

热连轧粗轧辊磨损的有限元数值模拟和工艺优化

李小龙¹ 周立新² 周敦世¹ 冯亮¹

(大冶特殊钢股份有限公司 1 中棒线项目部; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001)

摘要 针对轧钢厂 GCr15 轴承钢 240 mm × 240 mm 方坯粗轧阶段轧辊磨损较严重的情况, 采用 Archard 磨损数学模型模拟分析了轧件压下量、轧辊硬度、热传导系数及摩擦因子在一道次成形后对轧辊磨损规律的影响。模拟结果表明, 轧辊硬度越高, 轧辊抗磨损能力越强; 热传导系数对轧辊磨损的影响较小; 当摩擦因子 $f > 0.25$ 时, 其摩擦因子对轧辊磨损量变化明显; 当轧件压下量在 $\Delta h < 50$ mm 时, 轧件压下量对轧辊的磨损量影响显著。根据所得结果, 结合现场轧制工艺和轧辊材质, 将使用的球墨铸铁 I 轧辊 [抗拉强度 ≥ 400 MPa, 硬度 HRC 值 40, 热传导系数 $18 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$, 摩擦因子 0.3] 改成球墨铸铁 II 轧辊 [抗拉强度 ≥ 500 MPa, 硬度 HRC 值 45, 热传导系数 $17 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$, 摩擦因子 0.2], 并将压下量由 70 mm 降至 50 mm, 使轧辊单槽过钢量由优化前 10 000 t 提高至优化后的 18 000 ~ 20 000 t。

关键词 GCr15 钢 240 mm × 240 mm 连铸坯 粗轧辊 磨损 数值模拟 工艺优化

Finite Element Simulation on Wearing of Roll for Rough Mill of Hot Continuous Rolling Mill and Process Optimization

Li Xiaolong¹, Zhou Lixin², Zhou Dunshi¹ and Feng Liang¹

(1 Project Department of Medium Size Steel Bar, 2 Hubei Province Key Laboratory of High Quality Special Steel, Daye Special Steel Co Ltd, Huangshi 435001)

Abstract According to the status of serious wearing of rough mill roller during 240 mm × 240 mm bloom of bearing steel GCr15 at rolling mill, the effect of stock reduction amount, roll hardness, thermal conductivity and friction factor at a time of forming pass on roll wearing rule has been simulated and analyzed by using Archard wear mathematical model. The simulated results show that the higher the hardness of roll, the stronger the roll wear resistance; the effect of thermal conductivity on wearing of roll is minor; as friction factor $f > 0.25$, the effect of friction factor on change of wearing of roll is obvious; as stock reduction amount $\Delta h < 50$ mm, the effect of stock reduction amount on wearing of roll is also obvious. Based on obtained results, combined with rolling process in situ and material of roll, with the measures including modifying the used spheroidal graphite I roll [tensile strength ≥ 400 MPa, HRC hardness 40, thermal conductivity $18 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ and friction factor $f = 0.3$] to spheroidal graphite II roll [tensile strength ≥ 500 MPa, HRC hardness 45, thermal conductivity $17 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ and friction factor $f = 0.2$], and decreasing the reduction amount from 70 mm to 50 mm, the rolling steel amount by single groove of roll increases from 10 000 t before optimization to 18 000 ~ 20 000 t after optimization.

Material Index GCr15 Steel, 240 mm × 240 mm Casting Bloom, Rough Mill Roller, Wearing, Numerical Simulation, Process Optimization

轧辊是轧钢厂生产中的重要备品备件,同时也是保证轧件质量的重要工具^[1-2]。生产实践证明,轧辊磨损不仅破坏轧辊辊面形状和恶化辊面质量,而且给轧件的产品质量控制也带来了诸多的困难^[3-6]。因此对轧辊磨损规律进行研究与分析,对于控制轧件的尺寸精度、几何形状和表面质量;提高轧辊利用效率、延长轧辊使用寿命有着非常重要的经济价值和社会效益。本文针对轧钢厂在热连轧过程中,粗轧阶段轧辊磨损较严重的情况,采用有限元数值模拟方法对影响轧辊磨损的规律进行了分析,研究了轧件压下量,轧辊硬度、热传导系数及摩擦因子对轧辊磨损的规律影响。

