

## 乳化液润滑工艺对冷轧 IF 钢板表面质量的影响

夏 垒<sup>1</sup> 李 岩<sup>2</sup> 张红梅<sup>3</sup>

(1 中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院,北京 100083;2 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室 鞍钢集团钢铁研究院,鞍山 114009;3 辽宁科技大学材料与冶金学院,鞍山 114051)

**摘要** 分析了无润滑和采用两种不同乳化液润滑轧后 IF 钢板表面质量,并通过对乳化液摩擦学性能分析研究了造成轧后表面质量差异的原因。研究发现,采用乳化液润滑可以使轧后钢板表面更加平整、光滑,改善表面质量;LP-2 润滑时轧后钢板表面质量比使用 LP-1 润滑时更好,主要是因为 LP-2 乳化液其油膜强度更高,润滑过程中油膜更加稳定,抗磨减摩效果更好。

**关键词** 冷轧 润滑 带钢 表面质量

## Effect of Emulsion Lubrication Process on Surface Quality of Cold Rolled IF Steel Plate

Xia Lei<sup>1</sup>, Li Yan<sup>2</sup> and Zhang Hongmei<sup>3</sup>

(1 Research Institute of Petroleum Processing, SINOPEC, Beijing 100083; 2 State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Iron & Steel Research Institutes of Ansteel Group Corporation, Anshan 114009; 3 Department of Material and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051)

**Abstract** The surface quality of the IF steel strips rolled without lubrication and with two different emulsions lubrication was analyzed, and the reasons for the difference of surface quality lubricated by different emulsions were studied by analyzing the tribological properties of emulsions. The results showed that the lubrication of emulsions in cold rolling process could make the steel strip surface more smooth and improve the surface quality. The reason for the better surface quality of the steel strip lubricated by LP-2 than lubricated by LP-1 is mainly that the LP-2 emulsion had higher oil film strength which could form more stable oil film in the lubrication process, and get better anti-friction and anti-wear effects.

**Material Index** Cold Rolling, Lubrication, Strip Steel, Surface Quality

无间隙原子钢(IF 钢)由于具有优异的深冲性能,在汽车工业上的应用十分广泛。近年来中国汽车工业的快速发展,带动了汽车板需求量的增加,汽车用 IF 钢对表面质量具有较高要求,目前国产 IF 钢表面质量与国外同类产品还有一定差距,主要用于生产中低档轿车和卡车,中高档轿车用高品质钢板仍然需要大量进口<sup>[1-2]</sup>。生产高质量的 IF 钢板不仅可以满足市场需求而且可以提高产品附加值,增加经济效益。

冷轧钢板产品表面质量受原料成分与质量、轧制工艺、退火工艺等多方面的影响<sup>[3-4]</sup>。由于钢板表面缺陷具有遗传性,前道生产工序中产生的表面缺陷很难在以后的生产工序中消除,甚至可能被扩大并产生新的问题,如钢板冷轧工序后其表面粗糙度过大,将造成退火工序产生粘结问题<sup>[5]</sup>。钢板轧制过程中采用合适的润滑工艺不仅可以节约能耗和轧辊损耗,而且可以改善钢板表面质量<sup>[6]</sup>。本文采用激光共聚焦显微镜和表面轮廓仪对比了两种

不同乳化液润滑轧后钢板的表面质量,并通过对乳化液的摩擦学性能进行分析,研究了造成不同轧后表面质量差别的原因。

### 1 实验方法

#### 1.1 冷轧实验

在  $\Phi 95/200$  mm  $\times$  200 mm 四辊轧机上对 IF 钢进行冷轧实验,轧制速度为 60 r/min。IF 钢的主要化学成分如表 1 所示,轧制试样的尺寸为 20 mm  $\times$  5 mm  $\times$  1 mm。将商品乳化油(A)与新研发的冷轧乳化油(B)以 5% 的比例加入自来水中搅拌均匀配制成乳化液 LP-1 和 LP-2,实验过程中将乳化液喷淋的在轧辊和轧件上进行润滑,并与无润滑的情况进行对比,乳化油主要性能指标如表 2 所示。实验前以及更换轧制液时先用丙酮将轧辊和轧件表面清洗干净,再用医用棉擦干,以免轧辊和轧件表面污染物和/或残留乳化液影响实验结果。试验后将轧后钢板加工成 10 mm  $\times$  10 mm 的样品,在丙酮溶

