

## 梯形轮廓曲面件多夹钳拉形的成形力研究

程艳艳<sup>1,2</sup>, 王 鑫<sup>1</sup>, 刘祥玲<sup>1</sup>, 索忠源<sup>1</sup>, 姜 峰<sup>1</sup>, 吕海波<sup>1</sup>

(1. 吉林化工学院 机电工程学院, 吉林 吉林 132022; 2. 南昌理工学院 新能源与环境工程学院, 江西 南昌 330044)

**摘要:** 为了研究成形力对三维曲面件拉形质量的影响, 采用有限元软件 ABAQUS, 以梯形轮廓曲面件为研究对象, 建立梯形毛坯的多夹钳拉形有限元模型, 选取 4 组不同的成形力进行数值模拟。结果表明: 水平拉力一定时, 随着倾斜拉力的增加, 成形件的应力和厚度分布更均匀, 但是进一步增加倾斜拉力时其分布均匀性变差; 倾斜拉力为水平拉力的 3/4 时成形效果最佳, 且成形件的回弹量较小, 分布也较均匀。采用该成形力在多夹钳拉形机上进行了梯形轮廓曲面件拉形试验, 成形件的质量良好。试验结果与数值模拟结果一致, 验证了梯形毛坯多夹钳拉形的可行性和数值模拟的正确性。

**关键词:** 梯形轮廓曲面件; 拉形; 成形力; 应力; 厚度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.07.013

**中图分类号:** TG386 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 07-0095-05

## Research on forming force of multi-gripper stretch forming for trapezoidal profile curved part

Cheng Yanyan<sup>1,2</sup>, Wang Xin<sup>1</sup>, Liu Xiangling<sup>1</sup>, Suo Zhongyuan<sup>1</sup>, Jiang Feng<sup>1</sup>, Lyu Haibo<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China;

2. Energy and Environment Engineering Institute, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330044, China)

**Abstract:** In order to study the influence of forming force on the stretch forming quality for 3D curved parts, for the trapezoidal profile curved part, the finite element model of trapezoidal blank in the multi-gripper stretch forming was established by finite element software ABAQUS, and the stretch forming process was numerically simulated by selecting four groups of different forming forces. The results show that when the horizontal stretch force is constant, the distributions of stress and thickness for formed part are more uniform with the increasing of oblique stretch force, but the distribution uniformity becomes worse when the oblique stretch force is further increased. However, when the oblique stretch force is three-quarters of the horizontal stretch force, the forming effect is the best, and the springback amount of the formed part is smaller and the distribution is more uniform. Using this forming force, the stretch forming experiment of trapezoidal profile curved part was conducted by the multi-gripper stretch forming machine, and the formed part had good quality. The experiment results are consistent with the numerical simulation results, which verifies the feasibility of the multi-gripper stretch forming for trapezoidal blank and the correctness of numerical simulation.

**Key words:** trapezoidal profile curved part; stretch forming; forming force; stress; thickness

拉伸成形主要用来成形飞机蒙皮等大型曲面件<sup>[1-3]</sup>。随着制造业的发展, 对零件的要求会越来越高, 形状也会越来越复杂, 传统拉形很难满足实际需求。多夹钳拉形是在传统拉形的基础上进行技术创新, 将整体夹钳离散自适应的思想引入夹钳设计中 (图 1), 用多个夹钳代替整体夹钳, 是板料柔性成型的主要方法之一<sup>[4-5]</sup>。多夹钳拉形改变了传统的加载方式, 每个夹钳独立控制, 使其更加灵

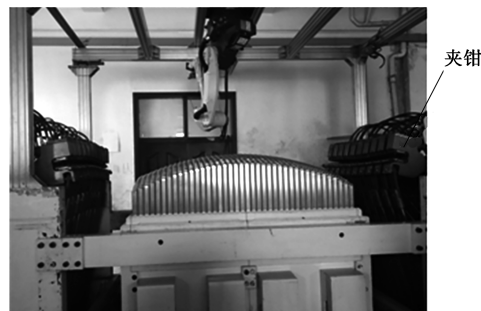


图 1 多夹钳拉形装置

Fig. 1 Multi-gripper stretch forming device

活<sup>[6-8]</sup>。许多学者对该工艺进行了数值模拟和试验研究。例如, 吉林大学李明哲教授等<sup>[9-10]</sup>研制出柔性多夹钳拉形机, 并对其理论、设备、控制系统进