1 有限元模型建立

轧钢厂粗轧阶段的轧辊材质为高镍铬钼无限冷硬球墨合金铸铁 I, 初始温度为 20 °C, 轧辊工作部分直径 785 mm, 长 760 mm。

钢坯大多数为连铸坯, 连铸坯尺寸 (mm) 为 240 × 240 × 6 000, 加热温度在 1 150 ~ 1 250 °C, 粗轧温度 1 150 °C。本文钢坯材质采用 GCr15 轴承钢, 其材料的化学成分与热物理参数如表 1 和表 2。

有限元模型中的边界条件主要包括速度边界条

表 1 GCr15 轴承钢棒材的化学成分 / %
Table 1 Analysis of bar product of bearing steel GCr15 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	Al
0.98	0.54	0.34	0.014	0.005	1.49	0.06	0.10	0.01	0.004 4	0.021

表 2 GCr15 轴承钢棒材的热物理参数

Table 2 Thermal physical parameters of bar product of bearing steel GCr15 / %

温度/°C	密度/(kg · m ⁻³)	比热容/[J · (kg · K) ⁻¹]
45	7 810	553
525	7 810	787
981	7 810	729

件、摩擦边界条件和热边界条件。对于热边界条件，取环境温度为 20 °C，轴承钢的辐射率为 0.7，轧件与轧辊的热交换系数为 15 ~ 20 kW/(m² · °C)，轧件与空气的热交换系数为 0.2 ~ 0.5 kW/(m² · °C)。摩擦模型采用剪切摩擦模型，摩擦因子为 0.15 ~ 0.6。速度边界条件为轧件入口速度 220 mm/s。轧辊磨损模型采用 Archard 磨损数学模型^[7] 预测轧辊在粗轧一道次成形后对轧辊磨损规律的影响，其数学表达式为：

$$w = \int K \frac{P^a v^b}{H^c} dt \quad (1)$$

式中： w - 磨损深度； P - 轧辊表面正压力； v - 滑动速度； a, b, c - 标准常数； K - 与材料相关的常数； H - 轧辊硬度(HRC)。

影响轧辊磨损规律的因素有轧件压下量 Δh ：20, 30, 40, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 mm；轧辊 HRC 值：35, 40, 45, 50, 55, 60；热传导系数 λ ：15, 16, 17, 18, 19, 20 kW/(m² · °C)；摩擦因子 f ：0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6。

2 模拟结果分析

2.1 压下量对轧辊磨损量的影响

图 1 为轧件不同压下量对轧辊磨损量的影响分布情况。从图 1 中明显可知，当轧件压下量 $\Delta h = 20$ mm 时，一道次成形后轧辊的最大磨损量为 0.000 375 mm；当轧件压下量 $\Delta h = 30$ mm 时，轧辊的最大磨损量为 0.000 537 mm。

然而当轧件压下量 $\Delta h = 55$ mm 时，则轧辊的最大磨损量迅速增大，磨损量达到 0.000 942 mm；其轧辊磨损量比 $\Delta h = 20$ mm 时磨损量增加了近 3 倍。一般而言，随着轧件压下量的增大，轧辊的最大磨损量也随之增加。因此，合理确定轧件压下量对于减少轧辊的最大磨损量具有重要意义。图 2(a) 所示为轧件的压下量对轧辊最大磨损量的影响关系。从图 2(a) 中可见，在压下量 $\Delta h < 50$ mm 时，轧辊的最

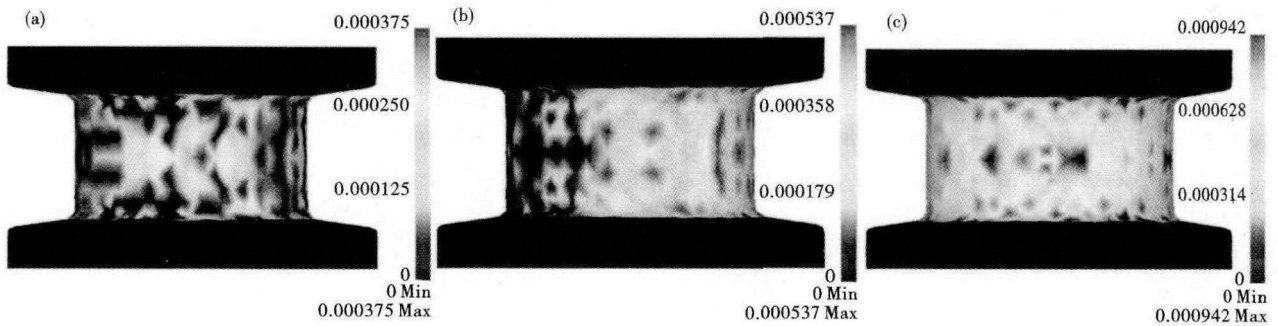


图 1 压下量 Δh - (a)20 mm, (b)30 mm 和 (c)50 mm 对轧辊磨损量分布的影响

Fig. 1 Effect of reduction amount Δh - (a) 20 mm, (b) 30 mm and (c) 50 mm on distribution of wearing amount of roller

