

超快速冷却装置的开发 及其在管线钢生产中的应用

田 勇¹, 王昭东¹, 王国栋¹, 马长文²

(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 首钢技术研究院, 北京 100041)

摘 要: 考虑到传统层流冷却装置的冷却能力低、冷却均匀性差, 无法满足中厚板低成本减量化的生产需求, 因此开发出超快速冷却装置。超快速冷却装置的喷嘴与钢板的距离较近, 以一定的角度沿轧制方向将一定压力的水喷射到板面, 将板面残存水与钢板之间形成的气膜吹扫掉, 从而达到钢板和冷却水之间的完全接触, 实现核沸腾, 进而大幅度提高冷却效率和冷却均匀性。将超快速冷却装置应用于国内某宽厚板生产线, 并在此冷却装置上开发出低成本管线钢。与传统层流冷却装置生产的管线钢相比, 采用超快冷工艺可大幅降低管线钢的合金含量并提高板形合格率。

关 键 词: 中厚板; 控制冷却; 超快冷; 管线钢; 合金减量化

中图分类号: TG 142.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2012)08-1141-05

Development of Ultra Fast Cooling Equipment and Its Application to Production of Pipeline Steel

TIAN Yong¹, WANG Zhao-dong¹, WANG Guo-dong¹, MA Chang-wen²

(1. The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100041, China. Corresponding author: TIAN Yong, E-mail: tianyong@ral.neu.edu.cn)

Abstract: Given the low cooling capacity and the poor uniformity of conventional accelerating cooling control (ACC), ultra fast cooling (UFC) equipment was developed. With closer distance between the nozzles of the UFC equipment and the plate, cooling water sprayed with a high pressure at a proper angle along the rolling direction can clear away the vaporous film forming on the plate, thus making the water cover the plate completely and achieving nucleate boiling. Using the UFC equipment, cooling efficiency and uniformity are improved significantly and pipeline steels are developed at a low cost. Compared with the ACC, the UFC can greatly reduce both the alloy content in pipeline steels and the defective rate of plate shape.

Key words: plate; TMCP (thermo mechanical control process); ultra-fast cooling; pipeline steel; reduction in the amount of alloy

TMCP 技术是 20 世纪钢铁业最伟大的成就之一。20 世纪 80 年代, 日本首次成功研制出第一套中厚板在线加速冷却(OLAC)装置并应用于福山厚板厂。20 世纪末 JFE 公司在 OLAC 基础上开发出超级在线加速冷却(Super OLAC)装置, Super OLAC 采用具有一定压力的冷却水冲击钢板表面, 在冷却速率和冷却均匀性方面均有突出

表现^[1]。

国内在 20 世纪 70 年代开展了控制冷却(TMCP)的研究工作并用于生产实践中, 但其研究多针对冷却机理为层流冷却的传统控制冷却装置。2005 年以来, 国内学者致力于基于超快冷(UFC)的新一代 TMCP 技术的研究开发和工程化工作, 其研究成果目前已经成功应用于鞍钢、首

收稿日期: 2012-12-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB630801); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N100307005)。

作者简介: 田 勇(1981-), 男, 河南许昌人, 东北大学讲师, 博士; 王国栋(1942-), 男, 辽宁大连人, 东北大学教授, 博士生导师, 中国工程院院士。

钢、涟钢等国内大中型钢铁企业^[2]。

1 超快冷技术原理

1.1 传统管层流的冷却机理

目前在中厚板生产中常用的冷却装置形式为管层流冷却设备。圆形集管流出的冷却水通过重力的作用到达钢板表面,形成冲击区和残留水自由流动区。根据换热效果,冷却水覆盖区域分为 5 个区域:在集管正下方的单相强制对流区,其他区域由内到外依次为核态沸腾和过渡沸腾区、膜态沸腾强制对流区和小液态聚集区。实验及研究表明,单相强制对流区及集管冷却水以一定速度直接冲击的区域具有很强的换热能力,其他区域的冷却效率远不如该区域,且水流的无序流动使冷却均匀性非常差。因此管层流存在冷却能力低、冷却均匀性差等缺点。由于国内中厚板生产厂的轧后冷却装置多为管层流冷却装置,因此严重制约了高等级品种钢的开发和生产。

