2.36 m。

冷却过程 1—7 号喷嘴的开关状态、压力及喷水流量如表 3 所示。

冷却线设置了 3 处温度监测点，位置如图 4 所示，参考温度：监测点 1(冷却线入口温度) 为 959 ℃，监测点 2(冷却线出口温度) 为 674 ℃，监测点 3(返温结束温度) 为 720 ℃。

以第 1 大组为例，A、A′、C、C′等四边交替喷水，A、A′等两个外边喷水的同时，内圆弧 R 喷水，C、C′等两个内边喷水时，内圆弧 R 终止，进而避免干涉，A、A′、C、C′等四边分别喷水 0.21 s，内圆弧 R 喷水 0.42 s。表 4 所示角钢不同位置水冷和空冷的热交换系数。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

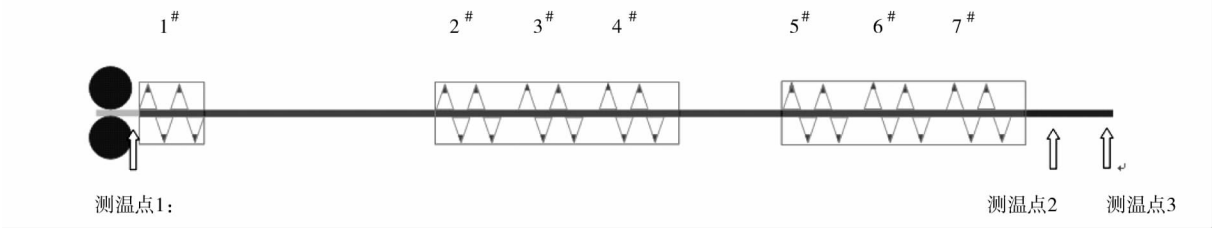



图4 冷却线布置示意图

表3 压力及喷水流量

| 喷嘴开关编号 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 冷却水气动阀 | 上喷嘴 | 开 | 关 | 开 | 开 | 开 | 开 | 开 |
| | 下喷嘴 | 开 | 关 | 开 | 开 | 开 | 开 | 开 |
| | R角喷嘴 | 开 | 关 | 开 | 开 | 开 | | |
| 压力反馈/MPa | 上喷嘴 | 3.98 | 0 | | 4.27 | 3.4 | 2.66 | 1.17 |
| | 下喷嘴 | 5.05 | 0 | 4.88 | | 4.41 | 4.01 | 1.37 |
| 流量反馈/($m^3 \cdot h^{-1}$) | 上喷嘴 | 72.8 | 0 | 65.9 | 64.5 | 56.1 | 55.6 | 35.2 |
| | 下喷嘴 | 34.9 | 0 | 46.6 | 47.2 | 44.9 | | 31.4 |
| 调节阀控制/% | 上喷嘴 | 100 | 0 | 100 | 80 | 60 | 50 | 30 |
| | 下喷嘴 | 100 | 0 | 100 | 80 | 60 | 50 | 30 |

表4 不同部位水冷过程的热交换系数

| 位置编号 | 热交换系数/($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) |
|---|---|
| A、A′、C、C′ | 12 000 |
| R | 12 000 |
| G | 80 |

2.7.2 控制冷却模拟分析

采用FLUENT软件对角钢冷却过程进行数值模拟,选择每次水冷前后时间点截取了角钢横截面温度分布云图,文中仅示意4#水嘴位置水冷后及测温点3处的横截面温度分布云图,分别见图5、图6。

