

滑动摩擦接触对母线弯曲成形质量的影响

岳学虎, 樊瑜瑾, 李鹏元

(昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650500)

摘要: **目的** 研究滑动摩擦接触对 1060 纯铝母线弯曲成形质量的影响, 得到表面质量更好的工件, 降低废品率。**方法** 采用自行设计的 V 形三点式自由弯曲成形的摩擦力测试装置, 通过更换不同表面粗糙度的凹模圆角、不同润滑介质以改变接触状况, 进行一系列摩擦试验。通过钨灯丝扫描显微镜获得板料弯曲件表面微观形貌图, 通过 MATLAB 软件对所采集的数据进行曲线处理。**结果** 得到不同粗糙度的凹模圆角以及不同润滑介质条件下的弯曲力-行程曲线。经测定, 凹模圆角表面光滑时, 无润滑状态下, 最大摩擦力约为 440 N; 采用聚乙烯薄膜作为润滑介质, 最大摩擦力约为 100 N; 采用聚四氟乙烯薄膜作为润滑介质时, 最大摩擦力约为 20 N。凹模圆角表面粗糙时, 无润滑状态下, 最大摩擦力约为 235 N; 采用聚四氟乙烯薄膜作为润滑介质时, 最大摩擦力约为 28 N。**结论** 添加润滑介质可以有效降低板料与凹模圆角之间摩擦力大小, 进而提高弯曲件表面成形质量。滑动摩擦条件下, 无论光滑还是粗糙的凹模圆角, 采取润滑措施均能有效提高弯曲成形工件的表面质量, 且聚四氟乙烯薄膜作为润滑介质时, 得到的板料表面质量最好。

关键词: 滑动摩擦; 摩擦接触; 弯曲成形; 成形质量

中图分类号: TG502.16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)01-0320-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.01.041

Influence of Sliding Friction Contact on the Quality of Busbar Bending Forming

YUE Xue-hu, FAN Yu-jin, LI Peng-yuan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of sliding friction contact on the bending quality of 1060 pure aluminum busbar to get better surface quality and reduce reject rate. The self-designed friction force testing device for V-shaped three-point free bending forming was adopted to carry out a series of friction tests by changing the corner of the concave die with different surface roughness and different lubricating media to change the contact condition. The surface micro structure of sheet metal bending parts was obtained by tungsten filament scanning microscope. The collected data were fitted by MATLAB software. The curves of bending force and stroke under different roughness of concave die and different lubricating media were obtained. When die fillet surface was smooth and there was no lubrication state, the maximum friction size was about 440 N. When polyethylene film was used as lubricating medium, the maximum friction force size was about 100 N. When polytetrafluoroethylene

收稿日期: 2018-06-19; 修订日期: 2018-08-23

Received: 2018-06-19; **Revised:** 2018-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51168020); 昆明理工大学分析测试基金 (2017M20162103009)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51168020) and the Analysis and Testing Foundation of Kunming University of Science and Technology (2017M20162103009)

作者简介: 岳学虎 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究板料塑性成形。

Biography: YUE Xue-hu (1992—), Male, Master, Research focus: sheet plastic forming.

通讯作者: 樊瑜瑾 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究摩擦学、板料塑性成形。邮箱: fanyujinkmust@163.com

Corresponding author: FAN Yu-jin (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: tribology and sheet plastic forming. E-mail: fanyujinkmust@163.com

film was used as lubricating medium, the maximum friction size was about 20 N. When the round angle surface of concave mould is rough, the maximum frictional force was about 235 N without lubrication. When polytetrafluoroethylene film was used as lubricating medium, the maximum frictional force was about 28 N. The addition of lubricating medium can reduce the friction between the plate and the concave die corner effectively, and then improve the forming quality of the surface of the bending parts. Under sliding friction conditions, the surface of bending parts can be effectively improved by the lubrication measures, whether concave die corner is smooth or rough, and the quality of the surface is the best when the PTEF film is used as the lubricating medium.