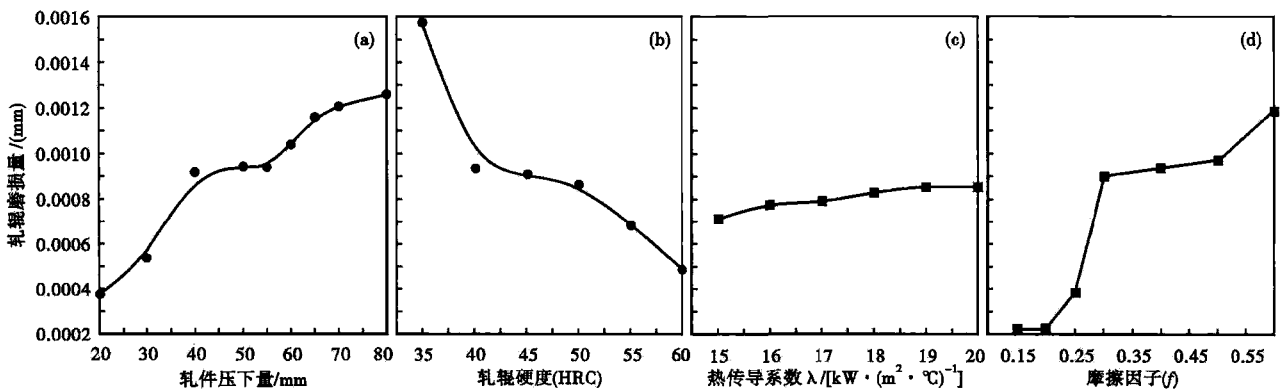


图 2 压下量(a), 轧辊硬度(b), 热传导系数(c)和摩擦因子f(d)对轧辊最大磨损量的影响

Fig. 2 Effect of reduction amount (a), roller hardness (b), thermal conductivity (c) and friction factor f (d) on max wearing amount of roller

大磨损量增加幅度大,而在压下量 $\Delta h > 50$ mm时,轧辊的最大磨损量增加较平缓。

2.2 轧辊硬度对磨损量的影响

从整体来讲,轧辊硬度越高,抗磨损的能力就越强。图3(a₁, b₁)所示为不同轧辊硬度情况下对轧辊最大磨损量的影响。在轧辊硬度为HRC35时,其轧辊最大磨损量为0.001 57 mm;然而,随着轧辊硬度的提高,当轧辊硬度为HRC50时,轧辊的最大磨损量为0.000 867 mm,其轧辊抗磨损能力提高近2倍。通常情况下,轧辊的硬度越高,其轧辊材料的塑性与韧性较低,因此选择一个合适的轧辊硬度对于提高轧辊耐磨损能力具有关键作用。图2(b)为不同轧辊硬度与最大磨损量的影响关系。从图2(b)中可知,随着轧辊硬度的提高,其抗耐磨损能力不断增强。

2.3 热传导系数对磨损量的影响

图3(a₂, b₂)为热传导系数对磨损量的影响。从图3(a₂, b₂)中可知,当轧件与轧辊的热传导系数为 $\lambda = 15$ kW/(m²·°C)时,其轧辊最大磨损量为0.000 771 mm;当轧件与轧辊的热传导系数为 $\lambda = 17$ kW/(m²·°C)时,其轧辊最大磨损量为0.000 824 mm;从图3(a₂, b₂)中发现,热传导系数对轧辊最大磨损量的影响变化比较缓慢。图2(c)为不同热传导系数对磨损量的影响关系。

2.4 摩擦因子对磨损量的影响

表面光洁度高的轧辊不仅能减少轧件与轧辊的摩擦,而且也有利于轧件保持表面质量,提高轧辊的使用寿命。然而,在轧辊的加工和修复过程中,由于各种原因导致轧辊表面光洁度不高,严重影响轧件表面质量和轧辊使用寿命。图3(a₃, b₃)为在不同摩擦因子情况下的轧辊磨损量情况,当摩擦因子为0.2时,轧辊的最大磨损量为0.000 228 mm;然而当摩擦因子为0.5时,其轧辊最大磨损量为0.000 979 mm,其轧辊最大磨损量迅速增大了4倍多。

