

穿过柔性体的板料 U 形折弯工艺研究

魏前龙

(安徽博微智能电气有限公司, 安徽 合肥 231299)

摘要: 折弯成形在钣金工艺中应用广泛, 但穿过柔性体的金属板料因折弯时的柔性体受力变形对板料成形影响较大, 给大规模生产造成困难。以某型电动汽车软包电池 PACK 中隔板组件为例, 通过单边折弯实验研究了压料力、间隙大小对其折弯成形的影响, 并提出了压料力、模具间隙的选取方法; 在此基础上, 选用 U 形折弯工艺, 运用 Dynaform 软件仿真验证 U 形折弯效果, 并提出了进一步减少折弯回弹量的工艺措施。

关键词: 板料折弯; 柔性模; 压料力; 模具间隙; 回弹补偿

中图分类号: TG386.3 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2023)01-0084-03

Research on U-shaped Plate Bending Through Flexible Part

WEI Qianlong

(Anhui Bowie Intelligent Electric Co., Ltd., Hefei 231299, China)

Abstract: Bending is widely applied in sheet metal processing, but the metallic sheet passing through the flexible part is much affected by the stress deformation in bending, which causes the difficulty for mass production. With a certain type of mid-diaphragm subassembly in pouch cells PACK used in electric vehicle as an example, and based on single side bending test, the influence of blank holder force, gap size acted on bending forming is studied, and the method to select appropriate blank holder force and die clearance is proposed. Through U-shaped bending process and by Dynaform software, simulation is conducted to verify the U-shaped bending effect, based on which, the processing measures further to reduce the bending springback are projected.

Keywords: plate bending; flexible mold; blank holder force; die clearance; springback compensation

0 引言

金属板料的 U 形折弯在折弯工艺中应用广泛, 其加工方法及模具设计已有较为成熟的工艺^[1-3], 由机器人替代人工进行折弯操作也已在生产中得到应用^[4]。生产实际中有时需要对穿过柔性体的板料进行折弯, 因柔性体影响板料精确成形, 与常见刚性模具 U 形折弯工艺有较大差别, 其加工难度更大, 质量很难保证, 且目前相关的研究较少。本文以某型电动汽车软包电池 PACK 中隔板组件的铝合金板料 U 形折弯为例, 研究折弯成形问题。

图 1 为该 PACK 中隔板组件, 由塑料件(柔性体)、矩形铝合金板组成, 两端对称。原工艺为金属板料一端 V 形 90° 单独折弯, 穿入塑料件后, 另一端由钳工敲击折弯并修整。该工艺方法效率低, 不利于保证折弯质量, 也不符合自动化生产的发展要求。因此, 迫切需要研究优化穿入塑料件的板料 U 形折弯工艺。

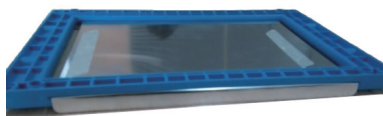


图 1 某型软包电池 PACK 中隔板组件

1 单边折弯试验与分析

弯曲件的主要质量问题有弯裂、回弹和滑移 3 种^[3]。该软包电池 PACK 中隔板组件为对称件, 其铝合金板折弯滑移量较小, 质量指标主要有表面质量和折弯回弹量。表面质量问题表现为板件折弯后的褶皱和裂纹; 折弯回弹量为折弯力消失后因折弯部分的弹性变形恢复造成的与弯曲模不一致的程度。影响回弹的因素很多, 一般有材料的力学性能、材料的相对弯曲半径 r/t 、弯曲件的形状、凸凹模之间间隙和弯曲校正力等^[5-7]。在本例中, 材料的性能及弯曲形状一定, 在不考虑合模速度的影响下, 其主要影响因素为间隙 C 、预压力 F 。影响回弹量的大小通常用角度回弹量 $\Delta\theta$ 和曲率回弹量 Δr 来表示, 本文以角度回弹量 $\Delta\theta$ 来表示回弹量大小。

1.1 试验平台制作

拟通过试验平台的试验确定折弯各影响因素对折弯成形质量的影响。图 2 所示为试验模型, 将中隔板组件定位固定, 通过上模的上下运动实现板件折弯。图中 C 为上模与中隔板塑料件之间的间隙, F 为折弯过程中对该塑料件上平面施加的压力。图 3 为制作完成的试验平台, 试验时将中隔板组件放入组合定位托架 4 上, 通过平移托架 4 调

