

顶镦 Ag-Cu 复合触点 Ag 层厚度分布的研究

廖丹佩, 詹艳然

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350108)

摘要: **目的** 解决继电器 Ag-Cu 复合触点顶镦成形后, Ag 层厚度分布不均的问题。 **方法** 通过数值模拟分析了其预成形和终成形过程中等效应变的分布, 以及 Ag-Cu 界面形状的变化规律及影响因素, 并在预成形形状和摩擦因数方面, 提出了改善 Ag 层厚度均匀性的措施。 **结果** 预成形模具形状及工件与模具间的摩擦, 对成形结果的影响很大。 **结论** 半锥角 α 取值居中时, 终成形后易获得均匀的 Ag 层厚度分布; 减小 Ag-上模间摩擦因数或增大 Cu-下模间摩擦因数, 则有利于增加终成形后 Ag 层厚度分布的均匀性。

关键词: 顶镦; 触点; 厚度分布; 预成形半锥角; 摩擦因数

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.05.020

中图分类号: TG316.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)05-0113-06

Thickness Distribution of the Ag Layer for the Upsetted Ag-Cu Composite Contact

LIAO Dan-pei, ZHAN Yan-ran

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

ABSTRACT: **Objective** To solve the uneven thickness distribution of the Ag layer for the upsetted Ag-Cu composite relay contact. **Methods** Numerical simulation was used to analyze the distribution of effective strain during the process of preforming and final forming, and the change pattern of the shape of Ag-Cu interface and its influencing factors were also considered. And then, some measures to improve the thickness uniformity of the Ag layer were proposed from the aspects of preform shape and friction coefficients. **Results** The preform die shape and the friction between the workpiece and its dies had a great influence on the forming results. **Conclusion** It is easy to obtain uniform thickness distribution of the Ag layer after final forming, when an intermediate value is taken for the half cone angle α . It's beneficial to increase the uniformity of thickness distribution of the Ag layer, if the friction coefficient of Ag-upper die is increased or the friction coefficient of Cu-lower die is increased.

KEY WORDS: upsetting; contact; thickness distribution; preforming half cone angle; friction coefficient

继电器触点是继电器的重要组成部分,承担着接通、断开及转换负载的作用,在其工作过程中可能发生触点间的金属电积、磨损及电阻快速增加等问题。显然,触点性能的好坏直接影响到继电器的使

用可靠性和寿命^[1-4]。为了保证触点质量及降低生产成本,在实际生产中多采用 Ag-Cu 复合触点,并以 Ag 为接触层,以 Cu 为其余部分材料且采用顶镦工艺制成。由于变形不均,顶镦成形后 Ag 层厚度

分布不均,可能造成工作过程中 Ag 层的过度磨损,从而缩短触点的使用寿命。针对这种情况,文中通过有限元数值模拟,对 Ag-Cu 复合触点顶锻过程进行分析,探究 Ag 层厚度的分布规律及其影响因素,为实际生产提供指导。

1 触点顶锻成形工艺过程

某型号 Ag-Cu 复合触点如图 1 所示,其成形过程如下:切断 Ag 丝、Cu 丝→Ag 丝、Cu 丝轴向对齐→顶锻预成形→顶锻终成形(见图 2),其成形设备如图 3 所示。由于变形不均,成形后触点的 Ag-Cu 界面可能有多种形状^[5](见图 4),为了保证触点的使用寿命,Ag 层厚度最好均匀分布。

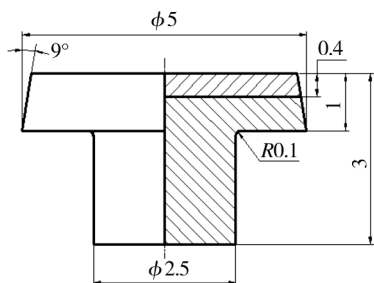


图 1 触点零件尺寸

Fig. 1 Part dimension of the contact

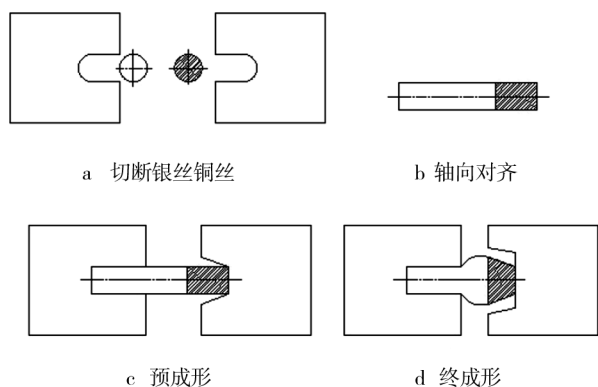


图 2 触点顶锻成形过程(阴影部分为 Ag)