收稿日期: 2021-07-16; 修订日期: 2021-10-19

基金项目: 吉林化工学院重大科技项目 (2019017); 吉林化工学院博士启动基金项目 (2021023)

作者简介: 程艳艳 (1980-), 女, 博士, 副教授

E-mail: chengyanyan1980@sina.com

行了完善与创新,取得了突破性进展;蔡中义等<sup>[11]</sup>探讨了加载方式对成形结果的影响等等。大量理论与实践证明,该项技术能够提高材料利用率和成形质量<sup>[12]</sup>,并可以成形较复杂的曲面件。多夹钳拉形时需要 3 个方向的拉力共同作用和协调,对成形件的质量有着重要的影响。本文研究多夹钳拉形的成形力对梯形轮廓曲面件质量的影响,从而为生产工艺提供有价值的参考。

## 1 有限元模型

为了分析成形力对多夹钳拉形曲面件质量的影响,采用有限元软件 ABAQUS/Explicit 动态显示算法来模拟其拉形过程。

数值模拟时,梯形轮廓模具尺寸如图 2 所示。板料选用 ST14 钢,材料属性设置为各向同性,板料密度  $\rho=7.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,弹性模量  $E=207 \text{ GPa}$ ,屈服强度  $R_{eL}=176.3 \text{ MPa}$ ,泊松比  $\nu=0.28$ 。为了减小过渡区、提高成形质量,毛坯选用梯形板料,上底边长度为 1660 mm,下底边长度为 1960 mm,高度为 1200 mm,厚度为 1.5 mm。因为成形件呈纵向对称,为了节省计算时间,建立 1/2 有限元模型,如图 3 所示。

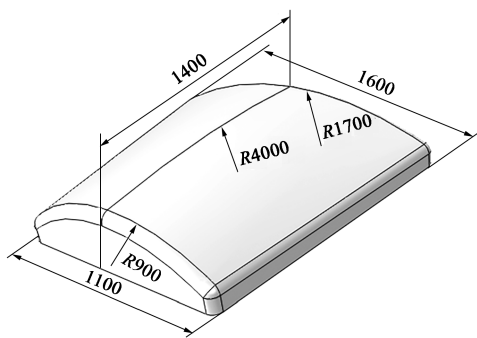


图 2 模具尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of die sizes

## 2 柔性拉形的成形力分析

### 2.1 成形力的选取

多夹钳拉形装置在模具两侧均有 10 个夹钳(图 3),每个夹钳与水平、倾斜和垂直 3 排液压缸相连,如图 4 所示。每排液压缸由同一个液压阀控制,故每个夹钳所受的 3 个方向的拉力相同。在拉形过程中,首先对板料施加水平拉力,进行预拉伸,板料在平直状态下发生屈服,然后施加倾斜拉力,

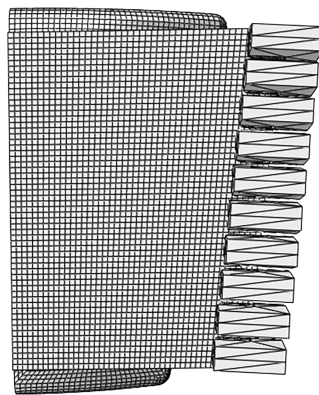


图 3 多夹钳拉形有限元模型 (1/2)

Fig. 3 Finite element model (1/2) of multi-gripper stretch forming

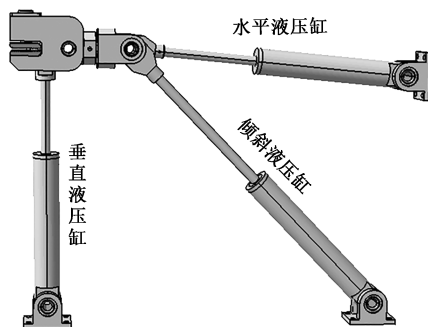


图 4 加载机构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of loading mechanism