图2(d)为不同摩擦因子与轧辊磨损量的关系。

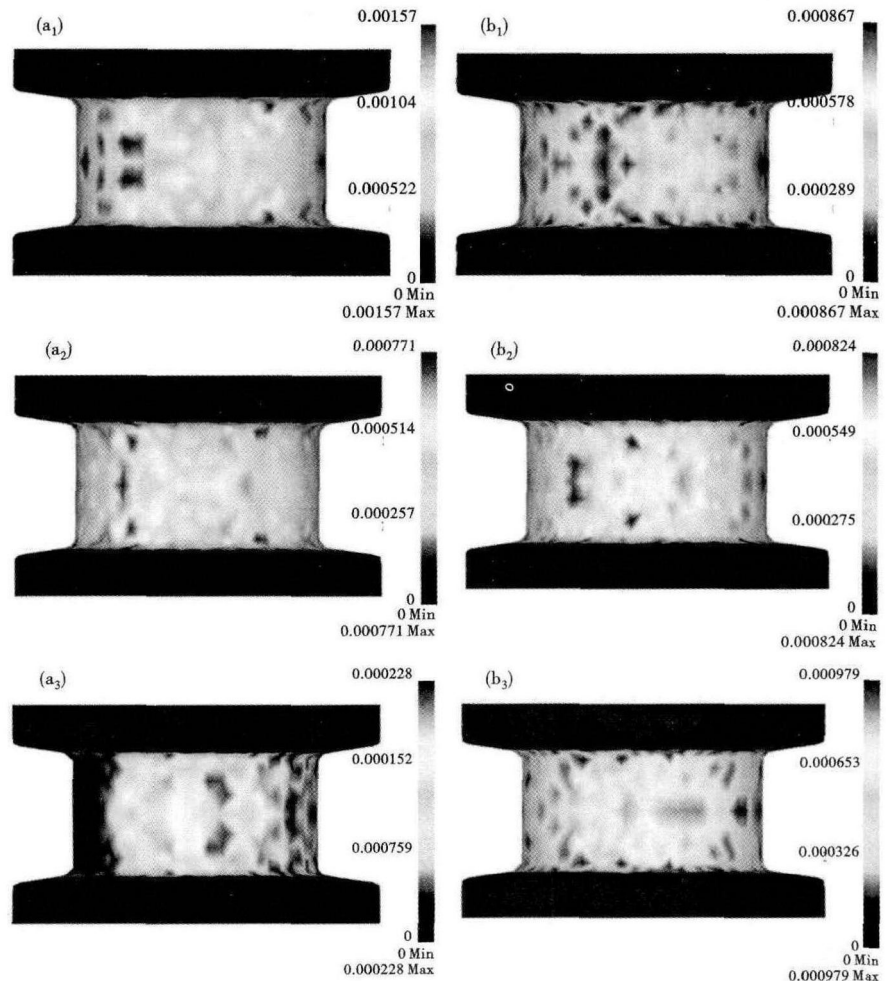


图3 轧辊硬度对(a₁)HRC35,(b₁)HRC50;热传导系数 λ (a₂)15,(b₂)17和摩擦因子 f (a₃)0.2,(b₃)0.5轧辊磨损量分布的影响

Fig.3 Effect of roller hardness (a₁) HRC35 and (b₁) HRC50, thermal conductivity λ (a₂) 15 and (b₂) 17, and friction factor f (a₃) 0.2 and (b₃) 0.5 on distribution of wearing amount of roller

从图2(d)中可见,当 $f < 0.25$ 时,轧辊磨损量的曲线变化较缓慢,然而当 $f > 0.25$ 时,轧辊磨损量的曲线急剧增加。因此,在轧辊加工与修复过程中,必须保证轧辊有良好的表面光洁度,以防轧辊磨损量迅速增加。

3 轧辊磨损量的工艺优化

通过分析影响轧辊磨损量的规律可以发现,导致轧辊磨损量的主要因素有轧件压下量、轧辊硬度、轧件与轧辊的热传导系数以及轧件与轧辊的相互摩擦。为此,根据影响轧辊磨损量的因素,结合现场轧制工艺参数与轧辊材质的实际情况,在原来的工艺基础上优化了轧辊磨损量。表3为优化前与优化后轧辊磨损量的比较。

