

热轧润滑对中厚板轧制力和表面特征的影响

高雅 孙建林* 朱作鑫

北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083

* 通信作者, E-mail: sj@ustb.edu.cn

摘要 通过中厚钢板热轧工艺润滑实验, 分析了不同工艺润滑条件下中厚钢板热轧过程中轧制载荷与压下率的关系, 研究了工艺润滑对钢板表面质量的影响, 并结合实验钢的连续冷却转变曲线, 探讨了工艺润滑条件对钢板组织转变的影响. 结果表明: 中高质量浓度比低质量浓度热轧油能更有效地降低轧制力; 粗轧阶段比精轧阶段降低轧制力效果更明显. 工艺润滑可改善中厚热轧板的表面质量, 降低板面粗糙度, 并促进钢板表面处在轧制过程中的铁素体转变, 减少表面附近的带状组织, 使轧后表面处组织均匀细小, 减小表面缺陷产生的概率.

关键词 中厚板; 热轧; 润滑; 轧制力; 表面质量; 组织转变

分类号 TG 335.5

Effect of lubrication on the rolling force and surface character of medium plate in hot rolling

GAO Ya, SUN Jian-lin*, ZHU Zuo-xin

School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

* Corresponding author, E-mail: sj@ustb.edu.cn

ABSTRACT Lubrication experiments of medium plates in hot rolling were carried out under different lubrication conditions to analyze the relationship between rolling force and compressibility and study the effect of lubrication on the slab surface quality. The influence of lubrication conditions on the structural transformation in the steel plates was also discussed in combination with the continuous cooling transformation curve of the experimental steel. It is shown that lubrication oil with high concentration can reduce more rolling force than that with low concentration, and this effect is more obvious in rough rolling than finish rolling. Lubrication in hot rolling improves the slab surface quality, decreases the slab surface roughness, promotes ferrite transformation, reduces zonal structure near the slab surface, and makes the deformation uniform and the probability of surface defects lower.

KEY WORDS medium plates; hot rolling; lubrication; rolling force; surface quality; structural transformation

随着轧机向高速化、连续化方向发展以及中厚板的低温、大压下轧制和控轧控冷工艺的推广应用, 工作辊负荷明显增加, 轧辊的磨损和剥落亦随之加剧, 进而造成轧后表面质量出现问题, 减少轧辊磨损和提高轧制作业率便成为一种必然要求^[1-3]. 随着中厚板轧制向宽厚轧制和低温轧制发展, 研究工艺润滑在中厚板轧制中的应用以提高设备能力就成为必然趋势. 开展中厚板热轧工艺润滑研究对于提高轧制压下率、降低轧制压力、扩大产品范围以及提高生产率都具有重要的指导

意义, 同时也符合环保节能的现代化工业生产的要求. 热轧薄板带工艺润滑技术在降低轧制力、减小氧化膜厚度和控制板形等方面已有深入研究^[4-7], 而中厚板热轧工艺润滑未见有研究和成功应用的报道. 薄板带热轧工艺润滑的研究和广泛应用为中厚板热轧工艺润滑技术研究与应用创造了一定的基础. 研究热轧工艺润滑对中厚板轧制力、轧后表面质量及组织转变规律的影响, 对比薄板带热轧工艺参数及润滑的影响规律, 可为工艺润滑在中厚板热轧中的应用提供依据.

收稿日期: 2010-09-20

基金项目: 北京科技大学与太钢集团临汾钢铁公司合作项目

1 研究方法和实验过程

实验用材料为工厂现场所取 Q460C 连铸坯, 其成分如表 1 所示. 热轧油为热轧润滑工业用油和水的混合液, 选用 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 两种质量浓度的油进行实验, 并与无润滑条件下对比.

表 1 Q460C 钢化学成分 (质量分数)

Table 1 Composition of Q460C steel %

C	Si	Mn	S	P	Nb	Ti
0.15	0.3	1.36	≤ 0.02	≤ 0.02	0.03	0.01

根据实验轧机能力将 200 mm 铸坯减薄到 75 mm, 保留铸坯上表面, 实验用坯料为厚 75 mm \times 长 100 mm \times 宽 100 mm. 粗轧 6 道次, 开轧 1050°C; 精轧 4 道次, 开轧 850°C, 轧制压下率取工业现场中厚板轧制数据. 应用实验专用工艺润滑喷油装置进行喷射, 采用工作辊润滑方式. 在 $\phi 350 \text{ mm}$ 热轧实验轧机上进行轧制, 轧制前进行机械除鳞, 轧后以 $5 \sim 10^\circ \text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 冷却到 500°C, 然后空冷至室温. 轧制时记录轧制力和轧制温度, 轧后观测钢板表面质量并测定钢板表面粗糙度, 观察钢板微观组织.

