

# 冲压剪切中相对间隙及关联尺寸与拉应力的关系

陈敦佳<sup>1</sup>, 关意鹏<sup>2</sup>, 杜雪磊<sup>3</sup>

(1. 柳州市质量检验检测研究中心, 广西 柳州 545006; 2. 柳州职业技术学院 机电工程学院, 广西 柳州 545006;  
3. 柳州职业技术学院 图书馆, 广西 柳州 545006)

**摘要:** 针对冲压生产过程中由于磨损导致间隙变大而产生的试样变形和毛刺变大等问题, 通过受力分析探究了冲压剪切过程中拉应力的产生原因和关联因素等, 并进行了理论推导和试验验证。结果显示: 试样轴向平均拉应力  $P$  与试样宽度  $W$ 、中心层内移系数  $\chi$ 、材质属性关联系数  $K_1$  以及剪切试验的相对间隙与最大剪应力状态下的相对间隙之差 ( $R-R_2$ ) 成正比, 与凹模刃口尺寸  $D_d$  成反比。当剪切力处于非最大剪应力状态时, 剪切过程中试样会产生弯矩, 弯矩导致试样中心层内移, 而中心层内部材料承受的压应力与中心层外部材料承受的拉应力并不对称, 且材料承受的拉应力大于压应力, 使试样整体呈拉应力状态。

**关键词:** 弯矩; 相对间隙; 拉应力; 凹模刃口尺寸; 冲压剪切

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.02.011

中图分类号: TG389

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 02-0086-05

## Relation of relative clearance and associated size with tensile stress in stamping shear

Chen Dunjia<sup>1</sup>, Guan Yipeng<sup>2</sup>, Du Xuelei<sup>3</sup>

(1. Liuzhou Quality Inspection Detection Research Center, Liuzhou 545006, China;

2. Mechanical and Electronic Engineering Department, Liuzhou Vocational & Technical College, Liuzhou 545006, China;

3. Library, Liuzhou Vocational and Technical College, Liuzhou 545006, China)

**Abstract:** For the problems of sample deformation and burr enlargement due to large gap caused by wear in the stamping production process, the causes and related factors of tensile stress in the stamping shear process were explored through force analysis, and the theoretical derivation and experimental verification were carried out. The result shows that the average axial tensile stress  $P$  of specimen is proportional to sample width  $W$ , central layer inward movement coefficient  $\chi$ , material property correlation coefficient  $K_1$  and difference between the relative clearances in shear test and maximum shear stress state ( $R-R_2$ ), and it is inversely proportional to the die edge size  $D_d$ . When the shear force is in a non-maximum shear stress state, the specimen generates a bending moment during the shear process, which causes the central layer of specimen to move inward. However, the compressive stress endured by the material inside the central layer is not symmetrical to the tensile stress endured by the material outside the central layer, and the tensile stress of material is greater than the compressive stress, making the entire sample in a tensile stress state.

**Key words:** bending moment; relative clearance; tensile stress; die edge size; stamping shear

冲压剪切过程中, 当相对间隙超过该材料最大剪应力状态的相对间隙时, 剪切过程中便会产生弯矩, 导致试样弯曲中心层内移。中心层内部材料承

受的压应力与中心层外部材料承受的拉应力并不对称, 且拉应力大于压应力。冲压剪切过程中通常试样整体受拉应力且在弹性范围内, 仅断口处为塑性变形。

收稿日期: 2023-06-29; 修订日期: 2023-09-23

基金项目: 2021 年第一批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划 (20210759-T-605); 广西高校中青年教师基础能力提升项目 (2021KY1041)

作者简介: 陈敦佳 (1969-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: cdjabcasd@163.com

通信作者: 关意鹏 (1978-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: 317310042@qq.com

## 1 剪切过程的弯矩分析

### 1.1 剪切力分析

剪切过程中的剪应力是成对互等的, 即分别由凸模刃口和凹模刃口处沿裂纹指向材料内部。剪切力是剪切过程中材料分别作用在凸模和凹模上的 4

个分力在各自刃口处形成的合力, 见图 1, 其中,  $P_1$  和  $P_2$  分别为凸模与凹模对试样的垂直作用力,  $\mu P_1$  和  $\mu P_2$  分别为凸模、凹模端面对试样的摩擦力,  $F_1$  和  $F_2$  分别为凸模、凹模对材料的侧压力,  $\mu F_1$  和  $\mu F_2$  分别为凸模、凹模侧面对试样的摩擦力,  $D_d$  为凹模刃口切刀宽度,  $P$  为试样的轴向拉应力,  $N$  为凸模压力,  $C$  为单边间隙,  $M$  为试样在剪切过程中受到的弯矩,  $d_p$  为凸模刃口尺寸。