板料与模具贴合,最后保持水平、倾斜拉力不变,施加垂直拉力,模具和板料完全贴合,板料全部发生屈服变形,过程结束。

计算最小水平拉力,并通过大量数值模拟计算,保证拉伸成形过程中夹钳不与模具碰撞,最终确定夹钳的水平拉力为 15 kN。由于在多夹钳拉形过程中,每个夹钳均会发生自协调移动,板料与模具边缘的角度也会随之变化,倾斜拉力不同时,总成形力也是不同的。因此倾斜拉力和垂直拉力的选取对成形件的质量有重要影响。通过模拟情况,选择 4 组倾斜拉力,分别为 8、12、16、20 kN,再根据数值模拟计算来确定贴模的最小垂直拉力,分别为 26、20、24、27 kN。见表 1,多夹钳拉形 4 组案例拉形贴模包覆过程中,理论上均满足屈服强度  $176.3 \text{ MPa} < \text{等效应力}$ ,理论上符合拉形的要求。通过 4 组成形力的数值模拟情况获得成形件的相关云图,从而分析成形力对板料成形情况的影响规律。

### 2.2 成形件的应力分析

图 5 为不同成形力下的成形件应力分布云图,从图 5 中可以看出,最大应力位于过渡区及夹钳夹持

表 1 板料完全贴模所需的成形力 (kN)

成形力	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组
水平拉力 $F_h$	15	15	15	15
倾斜拉力 $F_t$	8	12	16	20
垂直拉力 $F_v$	26	20	24	27
总拉力	49	47	55	62

边缘。开始时倾斜拉力增加，成形件有效成形区的应力分布更均匀，但随着倾斜拉力的继续增加，均匀性反而变差。倾斜拉力为 20 kN 的成形件有效成形区的应力值大于其他 3 个，倾斜拉力为 12 kN 时成形件有效成形区的应力分布最小，且最为均匀。这是因为在倾斜拉力为 12 kN 时，夹钳和梯形轮廓模具边缘的曲率更接近，更易贴模，所需的成形力较小，因此应力值更小，分布更均匀。

