

摩擦与润滑

基于辊耗控制的热连轧工艺润滑制度优化及其应用验证

姚非非¹, 杨 峥², 王飞飞¹, 张 明³

(1. 新乡职业技术学院 智能制造学院, 河南 新乡 453000; 2. 开封技师学院 汽车工程系, 河南 开封 475000;
3. 河南理工大学 机械工程学院, 河南 郑州 450000)

摘要: 为了获得最优带材出口板形, 在构建对辊耗程度判断指标的基础上, 建立了工艺润滑制度优化模型。为验证优化方法的实际应用性能, 对 2160 mm 热连轧机组进行了辊耗控制试验研究, 深入分析了工艺润滑下辊间压力横向分布, 综合运用试验轧机与理论分析, 构建得到了以辊耗控制为目标的工艺润滑技术, 实现了优化工艺润滑制度的效果。研究表明: 用于评价辊耗状态的目标函数由 0.415 减小为 0.068, 板形值由最初的 13.32 减小至 10.46, 带材轧制的热滑伤指数减小了 14.6%, 打滑因子减小了 13.2%, 辊耗减小了 17.4%。采用提出的优化方法对热连轧机组生产过程进行了控制测试, 获得了峰值更小的辊间压力分布, 实现了对轧辊辊耗的有效控制, 避免了机组打滑现象, 实现了经济效益的显著提升。

关键词: 热连轧; 辊耗; 工艺润滑; 辊间压力; 板形值; 热滑伤指数; 打滑因子

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.029

中图分类号: TH162 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 01-0223-05

Process lubrication system optimization and application validation on hot tandem rolling based on roller consumption control

Yao Feifei¹, Yang Zheng², Wang Feifei¹, Zhang Ming³

(1. Intelligent Manufacturing College, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453000, China;
2. Department of Automotive Engineering, Kaifeng Technician College, Kaifeng 475000, China;
3. College of Mechanical Engineering, Henan Polytechnic University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to obtain the optimal strip outlet shape, the optimization model of process lubrication system was established on the basis of the index of determining the degree of roller consumption, and the roller consumption control experiment was conducted on the 2160 mm hot tandem mill in order to verify the practical application performance of the optimization method. Then, the transverse distribution of the pressure between rollers under process lubrication was deeply analyzed, and by comprehensive application of the test mill and theoretical analysis, the process lubrication technology with roller consumption control as the objective was established to achieve the effect of optimizing the process lubrication system. The results show that the objective function for evaluating the state of roller consumption decreases from 0.415 to 0.068, the shape value decreases from 13.32 to 10.46, the thermal slip index decreases by 14.6%, the slip factor decreases by 13.2%, and the roller consumption decreases by 17.4%. The optimization method proposed is used to control and test the production process of the hot tandem rolling mill, and the pressure distribution between rollers with a smaller peak value is obtained, which can effectively control the roller consumption of roller, avoid the slipping phenomenon of the unit, and realize the significant improvement of economic benefits.

Key words: hot tandem rolling; roller consumption; process lubrication; pressure between rollers; shape value; thermal slip index; slip factor

在轧钢制造过程中, 轧辊已经成为一个不可或缺的部件, 并且会在长期使用过程中不断发生磨损而损坏, 造成较大的经济损失并产生安全隐患^[1-3]。工作辊面在轧制阶段会跟轧件发生接触, 产生极大

的受载抗力, 同时发生明显的冷热疲劳, 轧辊磨损与损坏均会造成轧辊消耗并导致成本的升高^[4-7]。

目前, 相关方面的工作吸引了众多的研究学者。孙卫华等^[8]在济钢集团有限公司 1700 mm 热连轧生产线上成功应用了工艺润滑系统, 使得轧制力和能耗降低。孙建林等^[9]从纳米粒子的选择与分散出发, 整理了润滑机理的理论模型及其配合关系, 并探索其表面修复作用对金属表面的物理吸附膜、化学反应膜及沉积自修复膜的影响。郭贺松等^[10]设

收稿日期: 2023-11-07; 修订日期: 2023-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51905496)

作者简介: 姚非非 (1985-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: wangfeifei6056092@126.com

