

## 铝型材三维拉弯工艺

崔广磊, 李 超, 沈盛军, 于洪兵  
(包头职业技术学院 车辆工程系, 内蒙古 包头 014030)

**摘要:** 由于铝型材三维拉弯夹头的运动轨迹一般为空间曲线, 且铝型材在拉弯过程中有拉伸变形, 其拉弯夹头的运动轨迹很难获取, 为此, 提出一种确定铝型材三维拉弯夹头运动轨迹的方法。首先, 将初始的铝型材两端分为固定端和夹持端, 并在固定端建立坐标系; 其次, 提取产品的中心轴线, 将其离散化成若干个空间点, 以每一个离散点为切点, 做产品中心轴线的切线; 沿每一条切线方向截取相应长度的线段 (从切点到夹持端), 线段另一端点即为夹头运动轨迹经过的空间点, 将这些点依次连接便可得到夹头的运动轨迹; 最后, 通过实例对提出的方法进行验证。结果表明: 在一定范围内, 随着离散点数量的增加, 回弹值迅速减小, 而后随着离散点继续增加, 回弹值变化不大; 在分析时将中间部位作为回弹参考基准, 得到的回弹值与实际结果更为接近。

**关键词:** 铝型材; 三维拉弯; 夹头; 运动轨迹; 回弹

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.011

**中图分类号:** TG386.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 02-0078-05

## Three-dimensional stretch-bending process for aluminum profile

Cui Guanglei, Li Chao, Shen Shengjun, Yu Hongbing

(Department of Vehicle Engineering, Baotou Vocational and Technical College, Baotou 014030, China)

**Abstract:** Since the motion trajectory of three-dimensional stretch-bending chuck for aluminum profile is generally a space curve, the aluminum profile is stretched and deformed during the stretch-bending process, and the motion trajectory of stretch-bending chuck is difficult to obtain. Therefore, a method for determining the motion trajectory of three-dimensional stretch-bending chuck for aluminum profile was proposed. Firstly, the two ends of initial aluminum profile were divided into fixed end and clamping end, and the coordinate system was established at the fixed end. Secondly, the central axis of product was extracted to discretize into several space points, and each discrete point was taken as the tangent point to make the tangent line of product central axis. Furthermore, the line segment of corresponding length was intercepted along each tangent direction (from the tangent point to the clamping end), the other end of the line segment was the space points through which the chuck motion trajectory passes, and by connecting these points in turn the trajectory of chuck was obtained. Finally, an example was given to verify the proposed method. The results show that within a certain range, with the increasing of the number of discrete points, the springback value decreases rapidly, and then as the number of discrete points continues to increase, the springback value changes little. In the analysis, the middle part is taken as the springback reference standard, and the springback value obtained is closer to the actual result.

**Key words:** aluminum profile; three-dimensional stretch-bending; chuck; motion trajectory; springback

车身轻量化必然要用到轻质合金, 铝合金是目前应用最为广泛的轻质合金, 车身骨架一般采用的均是铝型材, 铝型材的成形工艺主要包括压弯和拉弯。对于简单结构的铝型材, 可直接通过模具冲压实现; 对于复杂结构的铝型材, 特别是三维扭曲线, 无法通过模具压弯实现, 需要采用拉弯工艺。铝型材材质较软, 为增强铝型材结构强度, 铝型材多设

计为异形断面结构, 但异形断面结构不能采用圆球作为芯棒, 所以, 很难通过数控弯管机实现铝型材的三维弯曲结构, 可以通过弯曲工艺实现。对于冲压和数控弯曲, 工件和模具的运动关系较为简单, 一般为单一方向的移动和旋转; 而三维拉弯需要确定夹头的运动轨迹, 该运动轨迹直接影响产品的质量, 且其为空间曲线, 无法预先确定, 若通过试验的方法获取, 成本和周期将大大增加, 因此, 通过产品结构特征并结合数值计算来确定三维拉弯夹头的运动轨迹尤为重要。针对铝型材拉弯件引导线的变曲率问题: 黎明等<sup>[1]</sup>建立了中性层位移量与夹头