Fig. 2 Upsetted forming process of the contact (dash area indicates Ag)

前期研究结果表明,触点预成形形状及摩擦对 Ag 层厚度分布影响很大。借助数值模拟,分析预成形形状及摩擦因数对 Ag 层厚度分布的影响。

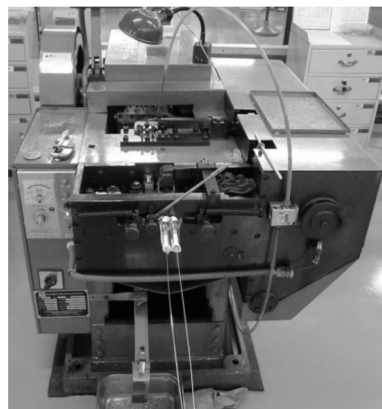


图 3 触点顶锻成形设备

Fig. 3 Upsetted forming equipment for the contact

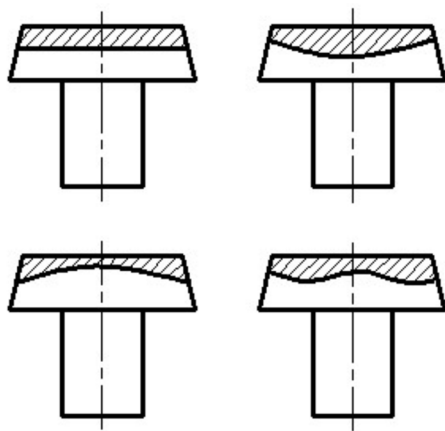


图 4 触点 Ag-Cu 界面的几种情况(阴影部分为 Ag 层)

Fig. 4 Several shapes of Ag-Cu interface of the contact (dash area indicates Ag)

2 Ag-Cu 复合触点顶锻成形过程数值模拟

2.1 模拟条件

根据图 1 所示的 Ag-Cu 复合触点零件图,确定 Ag, Cu 下料尺寸分别为 $\phi 2.5 \text{ mm} \times 1.46 \text{ mm}$ 和 $\phi 2.5 \text{ mm} \times 4.34 \text{ mm}$,并初定预成形模具半锥角 α 为 30° ,深度 h_1 的取值由 α 决定,以保证上模型腔的容积为 7.17 mm^3 ,即刚好能够容纳 Ag 层,如图 5 所示。由于实际成形中出现 3 种摩擦表面:Ag-上模、Cu-下模以及 Ag-Cu,为此在模拟中均采用库伦摩擦模型 $\tau = \mu \sigma_n$,设定的 3 个摩擦因数分别为 0.15 (Ag-模

具)、0.1 (Cu-模具) 和 0.1 (Ag-Cu)^[4-5]。模拟中采用的 Ag 和 Cu 两种材料的真实应力-应变曲线如图 6 所示,其模型分别为: $\sigma = 28.335\varepsilon^{0.5822}$ 和 $\sigma = 68.453\varepsilon^{0.4778}$ [8-10]。预成形阶段模具压下 1.4 mm, 坯料基本充满上模型腔,终成形阶段模具再次压下 1.4 mm,此时终成形上下模闭合。