设计了一种可以减小轧辊消耗的新处理方式：(1) 增加轧辊寿命，包括对辊表面进行镀铬形成保护层，选择耐蚀性更强的辊基材，规范轧制流程；(2) 消除断带与缺陷换辊问题，避免发生爆辊与黏辊的情况，尽量避免不必要的换辊过程。程志彦等^[11]对工作辊与支撑辊进行辊形结构优化，把这两种辊均设计为正凸结构，显著减少了辊耗。李硕等^[12]测试了磨损阶段辊表面形成的三维组织结构，并分析了磨损量的改变情况。吴琼等^[13]测试了板形调控下辊间接触应力分布，建立了轧辊磨损深度模型，取得了一定的效果。为实现控制辊耗与避免轧辊剥落的情况，可以采用辊形优化与调整轧辊参数的方式来实现。但是，关于采用工艺润滑方面的研究报道较少，为进一步提升冷轧产品表面质量并控制轧机运行成本，应对工艺润滑制度实施优化^[14]。

本文在前人研究的基础上，为了避免热连轧发生打滑与热滑伤的情况，并获得最优的带材出口板形，在构建可以对辊耗程度进行判断的判断指标的基础上，建立了工艺润滑制度优化模型，并对 2160 mm 热连轧机组进行了辊耗控制试验研究。

1 辊耗指标

轧辊工作阶段需承受很高的轧制压力以及载荷力矩作用，并且在实际运行环境中会发生温度的大幅变化，因此，要求轧辊具有能够适应苛刻工况的性能。为了减小辊耗，需采用合适的方法来降低辊间压力，并使横向上形成更均匀的辊间压力^[15]。辊耗控制原理见图 1。如图 1 所示，在热连轧机中，保持同样的乳化液油品条件，在温度的影响下，黏度会造成油膜厚度变化，进而影响摩擦因数，导致轧制压力和辊间压力变化，辊间压力又会对润滑油黏度造成影响，以上作用过程不断循环。

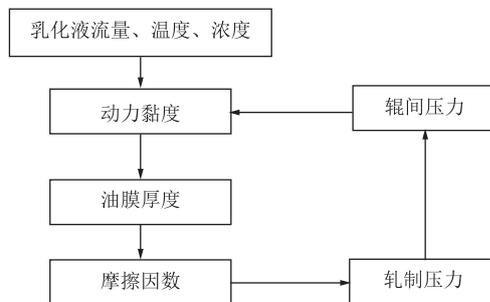


图 1 辊耗控制原理图

Fig. 1 Control principle diagram of roller consumption

2 工艺润滑制度建立

对某一热连轧过程进行分析可知，在恒定的轧制工艺与轧辊工艺条件下，当乳化液类型、喷嘴外形、喷射角度也确定后，打滑因子 ψ 、热滑伤指数 φ 、辊耗评估指标 γ 受到乳化液温度 T_i 、乳化液流量 w_i 、浓度 C_i 的综合作用（其中 i 为添加乳化液工艺次数）。各机架辊耗评估指标 γ 值越小，表示辊耗程度越小；反之亦然。辊耗函数表示为式 (1)：

$$\begin{cases} f(x) = \frac{\alpha}{n} \sum_{i=1}^n \gamma + (1 - \alpha) - \frac{\sigma_i}{T_0} \\ \varphi \leq \xi \varphi^* \\ \psi \leq \xi \psi^* \\ g'_{iw}(x) \leq \xi k_{iw} \\ g'_{ib}(x) \leq \xi k_{ib} \\ \sum_{i=1}^n w_i = W \\ T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} \\ C_{\min} \leq C_i \leq C_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $f(x)$ 为辊耗函数； x 为辊耗自变量； α 为加权系数； n 为添加乳化液工艺总次数； T_0 为乳化液温度初始值； σ_i 为前张力横向分布参数； φ^* 为热滑伤指数临界值； ξ 为安全系数； ψ^* 为打滑因子临界值； $g'_{iw}(x)$ 为工作辊与中间辊之间的不均匀度函数； k_{iw} 为工作辊与中间辊之间的不均匀度系数； $g'_{ib}(x)$ 为支撑辊与中间辊之间的不均匀度函数； k_{ib} 为支撑辊与中间辊之间的不均匀度系数； W 为乳化液总供量； T_{\min} 、 T_{\max} 为根据乳化液品质确定的最低与最高温度； C_{\min} 、 C_{\max} 为根据工艺条件被允许的最低与最高乳化液浓度。