表 2 不同润滑条件下 Q460C 热轧各道次轧制力

Table 2 Rolling force of Q460C in different lubrication conditions

kN

润滑油质量浓度 / ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	粗轧及压下率 %						精轧及压下率 %			
	R2, 16.1	R3, 17.3	R4, 18.6	R5, 17.1	R6, 20.7	F1, 17.4	F2, 21.1	F3, 13.3	F4, 15.4	
无润滑	375	289	319	437	489	740	885	781	796	
0.01	310	205	284	326	460	729	745	736	705	
2×10^{-3}	318	259	299	375	476	708	856	778	740	

根据总压下量和道次数计算粗轧和精轧阶段平均道次压下率, 粗轧为 16.2%, 精轧为 19.5%. 为比较粗轧阶段和精轧阶段工艺润滑对轧制力的影响, 定义平均轧制力为各道次轧制力的算术平均值, 计算平均轧制力降低绝对值和降低率如表 3 所示.

表 3 不同润滑条件下平均轧制力与轧制力降低率对比

Table 3 Average rolling force and reduction ratio of rolling force in different lubrication conditions

润滑油质量浓度 / ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均轧制力 /kN		平均轧制力降低绝对值 /kN		平均轧制力降低率 %	
	粗轧	精轧	粗轧	精轧	粗轧	精轧
无润滑	381.8	800.5	—	—	—	—
0.01	345.4	770.5	36.4	30	9.5	3.8
2×10^{-3}	317	728.75	64.8	72	17.0	9.0

对 Ti-IF 钢薄板热轧工艺润滑的研究^[8]表明, 较低温度轧制时比高温轧制时的轧制压力降低率要

为了更准确描述热轧润滑条件下组织转变规律, 在 Gleeble-1500 热模拟试验机上测定了实验钢变形条件下的连续冷却转变 (CCT) 曲线. 实验钢加热到 1150°C 保温奥氏体化后以 $5^\circ \text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 冷却至 870°C, 然后以 10 s^{-1} 应变速率变形 45%, 再分别以不同的冷却速度冷却至室温.

2 实验结果与分析

2.1 热轧润滑对轧制力的影响

考虑到第 1 道次咬入比较困难, 润滑从 R2 道次开始, Q460C 钢轧制时不同轧制油质量浓度下各道次的压下率及相应的轧制力如表 2 所示. 热轧润滑有效地降低了各道次轧制力, 其中热轧油质量浓度为 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时润滑效果比 $2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时更加显著. 可见热轧油的质量浓度对热轧润滑效果有很大影响, 这与质量浓度对变形区的油膜厚度的影响有关. 一般认为: 变形区油膜厚度在 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 就可以达到润滑的目的, 增加用量并不产生更有效的润滑作用效果. 最佳使用的质量浓度由具体轧制材料、轧制品的厚度、轧制温度、热轧油自身特性以及具体形态决定.

由表可见, 随热轧油质量浓度增加, 平均轧制力降低绝对值和降低率都增加. 在同种质量浓度条件下, 虽然粗轧阶段比精轧阶段平均道次压下率低, 但平均轧制力降低率要比精轧阶段高得多.