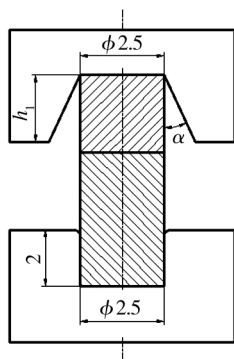


图5 预成形模具尺寸

Fig. 5 Dimension of preforming mould

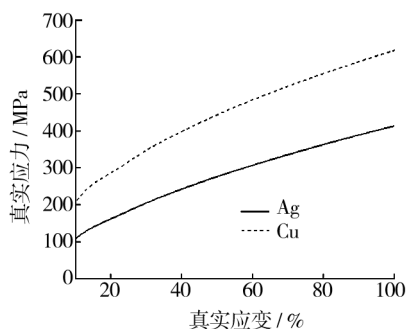


图6 Ag 和 Cu 真实应力-应变曲线

Fig. 6 True stress-strain curves of Ag and Cu

2.2 模拟结果与分析

2.2.1 预成形阶段

根据模拟结果,触点预成形阶段的等效应变如图 7 所示。由图 7 可知,变形前期在 Ag-Cu 界面附近,Ag 层变形较大,Cu 层变形相对较小(图 7a-b),随着模具继续压下,Ag 层逐渐充满预成形型腔,变形逐渐减缓,而此时 Cu 层的变形则逐渐增加(图 7c-d)。预成形结束时,变形最大的区域出现在 Ag-Cu 界面附近靠 Cu 一侧(图 7d)。

另一方面,由于变形初期 Ag 层变形较大,且 Ag-Cu 界面摩擦因数较小,造成界面两侧鼓肚程度不

同,Ag 层径向尺寸较大(图 7a-b),随着模具继续压下,预成型腔逐渐充满,变形逐渐转移到 Cu 层,使得界面处 Cu 层直径增加较多,Ag 层直径增加较少(图 7c-d)。预成形结束时,Ag-Cu 界面两侧的直径基本相同(图 7d)。

从图 7 还可以看出,在变形前期,坯料与模具锥面接触较少,受其影响小,Ag 层厚度分布较为均匀(图 7a-b),随着预成型腔逐渐充满,Ag 层受模具的影响变大,变形逐渐转向 Cu 层,且厚度不均匀的程度逐渐加大,此时,Ag 层开始呈中间厚边缘薄分布(图 7c-d)。

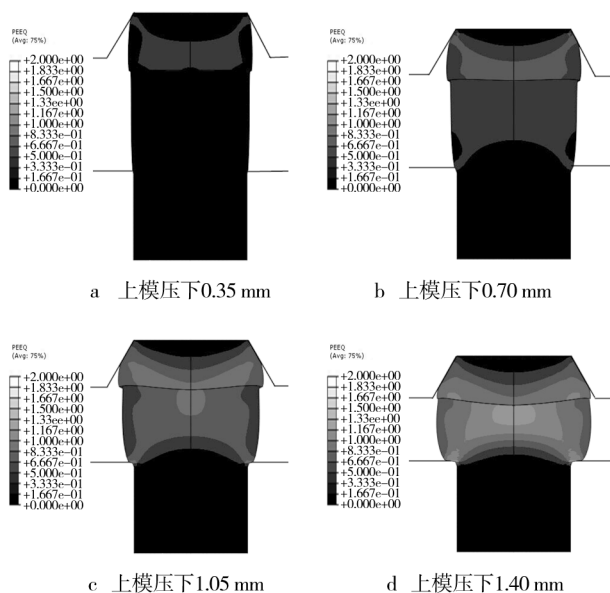


图7 Ag-Cu 复合触点预成形阶段的等效应变

Fig. 7 Effective strain of the Ag-Cu composite contact during the process of preforming

2.2.2 终成形阶段

在预成形基础上,将预成形上模换成终成形上模,其余保持不变,进行终成形模拟,结果如图 8 所示。由图 8 可知,终成形变形初期,在 Ag-Cu 界面附近,Cu 层中心变形较大,Ag 层变形相对较小(图 8a),随着模具继续压下,坯料逐渐充填型腔,Ag 层变形增大较多(图 8b-c),当模具进一步压下,Ag 层金属首先接触模具侧壁,从而使其变形受到抑制,继续变形的区域逐渐向 Cu 层转移(图 8c-d)。终成形结束时,变形最大区域在 Ag-Cu 界面中心处。

