

外冷在铝材铸轧过程中的作用机理

高志, 肖刚, 钟掘

(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 外冷技术是实现铝材超薄快速铸轧的关键技术之一, 它通过在铸轧过程中对铝板和辊套外表面进行强制冷却以达到提高系统的传热能力, 增加铸轧速度, 提高铝材质量的目的. 作者在研究了铸轧过程传热模型和辊-板系统温度场特点的基础上, 分析了外冷板面和辊面对辊套和铝板的温度场及铸轧速度的影响规律. 研究表明: 随着铸轧速度的提高, 外冷板面对提高铸轧速度的影响逐步减少, 而外冷辊面对提高铸轧速度的影响逐步增强. 造成这一现象的原因在于外冷板面和外冷辊面对提高铸轧速度的作用机理不同, 因此, 应将辊面外冷作为外冷技术的发展方向, 通过采用高效外冷介质, 合理设置外冷区间来满足超薄快速铸轧对外冷技术的要求. 本研究对确定铝材铸轧过程中的外冷技术方案, 具有重要的意义.

关键词: 铝材; 铸轧; 外冷

中图分类号: TG332; TK123

文献标识码: A

文章编号: 1005-9792(2001)02-0192-04

铝材连续铸轧技术以其投资少、成本低、能耗小的优势已成为铝加工带坯的主要生产方式. 超薄快速铸轧技术是将现代铸轧技术推向高水平、高效率、短流程和高质量的前沿技术; 实现这一目标的关键是提高铸轧系统的冷却能力, 而外冷技术正是提高铸轧系统冷却能力的重要组成部分. 因此, 研究外冷在铸轧过程中的作用机理, 对于外冷技术的发展和外冷方案的设计都具有十分重要的意义.

1 铸轧过程热传导的基本方程和辊-板系统温度场的特点

在铸轧过程中, 铝液通过铸咀注入两冷却辊之间的楔形区内, 使金属熔体经过铸造和轧制直接生产出不同厚度的带坯^[1]. 如图 1 所示, 在铸轧区内, 铝材凝固和冷却所散发出的热量主要是通过它与冷却辊的接触传递到辊套上, 然后由辊套内部的循环冷却水不断地冷却辊套和带走热量, 以保证铸轧过程的连续进行; 铸轧辊与普通轧辊的作用机理不同, 铸轧辊起水冷结晶器和轧制薄带坯的双重作用^[1].

在铸轧过程中, 温度主要沿着垂直于轧辊轴线方向的平面内传导, 并且对于稳定生产过程而言, 空间任一点的温度场是稳定不变的, 由于辊-板系统以

铸轧板中心对称分布, 因此可采用二维稳态热传导方程进行^[2], 仅对其上半部分进行仿真分析. 其边界条件为:

- a. 铸轧区入口处为等温边界;
- b. 对称中心为绝热边界条件;
- c. 与水、气及辊-板接触界面采用第三类边界条件^[3].

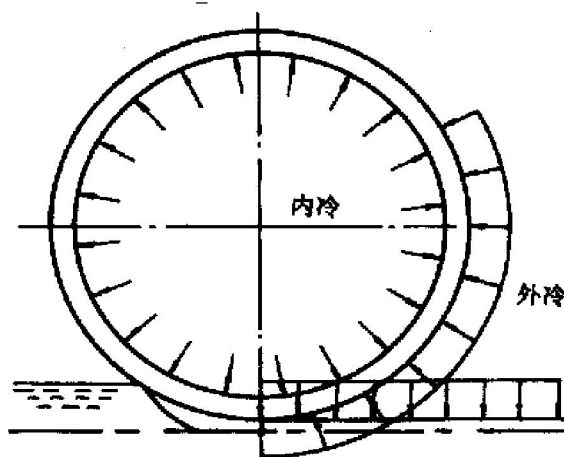


图 1 铝材铸轧的热交换过程

针对研究对象的特点, 采用固定坐标系^[4]. 对于铸轧辊套, 采用极坐标系, 将极坐标原点固定在轧辊中心, 并让 r 轴向与铸轧辊径向一致, φ 为轧辊转角方向; 对于铝带坯, 采用直角坐标系, 其坐标原点

收稿日期: 2000-09-08

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展规划项目(G1999064906)

作者简介: 高志(1963-), 男, 湖南汨罗人, 中南大学高级工程师, 博士研究生, 从事材料加工研究.

