

轧制

5154 铝合金小尺寸产品的轧制剪切加工实践

王同刚¹, 杨 嵩^{2,3}

(1. 新乡职业技术学院 数控技术学院, 河南 新乡 453000; 2. 北华航天工业学院 工业技术中心, 河北 廊坊 065000;
3. 天津职业技术师范大学 机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 针对 5154 铝合金小尺寸产品铸造加工过程中生产效率低下且易产生缩孔、裂纹等缺陷的问题, 提出了轧制配合剪切的加工方式。为实现受限空间内保护气氛下的多次轧制, 拟采用单槽多道次轧辊。按照等压下率原则设定总轧制次数为 6 道次, 计算得到每道次压下率为 27%, 从而确定了各道次压下量。根据 5154 铝合金的物理性质、压下量及其他影响因素, 计算得到系统需提供的轧制力为 1195600 N, 轧制力矩为 71721 N·m。试验结果显示, 板坯板形良好, 无瓢曲、起拱、波浪、侧弯等板形缺陷。根据最终产品尺寸要求, 设计出横向与纵向双剪刀协同运动的剪切机构, 参考抗剪强度计算出所需剪切力为 123120 N, 通过比较两种剪切方案所得产品的状态确定了最优剪切方案。最终产品满足技术规程规定的小于 9 mm×45 mm 的要求, 有效地解决了生产中存在的问题。

关键词: 轧制; 剪切; 5154 铝合金; 轧制力; 剪切力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.08.022

中图分类号: TG335

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 08-0146-06

Processing practice on rolling and shearing of small size product for 5154 aluminum alloy

Wang Tonggang¹, Yang Song^{2,3}

(1. College of Numerical Control Technology, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453000, China;
2. Industrial Technology Center, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China;
3. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: For the problems of low production efficiency and easy generation of shrinkage holes, cracks and other defects in the casting process for 5154 aluminum alloy small-size products, a rolling and shearing processing method was proposed. In order to achieve multiple rolling under the protective atmosphere in a confined space, a single-groove and multi-pass roller was adopted. According to the principle of equal reduction rate, the total number of rolling times was set to six passes, and the reduction rate of each pass was calculated to be 27%, so as to determine the reduction amount of each pass. According to the physical properties, reduction amount and other influencing factors of 5154 aluminum alloy, it is calculated that the rolling force that the system needs to provide is 1195600 N, and the rolling torque is 71721 N·m. The test results show that the slab is in good shape without buckling, arching, waves, side bending and other sheet shape defects. According to the size requirements of the final product, the shearing mechanism with the coordinated movement of transverse and longitudinal double shear blades was designed, and the required shearing force was calculated to be 123120 N by reference to the shear strength. The optimal shearing scheme was determined by comparing the states of the products obtained from the two shearing schemes. Thus, the final product meets the requirement of less than 9 mm×45 mm specified in the technical regulations, which effectively solves the problems existing in the production.

Key words: rolling; shearing; 5154 aluminum alloy; rolling force; shearing force

现阶段, 5154 铝合金小尺寸产品的成形方式以铸造为主。铸造成形过程中由于相变应力及热应力

等原因, 铸件内部会产生裂纹或尺寸变形等物理损伤^[1]。同时小尺寸产品铸造成形工艺还存在生产效率高、充型能力差、脱模困难等产业化应用缺陷^[2]。为了提升生产效率及产品合格率, 提出轧制配合剪切的成形工艺。由于产品本身性质所限, 生产过程需在具有气氛保护的受限空间箱室内进行, 要求简化生产设备, 缩短工序流程, 且不能出现屈

收稿日期: 2021-07-21; 修订日期: 2021-10-25

基金项目: 天津市自然科学基金项目 (16JCZDJC38200)

作者简介: 王同刚 (1978-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: wtg613@163.com