收稿日期: 2020-12-14; 修订日期: 2021-03-15

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJZY21101)

作者简介: 崔广磊 (1986-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: 1129279130@qq.com

轨迹之间的关系模型, 并经过归一化处理, 建立了拉弯成形模拟过程中夹头的位移边界条件定义数据的计算方法, 最后对该算法进行验证; 张学广等<sup>[2]</sup>针对铝型材拉弯设备的结构及其成形原理, 将夹头的加载方式转化为拉伸缸沿转臂的拉伸量和转臂的转角, 并设计出一种基于增量控制的型材拉弯轨迹设计方法; 高恩志等<sup>[3]</sup>针对 L 形 2024 铝合金拉弯结构件的回弹问题, 提出基于位移控制的夹钳轨迹建模方法, 建立了拉弯及回弹有限元模型, 对比分析了预拉量、补拉量以及摩擦因数对回弹的影响, 并通过正交试验方法进行了验证; 刘志军等<sup>[4]</sup>在运动仿真系统 PSBPD 中建立了 T 形材拉弯夹头运动轨迹, 采用 ABAQUS 分析了预拉系数和包覆变形控制系数对铝型材拉弯成形结果的影响, 结果表明, 预拉系数与变形系数与回弹成反比, 且预拉系数对切向应变的影响较为显著。上述研究仅对某些特定结构的型材适用, 对于一般的三维铝型材拉弯, 上述方法存在一定的局限性。为了解决三维铝型材拉弯夹头运动轨迹的确定问题, 本文提出一种离散化逼近方法来确定夹头的运动轨迹, 将三维拉弯等效转化成一端固定、另一端随形运动的模型, 并根据中心线离散化切点延长线来截取每个夹头的轨迹点。该方法对铝型材结构的适应性强, 通过该方法可快速确定夹头的运动轨迹, 有效地缩减产品的开发周期和试模次数。

## 1 铝型材拉弯过程的等效变换

铝型材一般通过挤出成形获得, 相比弯曲成形, 挤出成形的质量控制相对单一, 且产品质量的稳定性好<sup>[5-8]</sup>。铝型材拉弯是通过两端夹头夹持型材逐渐贴合模具型面, 该方法需要预先确定两个夹头的运动轨迹, 而对于三维拉弯而言, 型材在拉伸过程中的伸缩量和变形量很难准确预测, 且针对铝型材拉弯, 目前没有专业分析软件。铝型材在拉弯过程中不可避免地会产生塌陷和起皱, 对于一般的基础性分析软件, 将出现网格单元的过度畸变, 导致计算失效, 所以, 预先通过仿真算法来获取拉弯轨迹几乎无法实现。为此, 本文提出一种基于产品几何特征的拉弯轨迹获取方法。

由于运动存在相对性, 可将双夹头运动等效转化为单夹头运动, 为此, 本文充分考虑铝型材拉弯件的结构特征, 将拉弯过程等效转化成一端固定、一端通过夹头夹持。从固定端向夹持端逐渐贴合模

具的过程, 如图 1 所示。

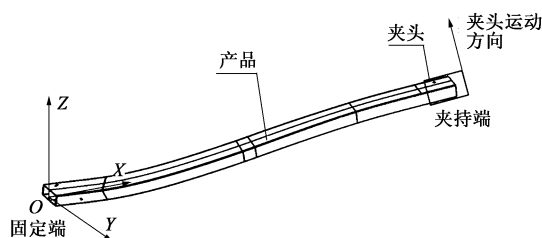


图1 铝型材拉弯过程的等效转化

Fig. 1 Equivalent transformation of stretch-bending process for aluminum profiles

## 2 铝型材拉弯轨迹的确定

首先, 以固定端(图1)作为坐标原点, 构建相应的坐标系; 其次, 提取产品的中心轴线, 将轴线均匀离散化成若干个点。在铝型材贴合模具的过程中, 将产品分为贴合段 $L_t$ 和未贴合段 $L_w$ , 设产品长度为 $L_0$ , 则 $L_0 = L_w + L_t$ , 如图2所示。由于产品在贴合模具过程中会发生变形, 则未贴合段长度可通过 $L_w = L_0 - L_t$ 获得, 这样可以保证未贴合段长度与实际值保持一致。