从图 8 还可以看出,在坯料接触模具侧壁前,Ag 和 Cu 的鼓肚程度相差较大,且 Ag 层厚度由预成

形的中间厚边缘薄逐渐变得接近等厚(图8a-b),但随着模具继续压下,Ag层厚度呈现波浪状分布(图8c-d)。

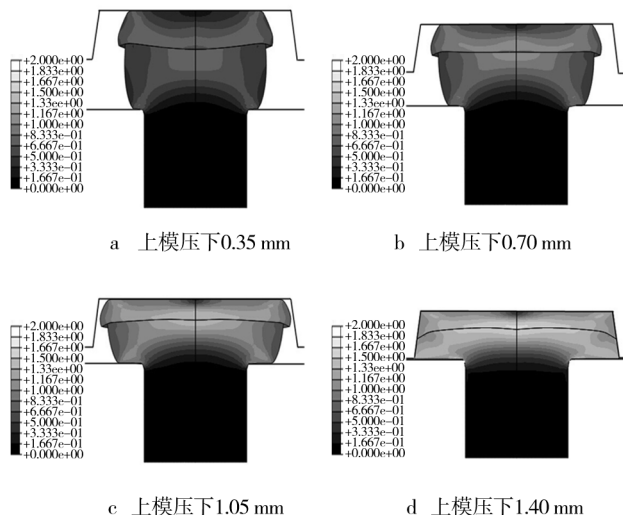


图8 Ag-Cu复合触点终成形阶段的等效应变

Fig. 8 Effective strain of the Ag-Cu composite contact during the process of final forming

3 主要因素对 Ag-Cu 复合触点顶镦成形过程的影响

在金属变形流动过程中,模具型面形状及工件与模具间的摩擦对成形结果影响很大,顶镦也不例外。文中通过数值模拟,探讨预成形模具半锥角及摩擦因数的影响。

3.1 预成形模半锥角 α 的影响

采用与2.1节相同的模拟条件,仅改变半锥角 α (图5中深度 h_1 也相应改变)的大小,考察其对成形结果的影响。

3.1.1 预成形等效应变分布

预成形结束时的等效应变分布,如图9所示。从中可以看出,当半锥角 α 较小时,预成形阶段模具压下量少,金属变形较小,Ag-Cu界面处应变值也较小(图9a-d)。随着 α 增大,预成形压下量也逐渐增大,使得 Ag-Cu 界面处应变逐渐增大(图9e-h)。预成形结束时,最大应变出现在 Ag-Cu 界面中心靠 Cu 层一侧,且 Ag 层厚度呈中间厚边缘薄分布(图9a-h)。

3.1.2 Ag 层厚度均匀性

从图9所示的 Ag-Cu 界面形状已能看出 Ag 层厚度分布的大致情况,为了更加清晰地反映 Ag 层厚度分布的均匀性,文中采用工件心部 Ag 层厚度 t_c 与边缘 Ag 层厚度 t_e 的差值 $\Delta t = t_c - t_e$ 来表示 Ag 层厚度分布的均匀性(见图10)。 $|\Delta t|$ 越小则厚度越均匀,且 Δt 为正表明 Ag 层中间厚边缘薄, Δt 为负则表示 Ag 层中间薄边缘厚。根据模拟结果,可得到 α 对 Ag 层厚度均匀性的影响,如图11所示。