从表3中明显看出,通过优化轧制工艺参数与

表 3 工艺优化前后的轧辊技术参数
 Table 3 Technical parameters of roller before and after process optimization

工艺	材质	金相组织	辊身抗拉强度/MPa	压下量/mm	辊身硬度(HRC)	热传导系数/[kW·(m ² ·°C) ⁻¹]	摩擦因子	单槽过钢量/t
优化前	无限冷硬球墨合金铸铁 I	珠光体	≥400	70	40	18	0.3	10 000
优化后	无限冷硬球墨合金铸铁 II	珠光体	≥500	50	45	17	0.2	18 000 ~ 20 000

轧辊材质后,其轧辊的单槽过钢量由优化前的 10 000 t 增加到优化后的 18 000 ~ 20 000 t,轧辊使用寿命提高近 1 倍,较大地提高了轧辊利用效率。

4 结论

(1) 轧件压下量越高,其对轧辊最大磨损量越严重。尤其在压下量 $\Delta h < 50$ mm 时,轧辊的最大磨损量增加幅度大,因此合理确定轧件压下量对于减少轧辊的最大磨损量是行之有效措施之一。

(2) 轧辊硬度越高,其抗磨损的能力就越强。因此选用强度较高,而且韧性较好的轧辊材质是减少轧辊磨损的重要手段。

(3) 在轧辊磨损量的因素中,热传导系数对轧辊的最大磨损量影响较小。但是为了尽量减小热传导系数对轧辊磨损量影响,其尽量选择轧件与轧辊合适的热传导系数。

(4) 轧辊本身光洁度对轧辊的最大磨损量有重要影响,当摩擦因子 $f > 0.25$ 时,轧辊的最大磨损量迅速增大。因此,在轧辊加工与使用过程中,保持轧辊良好的光洁度是减少轧辊最大磨损量,提高轧辊使用寿命的关键。

(5) 通过综合考虑影响轧辊磨损量的主要因

素,优化了轧制过程中的工艺参数,使其轧辊利用效率得到较大提高,其优化后的轧辊使用寿命增加了近 1 倍。

参考文献

[1] 符寒光. 耐磨铸造高速钢轧辊的研究[J]. 中国铝业, 2000, 24(6): 30-34.
 [2] 孔祥伟, 史静, 徐建忠, 等. 热带钢轧机轧辊磨损预测[J]. 东北大学(自然科学版), 2002, 23(8): 790-792.
 [3] 廖乾初, 崔佩楠. 研究热轧轧辊磨损过程的模拟试验及其扫描电镜原位观察技术[J]. 钢铁, 1990, 25(9): 46-50.
 [4] 孙林, 张清东, 陈先霖, 等. 2800 四辊轧机工作辊磨损模型研究[J]. 冶金设备, 2001(3): 17-19.
 [5] 何安瑞, 张清东. 热轧工作辊磨损模型的遗传算法[J]. 钢铁, 2000, 35(2): 56-69.
 [6] 陈连生, 连家创. 热带钢轧机轧辊磨损研究[J]. 钢铁, 2001, 36(1): 66-69.
 [7] 周杰, 赵军, 安治国. 热挤压模磨损规律及磨损对模具寿命的影响[J]. 中国机械工程, 2007, 18(17): 2112-2115.

李小龙(1983-),男,硕士研究生(南昌大学),工程师,轧钢工艺技术和材料加工计算机数值模拟。
 E-mail:lixiaolong0520@163.com

收稿日期:2014-10-12

下 期 要 目

高速铁路车轴用 25CrMoVN_i 超低氧钢 RH 精炼过程非金属夹杂物的行为 魏鹏远等
 响应曲面法分析和优化铁水 KR 法脱硫工艺 王震等
 高碳铬轴承钢的成分设计和热处理工艺的研究进展 张国宏等
 天津钢管公司 RH-WPB 水冷顶枪喷粉系统的应用与展望 曹海玲等
 CM690 锚链钢发纹缺陷形成分析和工艺改善 马建超等
 电渣重熔锭的直径和压缩比对 M2 高速钢碳化物不均度的影响 邵青立等
 V 含量对高氮 20MnSi 钢自然时效性能的影响 杨吉春等
 冷拔 60Si2MnA 弹簧钢制簧过程的断裂分析 曹杰等
 萤石含量对连铸保护渣结晶性能的影响 韩秀丽等