置于铸轧区入口的对称中心面上, X 轴沿轧制方向, Y 轴沿厚度方向.

对辊套而言, 无内热源, 无相变, 其二维稳态导热偏微分方程为^[5,6]

$$\alpha \left[\frac{\partial \theta_g}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_g}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial \varphi^2} \right] + \omega \cdot \frac{\partial \theta_g}{\partial \varphi} = 0 \quad (1)$$

对铝带坯而言, 在凝固过程中有相变产生, 将释放出大量的结晶潜热, 在此将结晶潜热作内热源处理^[3], 可得其二维稳态导热偏微分方程为

$$\alpha \left[\frac{\partial \theta_b}{\partial x^2} + \frac{\partial \theta_b}{\partial y^2} \right] + \left[u \frac{\partial \theta_b}{\partial x} + v \frac{\partial \theta_b}{\partial y} \right] + \alpha \frac{q_v}{\lambda} = 0 \quad (2)$$

式中: θ_g 为辊套温度; θ_b 为带坯温度; ω 为辊套旋转角速度; u, v 为控制微元体沿 x, y 方向的速度分量;

α 为轧辊材料的热扩散率 ($\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$); λ 为导热系数; ρ

为密度; c 为比热容; $\omega \frac{\partial \theta_g}{\partial \varphi}$ 和 $u \frac{\partial \theta_b}{\partial x} + v \frac{\partial \theta_b}{\partial y}$ 分别表示

辊套和带坯的质量流迁移引起的温度变化. 导热偏微分方程反映了铸轧过程中的传热特点, 即除了有微观粒子热运动引起的导热^[7]外, 还存在由于辊套(沿 φ 方向)和铝带坯(沿 x, y 方向)的宏观运动所产生的质量流经控制单元界面携带进的热量.

图2和图3分别是以炮钢材料作辊套, 以1 m/min的速度铸轧8 mm厚铝板时, 辊套和铝带坯稳态温度场的变化规律曲线. 由图2可见: 在进入铸轧区28 mm处(铸轧区长70 mm), 轧辊表面温度达到最高点, 为421 °C; 铸轧区出口位置轧辊表面温度为347 °C; 出铸轧区后, 轧辊表面温度逐步降低; 在进入铸轧区前8 mm处, 轧辊表面温度达到最低点, 为45 °C; 随之表面温度受铸轧区高温的影响而上升. 在与冷却水接触的辊套内表面, 最高温度为31.5 °C, 平均温度为27 °C, 与冷却水温度相差仅7 °C.

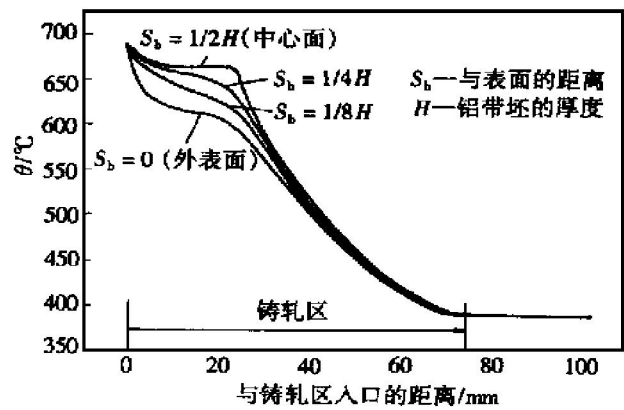


图3 铝带坯温度场的变化规律

由图3可见, 在铸轧区内, 由于结晶潜热的释放, 铝带坯内各层温度非线性变化, 存在着一个温度平台, 在铝带坯中心层, 这种现象更加明显; 通过观测各层温度降低到液相线温度($\theta_L = 660$ °C)和固相线温度($\theta_S = 640$ °C)的位置, 就可得到铸轧区内各层在液态区、过渡区和固态区的长度, 从而反映出铝材在铸轧区的凝固和结晶区间.

2 外冷对辊-板系统温度场的影响规律

当铸轧速度提高以后, 系统热交换量随之增加. 为了突破常规铸轧技术的限制, 实现铝材的超薄快速铸轧, 开展了对铝材铸轧过程中外冷技术的研究, 即通过增加对出口板面和辊面的外部强制冷却来带走热量, 提高系统的冷却能力.