曲失稳现象，因此对轧制工艺提出了较高的要求^[3]。薛春江等^[4]分析了变形温度、变形抗力、轧制压力等对铝板带轧制的影响，提出了适合生产应用的变形抗力模型。寇新民等^[5]对传统冷轧过程的能耗分配进行了优化，并应用于生产线验证，缩短了调试周期。曹建国等^[6]针对冷轧薄板边降、凸度、同板差、平坦度等质量指标，并结合宽带钢的冷轧特点，提出了全机组一体化的控制策略，有效地提高了板形质量。邢德茂等^[7]定量分析了弯辊力、窜辊量和倾辊量对板形的影响，并开发出了板形预报软件，取得了有益效果。罗永军等^[8]针对板形板厚的综合控制问题，提出了采用轧制力和压下量作为板形控制的手段，可以提高弯辊力的调控能力，并借鉴生物学免疫遗传算法优化了负荷分配。呼小军等^[9]根据铝热轧特点，采用改进遗传算法，建立了兼顾板形的精轧负荷分配模型，为生产实践提供了技术指导。孙升阳等^[10]对单机架轧制力和板形调节能力进行了分析，在此基础上建立了粒子群算法的负荷分配数学模型，在实践中得到了较好的应用。

综上所述，目前研究主要集中于大空间常规轧制工艺技术，对于受限空间内小尺寸产品的轧制及剪切成形工艺的研究较少。本文根据工艺要求，提出了符合受限空间内生产特点的轧制形式及剪切形式，对加工过程进行了分解研究，并进行了生产验证。

1 金属成形工艺分析

5154 铝合金是以镁作为主要合金元素的铝合金，强度明显高于 1XXX 系列产品，属于中高强度铝合金，具体成分见表 1。镁主要以固溶态和 β (Mg_2Al_3 或 $Mg_{17}Al_{12}$) 相存在，对铝起到了强化作用，5154 铝合金的机械性能见表 2。

表 1 5154 铝合金化学成分（%，质量分数）						
Table 1 Chemical compositions of 5154 aluminum alloy (%, mass fraction)						
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
0.50	0.40	0.10	0.10	3.10~3.90	0.15~0.35	0.20

表 2 5154 铝合金力学性能						
Table 2 Mechanical properties of 5154 aluminum alloy						
参数	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{el} /MPa	伸长率 A /%	硬度/ HB	抗剪强度 σ_r /MPa	弹性模量 E /GPa
数值	230	117	27	58	152	69.3

通过对 5154 铝合金的化学成分及机械性能指标进行分析，发现其特点为抗拉强度高，伸长率高，硬度在 5XXX 系列铝合金中较低，因此可选用轧制作为其成形方式。成形坯料形状如图 1 所示，为尺寸为 $\Phi 60\text{ mm}\times 103\text{ mm}$ 的端面球状圆台，最终产品为 h （厚度） $\times w$ （宽度） $\times l$ （长度） $\leq 9\text{ mm}\times 9\text{ mm}\times 45\text{ mm}$ 的片状金属。

轧制总加工率 ε_Σ 的表达式如式（1）所示。

$$\varepsilon_\Sigma = \frac{H - h}{H} \times 100\% \quad (1)$$

式中： H 为坯料厚度。



图 1 成形坯料形状
Fig. 1 Shape of formed blank

将 $H=60\text{ mm}$ ， $h=9\text{ mm}$ ，代入式（1），计算得出 $\varepsilon_\Sigma=85\%$ 。总加工率较大，为减小咬入难度及避免轧制过程中产品边缘开裂，因此需要通过多次轧制以达到规定的尺寸。

2 轧制工艺设计

2.1 各道次加工率分配

在轧制总加工率确定后，应合理分配各道次的加工率。分配基本原则为^[11]：

- （1）为充分利用金属塑性，第 1 道次加工量较大，随加工硬化程度的增加，加工量逐渐减小。
- （2）分配各道次加工率时，应尽量使各道次的轧制压力接近。
- （3）保证设备安全运转，防止超负荷造成设备损坏。

由于 5154 铝合金具有良好的延展性，为简化影响因素，根据可逆冷轧机的特点，各道次的加工率分配方法一般采用等压下率分配，计算公式为^[12]：

$$\varepsilon \approx \left[1 - \left(\frac{h}{H} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中: ε 为压下率, %; n 为所需要轧制的道次。

根据探索性试验结果及坯料的物理性质, 取 $n=6$, 将直径为 $\Phi 60$ mm 的坯料轧制至直径为 $\Phi 9$ mm, 则 $\varepsilon \approx 27\%$ 。即各道次压下量为: $\Phi 60$ mm (坯料原始尺寸) $\rightarrow \Phi 43.7$ mm ($\Phi 60$ mm $\times 73\%$) $\rightarrow \Phi 31.9$ mm ($\Phi 43.7$ mm $\times 73\%$) $\rightarrow \Phi 23.2$ mm ($\Phi 31.9$ mm $\times 73\%$) $\rightarrow \Phi 16.9$ mm ($\Phi 23.2$ mm $\times 73\%$) $\rightarrow \Phi 12.3$ mm ($\Phi 16.9$ mm $\times 73\%$) $\rightarrow \Phi 9$ mm ($\Phi 12.3$ mm $\times 73\%$)。