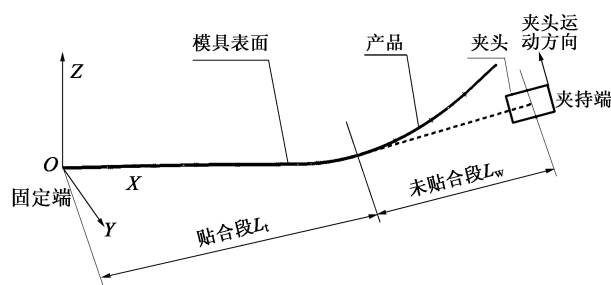


图2 铝型材贴合模具过程

Fig. 2 Process of aluminum profile fitting die

由于分离出的产品中心线是空间曲线, 而空间曲线在某一点处的切线方向是确定的; 切线可在CAD软件中直接得出, 并得到相应的线段长度; 将获取到的夹头运动轨迹作为拉弯机的控制参数, 其运动端夹头的控制参数格式为(时间, X坐标、Y坐标、Z坐标), 固定端夹头的控制参数格式为(时间, 0、0、0)。对于空间变形较大的零件: (1) 可通过几何方法确定产品的中心层(不产生伸长量的面), 将中心轴线在中心层的投影作为虚拟的产品轴线; (2) 中心层不易获取的型材零件(扭曲零件), 可将其中心线所在的面沿某一主方向展开

(近似冲压成形分析)。

为确定夹头的运动轨迹, 首先将产品中心轴线离散化为  $n$  个空间点 ( $n$  值越大, 确定的轨迹越精确)。在每个点处做产品中心轴线的切线, 设第  $k$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ) 个空间点贴合段长度为  $L_t(k)$ , 则未贴合段长度为  $L_w(k) = L_0 - L_t(k)$ 。以  $k$  点为起点, 沿  $k$  点切线方向截取长度为  $L_w(k)$  的线段, 则线段的终点便为  $k$  点处夹头运动经过的点, 依次类推, 可以获得整个夹头的运动轨迹。

将获取到的夹头运动轨迹作为拉弯机的控制参数, 其夹持端夹头的控制参数格式为 (时间,  $X$  坐标、 $Y$  坐标、 $Z$  坐标), 固定端夹头的控制参数格式为 (时间, 0、0、0), 从而实现一端固定、另一端移动。

### 3 铝型材拉弯轨迹仿真分析与结果验证

#### 3.1 夹头拉弯轨迹确定方法的验证

以某轻量化车身横梁为载体, 对本文所提出的方法进行验证。产品数模如图 3 所示, 该产品是一个三维拉弯结构, 其断面为“日”字口型, 材料为 6016-T6 铝合金。



图 3 产品数模

Fig. 3 Numerical simulation model of product

首先, 在 CAD 软件中提取产品的中心轴线, 并对其进行离散化处理。在中心轴线上均匀预设 50 个切点 (根据产品结构复杂程度来确定切点的数量, 切点数量与最终获取的轨迹精度有关, 一般在曲率变化大的位置布置多个切点)。如图 4 所示, 从固定端依次向夹持端做中心轴线的切线; 在每个切线方向上截取一定长度的线段 (未贴合模具的产品中心线展开长度), 线段的终点就是夹头运动经过的点; 最后, 依次将这些点连接起来, 便可获取最终的夹头运动轨迹。在实际应用过程中, 直接读取这些点坐标, 将坐标值作为夹头的控制参数。

在首次拉弯过程中会按预先设定好的轨迹进行拉弯。由于产品一端是固定的, 产品本身不会发生刚性偏移; 但由于夹头的运动轨迹是三维曲线, 产品会跟随夹头的运动而运动。由于铝型材回弹的不确定性较大, 在首次确定夹头的拉弯运动轨迹时不