作者简介: 魏前龙(1986—), 男, 安徽阜阳人, 工程师, 硕士, 研究方向为机电设备研发及工艺。

整折弯件相对折弯上模 2 的间隙 C , 而后拧紧托架 4 两端紧固螺栓固定好托架, 开启导杆气缸 1, 通过橡胶垫板 3 压住中隔板组件, 上模 2 下移完成铝合金板单边折弯。组件上平面所施压力通过改变气缸供气气压进行调整。

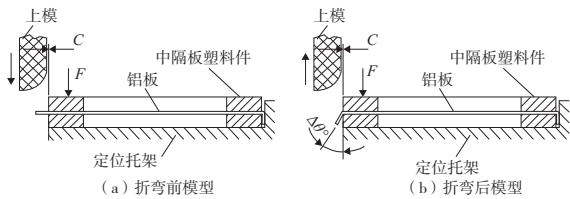
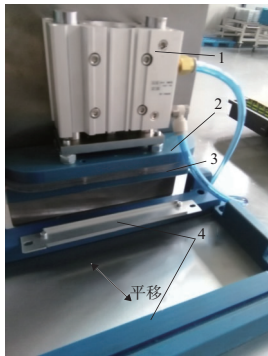


图 2 单边折弯试验示意图



1—导杆气缸;2—上模;3—橡胶垫板;4—组合定位托架。

图 3 试验平台

1.2 试验程序及结果

调整间隙 C 和压力 F , 分别测量 $C=0.4、0.5、0.7\text{ mm}$, $F=0、200、400、600、800\text{ N}$ 时折弯后的角度回弹量, 得出相应结果并绘制折线图, 如图 4 所示。

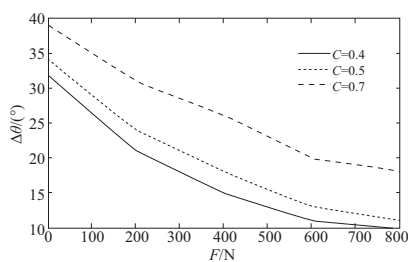


图 4 单边折弯试验结果

1.3 试验分析

1) 压力 F 的影响

中隔板塑料件为柔性体, 其铝板折弯与传统刚性折弯模折弯不同。在折弯中因柔性体易于弹性变形, 在折弯时塑料件受到铝板的折弯反力影响产生变形, 造成折弯弯曲半径过大。而材料的相对弯曲半径 r/t 越大, 其塑性变形成分越小, 回弹量越大^[6]。

从图 4 可以看出, 对塑料件施加预压力 F , 消除部分弹性变形, 可以减小相对折弯半径 r/t , 从而减小回弹量。在保证塑料件不出现塑性变形情况下, 尽可能施加较大预

压力 F 有助于减小回弹量。

对于通常的刚性折弯模 U 形折弯, 其压料力 F_Q 有如下经验公式^[1-2]:

$$F_Q = (0.3 \sim 0.8) F_z \quad (1)$$

$$F_z = \frac{0.7kbt^2\sigma_b}{r+t} \quad (2)$$

式中: F_z 为自由弯曲力, N; k 为安全系数; b 为弯曲件宽度, mm; t 为弯曲件厚度, mm; σ_b 为材料的抗压强度, MPa; r 为弯曲半径, mm。

而对于穿入柔性体的板料折弯, 其压边力不仅要考虑压料本身, 还要考虑对穿入的柔性体 (塑料件) 进行预压的压力, 即要满足

$$\sigma < \sigma_{sf} \quad (3)$$

又

$$\sigma = F/A \quad (4)$$

式中: A 为施加预压力时柔性体 (塑料件) 的受力面积; σ_{sf} 为柔性体的屈服强度。

在满足式 (3) 的同时, 采用尽可能大的 σ , 以尽可能大地消除柔性体的弹性变形。

设 $f(s)$ 为柔性体施加力 F 后, 其传递给折边板料的压力 F_Q 的传力系数, 则有

$$F_Q = f(s)F \quad (5)$$

式中: 传力系数 $f(s)$ 反映 F 在力传递过程中受到柔性体阻滞作用的程度; s 为柔性体的弹性变形量, $0 \leq f(s) \leq 1$ 。对于简单结构柔性件, 可认其为一固定常数。