高, 较低温度轧制时工艺润滑效果更显著. 可见, 润滑对中厚板热轧和薄板热轧轧制压力的影响机理不

完全相同. 影响轧制压力的因素主要是变形温度、应变速率和变形程度, 润滑对轧制压力的影响是通过摩擦因数的变化对各种参数的影响来体现的, 摩擦因数的变化对变形区内的压下量、前滑值、中性角大小和应变速率等各参数都有影响, 而轧制变形区变形是一复杂的过程, 各种参数又相互影响, 因而很难定量地研究润滑对轧制力能参数的影响^[9]. 下面建立一个热变形抗力变化同压下率变化之间的联系. 利用恰古诺夫热变形抗力公式^[10]:

$$k_f = [1 + \mu(\sqrt{h} - 1)] K_1 \sigma_s \quad (1)$$

式中: k_f 为变形抗力; μ 为外摩擦因数; l 为变形区长度; h 为变形区平均厚度; K_1 为温度影响系数, 为温度的函数; σ_s 为材料在室温下的屈服应力. 取道次变形率为 ϵ , 则

$$\begin{cases} h = (h_0 + h) / 2 \\ h = h_0 (1 - \epsilon) \\ l = \sqrt{R h_0} \end{cases} \quad (2)$$

R 为工作辊半径, 将式 (2) 代入式 (1), 并对 ϵ 求导得

$$\frac{dk_f}{d\epsilon} = \mu K_1 \sigma_s \sqrt{R/h_0} \frac{2 + \epsilon}{\sqrt{\epsilon(2 - \epsilon)^2}} \quad (3)$$

可见压下率变化对轧制压力变化的影响除与压下率有关外, 还受摩擦因数、温度、材料屈服强度及轧辊和板厚的控制和影响. 每种因素对轧制力的影响也都受其他因素波动的影响. 采用工艺润滑降低摩擦因数可降低压下率增加对轧制力增高的影响程度, 这与润滑对粗轧阶段和精轧阶段的影响是一致的.

由此可见, 润滑对中厚板粗轧阶段轧制力降低贡献比精轧阶段更明显, 这对现在中厚板轧制中广泛采用的热送热装工艺的推进有重要意义, 因为在同样轧机能力情况下, 采用润滑轧制可以加大粗轧道次的压下率以促进再结晶充分进行, 消除热装过程中产生的混晶组织, 以减少后续轧制过程中因变形不均匀产生的各种缺陷并改善钢板的性能.

2.2 热轧润滑对表面质量的影响

表面质量是钢板生产厂家比较关注的问题, 热轧钢板表面的微观形貌主要由工作辊表面粗糙度所决定, 轧辊粗糙度和被轧制金属的表面状态取决于轧辊磨损. 随着轧辊磨损增加, 轧件表面质量变坏. 工艺润滑不仅可以降低轧制压力, 还可以减少轧辊磨损, 改善钢板表面质量^[11]. 图 1 是 Q460C 钢有润滑和无润滑条件下的轧后表面宏观照片, 润滑条件下轧后钢板表面光亮基本无氧化, 无润滑条件下表面暗褐色, 呈现较强的氧化特征.

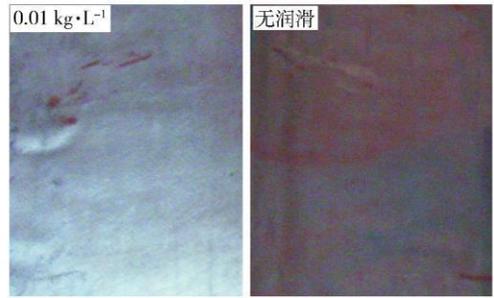


图 1 Q460C 轧后表面宏观照片

Fig. 1 Macro photograph of Q460C slab surfaces

表 4 为热轧后试样表面粗糙度. 对比数据可知平行轧制方向测得粗糙度明显低于垂直轧向方向测得的粗糙度; 采用工艺润滑可有效降低轧件表面粗糙度, 热轧油使用的质量浓度越高轧后表面粗糙度越低. 工艺润滑实际上降低了轧辊磨损, 它们用保护性油层覆盖在轧辊表面上, 在变形区缓和了水的侵蚀, 降低了接触面的温度, 减缓了表面氧化程度, 并影响表面的变化程度. 当辊面油耗量在适当范围内时, 润滑剂会降低轧辊磨损, 但是随着润滑剂耗量的进一步增加, 不仅不能使轧辊寿命增加, 反而会引起轧件打滑及轧辊损坏. 与无润滑的钢板表面相比, 润滑轧制的钢板表面光洁, 氧化较轻, 无翘曲等缺陷.

