

摩擦与润滑

## 摩擦对 430 不锈钢板材热轧过程边部线状缺陷的影响

曾华旭, 张立文, 张 驰, 薛 莉

(大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为了改善热轧板材的表面质量, 通过有限元软件 MSC. Marc, 建立了一个 4 道次的往复轧制模型以模拟 430 不锈钢板材热轧过程中的侧翻现象, 分析了摩擦因数对于侧翻过程的影响。研究结果表明, 只有当板材的压下量达到一定程度时侧翻才会发生, 且随着轧制过程的不断进行, 板材的侧翻程度增加。当摩擦因数降低时, 侧翻的程度也随之减轻, 直至摩擦因数为 0.2 时, 侧翻不会发生。由此可见, 对板坯的表面进行润滑可以有效减小由边部线状缺陷造成的切边损失。此外, 通过分析板材在宽度方向的位移分布发现, 摩擦之所以能够影响侧翻过程是由于不同的摩擦力导致了接触面上的金属和侧面的金属沿着宽度方向的流动速度不同, 进而间接影响侧翻。

**关键词:** 430 不锈钢; 热轧; 摩擦; 边部线状缺陷; 金属流动; 侧翻

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.025

**中图分类号:** TG142.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 04-0189-05

## Influence of friction on edge seam defect for 430 stainless steel plate during hot rolling process

Zeng Huaxu, Zhang Liwen, Zhang Chi, Xue Li

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In order to improve the surface quality of hot-rolled plates, a four-pass reciprocating rolling model was developed by finite element software MSC. Marc to simulate the side turn phenomenon in the hot rolling process of 430 stainless steel plate, and the influence of friction factor on the side turn process was analyzed. The research results show that the side turn occurs only when the reduction amount of plate reaches a certain degree, and the degree of side turn for plate increases with the continuous rolling process. When the friction factor decreases, the degree of side turn decreases, until the friction factor is less than 0.2, the side turn does not occur. It can be seen that lubricating the surface of slab can effectively reduce the trimming loss caused by edge seam defects. In addition, by analyzing the displacement distribution of plate along the width direction, it is found that the reason why the friction can affect the side turn process is that different friction forces result in the difference of flow velocity between the metal on the surface and the metal on the side along the width direction, which indirectly affects the side turn.

**Key words:** 430 stainless steel; hot rolling; friction; edge seam defect; metal flow; side turn

430 不锈钢是一种典型的铁素体不锈钢, 具有良好的耐腐蚀性、导热性、优良的高温性能和良好的切削加工性能等一系列优点。并且, 铁素体不锈钢是一种节镍型不锈钢, 具有低成本、可循环利用的优点<sup>[1]</sup>。目前, 在 430 不锈钢板材热轧过程中,

板材的边部常出现一种边部线状缺陷, 严重时会发生翘皮。该缺陷沿长度方向连续分布, 严重影响了板材的表面质量, 需要对板材进行切边处理, 造成了巨大的经济损失。研究表明, 该缺陷主要是由于边部折叠再经过侧面翻平所导致的<sup>[2]</sup>。尽管单纯的侧翻并不会导致边部线状缺陷的产生, 但是侧翻是缺陷产生过程中不可缺少的一环, 因此, 改善侧翻现象就可以减少边部线状缺陷。

为了减少由该缺陷造成的切边损失, 国内外学者进行了许多研究。早期的研究中, Ko D C 等<sup>[3]</sup>和 Yamaguchi H 等<sup>[4]</sup>采用了带凸模的定宽压力机以减

收稿日期: 2021-12-26; 修订日期: 2022-04-12

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目 (2019KF0506)

作者简介: 曾华旭 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: 87881653@qq.com

通信作者: 张立文 (1962-), 男, 博士, 教授

E-mail: commat@mail.dlut.edu.cn

小该缺陷,并对凸模的形状进行设计。Sun C G 等<sup>[5]</sup>通过控制板坯上下表面的温差以及设置上下辊不同的轧制速度,来调节板坯上下表面出现的不同的缺陷长度,以达到减少切边量的目的。王国栋等<sup>[6]</sup>、邸洪双等<sup>[7]</sup>采用了带孔型的立辊,有效地减少了边部线状缺陷的产生,并通过有限元模拟的方法研究了立辊孔型对边部线状缺陷的影响。张慧等<sup>[8-9]</sup>和 Zong N F 等<sup>[10-11]</sup>通过对板坯进行倒角,避免了边部折叠现象的出现,大大地改善了板坯表面质量。