1.2 超快冷技术的冷却机理

超快冷设备基于射流冲击换热原理,射流冲击冷却主要依靠冷却介质增压后冲击冷却壁面形成的驻点区换热。超快冷设备采用一定压力的冷却水,以特定角度倾斜喷射至钢板表面,主要作用是除去钢板表面的二次冷却水,并破除钢板表面的蒸汽膜,提高冷却效率,并使钢板沿宽向和纵向均得到均匀冷却,避免出现板形瓢曲等问题。

所谓倾斜射流是指与垂直线具有一定角度的冷却水对高温钢板表面的冲击流动形成冲击射流。冲击射流存在 3 个具有不同特征的区域,分别为自由射流区、滞止流动区(也称驻点区域)和壁面射流区。在自由射流区,水流以较大的速度向前运行;在滞止流动区,射流速度迅速滞止为零,并且急剧地由轴向转为径向,产生很大的压力梯度,参数变化最为激烈,从而使冲击射流表现出与简单的平行剪切流动完全不同的特性。射流到达壁面后,在滞止区压力梯度的驱动下,流体沿壁面向四周流开,形成壁面射流区^[3-4]。

射流冲击换热的特性表现为滞止区和壁面射流区的对流换热。滞止区以滞止点的存在和流线的径向弯曲为特征,直接影响壁面射流区射流的转捩。该区内流体的轴向速度急剧下降,而静压上升,使被冲击表面上的流动边界层和热边界层厚度大大减薄。研究表明,滞止区的流动边界层和热边界层的厚度为 $10\mu\text{m}$ 数量级,存在很强的热/质传递效率,换热强度很大。壁面射流区流体的流动特征为总体流动沿径向向外,局部速度在壁面附

近快速上升到一个最大值,然后在离开壁面较大的距离处下降。壁面射流与周围空气介质之间的剪切所产生的湍流,被输送到传热表面的边界层中,使得壁面射流比平行流动具有更好的传热效果^[5-7]。

2 超快冷装置的开发与应用

2.1 超快速冷却装置的开发

超快冷装置的重点在于确保实现钢板冷却过程中冷却水与高温钢板的高效及均匀换热。为了实现高强度均匀化冷却,在喷嘴的结构设计上需要考虑冷却水冲击速度、冲击面积及冲击重叠区域,使冷却水沿钢板的宽度和长度方向合理分布。冲击速度决定冷却水是否能穿透残留冷却水并打破水膜,因此冷却水具有较高压力;冲击面积决定冷却水是否与高温钢板均匀接触;冲击重叠区域要求冲击点尽量多。因此设计超快冷喷嘴的关键在于:冷却喷嘴出水孔的孔径,出水孔的排布方式、密度及与钢板的夹角。

为了实现钢板上下表面的均匀冷却,要求实现上下冲击区域的对称控制。超快冷装置采用的基本换热形式是射流冲击换热,在钢板表面上射流冲击区域的冷却水的换热能力远大于其他区域的换热能力。如果超快冷的上喷嘴和下喷嘴都处于固定位置,则当钢板厚度规格变化时,射流冲击的冷却水在钢板上下表面形成的冲击换热不可能完全对称;因此,超快冷上喷嘴框架被设计成水平方向相对静止,竖直方向可通过机械丝杠和液压系统进行调整的形式,以满足冲击换热区域对称的需要。

为了实现终冷温度的精确控制,超快冷装置采用精细的冷却单元控制,每个喷嘴均由单独的流量调节阀配以高精度流量计以实现流量的精细控制。

2.2 超快冷装置的现场应用

首秦 4 300 mm 宽厚板生产线原来使用的加速冷却控制(ACC)系统由国外某著名公司设计供货,在首秦公司品种钢的生产过程中发挥了重要作用,但是在冷却一些高等级品种钢时存在冷却能力不足、实际冷却速度不能达到工艺要求、冷后钢板温度均匀性差及冷后板形不良等问题;因此在该生产线增设一套超快冷装置,用于满足日益严格的品种工艺需求。