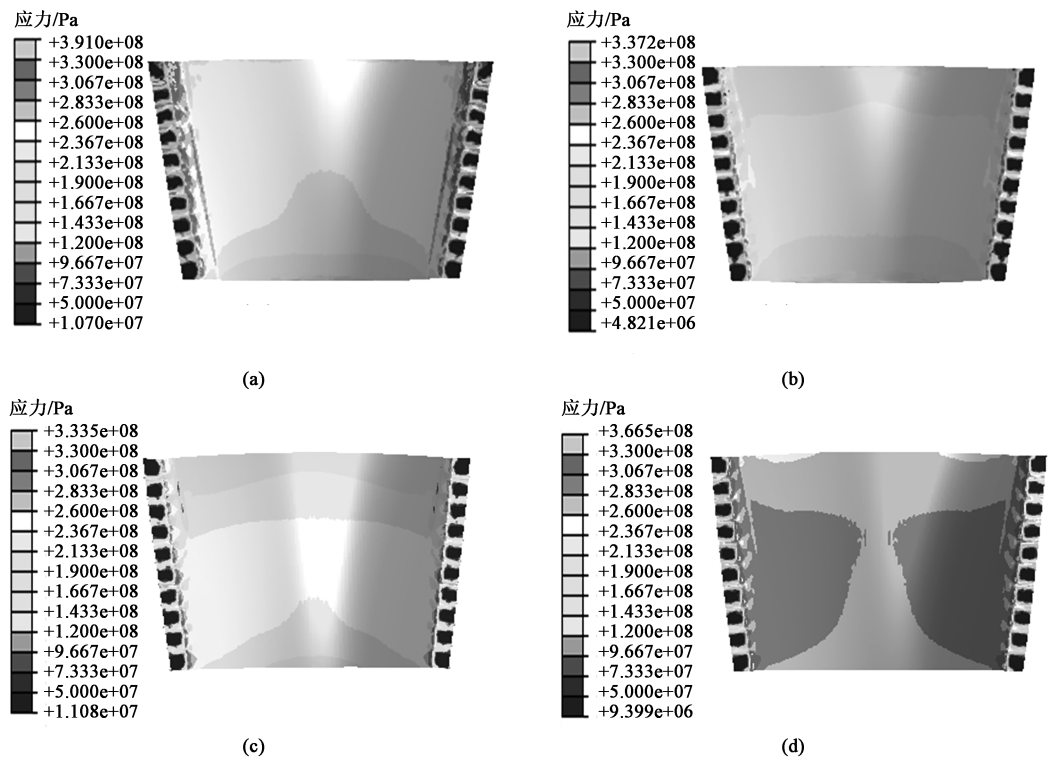


图 5 不同成形力下成形件的应力分布  
(a)  $F_t = 8\text{ kN}$  (b)  $F_t = 12\text{ kN}$  (c)  $F_t = 16\text{ kN}$  (d)  $F_t = 20\text{ kN}$   
Fig. 5 Stress distributions of formed parts under different forming forces

2.3 成形件的厚度分析

图 6 为不同成形力下成形件的厚度分布云图，由图 6 可知，倾斜拉力为 8、12、16 和 20 kN 的成形件有效成形区的厚度分布范围分别为 1.472 ~ 1.488、1.481 ~ 1.493、1.469 ~ 1.490 和 1.451 ~ 1.479 mm。可以看出，倾斜拉力为 12 kN 的成形件有效成形区的厚度分布范围区间明显减小，分布更均匀。

2.4 成形件的回弹分析

图 7 为成形件的回弹分布云图，由图 7 可知，倾斜拉力为 8、12、16 和 20 kN 的成形件有效成形区的回弹量最大值分别为 3.125、1.935、2.156 和 1.668 mm。可以看出，倾斜拉力为 12 和 20 kN 的成形件有效成形区的回弹量较小，回弹分布更均匀。这是因为回弹分布不仅与应力的有关，也与应

力分布的均匀程度有关。

3 试验结果

在图 1 所示的多夹钳拉形机上进行拉形试验，试验选用与数值模拟相同的模具、板料材质和尺寸，成形力选用第 2 组，即水平拉力为 15 kN、倾斜拉力为 12 kN 和垂直拉力为 20 kN。拉形过程中梯形毛坯与模具完全贴合，梯形轮廓曲面拉形件如图 8 所示，表面成形质量良好，无拉裂和起皱等缺陷，与数值模拟结果一致。