KEY WORDS: sliding friction; friction contact; bending forming; forming quality

弯曲工艺在实际生产中应用十分广泛,保证获得质量合格的折弯件是弯曲工艺的基本要求。就弯曲质量而言,主要包括弯曲件的表面擦伤、开裂。经过多年的发展,弯曲成形基本理论可分为两大类:一类是以 Ludwik 为代表的在平截面假设和单项应力假设的基础上提出的塑性弯曲工程理论模型^[1],另一类是以 Hill^[2]为代表的塑性弯曲精确数学理论模型。专家学者以这两种理论模型为基础,对弯曲理论进行了深入的研究,研究人员更多地倾向于采用 Hill 的模型。摩尔等^[3-5]从原理上对滑动摩擦进行了分析,指出在两物体接触情况下,当施加在接触面的切向载荷超过一定数值时,两物体之间发生相对滑动产生滑动摩擦。杨本杰等^[6]设计了一种新型的摩擦实验装置,通过板料拉伸试验探究了表面形貌、滑动速度对滑动接触界面摩擦行为的影响,研究表明,规则的圆形凹坑表面具有较低的摩擦系数,摩擦系数对滑动速度有显著的依赖性。原大宁等^[7-10]研究了润滑对板料表面塑性变形时摩擦系数的影响,提出了摩擦特性的宏观力学模型,并对各种模型的特点分别作了详细的阐述分析。赵振铎等^[11-12]研究了金属材料相互滑动过程中平均摩擦系数与接触压力的关系,研究表明,摩擦系数不仅与接触表面的材质、形貌有关,与接触压力也有密切的关系。邹琼琼等^[13-17]研究了金属塑性成形加工过程中的摩擦特性以及如何测量摩擦系数,实验结果表明,向材料与模具之间添加润滑介质可以有效减小摩擦磨损。研究人员对摩擦力原理分析、摩擦结构模型的建立以及润滑对摩擦力的影响都有了一定的研究,为后续的研究工作提供了理论基础与实验依据,但并未提出折弯过程中摩擦参数的有效测定方法。本文采用自行设计的 V 形三点式自由弯曲成形摩擦力测试装置,对板料折弯过程中板料与凹模圆角之间产生的摩擦力进行实时测量,通过 MATLAB 软件对测量数据进行曲线处理,对比成形工件表面状况,分析润滑介质对折弯过程中摩擦力大小的影响以及对工件成

形质量的影响,提出改进折弯件成形质量的有效措施,为板料弯曲成形质量的保证提供了实验依据。

1 实验

1.1 试验原理

V 形三点式板料自由弯曲成形过程中摩擦测试装置如图 1 所示。板料折弯的过程中,在正压力 P 的作用下,板料弯曲角度 φ 不断减小,凹模圆角与板料之间发生相对滑动,产生切向摩擦力 F_f ,从而带动滚轴向外侧做旋转运动。受力板随着滚轴向外侧转动,压住传感器测试压头,通过传感器可以实时采集受力板所提供力 F 的大小,通过公式 $F_f \times R = F \times L$ 可以计算出凹模圆角处所受摩擦力的大小。

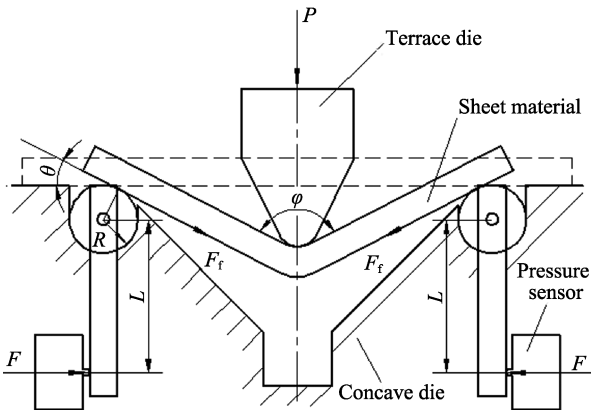


图 1 板料弯曲与摩擦测试实验原理
Fig.1 Diagram of test principle of sheet metal bending and friction

1.2 试验材料

选用同一规格的 1060 纯铝板作为实验材料,具体参数为:长度 $l=100\text{ mm}$,宽度 $b=40\text{ mm}$,厚度 $b=6\text{ mm}$ 。其化学成分和基本力学性能见表 1、表 2。

表 1 1060 纯铝化学成分
Tab.1 Component of 1060 pure aluminum

Chemical element	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	V
Mass fraction/%	99.60	0.25	0.35	0.05	0.03	0.03	0.05	0.03	0.05