可以将优化过程简化为确定最优的 $X = [x_1, x_2, x_3] = [w_i, C_i, T_i]$ ，以达到最小的 $f(x)$ 。 $f(x)$ 值越小，表示板形值 I 越好。通过 Powell 方法计算^[16]，具体计算过程见图 2。

可以明显发现，对工艺润滑制度进行优化的目的是为了达到最优的乳化液温度、流量和浓度状态，从而确保对不同规格产品进行轧制时，各机架均获得最小的 $f_j(x)$ 值，从而大幅降低辊耗，并避免发生打滑，进而计算最优出口板形。将评价辊耗状态的目标函数 $G(x)$ 表示为式 (2)：

$$G(x) = \tau \sqrt{\left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f_j(x) \right]^2} + \frac{1 - \gamma}{m} \sum_{j=1}^m f_j(x) \quad (2)$$

式中： $G(x)$ 为评价辊耗状态的目标函数； τ 为加权系数； j 为产品工艺规格， $j=1, \dots, m$ 。

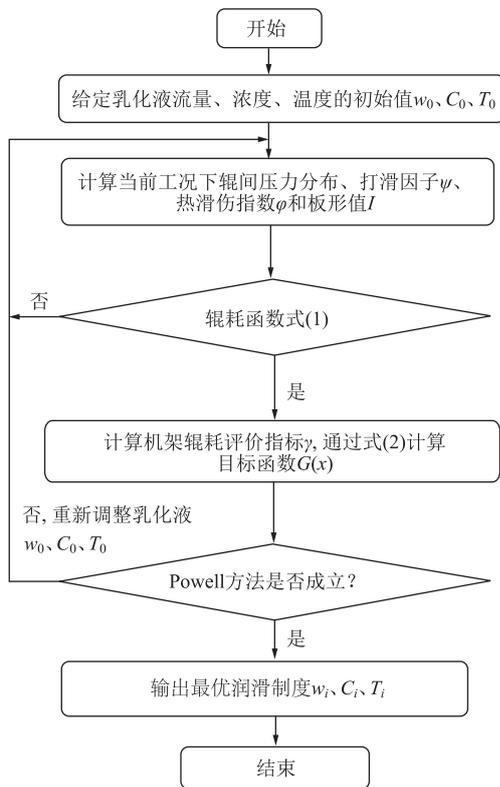


图 2 优化流程图

Fig. 2 Optimization flow chart

3 现场应用

对 2160 mm 热连轧机组进行了辊耗控制研究，由此制得高精度的成品板，同时在更短时间内完成轧辊的更换过程，显著提升轧制钢的成材率。根据本文设计的优化模型对现场生产过程开展了预测，

同时优化乳化液的流量、温度与浓度参数，针对各生产规格设置了相应的工艺润滑条件。

为验证本文的优化方法，对宽度×厚度尺寸为 1020 mm×2.20 mm 的 MRT-4CA 带钢设置本文工艺润滑制度。先收集机组参数、乳化液参数与轧制工艺数据，机组各项参数见表 1，优化前、后的乳化液参数见表 2。通过控制变量的方式共完成 2 次验证测试。其中，采用优化前、后工艺润滑制度获得辊耗评估指标，并计算得到板形值。

对轧制成形出口位置进行测试，测量 200 组数据并取均值，优化前、后形成的辊耗指标与板形值见表 3，不同机架优化前后的指标对比结果见表 4。

表 1 热连轧机组参数

Table 1 Parameters of hot tandem rolling mill

参数	数值
带钢厚度/mm	1.5~25
带钢宽度/mm	780~2160
最大卷重/(×10 ³ kg)	42
年产量/(×10 ⁷ kg)	500
最大轧制力/kN	12800
最大轧制功率/kW	1520
乳化液喷射点距辊缝位置/m	0.45
乳化液喷射最大流量/(L·min ⁻¹)	22

表 2 优化前后乳化液参数

Table 2 Parameters of emulsion before and after optimization

参数	优化前	优化后
流量/(L·min ⁻¹)	11.8	8.3
温度/℃	34.6	41.3
浓度/%	2.5	3.4

表 3 不同机架优化前后的工艺润滑结果

Table 3 Process lubrication results for different frames before and after optimization