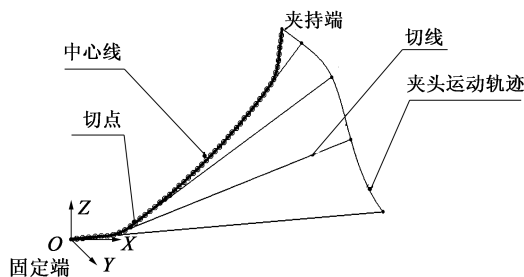


图 4 夹头轨迹的确定

Fig. 4 Determination of motion trajectory for chuck

考虑回弹, 根据首次试模样件回弹值再对夹头的拉弯运动轨迹进行修正。通过扫描实物样件, 提取出产品的实际中心轴线, 建立相应的拉弯运动轨迹, 在预设拉弯运动轨迹跟实际产品中心轴线之间建立一一对应关系。首先, 将产品实际中心轴线分离成  $n$  个离散点, 产品理论中心轴线同样分离成  $n$  个离散点, 且这些离散点之间间距相等; 求相同编号离散点之间的空间距离, 并将该距离直接映射到修正后的拉弯运动轨迹上; 再根据仿真结果, 对模具做相应修正。

#### 3.2 产品成形性分析

成形性是铝型材拉弯的考核指标之一, 但由于铝型材断面结构一般为异形结构, 钢管弯曲过程中的型腔内部支撑体无法应用在铝型材拉弯中, 铝型材拉弯一般会出现起皱、开裂等缺陷。针对图 3 所示产品结构, 在 CAE 分析软件中构建相应的分析模型<sup>[9-13]</sup>, 并将夹头控制方式设定为位移控制, 最终的产品成形性分析结果如图 5 所示。

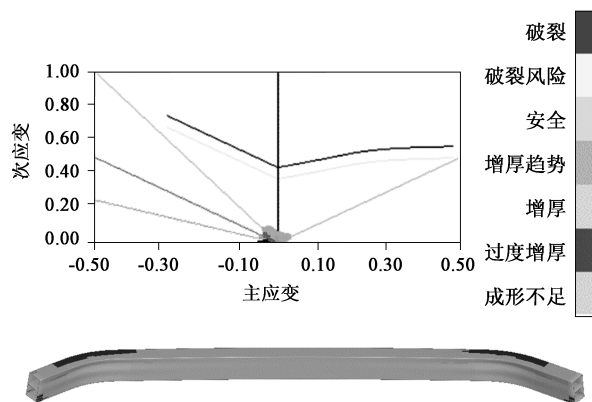


图 5 产品成形性分析结果

Fig. 5 Analysis result of formability for product

从图 5 可以看出, 产品在两端圆弧内侧出现凹陷, 这主要是由于产品在拉弯过程中内部型腔缺乏机械支撑而出现坍塌, 但产品无开裂、叠料等其他缺陷, 通过跟实物进行对比, 分析结果与实物相吻合。

### 3.3 产品回弹分析

通过对比钢、铝的力学性能可知, 铝合金成形难点主要有: (1) 伸长率低、变形区间小, 零件不易成形且容易开裂; (2) 弹性模量较钢板小, 成形后零件回弹较钢板大, 产品形状尺寸不易控制。回弹值也是铝型材拉弯的考核指标之一, 图6、图7分别为产品X向、Y向回弹分析结果。

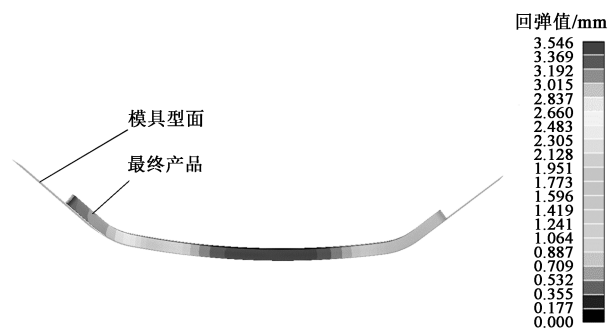


图6 产品回弹分析结果(X向)

Fig. 6 Analysis result of springback for product (X direction)