2.2 轧制力计算

轧制力可以通过压力传感器测量获得, 也可以通过计算得出。根据轧制力匹配轧机的功率及扭矩等, 既能满足生产需要, 又减少了无用功耗, 图 2 为轧机工作过程中轧辊与坯料之间的相互作用情况。其中, dh 为坯料前进 dx 距离时的压下量, hx 为轧辊与坯料某点的断面高度, x 为坯料前进的距离, Δh 为单道次压下量。

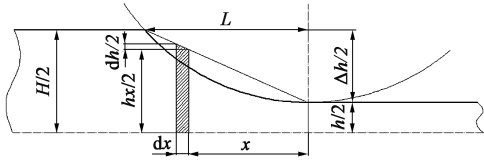


图 2 轧辊与坯料之间的相互作用情况

Fig. 2 Interaction condition between roller and blank

假设弧长约等于弦长, 根据采利柯夫平均单位压力公式:

$$\bar{p} = K \left(\frac{2h}{\Delta h(\delta - 1)} \right) \left(\frac{h_r}{h} \right) \left[\left(\frac{h_r}{h} \right)^\delta - 1 \right] \quad (3)$$

$$L = \sqrt{\Delta h \times R} \quad (4)$$

令:

$$\delta = \mu \frac{2L}{\Delta h} = \mu \sqrt{\frac{2D}{\Delta h}} \quad (5)$$

$$K = 1.15 R_m \quad (6)$$

式中: \bar{p} 为平均单位压力, MPa; K 为平面变形抗力, ($\text{Kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$); h_r 为中位面高度, mm; δ 为采氏系数; L 为接触弧长, mm; R 轧辊的工作半径, mm; D 为轧辊直径, mm; μ 为摩擦因数, 取 0.18^[13]。

计算可得 $L = 48.99$ mm, $\delta = 2.2045$, $K = 26.984 \text{ Kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。

代入以上结果, 得出 $\frac{\bar{p}}{K} = 1.3$, 故 $\bar{p} = 35.0792 \text{ Kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。

轧制力 P 为:

$$P = F \bar{p} \quad (7)$$

式中: F 为接触面积。

F 的计算公式如式 (8) 所示。

$$F = \frac{B + b}{2} \sqrt{R \Delta h} \quad (8)$$

式中: B 为某道次轧制前坯料的宽度, 取 70 mm; b 为轧制后坯料的宽度, 取 72 mm。计算得出 $F = 347 \text{ mm}^2$, 故轧制力 $P = 1195600 \text{ N}$ 。

两辊总轧制力矩 M 为:

$$M = 2P\varphi L \quad (9)$$

式中: φ 为力臂系数, 取 0.6。

则 $M = 71721 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。根据轧制力和轧制力矩对轧制动力系统进行选型。

2.3 轧辊形式设计

通过计算得出, 需要经过 6 道次轧制, 来完成坯料从 $\Phi 60$ mm 至 $\Phi 9$ mm 的塑性变形, 为了保障箱室的密封性, 不能通过调节辊缝开度来实现尺寸的变化。由于箱室空间受限, 也无法采用多辊轧制的方式, 因此设计出了单轧槽多道次轧辊^[14-15]。轧槽剖面如图 3 所示, 在 1 个轧槽内分布有两个不同直径的道次。3 道轧槽分布于轧辊表面 (图 4), 从而实现单根轧辊完成 6 道次轧制。