因此, 力 F 在满足式 (3) 的情况下, 由式 (1) 和式 (5), 可得出较合理的压料力 F 。

$$F = (0.3 \sim 0.8) F_z / f(s) \quad (6)$$

2) 间隙 C 影响

在通常的刚性折弯模上, 模具间隙愈小, 回弹值愈小^[7-8]。从图 4 可以看出, 在穿过柔性体的铝板折弯中, 该规律同样适用。与此同时, 由于折弯时柔性体的弹性变形影响, 在折弯中柔性体受到上模挤压的侧边力影响, 将会向挤压力方向产生弹性变形, 造成实际间隙 C 比折弯前测量的 C 要大。因此, 其间隙 C 对折弯回弹的影响要比相同条件下的刚性模具要弱。

但是, 间隙 C 也不能过小, 过小则可能会使板料的折边变薄或弯裂。图 5 所示为 $C=0.1\text{ mm}$, $F=800\text{ N}$ 时, 在某一合模速度下的弯裂情况。在通常的刚性模具上对于有色金属板料的 U 形弯通常取单边间隙^[2]:

$$C = t_{\min} + nt \quad (7)$$

式中: t_{\min} 为材料最小厚度, mm; n 为间隙系数。

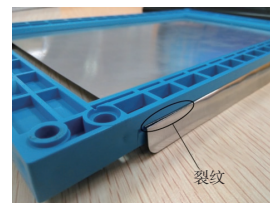


图 5 折弯弯裂

但是, 对于穿入柔性体的板料折弯, 由于柔性体的变

形影响,折弯时其实际间隙 C 比折弯前测量的 C 要大。因此有

$$C = t_{\min} + nt - mh \quad (8)$$

式中: m 为柔性体(塑料架)的变形系数; h 为柔性体受力部分的相对厚度,mm; m 值可通过试验取得。

2 U 形折弯工艺及仿真分析

2.1 折弯工艺选取

通过上述单边试验可以看出,在该 PACK 中隔板组件进行板料折弯时不仅效率较低,需要两侧分别折弯,同时折弯回弹量还是较大的。因此,拟对其两边同时折弯,即 U 形折弯。应用 U 形折弯一方面可以提高加工效率,一次成形;另一方面,柔性体(塑料件)在受到 U 形凹模的约束后可减小其弹性变形量,有利于提高成形质量。

2.2 仿真模型处理

折弯时压料板对塑料件施加足够压力,此时柔性体(塑料件)在折弯时其弹性变形将会变小;而后 U 形上模下移合模完成折弯动作。

为便于仿真分析,可以将该柔性体视作模具的一部分。对于该中隔板组件,将塑料件在板料上方的部分视作凹模(或压料板)的一部分,板料下方的塑料件视作凸模的一部分。因在足够大的压料力 F 作用下折弯时塑料件再次产生的弹性变形将会很小,所以,仿真时可将模具视为刚体,忽略其变形。这样处理后便可与常见板料成形模型一致,便于采用板料成形仿真工具进行仿真模拟。

2.3 Dynaform 有限元仿真

根据式(6)计算并设置压料力,取适当单边间隙。在 Dynaform 中建模并分析,设置回弹分析 springback,并提交 LS-DYNA 解算器进行成形和回弹的有限元分析计算^[5-9]。有限元分析结果如图 6、图 7 所示。