首秦超快冷装置(ADCOS-PM)安装在 ACC 系统之前。超快冷装置长度为 8 m,冷却水最大水量为 $5\,000\text{ m}^3/\text{h}$,水压 0.5 MPa。超快冷设备主要

由移动框架、提升机构、分流集水管和喷水冷却系统等组成。移动框架用于承载上喷水冷却装置；提升机构用于提升移动框架，由电动升降系统和液压快速提升系统组成。电动升降系统主要由电动机及丝杠升降机组成；液压提升系统由安装在升降机丝杠末端的液压缸实现上框架快提及框架保护等功能。分流集水管的主要作用是将高压冷却水均匀分配到各组冷却喷嘴。喷水冷却系统有两种形式的喷嘴：缝隙喷嘴和高密喷嘴。缝隙喷嘴采用特殊的喷嘴结构设计，在喷嘴出口形成缝隙射流，与钢板运行方向成一定角度喷射至钢板表面，实现钢板的高强度冷却；高密喷嘴采用小喷嘴出流结构，同样与钢板运行方向成一定角度喷射至加热钢板表面，实现钢板的后续冷却。分流集水管与喷水冷却系统的喷嘴之间通过中间管路连接，管路上设置流量调节阀及流量计；各冷却喷嘴的流量可以单独调节，并由计算机进行设定控制，确保达到目标终冷温度及钢板的均匀冷却。

在首秦超快冷装置上进行的冷却实验表明，超快冷装置可达到常规层流冷却装置 2~ 5 倍的冷却速率。图 1 所示为在首秦 UFC 装置和 ACC 装置上测得的不同厚度钢板的冷却速率情况。

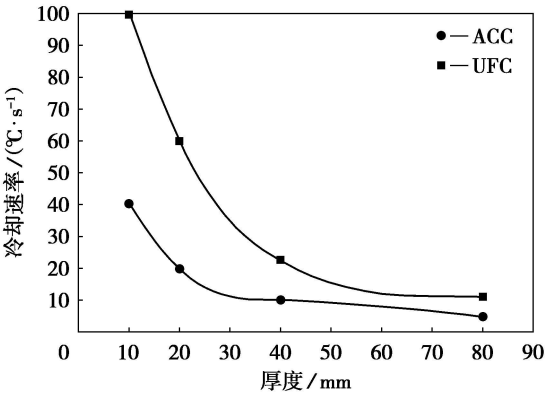


图 1 ACC 与 UFC 的冷却速率比较
Fig. 1 Comparison between the cooling rates of the ACC and the UFC

3 超快冷技术在 X70 生产中的应用

从 2010 年 12 月以来，首秦超快冷设备开始大批量应用于管线钢 (X70, X80) 的生产，目前已通过超快冷设备生产管线钢累计近 30 万 t，板形合格率在 95% 以上，一次检验性能合格率为 97.8%，抽检的 DWTT 落锤性能合格率超过 99%。每小时轧制块数最高可达 31 块。由于采用超快冷工艺后的管线钢强度有较大的富裕量，因此对 X70 和 X80 管线钢实行了合金减量化生产，特别是 X70 管线钢的化学成分中不含有 Ni, Mo, V 等合金元素，经济效益十分明显。其他高强钢的

试生产也取得了良好效果，高强钢生产的瓶颈问题已得到解决。

3.1 采用超快冷后的温度控制

根据喷嘴特点，对首秦超快冷装置进行了适当的分区，对沿轧件纵向的喷嘴配置方式和冷却参数进行了优化。为了清除残水，采用软水封等技术措施，因此可以保证冷却非常均匀，为提高钢板的冷却质量、控制钢材的相变提供了强有力的手段。管线钢的冷却板形问题是国内中厚板生产中普遍存在的一个较难解决的问题，在板形未得到妥善解决的前提下，温度均匀性问题更无从可谈，而采用 ADCOS- PM 装置之后该问题得到了很好的解决。图 2 所示为首秦超快速冷却后的管线钢温度分布。