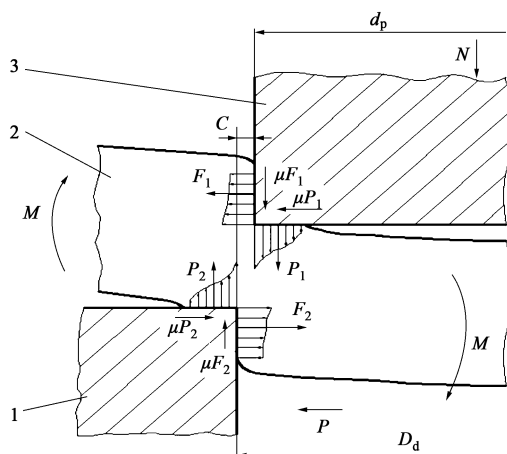


图1 剪切原理示意图

1. 凹模 2. 试样 3. 凸模

Fig. 1 Schematic diagram of shear principle

## 1.2 弯矩来源分析

如图 2 所示, 凸模在上, 试样放在凹模上。剪切过程中, 随着凸模刃口压入深度的增加, 凸模刃口附近的材料相对凹模刃口附近的材料移动, 使得凸模、凹模刃口附近的材料产生塑剪变形, 且纤维发生拉伸与弯曲。在剪切过程中, 裂纹首先在凹模刃口处产生, 继而在凸模刃口处产生, 随着凸模压入, 裂纹向材料内部扩展, 当间隙过大时两条裂纹不会重合, 但会产生弯矩使试样弯曲, 如图 2 中右侧 G 处放大图所示。

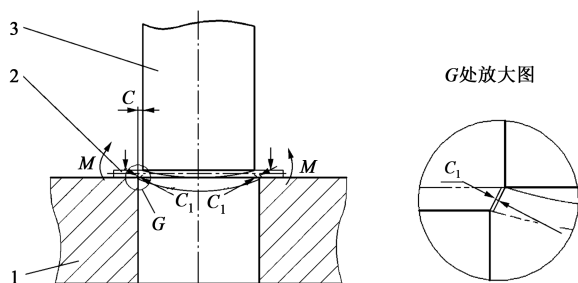


图2 剪切瞬间产生的裂纹示意图

1. 凹模 2. 试样 3. 凸模

Fig. 2 Schematic diagram of cracking at moment of shear

## 1.3 弯矩分析

如图 2 所示, 试验模具采取双剪切方案, 每对剪切力形成一个力矩, 这样便会产生两个方向相反、大小相等的一对力矩, 从而产生弯矩。设凸模刃口处的剪切力为  $F_m$ , 以凹模刃口为支点, 则试样在剪切过程中受到的弯矩  $M$  为<sup>[1-5]</sup>:

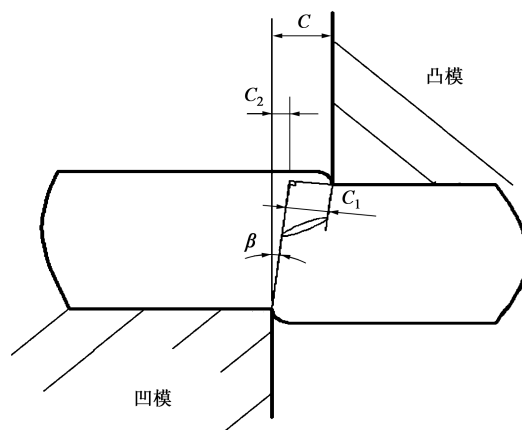
$$M = F_m \times C_1 \quad (1)$$

剪切力  $F_m$  的大小与试样剪切面积呈正相关, 还与试样材质、硬度等因素有关, 若将其与试样材质、硬度等关联因素设置一个关联系数  $K_1$ , 则式 (1) 可以改写为:

$$M = F_m \times C_1 = K_1 W t C_1 \quad (2)$$

式中:  $W$  为试样宽度, m;  $t$  为试样厚度, m;  $K_1$  为材质属性关联系数, Pa;  $C_1$  为两剪切力之间的距离, mm。