从图 6、图 7 仿真结果可以看出,该成形结果较好,没有出现破裂、褶皱情况,回弹量也较小,基本满足折弯成形质量要求。

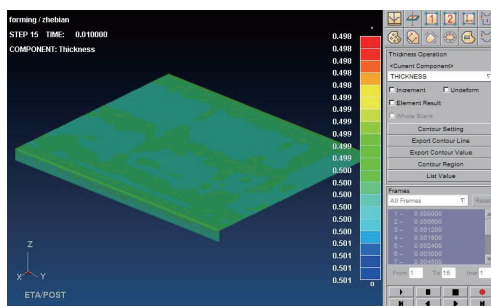


图 6 折弯成形板厚分布

2.4 减小回弹措施的应用

由图 1 的中隔板组件外形可以看出,要实现板料两边 90°折弯必然存在折弯回弹问题。该回弹可通过上述方法

调整压料力 F 、间隙 C 等减少回弹量,但压料力 F 不能过大,间隙 C 也不能过小,更无法完全消除回弹量。因此,考虑在此基础上采取其他工艺措施减少回弹。

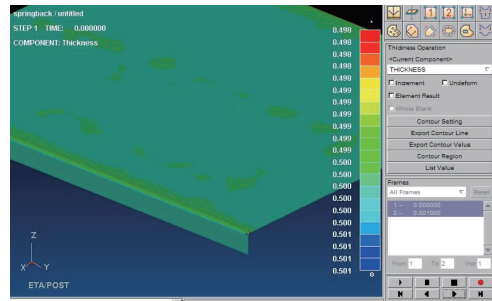


图 7 折弯回弹仿真模拟

常用的减少回弹的措施有补偿法和校正法^[7-9],但因塑料架对板料的包覆影响,校正法难以采用。因此,拟采用补偿法,即在设计模具时使弯曲件的变形量超出原设计的变形量,工作回弹后得到所需的正确形状。

采用抵消补偿法虽也受到塑料架的包覆影响,但可以使塑料架在压料力 F 作用下产生适当变形以有利于板料的折弯回弹补偿,如图 8 所示。在确定压料力 F 后,通过实验确定适当的压料板下压位移量 δ ,并对压料板及定位托架进行弧形面修磨。这样在折弯后,由于板料中部的回弹将使两侧折弯边的回弹得到补偿。

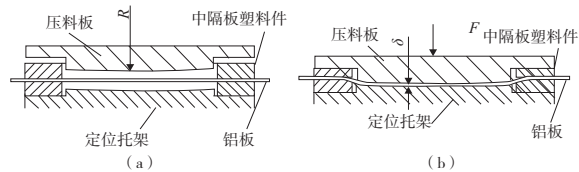


图 8 抵消补偿法应用示意

图 9 为应用 Dynaform 仿真得出的采用回弹补偿后的板料成形回弹前后对比图。从图中可以看出,基本消除了回弹量。这种方法在该型软包电池 PACK 中隔板组件的生产应用中取得了很好的效果。



图 9 采用回弹补偿措施后的回弹前后对比

3 结语

以某型电动汽车软包电池 PACK 中隔板组件为例,通过单边折弯实验明确了压料力 F 、间隙 C 等对穿入柔性体金属板料折边效果的影响,得出了压料力选取参考经验公式和间隙 C 选取方法;并采用 Dynaform 软件进行相应的 U 形折弯有限元仿真分析,得出了折弯成形结果及回弹量,基本满足了相应折弯质量要求。在此基础上分析并仿真验证了减小回弹量的抵消补偿法,在该型汽车软包电池 PACK 中隔板组件生产应用中基本实现了回弹量的消除。

(下转第 99 页)

的进一步增加,系统将处于更加复杂的混沌运动状态,并在混沌运动中逐渐走向失稳。

参考文献:

- [1] 邹博,徐园平,周瑾. 冲击激励下磁悬浮转子系统的响应特性分析[J]. 机械制造与自动化,2020,49(5):41-43.
- [2] YOON S Y, LIN Z L. Truncated predictor feedback control for exponentially unstable linear systems with time-varying input delay[J]. Systems & Control Letters,2013,62(10):837-844.
- [3] ANANTACHAISILP P, DI L, YOON S Y, et al. Control of active magnetic bearing systems with input delay for applications in remotely controlled turbomachinery[C]//53rd IEEE Conference on Decision and Control. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2014: 1197-1202.
- [4] YOON S Y, DI L, LIN Z L. An output regulation approach to rotor autobalancing in active magnetic bearing systems with input delay[C]//2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Banff, AB, Canada: IEEE, 2016: 1028-1033.
- [5] YOON S Y, DI L, LIN Z L. Unbalance compensation for AMB systems with input delay: an output regulation approach[J]. Control Engineering Practice, 2016, 46: 166-175.
- [6] YOON S Y, DI L, ANANTACHAISILP P, et al. Truncated predictor feedback control for active magnetic bearing systems with input delay[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(6): 2182-2189.
- [7] INOUE T, ISHIDA Y. Nonlinear forced oscillation in a magnetically levitated system; the effect of the time delay of the electromagnetic force[J]. Nonlinear Dynamics, 2008, 52(1/2): 103-113.
- [8] GHAZAVI M R, SUN Q. Bifurcation onset delay in magnetic bearing systems by time varying stiffness[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 90: 97-109.
- [9] 郑凯. 时滞反馈下高速电磁轴承转子系统的稳定性分析[A]. 第十五届中国科协年会第13分会场:航空发动机设计、制造与应用技术研讨会论文集[C]. 北京:中国学术期刊(光盘版)电子杂志社, 2013: 552-558.
- [10] 郑凯. 磁悬浮轴承系统的时滞动力学建模与控制研究[J]. 航空发动机, 2014, 40(1): 32-38.
- [11] LI H G, HENG L, LIE Y. Effect of time delay in velocity feedback loop on the dynamic behaviors of magnetic bearing system[C]//2007 International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China: IEEE, 2007: 2911-2916.
- [12] SONI T, DUTT J K, DAS A S. Dynamic behavior and stability of energy efficient electro-magnetic suspension of rotors involving time delay[J]. Energy, 2021, 231: 120906.
- [13] 吴少男,蒋科坚. 电磁轴承支承特性分析及优化调节[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2018, 39(6): 739-745.

收稿日期:2021-10-12

(上接第74页)

等,实现质量管理的方针目标,有效地开展各项质量管理活动。根据企业特点,涵盖了产品全生命周期,加强从设计研制、生产、检验、销售、使用全过程的质量管理活动,并予以制度化、标准化,从而提升质量运行的稳健性。

5 结语

汽车零部件生产质量关系重大,尤其机械加工过程的关键尺寸的质量控制,保证产品批量生产的工艺稳定,关乎总装厂的装配效率以及装配质量,甚至广大消费者的切身利益。在数字化与智能制造发展背景下,目前汽车零部件生产厂家要进一步完善产品全生命周期的质量管理体系

系,强化新装备、新技术、新系统的应用等,这对于实现汽车零部件的整体行业质量提升具有重要意义。

参考文献:

- [1] 薛金磊. A企业汽车零部件行业质量管理的研究[J]. 装备制造技术, 2021(2): 180-182.
- [2] 中国质量管理协会. 全面质量管理基本知识[M]. 北京:科学普及出版社, 1990.
- [3] 薛艳. 典型航空零件生产过程质量控制研究[D]. 大连:大连理工大学, 2016.
- [4] 刘刚. 谈智能制造背景下的汽车质量管理创新[J]. 时代汽车, 2020(5): 6-7.

收稿日期:2022-02-07

(上接第86页)

参考文献:

- [1] 陈锡栋,周小玉. 实用模具技术手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [2] 冯炳尧,王南根,王晓晓. 模具设计与制造简明手册[M]. 4版. 上海:上海科学技术出版社, 2015.
- [3] 田光辉,林红旗. 模具设计与制造[M]. 北京:北京大学出版社, 2009.
- [4] XU F Y, JIANG Q S, RONG L N, et al. Structural model and dynamic analysis of six-axis Cartesian coordinate robot for sheet metal bending[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(4): 172988141986156.
- [5] 王磊. 典型钣金件的折弯工艺与回弹研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2011.
- [6] ŞEN N, TAŞDEMİR V. Experimental and numerical investigation of the springback behaviour of CP800 sheet after the V-bending process[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2021, 48(7): 811-818.
- [7] 兰海,屈婧婧,刘飞,等. 整体式波形片的成形回弹分析与模具优化[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(7): 72-78.
- [8] 聂昕,杨昕宇,牛星辉,等. 基于不同U形弯曲冲压工艺的高强度钢板回弹实验研究[J]. 锻压技术, 2019, 44(12): 1-10.
- [9] 李文杰. 车身覆盖件冲压成型数值模拟及回弹控制研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2020.

收稿日期:2020-09-06