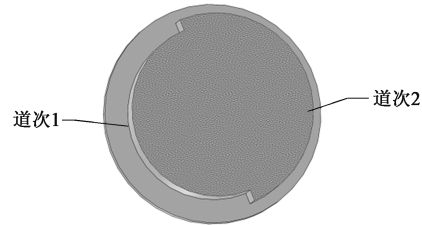


图 3 轧槽剖视图

Fig. 3 Cutaway view of rolling groove

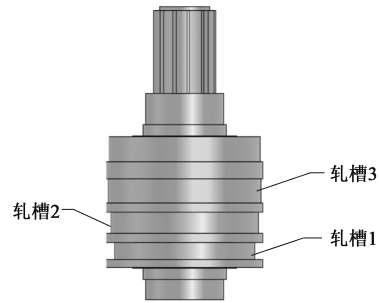


图 4 轧辊结构

Fig. 4 Roller structure

2.4 轧制过程分析

轧制开始时, 坯料先从轧槽 1 进入第 1 道次, 轧制完成后轧辊反转, 实现第 2 道次轧制, 再移至轧槽 2 进行第 3 道次轧制, 后续道次依次进行, 经过 6 次可逆轧制, 最终得到如图 5 所示的板坯。可以看出, 所得板坯的板形良好, 无瓢曲、起拱、波



图 5 轧制后的板坯

Fig. 5 Slab after rolling

浪、侧弯等板形缺陷，表面光滑，无需二次整形即可进入下道工序，缩短了系统工序。

3 剪切工艺设计

3.1 剪切机设计

经过测量，轧制后板坯的宽度约为 90 mm，大于最终宽度尺寸 45 mm，因此在对板坯横向剪切后需再进行纵向剪切。剪切机设计如图 6 所示，主剪刀和副剪刀通过曲轴的转动实现协同上下往复运动，完成对坯料的剪切动作。主剪刀先沿横向将板坯剪为条状，再滑落至副剪刀位置实现纵向剪切，从而得到最终产品。

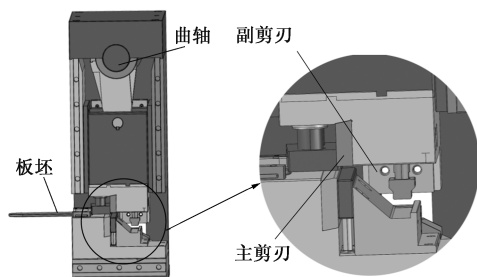


图 6 剪切机结构

Fig. 6 Structure of shearing machine

3.2 剪切力的计算

轧制后的板坯通过剪切工序得到最终产品，剪切过程可分解为弹性挤压、塑性变形、裂纹萌生及失稳扩展 4 个阶段^[16]。研究表明，最大剪切力出现在塑性变形阶段，要使剪刀完成对坯料的剪切任务，系统提供的动力需大于最大剪切力，剪切力 F_τ 的估算公式为^[17]：

$$F_\tau = \sigma_\tau \times S \quad (10)$$

式中： S 为板坯截面积。

代入数值得出 $F_\tau = 123120 \text{ N}$ ，即可根据所得剪切力来匹配剪切机动力系统。

3.3 剪切方案的确定

板坯的剪切流程主要有 2 种方案。方案 1：先沿横向剪切为厚度×宽度约为 9 mm×90 mm 的半成品，再沿纵向从中间剪断，得到小于 9 mm×45 mm 规格的产品（图 7a）；方案 2：先沿横向剪切为厚度×宽度约为 45 mm×90 mm 的半成品，再沿纵向剪切为小于 9 mm×45 mm 规格的产品（图 7b）。

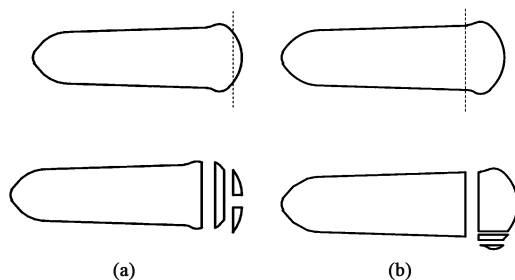


图 7 剪切方案对比

(a) 方案 1 (b) 方案 2

Fig. 7 Comparison of shearing schemes

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

图 8 为两种剪切方案产生的碎屑图。从图 8 可以看出，当采用第 1 种剪切方案时，碎屑较少，且基本可随产品一起收集，而对于第 2 种剪切方案，碎屑明显增多且不易收集。分析有两方面原因：(1) 轧制后的板坯呈梯形，剪切后会出现较多斜边；(2) 在副剪刀剪切过程中，主剪刀会产生多次的空切动作，摩擦剪切面造成碎屑增多。综合考虑以第 1 种剪切方案为主。