液中将样品用超声波清洗 10 min,用以之后表面质量分析。

### 1.2 表面质量分析

将轧制后的钢板用 LEXT ols4 000 激光共聚焦显微镜观测轧后钢板表面三维形貌,用 FTS-S3c 表面轮廓仪测量不同润滑状态轧后钢板表面轮廓和粗糙度。

### 1.3 摩擦学性能实验

在 MRS - 10A 四球摩擦磨损实验机上,采用 GB/T12583-1998 国标实验测定乳化液的最大无卡咬负荷 PB 值,评价各轧制乳化液的极压性能。在载荷为  $(392 \pm 5)$  N,转速为 1200 r/min 下,进行 30 min 的摩擦磨损长磨试验,确定摩擦系数和不同润滑情况下的磨斑形貌,以比较各乳化液的抗磨减摩性能<sup>[7-8]</sup>。本实验所用钢球为上海钢球厂生产的一级 GCr15 标准钢球,直径为 12.7 mm, HRC 硬度值为 61 ~ 65。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 轧后钢板表面质量

表 1 IF 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of IF steel/%

C	Si	Mn	P	S	Ti	Nb	N	Al
0.003	0.02	0.10	0.008	0.008	0.025	0.006	0.002	0.04

表 2 乳化油主要性能参数

Table 2 Performance parameters of emulsified oil

乳化油	运动粘度 (40℃)/ ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	酸值/ ( $\text{mgKOH} \cdot \text{g}^{-1}$ )	倾点/ ℃	皂化值/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )
A	50 ~ 65	10	20	180
B	50 ~ 65	10 ~ 12	20	180

使用激光共聚焦显微镜观测了不同轧制状态下轧后钢板的表面形貌,结果如图 1 所示。从图 1 中可以看出:无润滑时轧后钢板表面起伏较大,局部有较深的坑;采用乳化液润滑时,轧后钢板表面只有微小的起伏并且钢板表面起伏相对比较均匀。为了更加细致地了解不同轧制状态轧后钢板表面质量的微观信息,使用表面轮廓仪测量了轧后钢板的表面轮廓及其粗糙度,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出:三种情况轧后钢板表面轮廓都是波动性上下起伏的。无润滑的情况下,金属表面除了小幅波动外还有整体较大的起伏,两个波峰/波谷之间的间距较大,将近 1 mm,其表面粗糙度  $R_a = 0.388 \mu\text{m}$ 。采用 LP-1 和 LP-2 润滑时,轧后钢板表面较为平整,没有大的波动起伏,轧后钢板表面粗糙度  $R_a$  分别为  $0.303 \mu\text{m}$  和  $0.258 \mu\text{m}$ ,两者相比使用 LP-2 润滑时金属表面起伏更加均匀。综上所述,IF 钢冷轧过程中,采用乳化液进行润滑可以使轧后钢板表面更加平整、光滑,改善表面质量;采用 LP-2 润滑时比使用 LP-1 润滑时轧后金属表面质量更加良好。

无润滑时轧辊与轧件直接接触,由于轧辊长时间连续工作其表面局部会产生一些划痕、磨损或微观缺陷,在轧制过程中其会对轧件造成损伤,从而影响钢板轧后表面质量,如图 1(a) 中钢板表面局部微坑缺陷就是以上原因造成的。轧制过程中由于摩擦和金属塑性变形会产生大量的热量,从而使轧辊和轧件温度升高并产生热膨胀,进而改变辊缝大小。另一方面,根据 M. D. Stone 轧制压力计算公式,如式(1) ~ 式(4)所示<sup>[9]</sup>,其它条件相同的情况下,轧制压力受轧制过程中的摩擦系数所控制,轧