4 结论

(1) 由数值模拟可知，在水平拉力一定时梯形

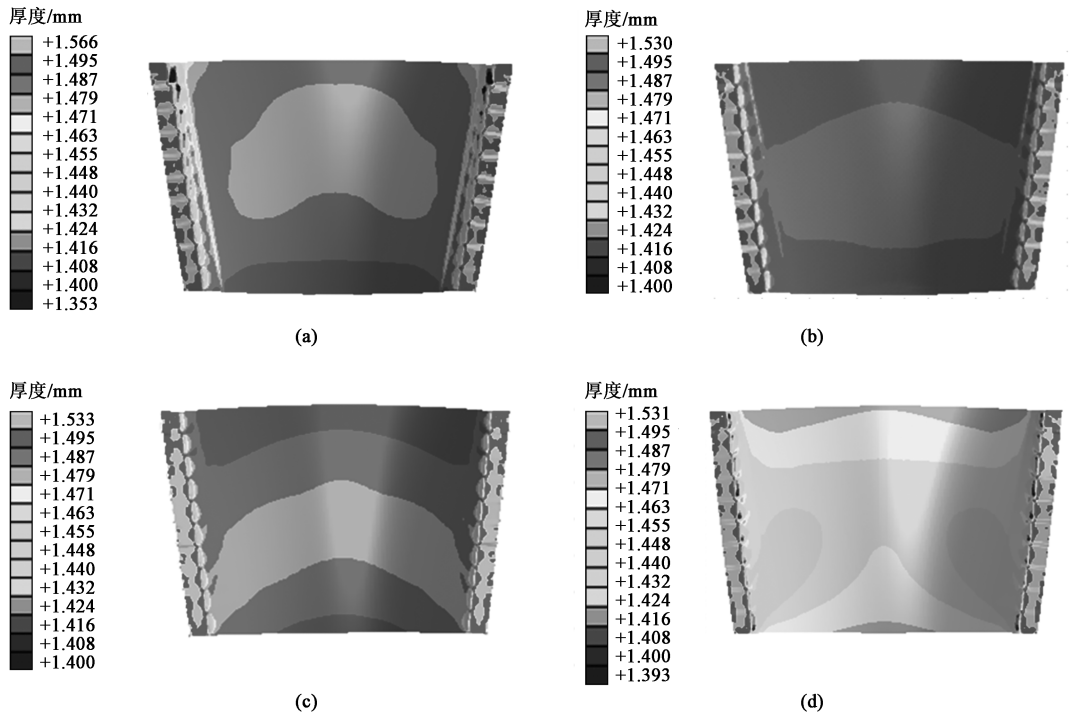


图 6 不同成形力下成形件的厚度分布

(a)  $F_t = 8$  kN    (b)  $F_t = 12$  kN    (c)  $F_t = 16$  kN    (d)  $F_t = 20$  kN

Fig. 6 Thickness distributions of formed parts under different forming forces

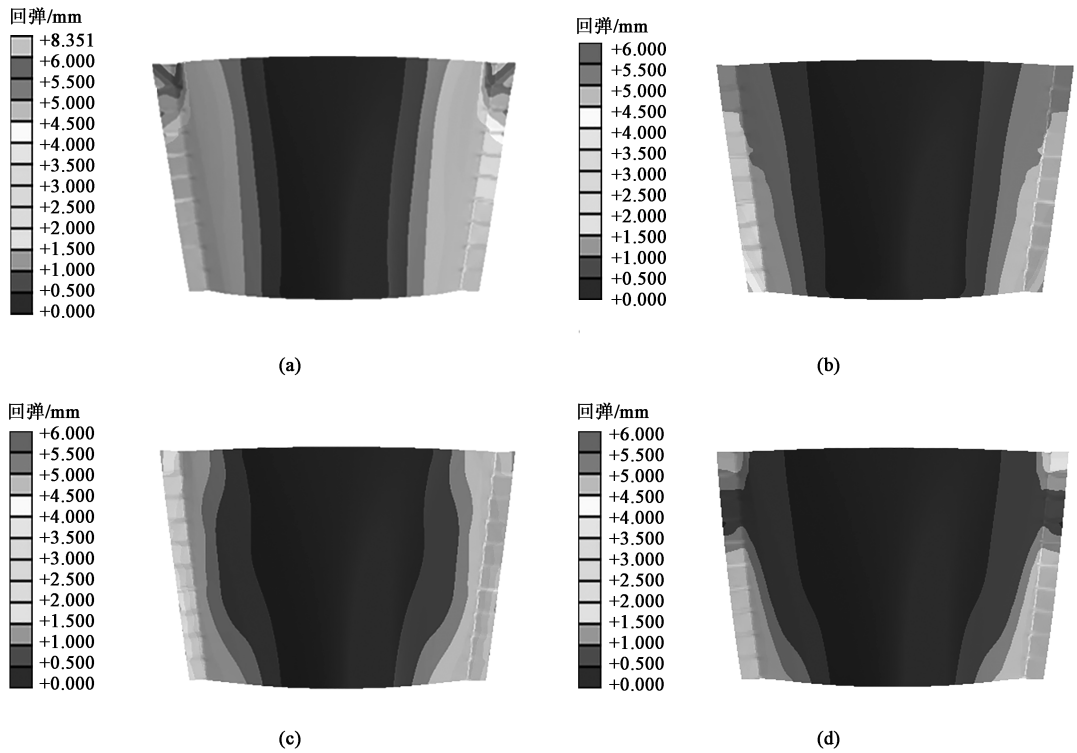


图 7 不同成形力下成形件的回弹分布

(a)  $F_t = 8$  kN    (b)  $F_t = 12$  kN    (c)  $F_t = 16$  kN    (d)  $F_t = 20$  kN