从图11中可以看出,预成形阶段, Δt 均为正值,表明 Ag 层中间厚边缘薄。当半锥角 α 较小或较大时,差值 Δt 都较小,即 Ag 层厚度分布比较均匀。

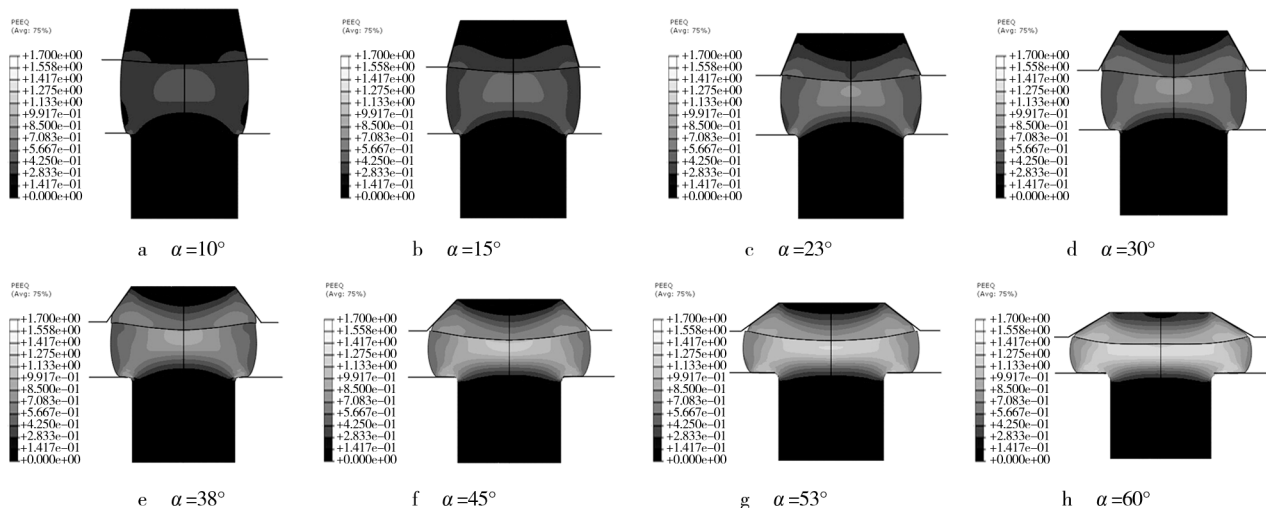


图9 半锥角 α 对预成形等效应变分布的影响

Fig. 9 Influence of the half cone angle α on the distribution of effective strain during the preforming

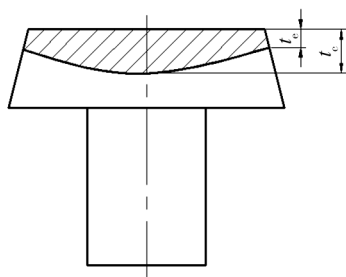
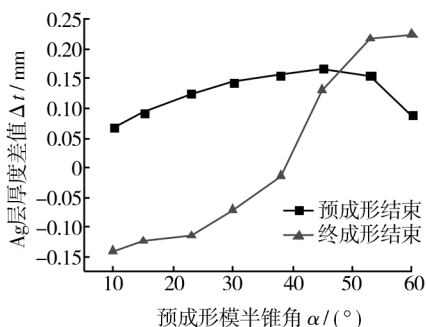


图10 Ag层厚度均匀性指标

Fig. 10 Uniformity index of the thickness of the Ag layer

图11 半锥角 α 对 Ag 层厚度差的影响Fig. 11 Influence of the half cone angle α on thickness difference of the Ag layer

当 α 值在 $23^\circ \sim 53^\circ$ 时,差值 Δt 较大,Ag 层厚度分布比较不均匀。

而在终成形阶段,半锥角 α 较小或较大时, $|\Delta t|$ 都较大,Ag 层厚度分布很不均匀,且 α 较小时, Δt 为负值,Ag 层中间薄边缘厚,而 α 较大时, Δt 为正值,Ag 层中间厚边缘薄。随着半锥角 α 的增大,差值 Δt 也逐渐由负变为正,且数值不断增大。而当 α 在 38° 左右时, Δt 为负值但接近为 0,Ag 层厚度分布最为均匀。即 α 取 38° 左右,可以获得较为均匀的 Ag 层厚度分布。

当 α 在 $10^\circ \sim 38^\circ$ 时,由预成形的正值变为终成形的负值,即预成形后 Ag 层呈中间厚边缘薄分布,而终成形后 Ag 层呈中间薄边缘厚分布,因此, α 在此范围内取值所造成的 Ag 层厚薄位置的变化,易使 Ag 层形成波浪状分布。

综合考虑预成形模半锥角 α 对预成形等效应变(图 9)和 Ag 层厚度均匀性(图 11)的影响,可以得出 α 取 38° 或 45° 为宜,但当 α 为 38° 时,终成形 Δt 为负值,即 Ag 层中间薄边缘厚。对于触点而言,