然而,少有人研究轧制参数,如摩擦,对于边部线状缺陷的影响。本文利用大型商业有限元软件 MSC. Marc,对导致了边部线状缺陷的侧翻过程进行了模拟,并分析了摩擦对侧翻过程的影响。

## 1 有限元模型

利用大型商业有限元软件 MSC. Marc,建立了一个 4 道次的 430 不锈钢板材往复轧制过程的热力耦合有限元模型,如图 1 所示。由于整个系统的对称性,只需要建立 1/4 模型即可模拟整个轧制过程,在不影响计算精度的情况下减少了网格的数量,极大地提高了计算效率。模型分为轧辊、轧板、推动体、推板 4 部分。其中,轧板被设置为变形体,轧板的初始温度假设为 1200 °C。长度为 300 mm,宽度为 198 mm,高度为 150 mm。为了实现轧板的往复运动,在板材的首尾两端添加两个虚拟的刚性推动体。轧辊定义为刚体,轧辊直径为  $\Phi 450$  mm,温度为 70 °C,并假设其温度保持不变。轧辊与轧件的接触采用了库伦摩擦模型<sup>[12]</sup>,摩擦因数为 0.5。轧制规程如表 1 所示,其中, $\Delta H$  为压下量, $r$  为压下率, $H_0$  为轧后厚度, $V$  为轧制速度。

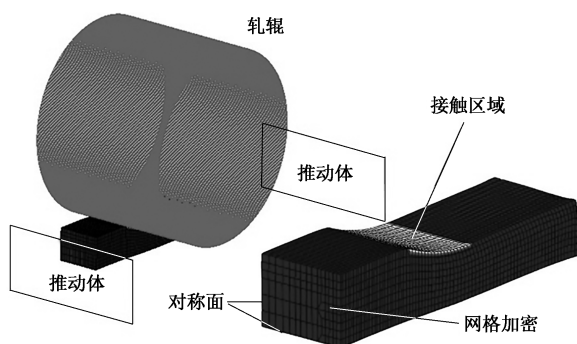


图 1 430 不锈钢板材热轧过程的几何模型以及网格划分

Fig. 1 Geometric model and grid division of 430 stainless steel plate during hot rolling process

表 1 板坯轧制规程

Table 1 Rolling schedule of plate

道次	$\Delta H/\text{mm}$	$r/\%$	$H_0/\text{mm}$	$V/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
1	45.0	30	105.0	3000
2	31.5	30	73.5	-3000
3	22.0	30	51.5	3000
4	15.5	30	36.0	-3000

## 2 结果与讨论

### 2.1 侧翻过程分析

图 2 为各道次轧制结束后宽度方向的位移云图,箭头标记了初始角部节点的位置。由图 2 可以看出,最外侧的侧面单元在轧制的过程中逐渐发生畸变,到第 4 道次,已经有 3 个单元翻转至表面上。图 3 为板材各道次轧制结束后的角部轮廓图,由于初始角部节点(节点 1)为侧面和表面的分界线,通过追踪初始角部节点的位置即可以观察侧翻现象的出现。第 1 道次轧制结束后,节点 1 仍为角部金属,此时侧翻还未发生。第 2 道次轧制后,此时节点 2 变为了新的角部节点,尽管初始角部节点在宽度方向上向外运动,但仍然发生了侧翻。由此可见,当板材的压下量较小时,并不会发生侧翻,并且随着压下量的增加,侧翻的程度也不断变大。由图 2 可以发现,板材在表面上的位移要小于中心位置,这是由于接触面上轧辊摩擦力的限制导致侧面金属的横向运动速度大于表面金属的横向运动速度,于是首先在侧面产生了鼓形。之后,伴随着表面金属不断被压下,以及侧面鼓形不断长大,最终导致了侧面金属翻转至表面上。