表 2 1060 纯铝的基本力学性能参数
Tab.2 Basic mechanical properties of 1060 pure aluminum

Modulus of elasticity/GPa	Tangent modulus/MPa	Yield strength/MPa	Poisson ratio	Tensile strength/MPa	Hardening exponent
69	345	27.6	0.330	68.9	0.32

1.3 试验装置

试验在自行设计的 V 形三点式自由弯曲成形摩擦试验装置上进行, 试验装置如图 2 所示。该装置与传统折弯机分别对同种规格板料进行折弯试验, 所产生的折弯效果相同, 故该实验装置可以保证试验测量结果的正确性。根据板料弯曲摩擦参数测试原理, 在

凹模左、右两侧各安装一个 ZNHBM-100KG 型压力传感器, 在板料弯曲成形的同时测量左右受力板所承受压力大小, 之后通过公式 $F_f \times R = F \times L$ 计算得到板料与凹模左、右两侧接触区的摩擦力 F_f 。试验所用圆柱滚轴可以更换, 有金刚石车刀精车而成表面粗糙度较低和普通车刀半精车加工而成表面粗糙度较高两种规格。

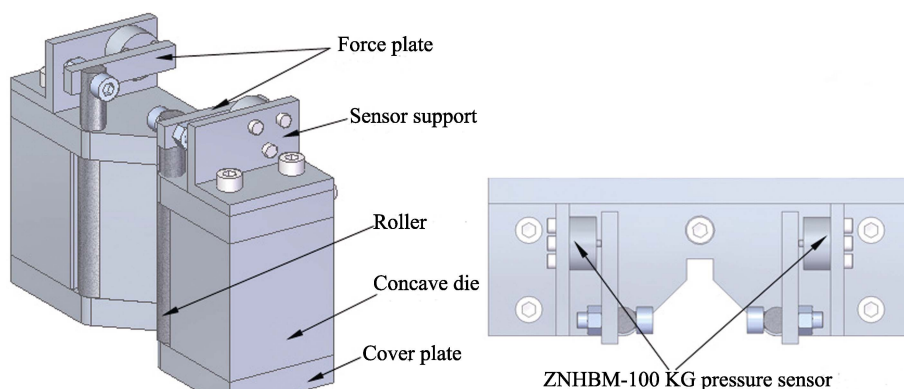


图 2 摩擦测试装置
Fig.2 Diagram of friction test device

1.4 试验步骤

选用 1060 纯铝板作为试验材料, 通过更换不同表面粗糙度的两种圆柱滚轴, 以达到改变凹模圆角表面状况的目的。试验中通过向板料与凹模圆角之间添加润滑介质, 以改变两者之间的接触摩擦状况, 来探究润滑措施对板料成形加工质量的影响。在不采取任何润滑措施的情况下认为是干摩擦状态, 试验具体分组见表 3。

表 3 板料弯曲接触摩擦实验分组
Tab.3 Experimental group of sheet bending contact friction

Group	Corner surface condition of die	Friction form	Lubrication measures
1	Smooth	Slide	No (Dry friction)
2	Smooth	Slide	Polyethylene film
3	Smooth	Slide	polytetrafluoroethylene film
4	Rough	Slide	No (Dry friction)
5	Rough	Slide	Polytetrafluoroethylene film

为了确保试验数据准确可靠, 对每组试验重复进行 5 次, 并对所测的数据取平均值作为有效数据。使用 MATLAB 将采集到的数据进行曲线处理, 得到弯曲成形过程中力学参数曲线, 研究分析板料在弯曲成