Ag 层中间略厚更有利于增加其使用寿命,因此, α 取为 45° 更为合理。

3.2 摩擦因数对 Ag-Cu 复合触点 Ag 层厚度均匀性的影响

选择预成形模半锥角 $\alpha = 45^\circ$,其他模拟条件与 2.1 章节相同,探讨不同摩擦条件下 Ag-Cu 复合触点顶镦成形过程 Ag 层厚度分布规律,模拟结果如图 12 和 13 所示。

3.2.1 Ag-上模间摩擦因数的影响

模拟中 Cu-下模和 Ag-Cu 的库伦摩擦因数均取 0.1,并取 Ag-上模间库伦摩擦因数分别为 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 及 0.30,考察 Ag-上模间摩擦因数对 Ag 层厚度均匀性的影响,模拟结果如图 12 所示。

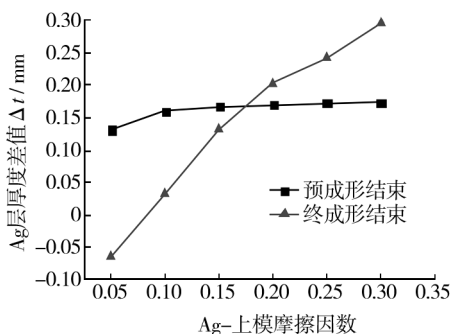


图12 Ag-上模间摩擦因数对 Ag 层厚度差的影响

Fig. 12 Influence of friction coefficient of the Ag-upper die on thickness difference of the Ag layer

从图 12 中可以看出,预成形阶段,厚度差 Δt 与摩擦因数关系不大,数值基本不变且均为较大的正值,即中间厚边缘薄。终成形阶段,摩擦因数越大则 $|\Delta t|$ 越大,Ag 层厚度越不均匀,且基本为中间厚边缘薄 ($\Delta t > 0$),当摩擦因数取 0.1 左右时,Ag 层厚度分布最为均匀 (Δt 接近为 0)。

显然,仅当 Ag-上模间摩擦因数很小时, Δt 才能由预成形的正值变为终成形的负值,此时有可能 Ag 层形成波浪状分布。而在正常摩擦条件下, Δt 均为正值,都是中间厚边缘薄。

3.2.2 Cu-下模间摩擦因数的影响

模拟中 Ag-上模和 Ag-Cu 的库伦摩擦因数分别取 0.15 和 0.10,选择 Cu-下模库伦摩擦因数分别为 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 及 0.30,考察 Cu 和下模间摩擦因数对 Ag 层厚度均匀性的影响,模拟

结果如图 13 所示。

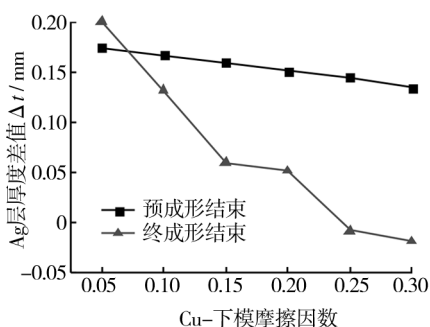


图 13 Cu-下模间摩擦因数对 Ag 层厚度差的影响

Fig. 13 Influence of friction coefficient of the Cu-lower die on thickness difference of the Ag layer

从图 13 中可以看出,预成形阶段,随着摩擦因数的增大,Ag 层厚度差逐渐减小,但不同的摩擦条件下,厚度差 Δt 相差不大,且均为正值。表明 Cu-下模间摩擦因数大小不会改变预成形阶段 Ag 层厚度的分布形态,都呈中间厚边缘薄分布,且对厚度均匀性影响较小。而在终成形阶段,随着摩擦因数的增大, Δt 逐渐减小,并在摩擦因数 ≥ 0.25 后变为负值,表明 Cu-下模间摩擦因数越小,终成形后 Ag 层厚度越不均匀。而当该摩擦因数等于 0.25 时,Ag 层厚度分布最为均匀。