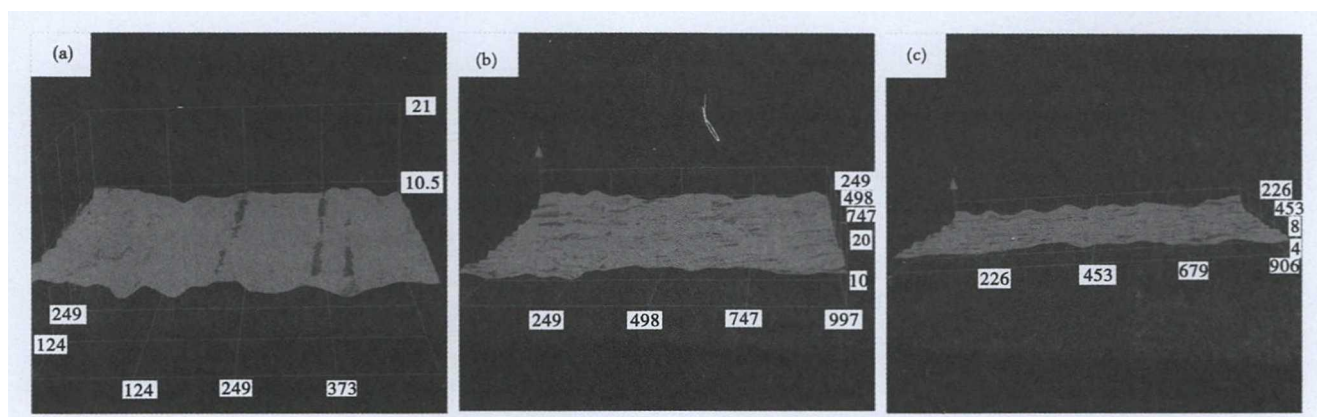


图 1 (a)无润滑;(b)LP-1 润滑;(c)LP-2 润滑轧后钢板表面三维形貌

Fig. 1 Three-dimensional appearance of rolled steel plate surface cold-rolling without lubrication (a); with lubrication by LP-1 (b) and LP-2 (c)

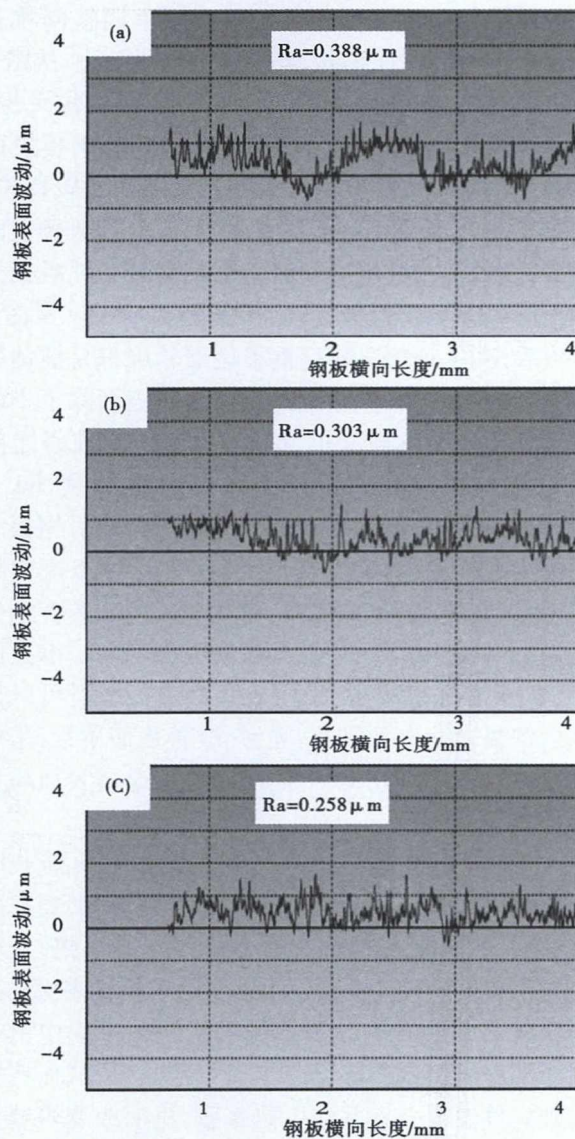


图 2 (a)无润滑;(b)LP-1 润滑;(c)LP-2 润滑轧制后钢板表面轮廓和粗糙度

Fig. 2 Surface profile and roughness of rolled strip steel plate under different lubrication conditions: (a) without lubrication; (b) lubricated by LP-1; (c) lubricated by LP-2

制压力的改变会影响材料的压下量进而影响产品厚度。无润滑的情况下,轧制过程中的摩擦系数较大且不稳定,其会造成轧制过程中轧制压力的不稳定,以上原因共同导致了轧后金属厚度不均、表面起伏波动等问题。采用乳化液润滑时,乳化液中大量的水可以对轧辊和轧件起到冷却作用,从而减少温度升高和由此产生的热膨胀。同时轧辊和轧件之间会形成一层极薄的润滑油膜,防止轧辊与轧件的直接接触,减少轧辊表面对轧件的划伤、粘结,从而改善轧件表面质量。润滑油膜还可以降低摩擦系数,并使摩擦保持在相对稳定的状态,进而稳定轧制过程避免或减少轧后钢板厚度不均等问题。

$$P = Bl \bar{p} \tag{1}$$

$$\bar{p} = K \left( \frac{e^m - 1}{m} \right) \tag{2}$$

$$m = \frac{\mu l}{h} \tag{3}$$

$$\bar{h} = \frac{H + h}{2} \tag{4}$$

式中: $P$ -轧制压力/N; $\bar{P}$ -平均单位压力/Pa; $B$ -轧件宽度/m; $l$ -变形区长度/m; $h$ -变形区平均高度/m; $H$ -轧件轧前厚度/m; $h$ -轧件轧后厚度/m; $K$ -材料变形抗力/Pa。