从外冷效果考虑, 外冷区间的起始位置应靠近铸轧区出口, 因此, 在外冷区间设置时均从铸轧区出口位置开始, 顺辊板的运动方向延伸1 m; 外冷界面对流换热系数为5 000 W/(m²·K)^[7].

2.1 外冷板面对辊-板系统温度场的影响

在常规铸轧条件下, 外冷板面对轧辊和铝板温度场的影响如图4和图5所示.

将图4与图2进行比较可知: 外冷板面时, 轧辊表面最高点温度降低0.22 °C; 铸轧区出口位置温度降低22.61 °C; 在进入铸轧区前8 mm处, 轧辊表面温度达到最低点, 为42 °C, 降低0.5 °C. 由此可见, 外冷板面对轧辊在铸轧区出口位置的温度影响较大, 其余部位均影响不大.

比较图5与图3发现, 外冷板面对铝板温度场有2个明显的影响:

- a. 铝板在铸轧区出口位置的温度显著降低, 从

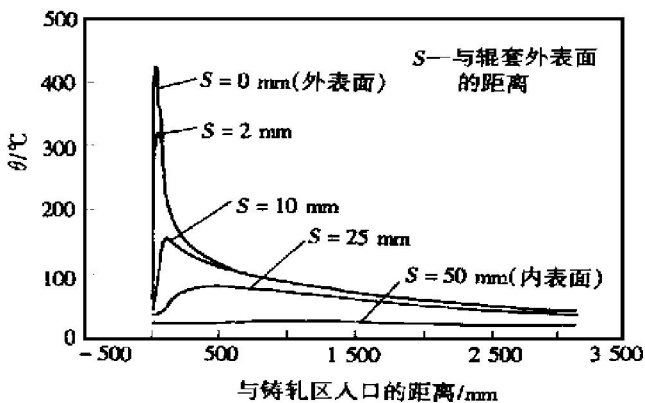


图2 辊套温度场的变化规律

400 °C 降至 297 °C, 降低 103 °C;

b. 铝板在铸轧区外的温度快速下降, 在离开铸轧区出口 30 mm 处, 铝板温度已降至 55 °C.

比较图 7 与图 3 可知: 外冷辊面时, 铝板在铸轧区出口部分温度有所降低, 在出口位置, 从 400 °C 降至 385 °C, 降低 15 °C; 其余发生相应变化.