下面对  $C_1$  进行分析, 如图 3 所示。图 3 中,  $\beta$  为最大剪应力方向与垂线夹角, 通常取  $4^\circ \sim 6^\circ$ ,  $C_2$  为最大剪应力状态下的间隙。

图3 凸模刃口处的  $C_1$ Fig. 3  $C_1$  at edge of convex die

$$C_1 \approx (C - C_2) \cos \beta \quad (3)$$

由于  $\cos \beta \approx 1$ , 式 (3) 可简化为:

$$C_1 \approx C - C_2 \quad (4)$$

由式 (4) 可知,  $C_1$  与剪切模具的单边间隙呈正相关。 $C_2$  和  $\beta$  角是该材质在纯剪切状态下 (最大剪应力状态) 的参数,  $C_2$  可按 GB/T 16743—2010<sup>[6]</sup> 中表 4 II 类间隙中间值选用。

## 2 剪切过程中拉应力分析

试样受到弯矩作用时, 其中心层会内移, 内移系数乘以试样厚度即为内移距离。中心层是正应力

为 0 Pa 的层面, 该层面既不受拉也不受压。在弯矩  $M=0$  的情况下, 中心层一般位于试样中间厚度处, 见图 4a, 其中,  $Z$  面为试样弯曲前中心面,  $N$  面为试样弯曲后中心层,  $\chi t$  为中心层内移距离,  $\chi$  为中心层内移系数,  $\rho$  为中心层弯曲后的曲面半径。另外,  $A$  为试样弯曲外侧面,  $B$  为试样弯曲内侧面, 中心层内移后, 各层面到移动后中心层距离向内为负值, 向外为正值。由于中心层移动了  $\chi t$  距离, 所以外层增加  $\chi t$ , 内层减少  $\chi t$ , 原中心层  $Z$  移动后变为  $N$  层面, 如图 4b 所示, 可以看出,  $B$  层面受压应力最大,  $A$  层面受拉应力最大。

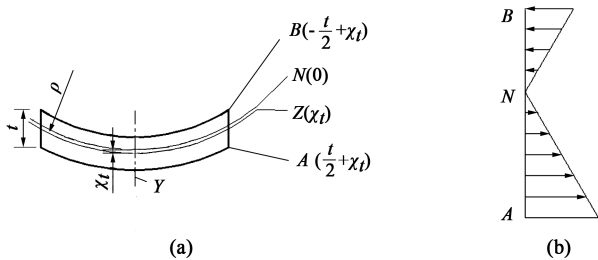


图 4 试样弯曲后中心层位置变化图

(a) 中心层位置 (b) Y 截面应力分布图

Fig. 4 Position change diagrams of center layer after sample bending  
(a) Position of neutral layer (b) Stress distribution diagram of Y-section

试样在平直状态时, 中心层位于中间厚度处, 内层和外层相等, 但弯曲后中心层内移, 即弹性阶段中心层内移, 在弯矩消失后, 其中心层会恢复到原位置。但进入塑性变形阶段后, 其中心层便无法恢复到原位置, 中心层内移以后, 其内层厚度明显小于外层厚度。内层承受压应力, 外层承受拉应力, 且距离中心层  $N$  的距离越大, 应力也越大。由于外层尺寸大于内层, 所以, 内层和外层应力不对称, 整体表现为拉力。剪切过程中, 试样中间部分在试验结束后会恢复原状态即平直状态, 所以, 可以视该部分变形为弹性变形<sup>[7-13]</sup>。

则 Y 截面应力为:

$$Q = E\varepsilon = E \cdot \frac{y}{\rho} \quad (5)$$

式中:  $Q$  为试样截面上各点正应力;  $E$  为试样材料的弹性模量;  $\varepsilon$  为试样应变;  $y$  为应力点到中心层的距离。

由于剪切过程中, 试样两端处于夹紧状态, 其弯曲时存在的轴向拉力  $F_L$  为<sup>[14]</sup>:

$$F_L = \int_A Q dS = \int_{\frac{t}{2}-\chi t}^{\frac{t}{2}+\chi t} E \cdot \frac{y}{\rho} \cdot dy dW \quad (6)$$