形的过程中摩擦力大小的变化, 探究不同凹模圆角质量、不同润滑措施对成形工件质量的影响。

2 实验结果及分析

2.1 折弯过程中滑动接触摩擦力的变化

在凹模圆角表面光滑的条件下, 所测得母线弯曲成形过程中板料外侧与凹模圆角接触区域的摩擦力-弯曲行程曲线, 如图 3 所示。左右两侧摩擦力-行程曲线几近重合, 说明了实验装置设计可靠合理。板料弯曲初始阶段摩擦力大小几乎为 0; 当弯曲行程到 5.6 mm 左右时, 摩擦力的大小开始稳步提升; 弯曲行程到 15 mm 左右时, 摩擦力大小基本达到稳定状态, 弯曲过程也已进入最终阶段。造成这一现象的原因可能是, 在板料与凹模圆角接触的初始阶段, 板料处于弹性变形状态, 板料与凹模圆角外侧之间有打滑现象的发生, 导致前期的弯曲行程几乎没有产生摩擦力。随着弯曲行程的进行, 板料的弹性变形不足以抵消板料与凹模圆角之间的相对位移, 凹模圆角发生扭转, 且摩擦力大小随弯曲行程整体呈现出线性增长的趋势。当摩擦力达到一定数值之后不再增加, 其根本原因为板料折弯已进行到最后阶段, 此时板料与凹模

之间进入纯塑性变形阶段, 摩擦力大小将不再随着弯曲行程的增加而发生明显的变化, 直到弯曲过程最终结束。

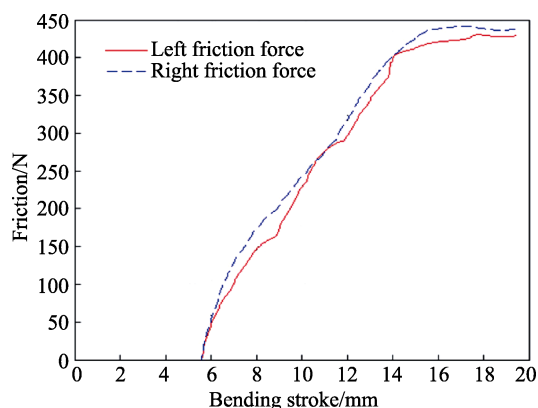


图 3 凹模圆角表面光滑及干摩擦时左、右两侧摩擦力-弯曲行程

Fig.3 Left and right friction force-bending stroke in dry friction when the fillet surface of die is smooth

2.2 摩擦接触条件对弯曲件质量的影响

图 3 中左右两侧摩擦力曲线几乎重合, 说明在试验过程中, 左右两侧凹模圆角所受接触力的状况在误差允许范围内是一致的。为了便于研究, 更清晰地说明问题, 对板料成形过程中右侧凹模圆角与板料之间的接触状况进行了具体分析。

图 4 为凹模圆角表面光滑时, 无润滑状态、聚乙烯薄膜作为润滑介质、聚四氟乙烯薄膜作为润滑介质

三种条件下得到的板料弯曲成形表面。通过对比可以发现: 无润滑状态下, 成形板料的表面受到严重的破坏, 滑动摩擦对表面造成的压痕整体较深, 且主要集中在两端位置, 在宽度方向上, 越接近两端, 压痕越深, 被破坏得越严重, 板料中心位置处几乎没有产生压痕; 使用聚乙烯薄膜作为润滑介质的条件下, 板料整体压痕较无润滑状态改善了很多, 但是宽度方向上, 中间部位出现了压痕; 使用聚四氟乙烯薄膜作为润滑介质的条件下, 板料无明显压痕现象, 质量最好。造成这一现象的原因可能是: 无润滑状态下, 板料与凹模圆角接触的初始阶段, 由于接触正压力的影响, 质地较硬的凹模圆角表层凸起材料会嵌入到质地较软的板料中, 随着弯曲过程的继续, 板料与凹模圆角之间发生相对位移, 嵌入板料中的凹模圆角表层会带动粘着物一起运动, 造成板料表层与整体发生脱离。宽度方向上, 由于板料边缘材料所受到的阻力较小, 所以较中间位置更容易发生脱离, 故中间压痕较浅, 两侧压痕较深。聚乙烯薄膜润滑时, 由于聚乙烯薄膜质地较软, 所以当凹模圆角在正压力作用下嵌入板料时, 起到了一定的缓冲作用, 使得凹模圆角凸起材料嵌入板料的深度较浅, 所以整体压痕较无润滑状态下明显减弱。同时, 聚乙烯薄膜在外压力的作用下与板料发生粘着效应, 两者之间的相互作用力足以克服相对运动所产生的摩擦力, 故会造成部分材料被带走的现象, 产生较浅的压痕。以聚四氟乙烯薄膜作为润滑介质的时候, 原理与聚乙烯薄膜相同, 但聚四氟乙烯的粘着效应非常弱, 所以与板料之间产生较小的摩擦力, 能够更好地保证板料弯曲成形的质量。