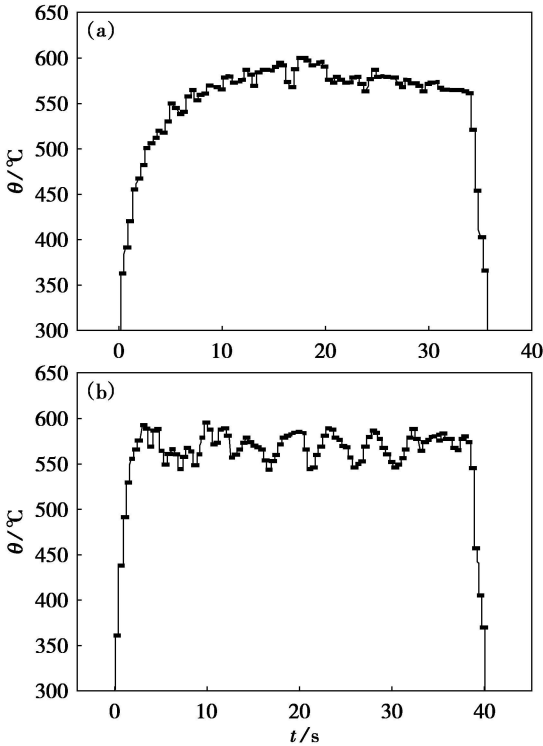


图 2 采用 ACC 和 UFC 冷却后钢板的纵向温度分布
Fig. 2 Longitudinal temperature profiles of the specimens cooled with the ACC and UFC equipment, respectively

(a) —ACC 工艺；(b) —UFC 工艺。

3.2 采用超快冷后的组织性能分析

图 3 给出了 X70 管线钢采用 ACC 和 UFC 装置冷却后得到的金相组织。其中 ACC 的生产工艺为：开冷温度 790 °C，终冷温度 520 °C，冷速 18 °C/s (层流冷却对于该厚度钢板所能达到最大冷速)；超快冷的生产工艺为：开冷温度 790 °C，终冷温度 560 °C，冷速 30 °C/s。从图中可以看出：基于 ACC 生产的 X70 组织为铁素体+ 贝氏体+ 少量珠光体，组织晶粒细小，珠光体细小弥散；基于超快冷生产的 X70 组织为贝氏体+ 针状铁素体

+ 少量 M/A 岛, 整体组织明显比 ACC 生产的要

均匀, 其晶粒度为 13 级。

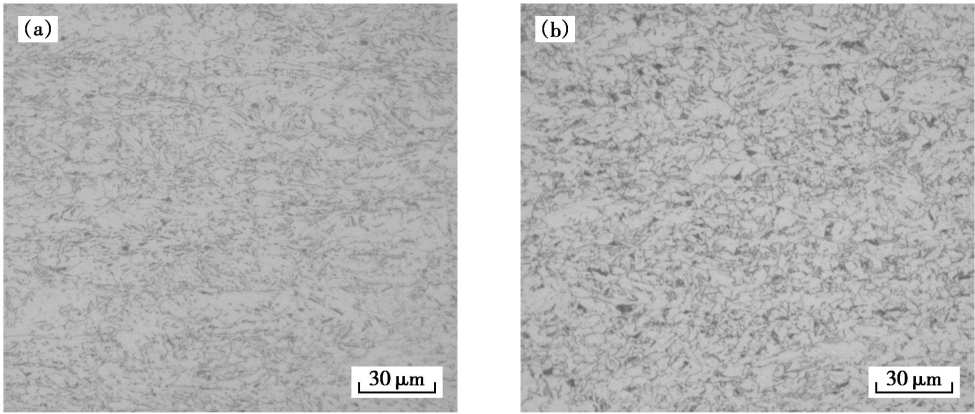


图 3 ACC 和 UFC 工艺生产的 X70 管线钢金相组织
Fig. 3 Micrographs of the specimens cooled with the ACC and UFC equipments, respectively
(a) —ACC 工艺; (b) —UFC 工艺。