Fig. 7 Springback distributions of formed parts under different forming forces

轮廓曲面件多夹钳拉形，随着倾斜拉力的增加，所需的垂直拉力和总拉力先减小后增大。



图8 多夹钳拉伸成形件

Fig. 8 Multi-gripper stretch forming part

(2) 通过分析成形件有效成形区的应力、厚度和回弹的分布, 梯形轮廓曲面件多夹钳拉形的最佳倾斜拉力为水平拉力的  $3/4$  左右。

(3) 在多夹钳拉形机上对梯形毛坯进行拉形试验, 成形件质量良好, 无表面缺陷, 验证了数值模拟的可靠性, 能够对企业生产工艺制定有一定的指导和借鉴作用。

#### 参考文献:

- [1] 陈根发, 方继钊, 王勇, 等. 复杂鼓包蒙皮成形技术分析与优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 82-87.  
Chen G F, Fang J Z, Wang Y, et al. Analysis and optimization on complex bulging skin forming technology [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 82-87.
- [2] 杨超君, 叶镇, 周建忠. 马鞍形板件可重构离散模成形方法的研究进展 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010, (2): 25-28.  
Yang C J, Ye Z, Zhou J Z. Development of forming method research on saddle-shaped plate by reconfigurable discrete dies [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2010, (2): 25-28.
- [3] 谢洪志, 王玲, 赵天章, 等. 基于数字化的蒙皮拉形加载轨迹优化与应用 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 56-59.  
Xie H Z, Wang L, Zhao T Z, et al. Optimization and application of loading trajectory in stretch forming of skin based on digital [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 56-59.
- [4] Sun L R, Cai Z Y, Li X J. Research on contact state and its effect on forming precision in uniform-contact stretch forming based on loading at multi-position [J]. Metals, 2019, 9 (7): 719-719.
- [5] Xing J, Cheng Y Y, Yi Z. Stress-strain and form accuracy of carbon steel components produced by a multi-point stretch forming technique [J]. Strength of Materials, 2019, 51: 667-677.
- [6] 程艳艳, 李明哲, 邢健, 等. 非规则曲面件的多夹钳式柔性拉伸成形研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (22): 90-96.  
Cheng Y Y, Li M Z, Xing J, et al. Research of multi-gripper flexible stretch forming for irregular part [J]. Journal of Mechanical

Engineering, 2014, 50 (22): 90-96.

- [7] Peng H L, Liu H J, Chen X, et al. Numerical simulation and experiment of dimple for flexible clamp multi-point stretch forming of spherical part [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1635 (1): 1-7.
- [8] 陈雪, 陈成, 李明哲. 离散夹钳柔性拉形机的研制及实验验证 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (14): 83-86.  
Chen X, Chen C, Li M Z. Development and experimental verification for flexible stretch machine with discrete clamp [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48 (14): 83-86.
- [9] 李明哲, 韩奇钢, 冯朋晓, 等. 多夹钳式拉伸成形机 [P]. 中国: CN201755613U, 2011-01-19.  
Li M Z, Han Q G, Feng P X, et al. Multi-gripper stretch forming device [P]. China: CN201755613U, 2011-01-19.
- [10] Wang Y, Li M Z, Wang D M, et al. Modeling and numerical simulation of multi-gripper flexible stretch forming process [J]. Int. J. Adv. Manuf. Tech., 2014, 73: 279-288.
- [11] 杨振, 蔡中义, 李明哲. 分布式位移加载方式拉伸成形三维曲面件的数值模拟 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2016, 46 (1): 199-204.  
Yang Z, Cai Z Y, Li M Z. Stretch forming of three-dimensional sheet metal part by distributed displacement loading method [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2016, 46 (1): 199-204.
- [12] 王友, 李明哲, 彭赫力. 多夹钳式柔性拉伸成形时过渡区长度的研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (10): 72-79.  
Wang Y, Li M Z, Peng H L. Study on transition length in multi-gripper flexible stretch forming process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (10): 72-79.

#### 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