表 4 轧后试样表面平均粗糙度

Table 4 Average roughness of steel slab surfaces

润滑油的质量浓度 / ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	相对轧向方向	
	垂直	平行
无润滑	1.740	0.958
2×10^{-3}	0.871	0.696
0.01	0.683	0.466

2.3 工艺润滑对中厚板组织的影响

一般认为工艺润滑不会对钢的组织产生明显影响, 但已有研究证实工艺润滑可以有效地均匀和细化钢铁的组织^[12]. 图 2 是 Q460C 钢不同润滑条件下热轧后表面附近和中心处的组织. 可以看到三种润滑条件下钢板中心部位组织基本相同, 都是基本为贝氏体的组织. 在接近钢板表面处, 随着热轧油质量浓度增大, 表面处铁素体量增多, 贝氏体量减少, 热轧油质量浓度为 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时表面处大部分都为铁素体组织, 且组织较为均匀. 这是热轧油的冷却和减摩共同作用的效果.

热轧油本身对轧辊有冷却作用, 冷的轧辊作用到钢板上时对变形区部位进行冷却使钢板表面温度

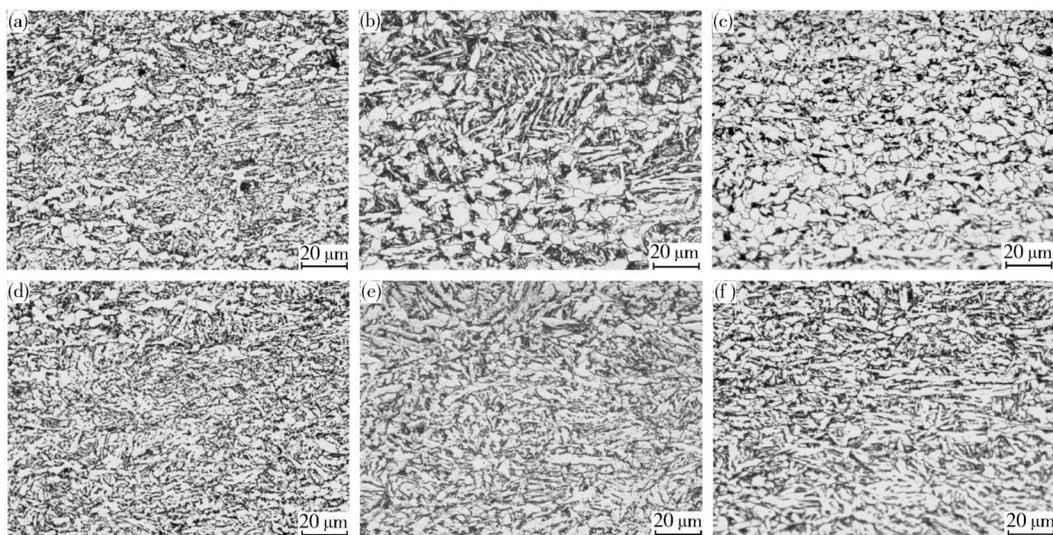


图 2 不同热轧油质量浓度下轧后钢板组织。(a)无润滑,表面;(b)质量浓度 $2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$,表面;(c)质量浓度 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$,表面;(d)无润滑,中心;(e)质量浓度 $2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$,中心;(f)质量浓度 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$,中心

Fig. 2 Microstructures of the steel plates at different oil mass concentrations: (a) no lubrication, surface; (b) $2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$, surface; (c) $0.01 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$, surface; (d) no lubrication, center; (e) $2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$, center; (f) $0.01 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$, center

下降. 热轧过程中由于热轧油的存在,降低了变形区的摩擦变形热,减少了钢板变形热升温,从而降低了钢板表面温升,且随轧制液浓度增大,摩擦因数降低,钢板温升也就越小. 实验过程测定钢板表面温度,未加润滑、质量浓度 $2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 润滑条件下,终轧温度分别为 792 、 748 和 715°C ,可见工艺润滑对钢板表面温降贡献明显.

图 3 是测得的实验钢 CCT 曲线. 中厚板热轧精轧初始阶段基本在部分再结晶区或未再结晶区,温度的降低使未再结晶奥氏体变形后晶内的变形带数量增加,也使位错和其他缺陷增多,增大了铁素体的形核自由能差,加速了铁素体的形变诱发形核. 当温度降到铁素体区时不必有孕育期就可以发生铁素体转变. 对比 CCT 曲线和终轧温度数据可见:在基本相同的精轧轧制时间内,未加润滑时,钢板表面冷速小,为 $0.5 \sim 0.8^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,将近到终轧结束时才进入铁素体转变区;而有润滑条件下,冷速较高,为 $1 \sim 2^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,进入铁素体区较早,铁素体转变量也越多,轧制油质量浓度高则转变量更多.