考察 X70 管线钢的力学性能: 采用 ACC 工艺, 屈服强度为 540~ 560 MPa, 平均 552 MPa, 抗拉强度为 640~ 660 MPa, 平均 658 MPa; 采用 UFC 工艺, 屈服强度为 540~ 570 MPa, 平均 561 MPa, 抗拉强度为 640~ 660 MPa, 平均 651 MPa。两者相比强度性能相当, 但两者的成分存在较大差别: 采用 ACC 生产的 X70 管线钢含有 Nb, V, Cr, Ni, 而采用 UFC 生产的仅含 Nb, Cr。

从以上分析可以看出, 两种生产工艺下的材

料综合性能相当, 但采用超快冷工艺后, 在降低合金添加量的基础上, 终冷温度比 ACC 工艺提高 40 ℃, 冷后板合格率优良, 且合金成本降低近 300 元/t, 在生产顺行和成本方面, 超快冷具有比较明显的优势。同时, 超快冷具有较高的冷速, 抑制了块状铁素体的形成, 大大增加了贝氏体形成的相变驱动力, 而且在较高过冷度下产生的碳化物粒子也更加细小、均匀(见图 4), 析出粒子的尺寸大部分在 10~ 30 nm 之间, 能谱分析表明析出

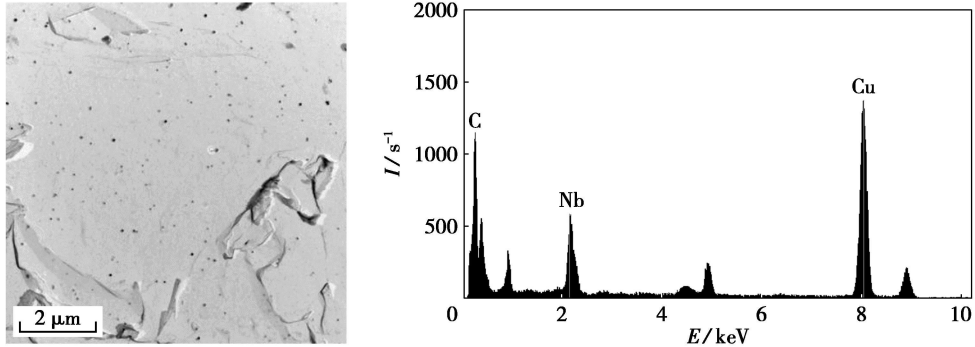


图 4 超快冷工艺生产的 X70 管线钢第二相粒子分布及其能谱分析
Fig. 4 TEM image of the secondary phase particles and their EDS of specimen cooled with the UFC equipment

粒子为 NbC^[8]。因此, 超快冷的使用及由此获得的冷却能力的提高给 X70 管线钢的合金减量化提供了良好的契机^[9]。

4 结 论

- 1) 随着新品种开发及减量化轧制的深入开展, 传统的管层流在冷却能力和冷却均匀性方面已无法满足生产工艺需求。
- 2) 基于压力喷射冷却机理的超快速冷却装置具有冷却能力强、冷却速率可大范围调整、冷却均匀性良好、控制精度高等特点, 可在新一代钢铁材料开发中发挥重要作用。

3) 基于超快冷生产的 X70 管线钢具有生产成本低、性能稳定、生产效率高等优点。

参考文献:

[1] Fujibayashi A, Omata K. JFE Steel's advanced manufacturing technologies for high performance steel plates [J]. JFE Technical Report, 2005(5): 10~ 15.
[2] 王国栋. 新一代控制轧制和控制冷却技术与创新的热轧过程 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(7): 913~ 922. (Wang Guo-dong. New generation TMCP and innovative hot rolling process [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2009, 30(7): 913~ 922.)