### 2.2 有限元模型的验证

如图 4 所示,为了验证模型的准确性,在轧制实验中用焊接的方法对板材角部位置的金属进行了标记,并在每道次轧制结束后进行拍照测量,记录侧翻的距离。再利用节点追踪的方法测量模拟结果中侧翻的距离。板材在轧制过程中的宽展可以分为滑动宽展、翻平宽展和鼓形宽展 3 部分。如图 3 所示,滑动宽展是指变形金属在与轧辊的接触表面上,发生相对滑动的部分,可以用节点 1 在宽度方向的位移表示。翻平宽展是指侧面翻平到表面上的部分,即发生侧翻的部分。针对在不同道次下的翻平宽展进行对比,结果如图 5 所示。由图 5 可以看出模拟结果和实验结果基本一致,证明模拟

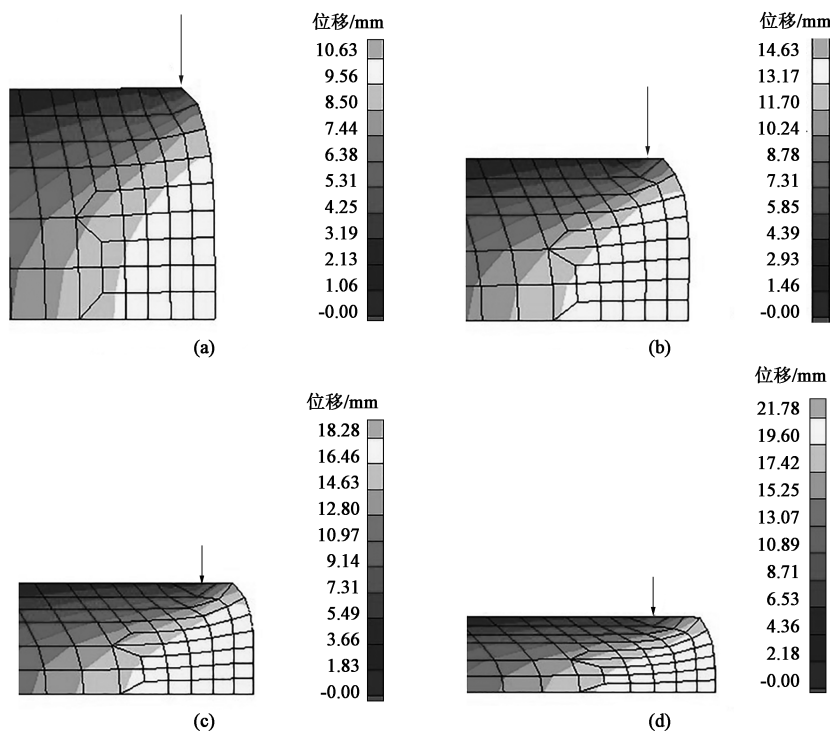


图 2 不同道次轧制后的板材在宽度方向上的位移分布  
(a) 第 1 道次 (b) 第 2 道次 (c) 第 3 道次 (d) 第 4 道次  
Fig. 2 Displacement distributions of plate in width direction after different passes of rolling  
(a) The first pass (b) The second pass (c) The third pass (d) The fourth pass

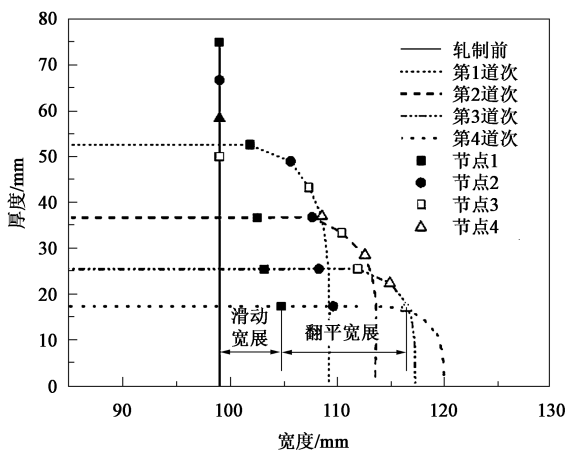


图 3 板材在不同道次轧制后的角部轮廓图  
Fig. 3 Corner profile diagram of plate after different passes of rolling