又由于:

$$\rho = EI_N/M \quad (7)$$

式中:  $I_N$  为对中心层  $N$  的惯性矩;  $S$  为横截面上微元的面积。

将式 (5) 和式 (7) 代入式 (6), 则:

$$F_L = W \frac{M}{I_N} \int_{\frac{t}{2}-\chi t}^{\frac{t}{2}+\chi t} y dy \quad (8)$$

在矩形试样剪切试验中:

$$I_N = D_d t^3/12 \quad (9)$$

由式 (8) 和式 (9) 解得:

$$F_L = \chi t^2 WM/I_N = 12\chi WM/(D_d t) \quad (10)$$

轴向拉应力  $P$  为:

$$P = F_L/Wt = 12\chi MC_1/(D_d t^2) \quad (11)$$

再将式 (2) 和式 (4) 代入式 (11) 得到:

$$P = F_L/Wt = 12W\chi(C - C_2)K_1/(D_d t) \quad (12)$$

$$P = 12W\chi K_1(C - C_2)/(D_d t) \quad (13)$$

单边间隙与试样厚度百分比为相对间隙, 可进一步推导出:

$$P = 12BWK_1(R - R_2)/D_d \quad (14)$$

式中:  $R$  为试验条件下的相对间隙;  $R_2$  为最大剪应力状态下的相对间隙。

由式 (14) 可知, 在冲压剪切过程中, 试样轴向平均拉应力  $P$  与试样宽度  $W$ 、中心层内移系数  $\chi$ 、材质属性关联系数  $K_1$  和试验条件下的相对间隙与最大剪应力状态下的相对间隙之差  $(R - R_2)$  成正比, 与凹模刃口尺寸  $D_d$  成反比。

### 3 验证试验

#### 3.1 试验方案设计

剪切过程中测量试样受到的拉应力大小极为困难, 为了验证式 (14) 的正确性, 可通过测定试样在不同状态下的剪应力强度的变化规律来判定。抗剪强度是金属材料本身固有属性, 是最大剪应力状态时的剪应力强度。在非最大剪应力状态时, 由于试样受拉导致剪应力强度降低, 此时剪应力强度会小于抗剪强度, 其差值是由两个原因造成的, 即试样受到拉应力和试样剪切过程中材料的分离性质及其占比的改变。

#### 3.2 剪切试验

本次剪切试验在同一 SPCC 钢板上取样, 采用机械加工方式, 将部分试样厚度由 2.94 mm 减薄至 1.93 mm, 采用相同剪切速度  $15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  和近似相等的相对间隙进行试验, 因为剪切速度越大, 剪应力强度越大, 而相对间隙越大, 剪应力强度越小,

只有在相同试验条件下才具有可比性。这两点规律性在文献 [7] 和文献 [8] 中有论述, 相对间隙在 GB/T 43115—2023<sup>[15]</sup> 的 3.7 节中有介绍。

剪切试验结果如表 1 所示。其中, 试验 1 和试验 2 是在弯矩大于  $0\text{ N}\cdot\text{m}$  的情况下进行的, 试验 3 是在最大剪应力状态下, 即弯矩为  $0\text{ N}\cdot\text{m}$  的情况下进行的。

表 1 不同条件下的剪应力  
Table 1 Shear stress under different conditions

| 编号 | 弯矩/( $\text{N}\cdot\text{m}$ ) | 试样规格 (宽度×厚度)/( $\text{mm}\times\text{mm}$ ) | 单面间隙/<br>mm | 相对间隙/<br>% | 剪应力/ $\text{MPa}$ |       |       |       |       |       |
|----|--------------------------------|---|-------------|------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    |                                |   |             |            | 第 1 次             | 第 2 次 | 第 3 次 | 第 4 次 | 第 5 次 | 平均值   |
| 1  | >0                             | 40×2.94                                     | 0.36        | 12.3       | 267               | 266   | 268   | 262   | —     | 265.8 |
| 2  | >0                             | 40×1.93                                     | 0.24        | 12.4       | 264               | 263   | 263   | 263   | —     | 263.3 |
| 3  | =0                             | 40×2.94                                     | 0.15        | 5.1        | 273               | 276   | 273   | 276   | 276   | 274.8 |