工艺	不同机架的 γ							目标函数 G(x)	板形值 I
	1	2	3	4	5	6	7		
优化前	0.413	0.326	0.411	0.406	0.246	0.211	0.168	0.415	13.32
优化后	0.133	0.126	0.183	0.195	0.162	0.210	0.168	0.068	10.46

表 4 不同机架优化前后的指标对比

Table 4 Comparison of indicators for different frames before and after optimization

指标	工艺	机架						
		1	2	3	4	5	6	7
热滑伤指数	优化前	0.166	0.242	0.274	0.512	0.562	0.564	0.565
	优化后	0.096	0.203	0.228	0.403	0.411	0.413	0.414
打滑因子	优化前	0.241	0.262	0.236	0.245	0.253	0.257	0.259
	优化后	0.222	0.243	0.256	0.255	0.184	0.188	0.189
工作辊辊耗/(kg·t ⁻¹)	优化前	6.142	6.336	5.468	5.185	4.266	4.266	4.266
	优化后	4.885	5.025	4.185	4.675	3.669	3.670	3.670

进行轧制生产时,规定弯辊力正方向与轧辊弯曲方向和轧制力导致的轧辊弯曲方向保持相反的状态;上工作辊在正窜辊作用下向驱动侧发生移动,下工作辊向操作侧发生移动;通过在轧辊正下方机架处安装测力传感器的方式,测试在不同乳化液参数取值状态下形成的辊间压力。采用不同润滑制度后的辊间压力分布情况如图 3 所示。

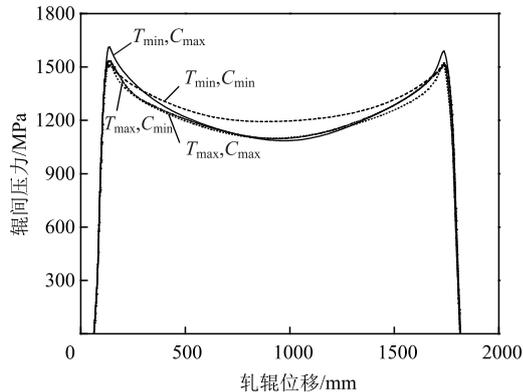


图 3 辊间压力分布

Fig. 3 Distribution of pressure between rollers

根据表 3 和图 3 可知,用于评价辊耗状态的目标函数由 0.415 减小为 0.068,减小幅度为 83.6%;作为末机架出口板形质量评价指标的板形值由最初的 13.32 减小至 10.46,减小比例为 21%。由表 4 可以发现,进行带材轧制时,热滑伤指数减小了 14.6%;打滑因子减小了 13.2%;辊耗减小了 17.4%。图 4 为对各个机架优化前后得到的辊耗结果。根据以上结果可知,采用本文优化方法可以有效减小轧辊辊耗,同时降低机组热滑伤程度,并避免发生打滑的情况,获得质量更优的带钢出口板形,实现了使用性能的大幅提升。

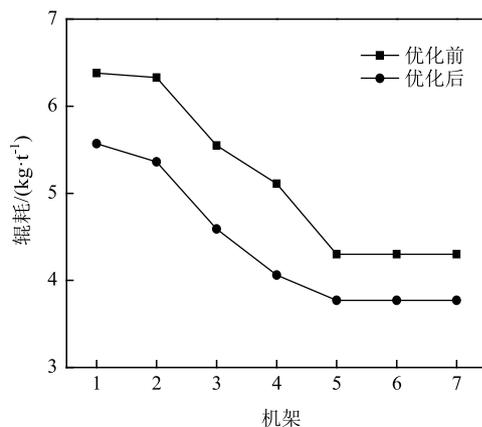


图 4 不同机架优化前后的辊耗

Fig. 4 Roller consumption for different frames before and after optimization

4 结论

(1) 针对热连轧机组工艺特征,综合运用试验轧机与理论分析的方式,构建得到辊耗控制为目标工艺的润滑技术,依次优化了乳化液浓度、流量、温度各项参数,由此实现了优化工艺润滑制度的效果。