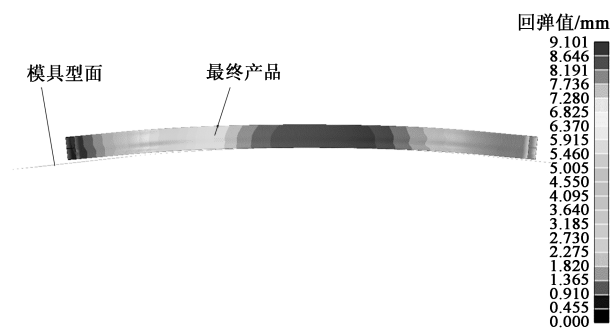


图7 产品回弹分析结果(Y向)

Fig. 7 Analysis result of springback for product (Y direction)

经过分析, 产品的Z向回弹值在0.5 mm以内, 故该产品的回弹值主要集中在X向和Y向, 且Y向回弹值大于X向回弹值; 回弹的最大值均出现在同一侧, X向最大回弹值为3.5 mm, Y向最大回弹值为8.4 mm。

### 3.4 实物验证

以试制方式对本文所设计的方法进行验证, 最终加工的产品如图8所示。



图8 最终产品

Fig. 8 Final product

产品两端圆弧处的内侧出现凹陷, 侧壁形成了鼓包, 中间有筋部位未产生明显的凹陷, 这主要是由于

铝型材在拉弯过程中内部型腔缺乏机械支撑, 容易出现塌陷, CAE分析结果与实物缺陷形式和位置保持一致, 由此可知, 本文所设计的夹头拉弯轨迹可以满足实际生产要求。通过对产品进行扫描, 得到实际的回弹值: X向最大回弹值为3.2 mm (分析值为3.5 mm), Y向最大回弹值为7.8 mm (分析值为8.4 mm), 分析结果与实际结果基本一致。分别将产品不同部位(固定端、夹持端、中间部位)作为回弹参考基准进行对比分析发现, 将中间部位作为回弹参考基准, 得到的回弹值与实际结果更为接近。图9为离散点数量对回弹结果的影响。

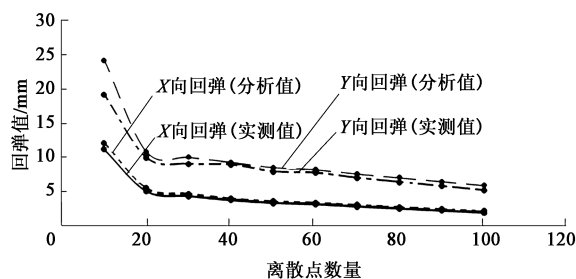


图9 离散点数量对回弹结果影响

Fig. 9 Influence for number of discrete points on springback results

在实际分析中, 当离散点数量小于10时, 产品偏离了模具型腔, 无法顺利贴合模具。当离散点数量大于10时, 从图9可以看出: 在一定范围内, 随着离散点数量的增加, 回弹值迅速减小; 而后随着离散点数量继续增加, 回弹值变化不大。

## 4 结论

(1) 根据运动的相对性原理, 将铝型材双头拉弯等效转化为单夹头拉弯, 可有效简化铝型材拉弯的计算模型。

(2) 分别将产品不同部位(固定端、夹持端、中间部位)作为回弹参考基准进行对比分析时发现, 将中间部位作为回弹参考基准, 得到的回弹值与实际结果更为接近。

(3) 当离散点数量小于10时, 产品偏离了模具型腔, 无法顺利贴合模具。当离散点数量大于10时, 在一定范围内, 随着离散点数量的增加, 回弹值迅速减小; 而后随着离散点数量继续增加, 回弹值变化不大。