由于上述降温速度是有限的,不足以发生贝氏体转变,贝氏体转变只有在轧后快冷 $5 \sim 10^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 冷速范围内才发生,钢板中心处为贝氏体组织而表面出现较多铁素体正是这种原因. 当热轧油质量浓度为 $2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,变形热较无润滑轧制时降低少,所以轧后快冷表面处发生的贝氏体转变较多. 没有相变时,温度降低会增加变形抗力. 在本研究润滑轧制条件下,润滑冷却作用会促进表面铁素体

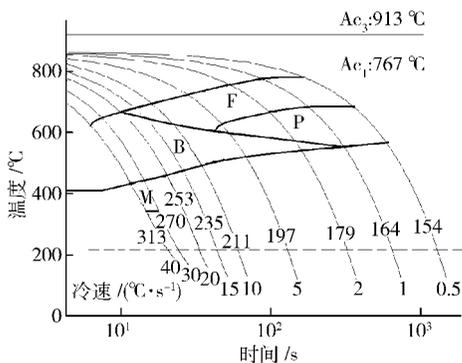


图 3 Q460C 钢动态 CCT 曲线

Fig. 3 CCT curve of Q460C steel under deformed condition

的转变量增多,反而使表面的变形抗力降低,轧制力的降低可能也与表面变形抗力的降低有关. 由于因润滑在钢板表面产生的铁素体层很薄,所以对钢板成品的性能基本不会产生影响,但铁素体增多及均匀细化会提高钢板表面的塑性及变形均匀性,有效地改善钢板的表面状况,降低表面缺陷产生的概率.

图 4 是钢板平行轧向方向断面上表面处和中心处组织分布. 不同的润滑条件下,钢板表面处的组织差别非常大:未加润滑时,组织沿轧向呈带状分布,组织大小不均匀;热轧油质量浓度为 $2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,表面处带状组织消失,但组织大小不均;热轧油质量浓度为 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,带状组织彻底消失,表面处组织均匀细小,组织状态非常理想. 在钢板中心处基本同图 2 垂直轧向方向,整体上组织差异不是很大.

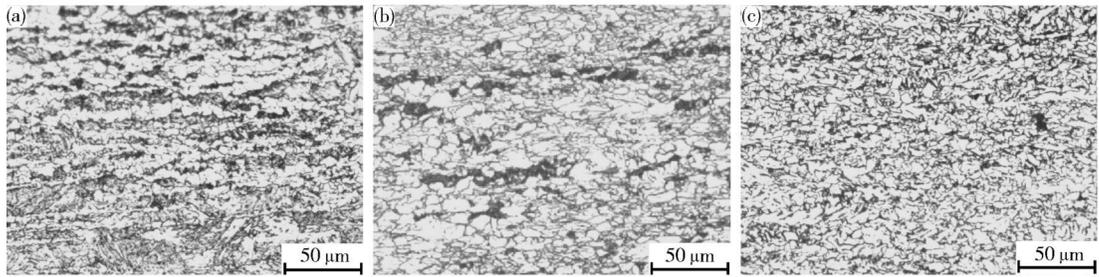


图 4 不同轧制液质量浓度下纵断面表面处组织。(a)无润滑; (b)质量浓度 $2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$; (c)质量浓度 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$

Fig. 4 Microstructures of vertical sections near the slab surfaces at different oil mass concentrations. (a) no lubrication; (b) $2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$; (c) $0.01 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$

不同润滑条件下组织的不同是由于润滑对摩擦因数的影响决定的, 随热轧油质量浓度增大, 轧辊与轧件间的摩擦因数降低, 钢板沿轧向承受的剪切力降低, 并且随着钢板中心部位的厚度加大, 摩擦对剪切的影响变小。无润滑条件下钢板表面处的带状组织与凝固过程中的枝晶偏析无关, 而是由于钢板表面较大的剪切作用造成晶粒取向和排列趋于一致, 从而形成的条带状分布。这种大的剪应力作用很容易造成钢板表面在轧制过程中沿晶界开裂。另外, 钢板表面组织的不均匀性为轧制过程中产生应力不均匀性的主要诱因, 而表面质量缺陷的产生很大程度上与此有关。所以, 润滑工艺的应用能有效地降低表面缺陷的产生概率。