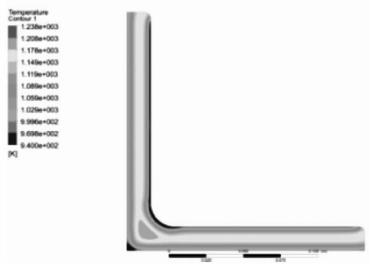


图5 4#水嘴位置水冷后

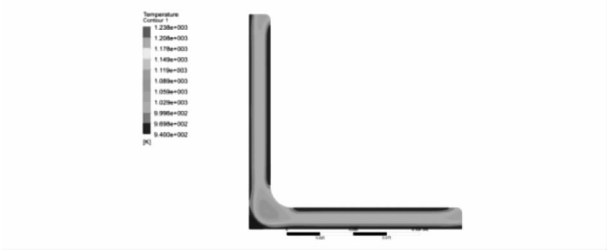


图6 测温点3处

选择如图3角钢A、B、C、E、R特征点,得到不同位置温度变化如图7所示。

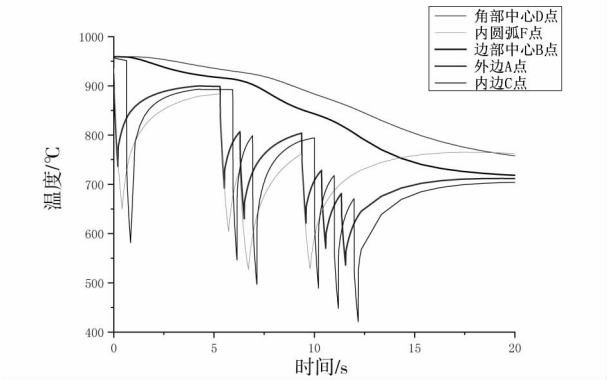



图7 方案二采样点温度随时间变化

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从模拟结果来看:

(1) 第 3 大组出口端外边 A 点温度约 642 ℃,出口约 2 m 处返温至 674 ℃。

(2) 角部顶点 E 在第 6#、7#喷嘴喷水后温度降至 500 ℃以下,可能发生贝氏体相变,因此,实际冷却过程应避免该位置喷水。

(3) 内圆弧 R 点分别在 1#、3#、4#和 5#位置强喷,冷却时间均为 1#、3#、4#和 5#上下喷嘴的 2 倍,但是由于第 6#、7#喷嘴位置没有 R 喷嘴,R 点返温温度会在冷却线出口 12 m 处高于角部中心位置,因此可以考虑在后续模拟过程中在第 6#喷嘴位置增加 R 喷嘴,实际冷却过程应加强该位置喷水。

## 3　角钢轧后控制冷应用实例

某生产线采用轧后控制冷却技术生产屈服强度 460 MPa 以上的高性能电力铁塔角钢。轧后控制冷却装置布置在精轧机出口 2.6 m 处,冷却段总长度 22 m,由 3 段水冷段、2 段空冷段组成,水冷出口恢复段长 55 m。生产 16 号等边角钢,轧件在精轧机出口温度约 950 ℃,运行速度 1.9 m/s,控制冷却装置出口温度显示 650 ℃,返温段结束时温度显示 750 ℃。产品金相组织为铁素体 + 珠光体,且形态细小、性能均匀,屈服强度提高约 70 ~ 100 MPa,抗拉强度提高约 80 ~ 150 MPa。

## 4　结论

(1) 型钢产品断面复杂,在冷却过程中任何不均匀冷却都会造成轧件的不均匀变形,因此型钢轧后冷却的工艺、设备、数学模型以及调整控制思路等的研究对研发者提出了更高的要求。生产实践证明,本文研究的高强度型钢轧后控制冷却试验数据和模拟结果与生产实例数据吻合,研究思路和方法准确、有效,且通用于其它断面型钢,可为角钢以及其它热轧型钢控制冷却的研究提供参考。

(2) 型钢轧后控制冷技术应用于 Q355、Q420 等边角钢,屈服强度提高约 70 ~ 100 MPa,达到了添加微合金提高产品强度的同等效果。型钢轧后控制冷却技术还可以提高产品抗拉强度约 80 ~ 150 MPa。通过合理的热轧后控制冷却工艺可以在提高强度、塑性和韧性的同时,有效降低微合金元素的用量,为实现绿色、节能、环保、资源可持续发展贡献较大。

(3) 型钢轧后控制冷却设置在精轧机出口,在高温区将轧件快速冷却,是短时间内轧件迅速降温的工艺,因此可以大幅降低轧件上冷床的温度,缩短轧件在冷床上的冷却时间,提高生产线效率。

## 参　考　文　献

[1] 徐匡迪. 20 世纪钢铁冶金从技艺走向工程科学[J]. 上海金属,2002,24(1):1.

[2] 小指军夫. 控制轧制控制冷却——改善钢材材质的轧制技术发展[M]. 北京: 冶金工业出版社,2002.

[3] 王国栋. 以超快速冷却为核心的新一代 TMCP 技术[J]. 上海金属,2008.30(2):3.

[4] 付天亮,赵大东,王昭东,等. 中厚板 UFC – ACC 过程控制系统的建立及冷却策略的制定[J]. 轧钢,2009,26(3):1.

[5] YBT 5127—1993,钢的临界点测定方法(膨胀法)[S].

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

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net