4 结论

1) 预成形阶段,受模具锥面的影响,变形最大的区域位于 Ag-Cu 界面附近且靠近 Cu 一侧。

2) 半锥角 α 较大或较小时,预成形 Ag 层厚度较为均匀,而终成形后则变得很不均匀;半锥角 α 取值居中时($38^\circ \sim 45^\circ$)则易获得均匀的终成形 Ag 层厚度分布。

3) 预成形及终成形阶段 Ag 层厚薄位置的交替变化,易造成 Ag 层厚度呈波浪状分布。

4) Ag-上模间及 Cu-下模间摩擦因数的大小对预成形 Ag 层厚度分布均匀性影响不大,但减小 Ag-上模间摩擦因数或增大 Cu-下模间摩擦因数,有利于增加终成形后 Ag 层厚度的均匀性。

参考文献:

[1] 姚芳,李志刚,李玲玲,等. 继电器触点失效预测的研

究[J]. 继电器,2004(16):28—31.

YAO Fang, LI Zhi-gang, LI Ling-ling, et al. Research on The Failure Prediction of Relay Contact[J]. Relay Contact, 2004(16):28—31.

[2] 展亚辉,刘明伟,韩志风,等. 汽车继电器触点寿命分析及保护措施[J]. 汽车电器,2012(12):20—24.

ZHAN Ya-hui, LIU Ming-wei, HAN Zhi-feng, et al. Life-time Analysis and Protective Measures of Vehicle Relay Contact[J]. Vehicle Electrical, 2012(12):20—24.

[3] 李震彪,徐金玲,黄良,等. 电磁继电器触点动态熔焊机理分析[J]. 低压电器,2007(5):1—4.

LI Zhen-biao, XU Jin-ling, HUANG Liang, et al. Mechanism Analysis on Dynamic Welding of Electromagnetic Relay Contacts[J]. Low Voltage Apparatus, 2007(5):1—4.

[4] 郭永利,李冬梅,李海燕,等. 低压电器用铜基触点材料的研究进展[J]. 电工材料,2011(3):10—13.

GUO Yong-li, LI Dong-mei, LI Hai-yan, et al. Progress in Cu-based Contact Materials of Low Voltage Apparatus[J]. Electrical Engineering Materials, 2011(3):10—13.

[5] 陆彪,刘茂林. 冷锻复合触点复层界面形成规律的探讨[J]. 锻压机械,1993(3):31—32.

LU Biao, LIU Mao-lin. Forming Rule of Cold Upsetted Composite Contact Cladding Interface[J]. Forging Machinery, 1993(3):31—32.

[6] 格鲁捷夫. 金属压力加工中的摩擦和润滑手册[M]. 焦明山,袁瑞琛,译. 北京:航空工业出版社,1990.

Drudegrid. The Friction and Lubrication Manual in Metal Pressure Processing[M]. JIAO Ming-shan, YUAN Rui-shen, Translation. Beijing: Aviation Industry Press, 1990.

[7] 许福太,陈敬超,刘满门,等. 银大塑性变形的有限元模拟[J]. 稀有金属材料与工程,2009(10):1761—1764.

XU Fu-tai, CHEN Jing-chao, LIU Man-men, et al. Finite Element Simulation on Large Plastic Deformation of Silver[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009(10):1761—1764.

[8] 许树勤,陈志英,张善元. 锻粗试验中鼓度与摩擦的相关性研究[J]. 锻压技术,2004,29(5):46—48.

XU Shu-qin, CHEN Zhi-ying, ZHANG Shan-yuan. Research on the Relation between Bulging and Friction in Cylinder Upsetting[J]. Forging and Stamping Technology, 2004,29(5):46—48.

[9] 赵新海,李剑锋,黄晓慧,等. 控制锻件变形均匀性和变形力的锻造预成形多目标优化设计[J]. 机械工程学报,2009(5):193—197.