通过设定主剪刀和副剪刀的剪切尺寸，可得到 $h \times w = 9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ ， $l \leq 45 \text{ mm}$ 的片状产品（图 9），经实际应用测试，产品能够满足技术指标要求。

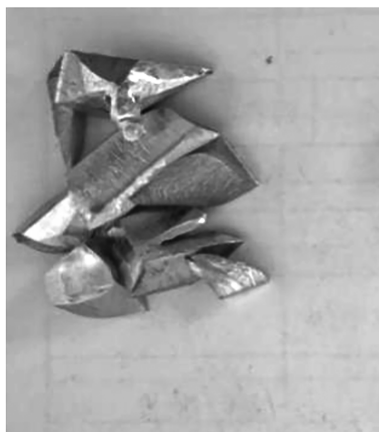
4 结论

(1) 采用 6 道次轧制，每道次压下率为 27%，实现从 $\Phi 60 \text{ mm}$ 端面球状圆台坯料轧制至符合剪切要求的 $\Phi 9 \text{ mm}$ 的板坯。

(2) 通过单槽多道次轧制方式，在保证空间气氛的条件下实现了多次往复轧制。

(3) 根据材料特性，采用轧制力为 1195600 N、轧制力矩为 71721 N·m 的条件可满足轧制需求。

(4) 采用横向与纵向双剪刀协同运动的剪切模



(a)



(b)

图 8 两种剪切方案产生的碎屑

(a) 方案 1 (b) 方案 2

Fig. 8 Detritus produced by two kinds of shearing schemes

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2



图 9 剪切后的产品

Fig. 9 Products after shearing

式, 剪切力为 123120 N, 可满足对应尺寸的剪切要求。

(5) 采用先横切为 9 mm×90 mm 的条状半成品, 再从中间纵切的方式, 所得的产品碎屑较少, 便于收集, 可作为最终剪切方案。

参考文献:

- [1] 李彩凤, 张兆隆. 金属工艺学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.
Li C F, Zhang Z L. Technology of Metals [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013.
- [2] 尹晓辉, 李响, 刘静安, 等. 铝合金冷轧及薄板生产技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
Yin X H, Li X, Liu J A, et al. Aluminum Alloy Cold Rolling and Sheet Production Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.
- [3] 杨荃, 陈先霖. 冷轧机的板形控制目标模型 [J]. 北京科技大

学学报, 1995, (3): 254-258.

Yang Q, Chen X L. Target model of the automatic shape control on cold strip mill [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1995, (3): 254-258.

- [4] 薛春江, 徐文利, 张巍. 基于工程设计应用的铝板带热轧规程设计 [J]. 轻合金加工技术, 2018, 46 (7): 39-44.
Xue C J, Xu W L, Zhang W. Design of hot rolling schedule for aluminum plate and strip based on engineering design and application [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2018, 46 (7): 39-44.
- [5] 寇新民, 张冬花. 能耗负荷分配法在铝冷轧生产线的应用 [J]. 冶金自动化, 2017, 41 (5): 44-46.
Kou X M, Zhang D H. Energy load distribution for aluminum cold rolling [J]. Metallurgy Industry Automation, 2017, 41 (5): 44-46.
- [6] 曹建国, 江军, 邱澜, 等. 新一代高技术宽带钢冷轧机全机组一体化板形控制 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2019, 50 (7): 1584-1591.
Cao J G, Jiang J, Qiu L, et al. High precision integrated profile and flatness control for new-generation high-tech wide strip cold rolling mills [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2019, 50 (7): 1584-1591.
- [7] 邢德茂, 姚利辉, 李学通. 2030 mm 冷连轧机组板形预报及影响因素研究 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (3): 210-216.
Xing D M, Yao L H, Li X T. Study on prediction and influencing factors of flatness of 2030 mm tandem cold rolling mill [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (3): 210-216.
- [8] 罗永军, 王长松, 曹建国, 等. 兼顾板形的热连轧机负荷分配的优化 [J]. 北京科技大学学报, 2005, (1): 94-97.
Luo Y J, Wang C S, Cao J G, et al. Load distribution optimization helpful to shape control of hot strip mills [J]. Journal of Universi-