3.3 数据分析

比较试验 1 和试验 3 的结果, 由于弯矩的存在导致剪应力强度减小了  $9\text{ MPa}$ ; 比较试验 2 和试验 3 的结果, 剪应力强度减小了  $11.5\text{ MPa}$ 。试验 3 中弯矩为  $0\text{ N}\cdot\text{m}$ , 试验 1 和试验 2 中存在弯矩且相对间隙近似相等, 可见弯矩产生的试样拉应力是存在的, 因为拉应力是剪应力强度减小的原因<sup>[16]</sup>, 可通过剪应力强度的减小来判断拉应力的存在。

比较试验 1 和试验 2 的结果, 剪应力强度仅仅相差  $2.5\text{ MPa}$ , 其误差率为  $0.94\%$ , 而按照式 (14) 其结果应相等。鉴于本次试验设备为 1 级精度, 最大允许误差为  $1\%$ , 若再考虑系统测量误差因素, 试验结果的不确定度应大于  $1\%$ , 试验 1 和试验 2 的误差率  $0.94\% < 1\%$ , 可以判定试验 1 和试验 2 结果符合式 (14) 的规律。

3.4 拉应力分析

若试样没有弯矩、无弯曲则中心层内移系数  $\chi = 0$ , 按式 (14) 计算, 拉应力  $P = 0$ , 理论分析符合实际情况。试样材质属性关联系数  $K_1$  与材质、硬度等关联, 该系数越大则拉应力  $P$  越大, 如同等条件下高强度钢的剪应力和拉应力比普通钢的大, 理论分析符合实际情况。

当剪切试验的相对间隙与该材质最大剪应力状态下相对间隙之差  $(R - R_2)$  越大, 按式 (14) 计算的拉应力  $P$  就越大, 这符合“剪切试验中, 间隙越大, 剪应力强度越小”这一客观规律。因为拉应力  $P$  越大使剪应力强度减小量越多。当实际相对间隙等于最大剪应力状态下的相对间隙即纯剪切状态时, 按式 (14) 计算, 拉应力  $P = 0\text{ MPa}$ , 此试验即为最大剪应力状态下的剪切, 该剪应力强度为抗拉强度, 式 (14) 符合抗剪强度定义, 即剪应力最大, 正应力为  $0\text{ MPa}$ 。

当相对间隙之差  $(R - R_2) < 0$  时, 即实际相对间隙小于最大剪应力状态下的相对间隙,  $(R - R_2)$  为负值, 拉应力  $P$  为负值, 即为压应力, 剪应力强度会增大, 这符合“间隙越小, 剪应力强度越大”这一客观规律。

凹模刃口尺寸  $D_d$  越大, 按式 (14) 计算则拉应力  $P$  会越小。根据式 (9) 可知, 凹模刃口尺寸  $D_d$  越大, 则惯性矩  $I_N$  越大, 抗弯刚度  $EI_N$  也越大, 而抗弯刚度越大, 则抵抗变形能力越强, 试样轴向应变就会越小, 导致拉应力  $P$  会越小, 这与按式 (14) 的计算结果是一致的。再从量纲上分析式 (14), 式 (14) 右侧分子上试样宽度  $W$  和分母上凹模刃口尺寸的单位均为  $\text{mm}$ , 可以同时约去, 分子上中心层内移系数无单位, 相对间隙是模具单边间隙与试样厚度的百分比, 也是无单位的, 右侧只剩下  $K_1$ , 理解  $K_1$  的单位就要回到式 (2), 可以看出  $K_1$  的单位为  $\text{MPa}$ , 而式 (14) 左侧的拉应力单位也为  $\text{MPa}$ , 可见得到的式 (14) 符合量纲运算规律。

4 结论

(1) 剪切过程中试样的轴向拉应力  $P$  的表达式为:  $P = 12BWK_1(R - R_2)/D_d$ , 表明剪切过程中试样受到的拉应力与试样宽度、中心层内移系数、试样材质属性关联系数及剪切试验的相对间隙与该材质最大剪应力状态下的相对间隙之差成正比, 与剪切模具刀口尺寸成反比。

(2) 此表达式为试样由弯矩而产生轴向应力提供了理论依据。

参考文献:

[1] 刘武静, 吕琳. 纵弧棱 U 型梁的冲压变形行为分析 [J]. 锻



- 压技术, 2022, 47 (1): 49-55.
- Liu W J, Lyu L. Analysis of stamping deformation behavior of U-shaped beam with longitudinal arc edge [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (1): 49-55.
- [2] 苏超杰, 罗志华, 刘圣勇, 等. 支架用热轧变形高钛钢板 TiC 析出及力学性能分析 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (8): 118-124
- Su C J, Luo Z H, Liu S Y, et al. TiC precipitation and mechanical properties analysis of hot-rolled high titanium steel plate for support [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (8): 118-124.
- [3] 施立军, 张珍, 方刚. C22 哈氏合金管的液压成形研究管材成形 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (4): 77-85.
- Shi L J, Zhang Z, Fang G. Study on tube forming by hydroforming of C22 Harrington alloy tube [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (4): 77-85.
- [4] 崔广磊, 李超, 沈盛军, 等. 铝型材三维拉弯工艺 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (2): 78-82.
- Cui G L, Li C, Shen S J, et al. Three-dimensional stretch-bending process for aluminum profile [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (2): 78-82.
- [5] 崔令江. 汽车覆盖件冲压成形技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- Cui L J. Technology of Automobile Panel Stamping Forming [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [6] GB/T 16743—2010, 冲裁间隙 [S].
- GB/T 16743—2010, Blanking clearance [S].
- [7] 湖南省机械工程学会锻压分会. 冲压工艺 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1991.
- Forging Branch of Hunan Society of Mechanical Engineering. Stamping Process [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1991.
- [8] 中国机械工程学会塑性工程分会. 锻压手册: 第 2 卷 [M]. 第 4 版. 北京: 中国机械出版社出版, 2020.
- China Society for Technology of Plasticity, CMES. Forging & Stamping Manuals: Volume 2 [M]. 4nd Edition. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [9] 王心可, 汪喆, 崔荣高, 等. 冲裁工艺对无取向电工钢叠片磁性能的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2019, 53 (9): 1115-1121.
- Wang X K, Wang Z, Cui R G, et al. Influence of blanking process on the magnetic properties of non-oriented electrical steel lamination [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53 (9): 1115-1121.
- [10] 郑海涛, 樊瑜瑾, 杨振, 等. T2 铜板冲裁间隙对冲裁力及断面质量的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2016, 24 (6): 61-66.
- Zheng H T, Fan Y J, Yang Z, et al. The effect of punching clearance on punching force and quality of cross section for T2 copper [J]. Materials Science and Technology, 2016, 24 (6): 61-66.
- [11] 宋劲坤, 陈建钧, 葛家豪. 基于分形理论的冲裁断面质量评价研究 [J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2020, 46 (5): 709-714.
- Song J K, Chen J J, Ge J H. Quality evaluation of blanking cross-section based on fractal theory [J]. Journal of East China University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2020, 46 (5): 709-714.
- [12] 刘静, 张明, 陈浩. 基于响应面法的台阶式凸模冲裁工艺参数优化 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (3): 52-57.
- Liu J, Zhang M, Chen H. Parameters optimization of step-shaped-punch blanking based on response surface method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (3): 52-57.
- [13] 彭德平, 刘筱, 贺丹丹, 等. 高速冲击载荷下 Ti6242 钛合金的绝热剪切行为及裂纹扩展机理 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 224-229.
- Peng D P, Liu X, He D D, et al. Adiabatic shear behavior and crack propagation mechanism on Ti6242 titanium alloy under high-speed impact loading [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 224-229.
- [14] 西南交通大学应用力学与工程系. 工程力学教程 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社出版, 2004.
- Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University. Engineering Mechanics Course [M]. 4nd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [15] GB/T 43115—2023, 金属材料 薄板和薄带 室温剪切试验方法 [S].
- GB/T 43115—2023, Metallic materials—Sheet and strip—Shear test method at room temperature [S].
- [16] 闫洪, 周天瑞. 塑性成型原理 [M]. 北京: 清华大学出版社出版, 2006.
- Yan H, Zhou T R. Principles of Plastic Forming [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

## 《锻压技术》读者信息反馈卡声明

《锻压技术》杂志自 2008 年起设立“读者信息反馈卡”, 旨在加强刊物与读者的交流, 促进刊物质量的提高, 并竭诚为读者服务。反馈卡填写要求: 内容填写完整、没有遗漏, 提供的信息准确、详细, 字迹书写清晰、整洁。如收到的反馈卡内容填写不完整, 字迹不清、无法辨认, 通讯地址模糊、不详细等, 编辑部将不予邮寄杂志, 特此声明。

“读者信息反馈卡” 1~12 期刊登, 位置在正文后, 请读者注意查看, 以免遗漏。

《锻压技术》编辑部