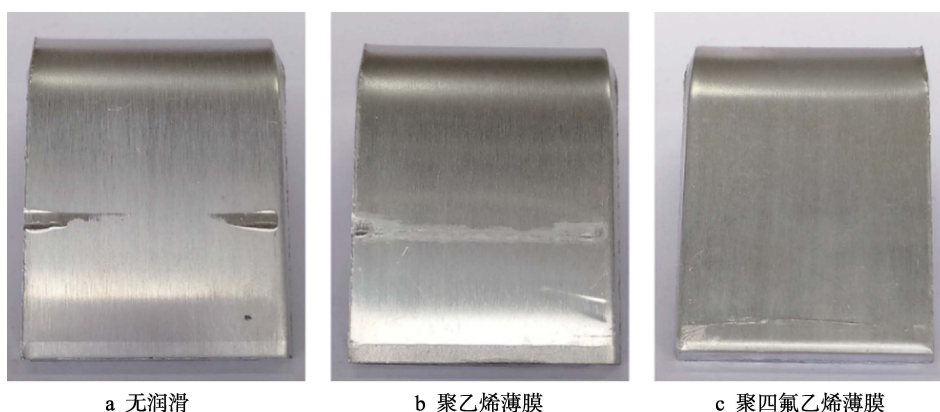


图 4 凹模圆角表面光滑时不同润滑措施下所得弯曲件表面质量

Fig.4 Surface quality of bending parts obtained by different lubrication measures when the surface of die is smooth: a) No lubrication; b) Polyethylene film; c) PTFE film

通过 MATLAB 软件对试验采集的数据进行处理, 得到如图 5 所示的摩擦力-弯曲行程曲线。可以发现, 板料与凹模圆角接触的初始阶段, 由于板料与凹模圆角之间发生的弹性变形对相对滑动有明显的抵消作用, 导致此时产生的摩擦力很小, 几乎可以忽略不计。随着弯曲行程的继续, 板料与凹模圆角之间

由弹性变形逐渐转为弹塑性变形, 且塑性变形逐渐占据主导地位, 此时三种条件下所产生的摩擦力大小均随着弯曲行程的增加而增大。从图 5 中可以明显看出, 相同弯曲行程条件下, 无润滑状态下产生的摩擦力最大, 聚乙烯薄膜作为润滑介质时产生的摩擦力明显减小, 聚四氟乙烯薄膜作为润滑介质时产生的摩擦

力最小。结合图4可知,当凹模圆角表面光滑时,板料与凹模圆角之间产生的摩擦力越小,所得弯曲件成形质量也就相对越好。

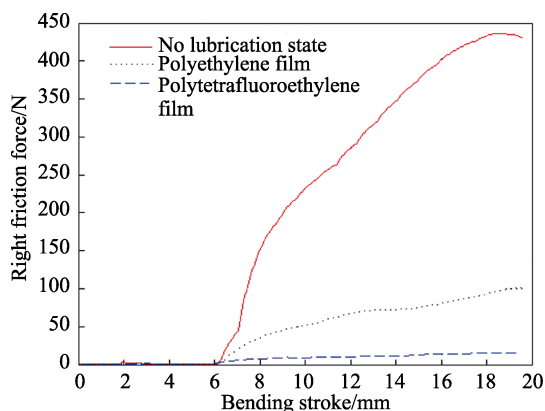


图5 凹模圆角表面光滑时不同润滑措施下的摩擦力-弯曲行程曲线

Fig.5 Curve for friction-bending stroke with different lubrication measures when the surface of die is smooth

图6为凹模圆角表面粗糙时,无润滑状态、聚四氟乙烯薄膜作为润滑介质两种条件下得到的板料弯曲成形表面。通过对比可以发现,无润滑状态下,成形板料的表面受到严重的破损,压痕主要集中在两端位置,与光滑凹模圆角表面所得到的板料压痕比较接近又有所不同。在中间位置出现了较浅的压痕,是因为表面粗糙的凹模圆角产生了犁沟效应。在此作用下,相对滑动过程中,中间位置的板料所受到的阻力得到有效减小,所产生的压痕比凹模圆角表面光滑时深。使用聚四氟乙烯薄膜作为润滑介质时,所得板料表面无明显压痕,与光滑凹模圆角表面成形原理相同。