结果是可靠的。

2.3 摩擦对边部线状缺陷的影响

如 2.1 节所述，板坯的侧翻是由于表面摩擦力的限制导致表面金属的横向流动速度小于侧面金属的横向流动速度，因此摩擦对于板材侧翻的影响巨大。为了分析摩擦对于侧翻现象的影响，建立了一系列不同摩擦因数  $\mu$  的板材热轧模型。模拟的结果

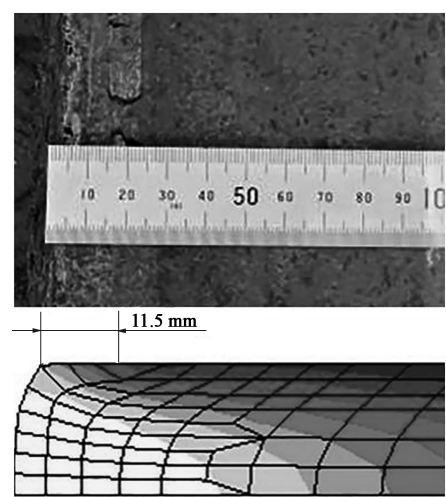


图 4 4 道次轧制结束后板材侧翻的模拟结果和实验结果  
Fig. 4 Simulation and experimental results of side turn for plate after four passes of rolling

如图 6 所示。箭头标记了初始角部节点的位置。摩擦因数取 0.2 时，此时经过了 4 道次的轧制，板材仍未发生侧翻，甚至由于表面层在宽度方向的位移量较大，出现了双鼓形。摩擦因数取 0.3 时，轧件经过 4 道次往复轧制后，有侧翻现象出现但程度较轻，并且侧面只呈现轻微的双鼓形。当摩擦因数为

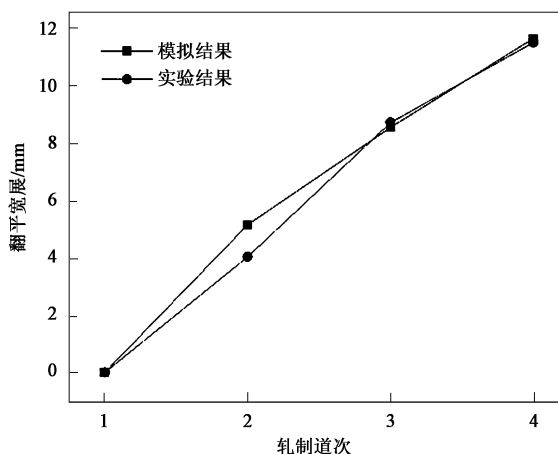


图 5 不同道次轧制后板材翻平宽展的模拟结果和实验结果对比

Fig. 5 Comparison between simulation and experimental results of turn over-spread for plate after different passes of rolling

0.4 时, 轧件的侧翻距离更大。通过观察图6可以

发现, 随着摩擦因数的增加, 板材的侧翻程度也逐渐增加。由于侧面不受摩擦力的影响, 因此摩擦对于侧翻并没有直接的作用。由于时间相同, 图 6 所示云图同样可以表示金属在整个轧制过程中宽度方向的平均流动速度。总体来说, 摩擦力越大时, 表面和靠近表面上的金属宽度方向的位移量越小, 并且侧翻发生时, 侧面金属的平均横向流动速度均大于表面金属。由此可知, 当接触面上的摩擦力较小时, 侧面上的金属和表面上的金属横向流动速度的差距较小, 此时侧翻难以发生。当接触面上的摩擦力过大时, 会导致表面上的金属横向流动受到较大的摩擦力的限制, 此时侧面金属的横向速度更快, 导致了侧面金属在表面不断被压下的情况下发生侧翻。因此, 摩擦是通过影响接触面上的金属发生的相对滑动的距离即板材在宽度方向的位移量来影响侧翻量的。