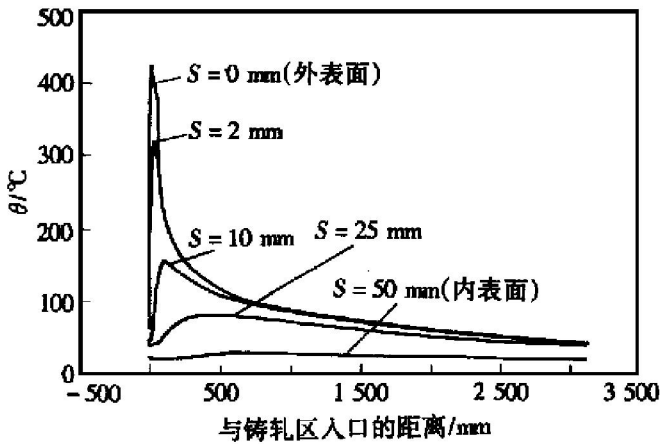


图 4 常规铸轧条件下外冷板面对辊温温度场的影响

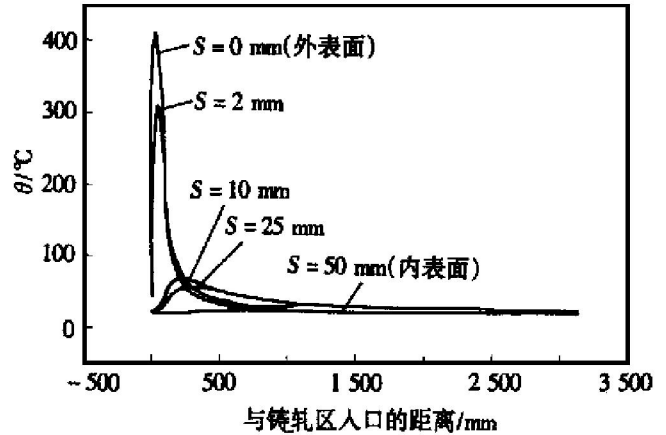


图 6 常规铸轧条件下外冷辊面对辊温温度场的影响

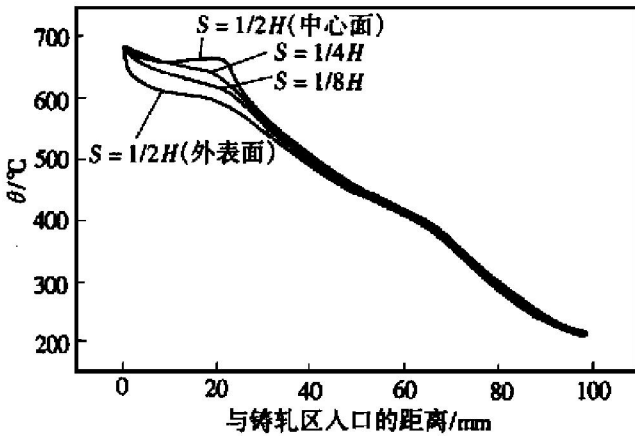


图 5 常规铸轧条件下外冷板面对铝带坯温度场的影响

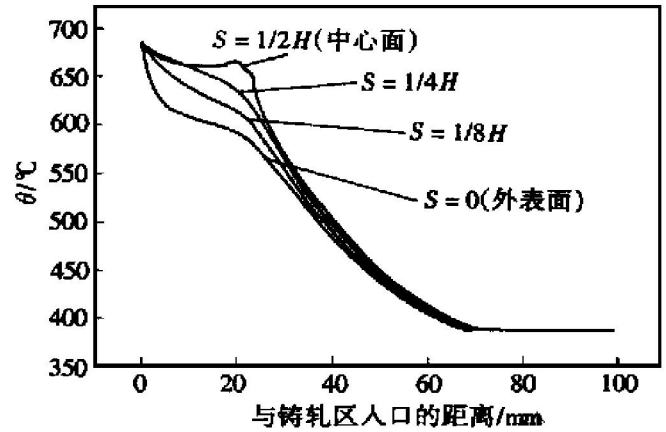


图 7 常规铸轧条件下外冷辊面对铝带坯温度场的影响

2.2 外冷辊面对辊-板系统温度场的影响

图 6 和图 7 分别反映了铸轧 8 mm 铝板时, 外冷辊面对辊套和铝板表面温度场的影响规律.

由图 6 与图 2 可见: 轧辊表面最高点温度降低 11.1 °C; 铸轧区出口位置温度降低 15 °C; 在外冷结束位置, 轧辊表面温度达到最低点, 为 20.11 °C, 降低 22.5 °C; 随后由于内表面的温度向外发散, 表面温度略有回升, 达到 20.87 °C, 在距铸轧区入口 8 mm 处温度回落至 20.65 °C, 后受铸轧区高温的影响而上升.

3 外冷对提高铝材铸轧速度的影响规律

表 1 列出了各种铸轧条件下, 板厚与铸轧速度的相互关系, 以及外冷板面和辊面对提高铸轧速度的影响规律. 可见, 在无外冷的铸轧条件下, 随着板厚的减小, 铸轧速度不断增大, 当板厚从 8 mm 减小至 2 mm 时, 铸轧速度可从 1 m/min 提高到 7.32 m/min.

由此可见: 在上述各种铸轧条件下, 外冷都会使

表 1 外冷对提高铝材铸轧速度的影响

	板厚/mm						
	8	7	6	5	4	3	2
无外冷时铸轧速度/(m·min ⁻¹)	1.00	1.24	1.57	2.07	2.85	4.20	7.20
外冷板面	铸轧速度/(m·min ⁻¹)	1.17	1.39	1.71	2.20	2.97	4.32
	增速相对值/%	17.00	12.00	8.80	6.00	4.20	2.86
外冷辊面	铸轧速度/(m·min ⁻¹)	1.10	1.39	1.80	2.40	3.38	5.32
	增速相对值/%	10.00	12.10	14.50	16.00	18.60	26.70