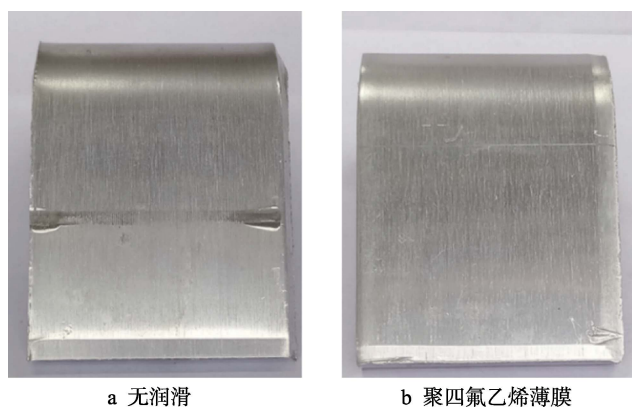


图6 凹模圆角表面粗糙时不同润滑措施下所得弯曲件表面质量

Fig.6 Surface quality of bending parts obtained by different lubrication measures when the surface of die is rough: a) No lubrication; b) PTFE film

通过 MATLAB 软件对试验采集的数据进行处理,得到如图7所示的摩擦力-弯曲行程曲线。可以发现,板料弯曲成形初始阶段,两种条件下所产生的

摩擦力都比较小。当以聚四氟乙烯薄膜作为润滑介质时,行程达到5 mm左右处,摩擦力开始增大。无润滑状态时,行程达到7.5 mm左右处,摩擦力开始增大,且上升速度较快,到达最大值后开始缓慢减小至175 N左右,最后阶段摩擦力有少量回升。造成这一现象的原因是:无润滑状态时,在正压力的作用下,凹模圆角粗糙的表面使其表层更深地嵌入板料中,使得前期板料的弹性变形时间加长,曲线图表现为摩擦力的增长具有滞后性。由于犁沟效应对板料与凹模圆角之间的摩擦力具有一定的削弱作用,所以摩擦力达到最大值后逐渐减小,犁沟效应会对板料表层材料产生推挤,最终堆积在犁沟边缘处,造成弯曲最终阶段摩擦力有少量回升的现象。从图7中还可以看出,相同弯曲行程条件下,聚四氟乙烯薄膜作为润滑介质产生的摩擦力远小于无润滑状态,且成形质量得到很大的提升。

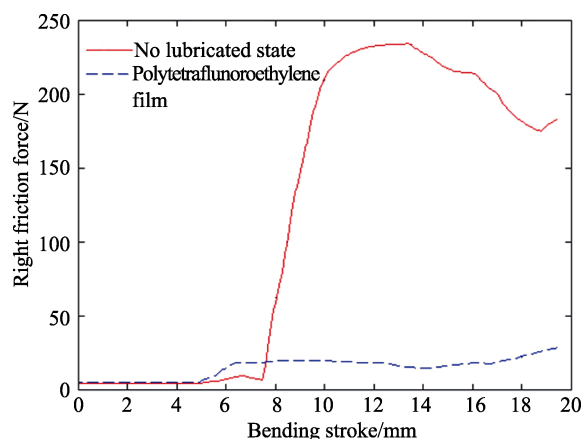


图7 凹模圆角表面粗糙时不同润滑措施下的摩擦力-弯曲行程曲线

Fig.7 Curve for friction-bending stroke with different lubrication measures when the surface of die is rough

3 结论

1)为研究滑动摩擦接触对母线弯曲成形质量的影响,设计了一种V形三点式自由弯曲成形的摩擦力测试装置,并使用该装置进行了摩擦力测量试验。经试验研究证明,该装置基本满足摩擦力测定的要求。

2)板料弯曲成形过程中,板料与凹模圆角表面之间摩擦接触对工件质量的影响主要集中在宽度方向的两端位置,且越靠近边缘,这种影响越明显。

3)在滑动摩擦接触过程中,采取添加润滑介质的方法可以有效降低板料与凹模圆角之间的摩擦力,进而提高弯曲件的表面成形质量。

4)滑动摩擦条件下,无论采用光滑还是粗糙的凹模圆角,在板料与凹模圆角接触区域采取润滑措施均能有效提高弯曲成形工件的表面质量,且聚四氟乙烯薄膜作为润滑介质时,得到的板料表面质量最好。