### 参考文献:

[1] 黎明, 魏耀光, 王永军, 等. 二维型材拉弯成形有限元模拟

- 夹头运动轨迹设计算法 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (2): 253-258.
- Li M, Wei Y G, Wang Y J, et al. Jaw trajectory design algorithm for finite element simulation of 2D profile stretch bending [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (2): 253-258.
- [2] 张学广, 贾明萌, 刘纯国, 等. 基于增量控制的型材拉弯轨迹设计及有限元仿真 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2019, 49 (4): 1272-1279.
- Zhang X G, Jia M M, Liu C G, et al. Trajectory design and FE simulation for profile stretch bending based on incremental control method [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2019, 49 (4): 1272-1279.
- [3] 高恩志, 李作成, 王杰, 等. 2024 铝合金挤压型材拉弯回弹分析 [J]. 有色金属工程, 2021, 11 (3): 50-56.
- Gao E J, Li Z C, Wang J, et al. Springback analysis of 2024 aluminum alloy extrusion profile in stretch bending [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11 (3): 50-56.
- [4] 刘志军, 金朝海, 李东升, 等. 基于 PSBPD 的 T 型材拉弯夹钳加载轨迹设计及有限元模拟 [J]. 塑性工程学报, 2012, 19 (6): 109-113.
- Liu Z J, Jin C H, Li D S, et al. PSBPD-based jaw trajectory design and numerical simulation for T-section profile during stretch-bending [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19 (6): 109-113.
- [5] 刘志文, 李落星, 肖罡, 等. 热处理状态和工艺顺序对铝型材弯曲回弹的影响 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41 (7): 23-29.
- Liu Z W, Li L X, Xiao G, et al. Influence of heat-treated condition and process sequences on the springback of aluminum bent profiles [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41 (7): 23-29.
- [6] 闵范磊, 朱光明, 常征, 等. 方管铝型材自弯曲挤压工艺 [J]. 中国有色金属学报, 2020, 30 (9): 2032-2040.
- Min F L, Zhu G M, Chang Z, et al. Self-bending extrusion process for square tube aluminum profiles [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30 (9): 2032-2040.
- [7] 赵富胜. 铝型材挤压生产新技术与装备 [J]. 有色金属加工, 2019, 48 (1): 16-23.
- Zhao F S. New technology and equipment for aluminum profile extrusion production [J]. Nonferrous Metals Processing, 2019, 48 (1): 16-23.
- [8] 白云鹏, 刘瑞萍, 孔雪, 等. 空心铝合金型材挤压成型模拟分析和实验验证 [J]. 有色金属加工, 2018, 47 (5): 44-46.
- Bai Y P, Liu R P, Kong X, et al. Simulation analysis and experimental verification of extrusion molding of hollow aluminum alloy profiles [J]. Nonferrous Metals Processing, 2018, 47 (5): 44-46.
- [9] 刘裕中, 谢国文, 利晓林. 铝型材拉弯仿真建模研究 [J]. 模具工业, 2019, 45 (11): 6-8.
- Liu Y Z, Xie G W, Li X L. Simulation modeling method for aluminum profile stretch-wrap forming [J]. Die & Mould Industry, 2019, 45 (11): 6-8.
- [10] 梁继才, 滕菲, 高嵩, 等. 矩形铝型材柔性三维拉弯工艺的多目标优化 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2013, 41 (9): 143-148.
- Liang J C, Teng F, Gao S, et al. Multi-objective optimization of flexible three-dimensional stretch-bending forming process of rectangular hollow aluminum profiles [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 41 (9): 143-148.
- [11] 梁继才, 李义. 型材多点拉弯成形制件的形状偏差控制 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2016, 44 (7): 29-33.
- Liang J C, Li Y. Control of shape deviation for multi-point stretch bending profiles [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2016, 44 (7): 29-33.
- [12] 张学广, 刘纯国, 张石磊, 等. 轴向非对称中空型材拉弯过渡区长度优化 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47 (10): 82-87.
- Zhang X G, Liu C G, Zhang S L, et al. Optimization of transition zone length in stretch bending of axially asymmetric hollow profiles [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47 (10): 82-87.
- [13] 文生平, 李超贤. 基于 Gaussian-yolov3 的铝型材表面缺陷检测 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (9): 88-93.
- Wen S P, Li C X. Surface defect detection of aluminum profile based on Gaussian-yolov3 [J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28 (9): 88-93.

## 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