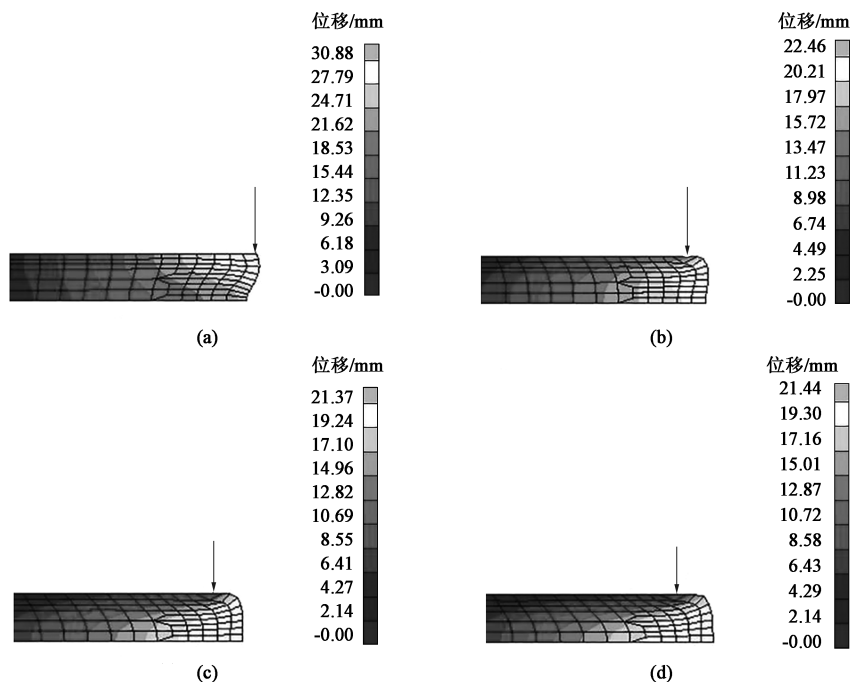


图 6 不同摩擦因数下轧制完成后板材在宽度方向上的位移分布

(a)  $\mu=0.2$  (b)  $\mu=0.3$  (c)  $\mu=0.4$  (d)  $\mu=0.5$

Fig. 6 Displacement distributions of plate in width direction under different friction factors after rolling

板材在上表面上的宽度增加量由翻平展宽和滑动展宽组成。图 7 为摩擦因数对 4 道次轧制结束后的板材翻平宽展的影响, 图 7 可以更直观地描述侧翻的程度。当摩擦因数为 0.2 时, 板坯轧制后无翻平宽展出现, 说明此时上表面上宽度的增加量全部由滑动宽展组成。当摩擦因数取 0.3 时, 翻平宽展增加, 此时板材在轧制的过程中其表面上

的金属流动受到了一个稍大些的摩擦力的限制, 从而导致侧面金属翻平到了表面上。当摩擦因数取 0.4 时, 翻平宽展的值为 7.0 mm。当摩擦因数为 0.5 时, 翻平宽展的量由最初的 0 mm 增加到了 11.6 mm。总的来说, 随着摩擦因数的增加, 板材的侧翻程度也同样大大增加。因此, 可以通过对板材表面进行润滑的方法来减小侧翻的程度, 改



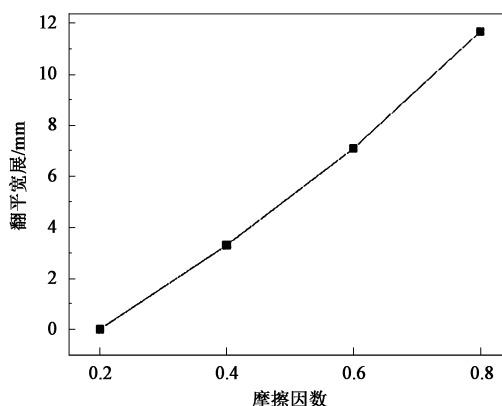


图7 板材在轧制后的翻平宽展随摩擦因数的变化曲线

Fig. 7 Change curve of turn over-spread for plate with friction factor after rolling

善板材的表面质量, 进而大大减小由边部线状缺陷造成的切边损失。

### 3 结论

(1) 建立了一个4道次的往复轧制模型, 通过分析不同道次间侧翻现象的变化规律来得到边部线缺陷的变化规律, 讨论了侧翻发生的原因, 并对模型的准确性进行了验证。

(2) 通过分析摩擦因数对于侧翻现象的影响, 发现随着摩擦因数的增加, 板材的翻平宽展同样大大增加。由板材在宽度方向的位移云图发现, 摩擦力对于侧翻的影响是通过影响表面上金属的横向流动速度实现的。由此可知, 在轧制过程中减小接触面上的摩擦可以有效降低侧翻程度, 可以通过对板材表面进行润滑来减小由边部线状缺陷造成的切边损失。