### 2.2 乳化液摩擦学性能

为了研究不同乳化液润滑轧后钢板表面质量出现差异的原因,采用摩擦磨损试验机测试了不同乳化液的摩擦学性能。实验结果显示,采用 LP-1 和 LP-2 润滑时其最大无卡咬负荷分别为 618 N 和 684 N,平均摩擦系数分别为 0.079 5 和 0.071 7。使用 LP-1 和 LP-2 润滑时摩擦系数随时间的变化如图 3 所示。从图 3 中可以看出:采用 LP-1 润滑时,实验开始阶段摩擦系数快速降低,之后经历一定时间的相对稳定阶段后又呈上升趋势,短暂维持一定时间后又逐渐降低,实验结束阶段摩擦系数则快速升高。使用 LP-2 润滑时,摩擦系数则在开始阶段快速降低、结束阶段快速升高,中间阶段则整体维持稳定。总体来看,采用 LP-2 润滑时摩擦系数比使用 LP-1 润滑时更小,并且润滑过程中使用 LP-2 时其摩擦系数上下浮动更小,润滑效果更加稳定。以上原因导致了轧制过程中采用 LP-1 润滑时其轧制压力变化相对较大,进而造成轧后表面粗糙度较大(图 2),表面质量相对较差。

根据 Stribeck 曲线(图 4),在边界润滑和混合润滑区,其它条件相同的情况下,摩擦副的相对运

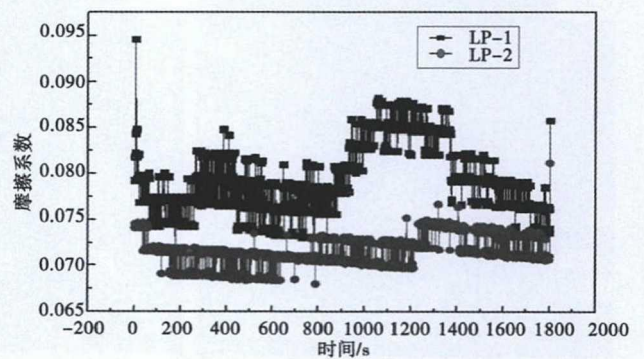


图 3 LP-1 和 LP-2 乳化液润滑的摩擦系数随时间的变化  
Fig. 3 Change of friction coefficient of lubricated by LP-1 and LP-2 emulsion with time

动速度越高,其摩擦系数越小<sup>[10]</sup>。实验过程中钢球之间的润滑方式主要是边界润滑和/或混合润滑。开始阶段钢球经历加速过程,结束阶段钢球经历减速过程,由于钢球运动速度的迅速升高(开始阶段)和降低(结束阶段)造成了其摩擦系数的迅速降低(开始阶段)和升高(结束阶段)。中间阶段采用LP-1润滑时其摩擦系数波动性较大主要与其最大无卡咬负荷较小有关。实验过程中,随着摩擦磨损时间的增长,摩擦产生的热量会使润滑剂温度升高,进而使摩擦副之间的润滑油膜变薄。当最大无卡咬负荷较小时,容易在实验中的某个阶段或局部由于油膜无法承受压力而产生油膜破裂。油膜破裂会造成金属的直接接触、摩擦,从而使摩擦系数变大。由于实验所用乳化液的最大无卡咬负荷都在摩擦磨损实验所用负荷之上,因此上述情况只会在局部或者较短的时间内产生。