- ty of Science and Technology Beijing, 2005, (1): 94-97.
- [9] 呼小军, 何安瑞, 王连生, 等. 基于改进遗传算法的铝热轧精轧负荷分配 [J]. 轻合金加工技术, 2010, 38 (7): 30-34.
- Hu X J, He A R, Wang L S, et al. Aluminum hot finish rolling with optimized load distribution based on improved GA [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2010, 38 (7): 30-34.
- [10] 孙升阳, 沈新玉, 胡柯, 等. 基于粒子群算法的单机架冷轧硅钢负荷分配优化 [A]. 2009 年全国冷轧板带生产技术交流会议论文集 [C]. 包头: 2009.
- Sun S Y, Shen X Y, Hu K, et al. Optimization of load distribution in single-stand rolling of silicon steel based on PSO algorithm [A]. Proceedings of the 2009 National Cold Rolled Strip Production Technology Exchange Conference [C]. Baotou: 2009.
- [11] 徐乐江. 板带冷轧机板形控制与机型选择 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- Xu L J. Flatness Control in Cold Strip Rolling and Mill Type Selection [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [12] 沈继程, 矫志杰, 王国栋. 应用简单迭代法进行可逆冷轧机负荷分配计算 [J]. 钢铁研究学报, 2007, (3): 35-37.
- Shen J C, Jiao Z J, Wang G D. Simple iteration method of calculating load distribution for reversible cold mill [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007, (3): 35-37.
- [13] Lenard J G. 板带轧制基础 [M]. 龚殿尧, 宋向荣, 译. 沈阳: 东北大学出版社, 2015.
- Lenard J G. Primer on Flat Rolling [M]. Translated by Gong D Y, Song X R. Shenyang: Northeastern University Press, 2015.
- [14] 华建新, 王贞祥. 全连续式冷连轧机过程控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- Hua J X, Wang Z X. Process Control of Fully Continuous Tandem Cold Mill [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.
- [15] 杨美顺. 现代冷轧机发展现状及展望 [J]. 中国冶金, 2004, (10): 15-19.
- Yang M S. Development and expectation of modern cold rolling mills [J]. China Metallurgy, 2004, (10): 15-19.
- [16] 魏纯纯, 陈明和, 孙磊, 等. 3D 封装用 Cu/Sn/Cu 焊点的组织与剪切性能研究 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (6): 603-608.
- Wei C C, Chen M H, Sun L, et al. Microstructure and shear property of Cu/Sn/Cu solder joints for 3D packaging [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (6): 603-608.
- [17] 刘培锴, 张世杰. 金属剪切过程力学研究进展 [J]. 力学进展, 1987, 17 (1): 39-45.
- Liu P E, Zhang S J. On researches of shearing progresses of metals [J]. Advance in Mechanics, 1987, 17 (1): 39-45.

欢迎订阅《塑性工程学报》杂志



欢迎关注微信公众号

《塑性工程学报》(Journal of Plasticity Engineering)创刊于1994年,是由中国科学技术协会主管、中国机械工程学会主办的学术刊物。《塑性工程学报》为全国中文核心期刊,被众多知名数据库收录:中文核心期刊要目总览(北大)、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊(核心库)、中国科技期刊引证报告统计源核心期刊、中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)、中国学术期刊文摘数据库(核心版,CSAD-C)、中国学术期刊综合评价数据库、美国化学文摘CA、美国剑桥科学文摘材料信息(CSA:MI)、Scopus数据库、日本科学技术振兴机构中国文献数据库等。本刊主要报道与塑性成形领域及其交叉学科相关的前沿性、创新性的基础理论研究和工程技术应用等优秀科研成果。

本刊宗旨:

活跃本专业学术思想,提高本专业学术理论,强化本专业学术交流,为不断提高我国塑性工程基础水平,确立我国塑性工程界在世界科技阵容中的地位而服务。

读者对象:

本刊适用于从事与材料塑性成形理论研究、科研、生产、设计等相关的高校师生、科研人员及专业技术人员阅读。

本刊订阅方式

1. 全国各地邮局均可直接订阅
本刊为月刊,大16开本,每月末出版
邮发代号: 80-353
国际标准刊号: ISSN 1007-2012
国内统一刊号: CN 11-3449/TG
国内定价: 40.00元/册
2. 逾期未定上者,可与编辑部联系订阅
汇款地址: 北京市海淀区学清路18号
收款人: 《塑性工程学报》编辑部
联系人: 薛老师
联系电话/传真: 010-62912592
电子邮箱: sxgxcb@263.net

欢迎投稿,网址: <http://sxgc.cbpt.cnki.net/>