#### 参考文献:

- [1] Baddoo N R. Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64 (11): 1199-1206.
- [2] 马忠伟, 张慧, 胡鹏, 等. 中厚板边部折叠模拟实验及机理研究 [J]. 工程科学学报, 2015, 37 (12): 1630-1636.  
Ma Z W, Zhang H, Hu P, et al. Simulation experiments and mechanism of medium plate edge folding [J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37 (12): 1630-1636.
- [3] Ko D C, Lee S H, Kim D H, et al. Design of sizing press anvil for decrease of defect in hot strip [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187 (12): 738-742.
- [4] Yamaguchi H, Kusaba Y, Yamada T. Improvement of seam-defects on strip edge of stainless steel [J]. Iron Steel Engineer, 1996, 82 (1): 58-62.
- [5] Sun C G, Lee J S, Lee J H, et al. Mechanism of edge seam defects of stainless steel generated during hot plate rolling [J]. ISI

International, 2006, 46 (1): 93-99.

- [6] 赵宪明, 王国栋, 朴海斗, 等. 立辊形状对粗轧板坯侧弯的影响 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2002, 23 (12): 1174-1176.  
Zhao X M, Wang G D, Park H D, et al. Influence of vertical roll shape on bar camber by fem and analytic modelling [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2002, 23 (12): 1174-1176.
- [7] 夏小明, 邸洪双, 高映. 热轧带钢边部黑线产生机理 [J]. 钢铁研究学报, 2010, 22 (6): 18-25.  
Xia X M, Di H S, Gao Y. Creation mechanism of edge black line on hot strip [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 22 (6): 18-25.
- [8] Zhang H, Hu P, Wang M L. Mechanism and improvement of straight edge seam defect on hot-rolled plate surfaces through use of chamfered slabs [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2016, 23 (6): 539-546.
- [9] Hu P, Zhang H, Wang M L. Application of a chamfered slab to reduce risk of edge straight crack on hot rolled strip surface [J]. Materials Transactions, 2015, 56 (12): 2095-2097.
- [10] Zong N F, Liu Y, Sida M, et al. A review of chamfer technology in continuous casting process [J]. Metallurgical Research Technology, 2020, 117 (204): 1-16.
- [11] Zong N F, Liu Y, Hui Z, et al. Application of a chamfered slab technology to reduce straight edge seam defects of non-oriented silicon electrical steel generated during flexible thin slab casting process [J]. Metallurgical Research Technology, 2017, 114 (311): 1-9.
- [12] Mahrenholtz O, Bontcheva N, Brzozowski M, et al. Influence of friction and geometry on plastic spread [J]. Mechanics Research Communication, 1997, 24 (4): 351-358.

#### 警惕不法网站, 保障投稿安全

近期, 本刊接到多名作者投诉, 网络上出现冒充《锻压技术》杂志官方网站的伪网站, 如 [www.dyjszz.cn](http://www.dyjszz.cn), 这些网站盗用本杂志官网内容及相关行业信息, 误导和欺骗广大投稿作者, 骗取文章版面费、套取作者文章及个人信息, 侵犯了广大作者的切身利益。

特此声明, 本刊唯一官方网站为 [www.fstjournal.net](http://www.fstjournal.net), 投稿方式为网站注册登录投稿, 不接受邮箱投稿。请作者投稿时务必认准杂志官方网站, 谨防受骗。

本刊郑重警告伪网站相关人员尽快停止违法行为, 否则将严肃处理, 并将运用一切法律手段维护本刊的权利。

请广大读者协助本刊监督网络上的不法行为, 一经发现, 请联系本刊, 本刊将及时处理, 共同努力营造良好的期刊网络氛围。

《锻压技术》杂志联系方式: [fst@263.net](mailto:fst@263.net); 010-62920652。

《锻压技术》编辑部