摩擦磨损实验后,将实验所用钢球在显微镜下观察,获得钢球表面磨斑形貌,以表征不同润滑状态下的磨损情况,实验结果如图5所示。从图5可

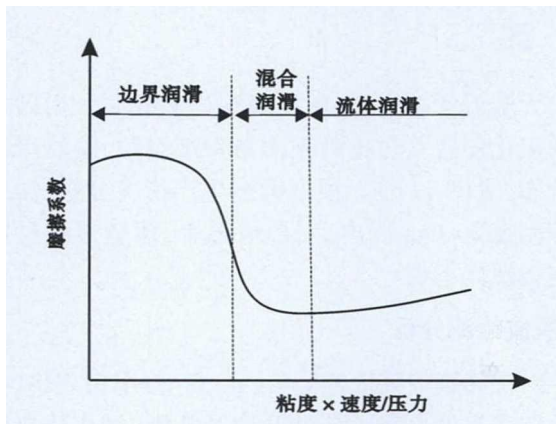


图4 Stribeck曲线  
Fig. 4 Stribeck curve

以看出,采用乳化液润滑实验后钢球表面磨斑均呈较规则的圆形,然而使用LP-1润滑的磨斑表面磨痕深度明显不均匀,这是因为实验过程中钢球表面润滑不均匀或者局部油膜破裂,这也是造成图3中LP-1润滑时摩擦系数不稳定的主要原因;使用LP-2润滑的钢球表面磨斑整体比较均匀,而且磨痕深度也较LP-1润滑时更浅,说明实验过程中其润滑比较稳定,对摩擦副的抗磨减摩效果更好,与图3结果一致。

### 3 结论

(1) IF钢冷轧过程中采用乳化液进行润滑,可以使轧后表面更加平整、光滑,减少表面缺陷,提高表面质量。

(2) 采用乳化液LP-2润滑时轧后钢板表面质量比使用LP-1润滑时更好,主要是因为LP-2乳化液具有较高的最大无卡咬负荷,润滑过程中其产生的油膜更加稳定,从而使轧制过程更加稳定的进行。轧制过程中板面受力均匀,有利于提高轧后表面的平整度。另一方面LP-2乳化液较好的抗磨减摩效果也可以减少金属表面划伤、磨损,提高轧后金属表面质量。

国家自然科学基金项目(51474127;51671100)资助

### 参考文献

- [1] 孙群,张锦刚. 鞍钢第三炼钢厂IF钢冶炼技术进展[J]. 鞍钢技术, 2003, (3): 47-48.
- [2] 朱立新,蒋晓放,许春雷. 宝钢纯净钢生产技术进展[J]. 钢铁, 2000, 35(11): 15-18.
- [3] 杨哲,杨柳,王清义,等. 改善冷轧板表面质量的研究[C]. 上海,宝钢学术年会, 2015.
- [4] 折媛,解西东,张朝晖,等. 低碳铝镇静钢冷轧板线状缺陷成因分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(15): 123-125.
- [5] 于世川,李一栋,梁振威,等. 提高冷轧板表面质量的工艺研究[J]. 金属世界, 2009, (4): 12-16.
- [6] 王士庭,孙建林,赵永涛,等. 板带钢冷轧乳化液稳定性与润滑性研究[J]. 石油炼制与化工, 2010, 41(4): 58-62.
- [7] 孙建林,黄瑛,熊孝经,等. 添加剂皂化值对铝材轧制油工艺润滑性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(6): 1491-1495.
- [8] 张敏,孙建林,姜伟. 一种新型极压剂在铝板带轧制油中的初步应用[C]. 北京,全国金属加工润滑技术学术研讨会, 2013.
- [9] 赵志业. 金属塑性变形与轧制理论(第2版)[M]. 北京:冶金工业出版社, 2006.
- [10] 孙建林. 轧制工艺润滑原理、技术与应用(第2版)[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010.

夏 垒(1988-),男,博士研究生(石油化工科学研究院), 2011年燕山大学(本科)毕业,摩擦磨损,润滑技术和表面质量研究. E-mail: charles2248@126.com

收稿日期:2018-06-12

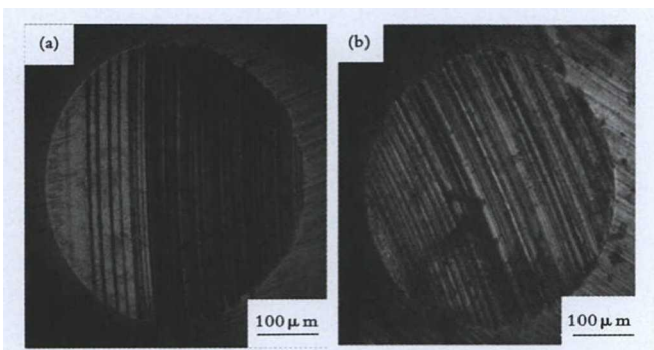


图5 (a)LP-1和(b)LP-2乳化液润滑后钢球表面磨斑形貌  
Fig. 5 Surface appearance of worn steel ball lubricated by emulsions LP-1 (a) and LP-2 (b)