(下转第 123 页)

- ZHU Zhi-wei, LIANG Ji-cai, LI Yi, et al. Study of Star-like Inner Race No-flash Die Forging Technology of Automobile Constant Velocity Universal Joint[J]. Forming and Stamping Technology, 2005(6):7—10.
- [5] 李君, 王岗超, 石文超. 圆柱直齿轮冷精锻模拟及试验研究[J]. 精密成形工程, 2011, 3(2):11—14.
LI Jun, WANG Gang-chao, SHI Wen-chao. Simulation and Experimental Study on Cold Precision Forging of Spur Gear with Big Modulus[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(2):11—14.
- [6] 王平, 魏志刚, 刘德仿, 等. 轿车等速万向节星形套冷挤压成型过程有限元模拟[J]. 机械设计, 2007, 24(1):34—36.
WANG Ping, WEI Zhi-gang, LIU De-fang, et al. Finite Element Simulation on the Forming Process of Cold Extruding for the Starlike Sleeve of Constant Speed Cardan Joint of Car[J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(1):34—36.
- [7] DAMIR V. Flow Formulation FE Metal-forming Analysis with Boundary Friction Via Penalty Function[J]. Journal of Material Processing Technology, 2002, 59(3):125—126.
- [8] LEE C M, YANG D Y. A Three-dimensional Steady-state Finite Element Analysis of Square Die Extrusion by Using Automatic mesh Generation[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(1):334—371.
- [9] BAKHSHI M. A Theoretical and Experimental Study of Friction in Metal Forming by the Use of Forward Extrusion Process[J]. Journal of Material Processing Technology, 2002, 125—126(9):369—374.
- [10] KIM Hyunkee, YAGI Tetsuji, YAMANAKA Masahito. FE Simulation as a Must Tool in Cold/warm Forging Process and Tool Design[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98(2):143—149.
- [11] LEE J H, KSNG B S, LEE J H. Process Design in Multi-stage Cold Forging by the Finite-element Method[J]. J Mater Process Technol, 1996, 58(2-3):174—183.
- [12] 夏巨谥, 王新云. 闭式模锻[M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
XIA Ju-chen, WANG Xin-yun. Closed Die Forging[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2013.
- [13] 王岗超, 王刚, 石文超, 等. 基于分流法的大模数半轴伞轮冷精锻工艺研究[J]. 精密成形工程, 2010, 2(4):52—56.
WANG Gang-chao, WANG Gang, SHI Wen-chao, et al. Cold-close Precision Forging of Half Axle Bevel Gear with Big Modulus Based on Divided Flow Method[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2(4):52—56.
- [14] 魏志刚, 汤文成, 刘德仿. 星形套冷挤压成形模具结构分析及优化[J]. 锻压技术, 2006(4):59—63.
WEI Zhi-gang, TANG Wen-cheng, LIU De-fang. Structural Analysis and Optimization of the Cold Extrusion Mould of Star Sleeve Workpiece[J]. Forming and Stamping Technology, 2005(6):7—10.
- [15] 魏志刚. 星形套冷挤压成形有限元法研究及模具优化与疲劳分析[D]. 南京:东南大学, 2006.
WEI Zhi-gang. FEM Study on the Cold Extrusion of the Starlike Inner Race and Mold Optimization and Fatigue Analysis[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.

(上接第118页)

- ZHAO Xin-hai, LI Jiang-feng, HUANG Xiao-hui, et al. Optimal Preform Die Shape Design through Controlling Deformation Uniformity and Deforming Force in Metal Forging[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009(5):193—197.
- [10] 梁婷, 赵亮, 李需, 等. 新型 Bi 系高温超导用银合金力学性能研究[J]. 低温物理学报, 2005(5):723—727
LIANG Ting, ZHAO Liang, LI Pei, et al. Mechanical Properties Research on The New Bi HTS with Silver Alloy[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2005(5):723—727.
- [11] 王广春, 郑伟, 姜华, 等. 纯铜微锻粗过程尺寸效应的试验研究[J]. 机械工程学报, 2012(14):32—38.
WANG Guang-chun, ZHENG Wei, JIANG Hua, et al. Experimental Research on Size Effect of Micro Upsetting of Pure Copper[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012(14):32—38.
- [12] 黄伯云, 李成功, 石力开, 等. 中国材料工程大典[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
HUANG Bo-yun, LI Cheng-gong, SHI Li-kai, et al. China Materials Engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [13] 吕炎. 锻造工艺学[M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
LYU Yan. Forging Technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1999.