(下 转 第 1149 页)

内熔体的温度影响不大. 存在一个很大的铸造温度范围, 能使结晶器内的熔体温度保持在稍低于液相线的某一温度.

参考文献:

[1] Dong J, Zhao Z, Cui J, *et al.* Effect of low-frequency electromagnetic casting on the castability, microstructure, and tensile properties of direct-chill cast A+Zn-Mg-Cu alloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2004, 35(8): 2487– 2494.

[2] Zuo Y, Cui J, Dong J, *et al.* Effects of low frequency electromagnetic field on the as cast microstructures and mechanical properties of superhigh strength aluminum alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 408(1/ 2):176– 181.

[3] Zuo Y B, Nagaumi H, Cui J Z. Study on the sump and temperature field during low frequency electromagnetic casting a superhigh strength A+Zn-Mg-Cu alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 197(1/2/3): 109 – 115.

[4] Getselev Z N. Casting in an electromagnetic mold [J]. *Journal of Metals*, 1971, 10: 38– 43.

[5] Vives C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process, part I: working principle and metallurgical results[J]. *Metallurgical and Materials Transactions: B*, 1989, 20(5): 623– 629.

[6] 左玉波, 崔建忠, 赵志浩, 等. 低频电磁铸造 7050 铝合金

的组织与性能[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2008, 29 (1): 77– 80.

(Zuo Yu-bo, Cui Jian-zhong, Zhao Zhi-hao, *et al.* Structure and properties of 7050 alloy prepared through low frequency electromagnetic casting process[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2008, 29(1): 77– 80.)

[7] 左玉波. 超高强铝合金 DC 铸造组织电磁调控工艺与理论研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2007.

(Zuo Yu-bo. Study on the technology and theory of structure control of superhigh strength aluminum alloys during direct chill casting by application of electromagnetic field [D]. Shenyang: Northeastern University, 2007.)

[8] 韩至成. 电磁冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.

(Han Zhi-cheng. Electromagnetic metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.)

[9] 戴锅生. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.

(Dai Guo-sheng. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.)

[10] 张北江. 低频电磁场作用下铝合金半连续铸造工艺与理论研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2002.

(Zhang Bei-jiang. Study on continuous casting of aluminum alloys under low-frequency electromagnetic field [D]. Shenyang: Northeastern University, 2002.)

[11] Yang C Y, Beckermann C. Equiaxed dendritic solidification with convection, part II: numerical simulations for an A+4wt pct Cu alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 1996, 27: 2765– 2783.

(上接第 1144 页)

[3] Fang R X, Jiang W, Khan J, *et al.* Experimental heat transfer enhancement in single phase liquid microchannel cooling with cross-flow synthetic jet[C] // Proceedings of the International Heat Transfer Conference. Washington D C: ASME, 2010: 1– 9.

[4] Teamah M A, Farahat S. Experimental and numerical heat transfer from impinging of single free liquid jet [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2003, 42(5): 559– 575.

[5] Jiang Z Y, Liu C C, Zhang X X, *et al.* Numerical simulation of flow and heat transfer from slot jets impinging on a cylindrical convex surface[J]. *Journal of Thermal Science*, 2011, 20(5): 460– 466.

[6] Won Y, Wang E N, Goodson K E, *et al.* 3-D visualization of

flow in microscale jet impingement systems[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, 50(3): 325– 331.

[7] Khavari M, Passandideh-Fard M, Mostaghimi J. The impingement of a normal liquid jet on a horizontal surface: a numerical approach[C] // The 20th International Symposium on Transport Phenomena. Victoria B C, 2009: 1– 8.

[8] Deng W, Gao X H, Qin X M, *et al.* Microstructure and properties of an X80 pipeline steel manufactured by untraditional TMCP[J]. *Advanced Science Letters*, 2011, 4 (3): 1088– 1092.

[9] Ishikawa N, Endo S, Kondo J. High performance UOE linepipes[J]. *JFE Technical Report*, 2006(7): 20– 26.