(2) 用于评价辊耗状态的目标函数由 0.415 减小为 0.068,减小幅度为 83.6%;板形值由最初的 13.32 减小至 10.46,减小比例为 21%。进行带材轧制时,热滑伤指数减小了 14.6%;打滑因子减小了 13.2%;辊耗减小了 17.4%。

(3) 采用本文优化方法对热连轧机组生产过程进行了控制测试,获得了峰值更小的辊间压力分布,实现了对轧辊辊耗的有效控制,避免了机组打滑现象,实现了经济效益的显著提升。

参考文献:

- [1] 曹建国,陈先霖,何安瑞. 宽带钢热轧机轧辊剥落及其解决方案 [J]. 冶金设备, 1998, (4): 7-9, 20.
Cao J G, Chen X L, He A R. Rolling spalling and its solution for wide strip hot rolling mill [J]. Metallurgical Equipment, 1998, (4): 7-9, 20.
- [2] 窦鹏,李友国,梁开明,等. CVC 热轧机支承辊接触应力有限元分析 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, (12): 1668-1671.
Dou P, Li Y G, Liang K M, et al. Finite element analysis of support roll contact stress in CVC hot rolling mill [J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition, 2005, (12): 1668-1671.
- [3] 李洪波,曹建国,张杰,等. CVC 轧机支持辊力学有限元分析及新辊形 [J]. 塑性工程学报, 2010, 17 (2): 84-89.
Li H B, Cao J G, Zhang J, et al. Finite element analysis and new roll shape of CVC mill support roll mechanics [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17 (2): 84-89.
- [4] 曹建国,王燕萍,孔宁,等. 不锈钢热连轧机粗轧支持辊剥落影响因素的有限元分析 [J]. 工程力学, 2011, 28 (4): 194-199.
Cao J G, Wang Y P, Kong N, et al. Finite element analysis of influencing factors of rough rolling support roll spalling in hot tandem stainless steel mill [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28 (4): 194-199.
- [5] 贾俊彪,严彪,吴成军. 支撑辊倒角对热轧钢板板形的影响 [J]. 上海金属, 2022, 44 (1): 105-110.
Jia J B, Yan B, Wu C J. Influence of support roll chamfer on shape of hot rolled steel sheet [J]. Shanghai Metal, 2022, 44 (1): 105-110.
- [6] 曹建国,魏钢城,张杰,等. 热轧辊形配置对无取向硅钢板形控制性能的影响 [J]. 北京科技大学学报, 2007, (10): 1033-1036, 1050.