参考文献:

- [1] 余同希, 章亮炽. 塑性弯曲理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
YU Tong-xi, ZHANG Liang-chi. Plastic bending theory and its application[M]. Beijing: Science China Press, 1992.
- [2] HILL R. The mathematical theory of plasticity[M]. Oxford: Clarendon Press, 1950.
- [3] 摩尔. 摩擦学原理和应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
MOLE. Principles and applications of tribology[M]. Beijing: China Machine Press, 1982.
- [4] 瓦伦丁 L 波波夫. 接触力学与摩擦学的原理及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
VALENTIN L P. Contact mechanics and friction physical principles and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [5] SCHEY J A. Tribology in metalworking[M]. Ohio: American Society for Metals, 1983.
- [6] 杨本杰, 刘小君, 董磊, 等. 表面形貌对滑动接触界面摩擦行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(5): 553-560.
YANG Ben-jie, LIU Xiao-jun, DONG Lei, et al. Effect of surface topography on the interface tribological behavior of sliding contact[J]. Tribology, 2014, 34(5): 553-560.
- [7] 原大宁, 刘丽兰, 刘宏昭, 等. 滑动摩擦模型研究现状[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(4): 1142-1147.
YUAN Da-ning, LIU Li-lan, LIU Hong-zhao, et al. Progress of pre-sliding friction model [J]. Journal of system simulation, 2009, 21(4): 1142-1147.
- [8] 赖联锋, 高诚辉, 黄健萌. 粗糙表面滑动摩擦接触模型研究的进展[J]. 中国工程机械学报, 2011, 9(2): 134-138.
LAI Lian-feng, GAO Cheng-hui, HUANG Jian-meng. Advances on sliding frictional contact models of rough surfaces[J]. Chinese journal of construction machinery, 2011, 9(2): 134-138.
- [9] MFANAFKILE D M. Sensitivity analysis of stamping processes using various friction models appropriate for non-stationary contact problems[J]. Journal of the franklin institute, 2009, 346(8): 830-839.
- [10] LEE B H, KEUM Y T, WAGONER R H. Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming[J]. Journal of materials processing technology, 2002, 130-131(1): 60-63.
- [11] 赵振铎, 王家安, 王丽君. 金属塑性成形平均摩擦系数与接触压力的关系研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2006, 41(1): 40-43.
ZHAO Zhen-duo, WANG Jia-an, WANG Li-jun. Research on the relationship between average friction coefficient and contact press in metal plastic forming[J]. China metal-forming equipment & manufacturing thchnology, 2006, 41(1): 40-43.
- [12] AZUSHIM A A, UDA M, KUDO H. An interpretation of the speed dependence of the coefficient of friction under the micro PHL condition in sheet drawing[J]. Annals of the CIRP, 1991, 40(1): 227-230.
- [13] 邹琼琼, 黄继龙, 龚红英, 等. 塑性成形中的摩擦与润滑问题[J]. 热加工工艺, 2016(23): 18-20.
ZOU Qiong-qiong, HUANG Ji-long, GONG Hong-ying, et al. Problems of friction and lubrication in plastic forming[J]. Hot working technology, 2016(23): 18-20.
- [14] 何霞, 廖文玲, 王国荣, 等. 润滑介质对摩擦性能影响差异分析[J]. 润滑与密封, 2017, 42(7): 60-65.
HE Xia, LIAO Wen-ling, WANG Guo-rong, et al. Analysis on influence difference of lubricating medium on tribological properties[J]. Lubrication engineering, 2017, 42(7): 60-65.
- [15] 赵振铎. 金属塑性成形中的摩擦与润滑[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
ZHAO Zhen-duo. Friction and lubrication in metal plastic forming [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [16] BECH J, BAY N, ERIKSEN M. A study of mechanisms of liquid lubrication in metal forming[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 1998, 47(1): 221-226.
- [17] WOJTOWICZ W J. Sliding friction test for metalworking lubricants[J]. Lubrication engineering, 1955, 11: 174-177.