3 结论

(1) 热轧中厚板中应用工艺润滑可有效地降低轧制力, 随着热轧油使用的质量浓度增加轧制力降低幅度增大, 粗轧阶段比精轧阶段降低轧制力效果更明显, 粗轧阶段应用工艺润滑能够减少热送热装工艺下热轧板表面裂纹缺陷的产生概率。

(2) 经过热轧润滑作用, 钢板表面残留有热轧油, 隔绝了与空气直接接触, 可以减轻轧制时钢板表面的氧化, 明显改善轧后钢板的表面质量, 降低其表面粗糙度。

(3) 中厚板热轧过程中采用工艺润滑可有效地促进钢板表面处在轧制过程中的铁素体转变, 并有效地减少表面附近的带状组织, 使轧后表面处组织均匀细小, 降低表面裂纹形成的概率。

参 考 文 献

- [1] Sun J L. The development and prospect of lubrication technology in steel rolling process. *Lubr Oil* 2010, 25(4): 1
(孙建林. 钢铁轧制润滑技术发展展望. *润滑油*, 2010, 25(4): 1)
- [2] Ling A B, Xia X M, Bian H. Application of technology lubrication in hot rolling. *China Metall* 2010, 20(8): 29
(凌爱兵, 夏小明, 卞皓. 工艺润滑在热连轧过程中的应用. *中国冶金*, 2010, 20(8): 29)
- [3] Azushima A, Xue W D, Aoki K. New evaluation method of lubricity of hot rolling oil // 9th International Conference on Steel Rolling. Paris 2006; 98
- [4] The Chinese Society for Metals. Report on Advances in Metallurgical Engineering and Technology. Beijing: China Science and Technology Press, 2009
(中国金属学会. 冶金工程技术学科发展报告. 北京: 中国科学技术出版社, 2009)
- [5] Sun J L, Ma Y L. Development and application of lubrication technology for rolling process. *Spec Steel* 2007, 28(3): 47
(孙建林, 马艳丽. 轧制过程工艺润滑技术的发展和运用. *特殊钢*, 2007, 28(3): 47)
- [6] Peretic M J, Seidel J, Kraemer S. Coordinated application of roll gap lubrication, work roll cooling and antipeeling systems in hot rolling mills. *Iron Steel Technol* 2004, 1(5): 27
- [7] Sun J L, Ma Y L, Zhang Z C. Effect of hot-rolling lubrication on the surface quality of strips. *J Univ Sci Technol Beijing* 2006, 28(1): 45
(孙建林, 马艳丽, 张志超. 不同润滑条件对热轧板带钢表面氧化的影响. *北京科技大学学报*, 2006, 28(1): 45)
- [8] Sun J L, Wang J Z, Zhang Z C, et al. Study on lubrication in hot strip rolling process. *Lubr Eng* 2005(3): 49
(孙建林, 王建泽, 张志超, 等. 带钢热轧工艺润滑的实验研究. *润滑与密封*, 2005(3): 49)
- [9] Azushima A, Xue W D, Yoshida Y. Lubrication mechanism in hot rolling by newly developed simulation testing machine. *CRP Ann Manuf Technol* 2007, 56(1): 297
- [10] Kang Y L. *Rolling Engineering Science*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006
(康永林. 轧制工程学. 北京: 冶金工业出版社, 2006)
- [11] Li J H, Yin G Q. Technology lubrication in the production of hot rolled strip practice. *Met World* 2008(3): 37
(栗建辉, 尹国强. 工艺润滑在热轧带钢生产中的实践. *金属世界*, 2008(3): 37)
- [12] Zheng Y Q, Guan J D, Kang Y L. Application and development of roll gap lubrication technology for hot rolling of JISCO. *China Metall* 2009, 19(8): 19
(郑跃强, 关建东, 康永林. 酒钢 CSP 热轧辊缝润滑的应用研究. *中国冶金*, 2009, 19(8): 19)