- Cao J G, Wei G C, Zhang J, et al. Effect of roll contour configuration on the flatness control performance of non-oriented electrical steel sheets in hot rolling [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, (10): 1033-1036, 1050.
- [7] 孙建林, 马艳丽. 轧制过程工艺润滑技术的发展和应 [J]. 特殊钢, 2007, (3): 47-49.
- Sun J L, Ma Y L. Development and application of lubrication technology for rolling process [J]. Special Steel, 2007, (3): 47-49.
- [8] 孙卫华, 白彦, 项本朝, 等. 热连轧工艺润滑自动控制系统的开发与应用 [J]. 轧钢, 2009, 26 (5): 47-50.
- Sun W H, Bai Y, Xiang B C, et al. Development and application of automatic control system for technology lubrication of hot strip mill [J]. Steel Rolling, 2009, 26 (5): 47-50.
- [9] 孙建林, 孟亚男. 纳米加工液对金属表面的润滑与修复 [J]. 表面技术, 2019, 48 (11): 1-14.
- Sun J L, Meng Y N. Lubrication and repair of metal surface by nano-fluid [J]. Surface Technology, 2019, 48 (11): 1-14.
- [10] 郭贺松, 姬会爽, 刘洋, 等. SCR3000 连铸连轧铜杆生产线 10# 轧辊润滑工艺优化 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (3): 163-170.
- Guo H S, Ji H S, Liu Y, et al. SCR3000 continuous casting and rolling copper rod production line 10# roll lubrication optimization [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (3): 163-170.
- [11] 程志彦, 崔熙颖, 刘云峰, 等. 冷连轧过程中以辊耗控制为目标的轧制规程优化技术 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (12): 211-215.
- Cheng Z Y, Cui X Y, Liu Y F, et al. Optimization technology of rolling schedule aiming at roll consumption control in cold continuous rolling process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (12): 211-215.
- [12] 李硕, 李根, 张勃洋, 等. 冷轧工作辊表面微观形貌磨损行为研究 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2018, 46 (11): 41-46.
- Li S, Li G, Zhang B Y, et al. Study on rolling-wear microtopograph of working roll surface during cold rolling [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2018, 46 (11): 41-46.
- [13] 吴琼, 秦晓峰. 板形调控工艺对轧辊间接接触及磨损的影响 [J]. 太原理工大学学报, 2020, 51 (2): 242-247.
- Wu Q, Qin X F. Influence of shape control process on contact stress and wear of roll [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51 (2): 242-247.
- [14] 曹建国, 张杰, 甘健斌, 等. 无取向硅钢热轧工作辊磨损预报模型 [J]. 北京科技大学学报, 2006, (3): 286-289.
- Cao J G, Zhang J, Gan J B, et al. Work roll wear prediction model of non-oriented electrical steel sheets in hot strip mills [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, (3): 286-289.
- [15] 邵健, 何安瑞, 杨荃, 等. 兼顾热轧工艺润滑的工作辊磨损预报模型 [J]. 中国机械工程, 2009, 20 (3): 361-364.
- Shao J, He A R, Yang Q, et al. Work roll wear prediction model taking in account lubrication in hot rolling [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20 (3): 361-364.
- [16] 白振华, 陈浩, 高明磊, 等. 冷连轧机组划痕缺陷产生机制及治理措施 [J]. 钢铁, 2014, 49 (6): 59-64.
- Bai Z H, Chen H, Gao M L, et al. Scratch defect mechanism and control measures in cold tandem mill [J]. Iron and Steel, 2014, 49 (6): 59-64.

《锻压技术》期刊再次入编《中文核心期刊要目总览》2023 年版 (第 10 版) 以及 “中国科技核心期刊 (中国科技论文统计源期刊)”

近日, 北京大学图书馆《中文核心期刊要目总览》2023 年版编委会发布通知, 《锻压技术》再次入编“金属学与热处理/焊接、金属切削及金属粘接类”核心期刊。这是继 1992 年以来, 本刊连续第 10 次入选中文核心期刊。中文核心期刊是北京大学图书馆联合众多学术界权威专家鉴定, 目前已经出版了 1992、1996、2000、2004、2008、2011、2014、2017、2020 年、2023 年版共 10 版, 受到了学术界的广泛认同。

同时, 根据中国科学技术信息研究所发布的《中国科技核心期刊目录》(2023 年版), 《锻压技术》再次被收录为“中国科技核心期刊”(中国科技论文统计源期刊)。中国科技核心期刊是目前国内公认的科技统计源期刊目录, 每年评估一次。“中国科技核心期刊”的遴选经过了严格的同行评议和定量评价, 是中国各学科领域中较重要的、能反映本学科发展水平的科技期刊。

此次入选是对《锻压技术》期刊学术水平和办刊质量的再次肯定, 也是《锻压技术》编委会全体同仁和编辑部工作人员共同努力的结果。在此, 特别感谢长期以来关心支持本刊的全体编委、审稿专家、作者、读者和各位锻压届同仁!

《锻压技术》创刊于 1958 年, 是一本影响面广泛, 具有权威性的专业技术刊物。自创刊以来, 《锻压技术》一直严把稿件质量关, 登载的论文以反映我国锻压领域及其相关领域的基础理论研究及应用基础研究的重大成果为目标, 兼及新技术和新方法。刊载的多篇文章先后获得中国机械工程学会优秀论文奖和中国科协优秀科技论文奖, 深受锻压行业广大读者的爱戴。

在广大读者、作者的关心和支持下, 在历届编委会和编辑部的共同努力下, 《锻压技术》将继续秉承“理论与生产实际相结合, 普及与提高相结合, 为促进行业技术进步、努力提高产品质量和企业经济效益服务”的办刊宗旨, 以推动锻压科技进步、推动锻压生产技术的发展为目标, 不断向前发展, 努力刊登出更多锻压领域具有高影响力的文章, 继续向精品化、国际化的目标迈进。