铸轧速度提高,但外冷板面与外冷辊面的影响效果与铸轧速度的关系完全相反;外冷板面时,在低速情况下对提高铸轧速度的影响比高速情况的大;外冷辊面时,在高速情况下提高铸轧速度的效果比低速情况时的效果更为显著.这是由于外冷板面时,主要是通过铝板从铸轧区中帶出热量来提高铸轧速度,板的运动速度与外冷对铸轧区产生影响的传递速度方向相反,二者之间存在速度竞争,即当板的运动速度增大时,冷却板面对铸轧区内温度场和铸轧速度的影响大大减小;外冷辊面时,主要是通过降低轧辊在铸轧区的入口温度,增大板、辊在铸轧界面上的温度差以传导出更多热量来提高铸轧速度的,板的运动速度越大,轧辊从铸轧区带出的热量越多,轧辊在铸轧区外的表面温度和入口温度升高,从而使外冷效果增强.因此,当铸轧速度增大时,冷却辊面对提高铸轧速度产生的影响也增大.

4 结 论

a. 外冷板面的仿真结果表明:外冷板面对提高铸轧速度的影响随铸轧速度的增加而下降;铸轧8 mm板时,可将速度提高17%;而铸轧2 mm板时,仅将速度提高1.38%.

b. 外冷辊面的仿真结果表明,外冷辊面对提高铸轧速度的影响随铸轧速度的增加而增大;铸轧8 mm板时,可将铸轧速度提高11%;而铸轧2 mm板时,可将铸轧速度提高32.8%.

c. 在超薄快速铸轧的外冷环境设计中,应将辊面外冷作为外冷技术的主要研究方向,开发高效外冷介质,合理设置外冷区间,从而较大幅度地降低轧辊在铸轧区入口位置的温度,提高铝材的铸轧速度.

参考文献:

- [1] 李晓谦,黄晓林.铝带坯连续铸轧变形的有限元分析[J].中南工业大学学报,1998,29(4):374-377.
- [2] Karwe M V, Jaluria Y. Numerical simulation of thermal transport associated with a continuously moving flat sheet in materials processing[J]. Transaction of the ASME, 1991, 113: 612-619.
- [3] 李晓谦.导热锥的传热分析[J].中南工业大学学报,1996,27(1):35-39.
- [4] 梅 焱,李 洪,刘 新.铝电解槽垂直平板肋的传热模型[J].中南工业大学学报,1996,27(1):82-85.
- [5] 刘高典.温度场的数值模拟[M].重庆:重庆大学出版社,1990.
- [6] [美]因克罗普拉 F P.传热基础[M].北京:宇航出版社,1985.
- [7] Mcwaid T, Marschall E. Thermal contact conductance of spherical rough metal[J]. Transaction of ASME, 1997, 119: 684-690.
- [8] Quintana D L, Amitay M, Ortega A. Heat transfer in the forced laminar wall jet[J]. Transaction of ASME, 1997, 119: 543-550.

The mechanism research of external cooling in aluminum cast-rolling process

GAO Zhi, XIAO Gang, ZHONG Jue

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: External cooling technology is one of the key technologies to realize fast cast-rolling process of aluminum, i. e. using compulsive cooling on the outside surface of plate and rollers to attain the aim of improving the cooling ability of system, increasing cast-rolling speed, enhancing aluminum plate quality. This paper analyzed the influence of external cooling surfaces of the board and the roller on the temperature field of the roller and the board as well as cast-rolling speed, based on the researching heat transfer model of cast-rolling process and the characteristics of roll-plate system temperature field. It is shown that, with the increase of cast-rolling speed, the influence of cooling board surface on increasing cast-rolling speed is gradually decreasing, while the influence of cooling roller surface on increasing cast-rolling speed is gradually increasing. The reason for this phenomenon lies in the different mechanisms for improving cast-rolling speed of external cooling plate surface and roll surface. Therefore, external cooling of rollers surface should be regarded as the developing direction of external cooling technology; through applying high efficiency external cooling media and rationally setting up external cooling area, the requirement of fast cast-rolling process for the external cooling technology might be satisfied. The research is very important in working out external cooling technology scheme.

Key words: aluminum; cast-rolling; external cold