

综述

伺服拉深成形粘模行为及粘模抑制研究

徐 腾, 王 鑫, 冉家琪, 龚 峰

(深圳大学 机电与控制工程学院 深圳市高性能特种制造重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要: 粘模磨损是一种常出现在金属板料拉深工艺过程中的成形缺陷, 为了进一步探究能够有效抑制粘模磨损的新方法, 对金属板料拉深粘模磨损问题的产生机理进行了详细阐述和深入分析, 对现有粘模磨损的表征以及仿真等方面的研究工作和实验结果进行了总结。相关的结论表明, 基于 Archard 理论磨损模型的有限元仿真分析能够较好地反映拉深过程中的粘模磨损问题。随后, 对防治粘模磨损和伺服曲线模式优化的相关研究进展进行了归纳总结和对比分析, 深入探讨了粘模磨损的产生原因以及不同防治措施的优势与不足。最后, 基于伺服压力机提出了优化拉深行程曲线模式以减少拉深时产生的粘模磨损问题的方法, 并详细地分析了此方法在改善粘模磨损问题上的优势及可行性, 为粘模磨损领域的研究提供了借鉴。

关键词: 伺服压力机; 拉深成形; 粘模磨损; 伺服曲线; 粘模抑制

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.001

中图分类号: TG386.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 01-0001-13

Research on sticking die behavior and sticking suppression in servo deep drawing

Xu Teng, Wang Xin, Ran Jiaqi, Gong Feng

(Shenzhen Key Laboratory of High Performance Nontraditional Manufacturing, College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Sticking die wear is a kind of forming defect that often appears in the process of metal sheet drawing. Therefore, in order to further explore new methods that could effectively inhibit the wear of sticking die, the mechanism of wear problem of sticking die in sheet metal drawing was elaborated in detail and analyzed deeply, and the existing research work and experimental results on the characterization and simulation of the wear of sticking die were summarized. The relevant conclusions show that the finite element simulation analysis based on the Archard theoretical wear model can better reflect the wear problem of sticking die in the drawing process. Subsequently, some research progress on the prevention and control of sticking die wear and the optimization of servo curve mode were summarized and compared, and the causes of sticking die wear and the advantages and disadvantages of different prevention and control measures were discussed in depth. Finally, based on the servo press, the method that optimizing the drawing stroke curve mode was proposed to reduce the sticking die wear during drawing, and the advantages and feasibility of this method in improving the sticking die wear problem were analyzed in detail, which provides a reference for the research in the field of sticking die wear.

Key words: servo press; deep drawing; sticking die wear; servo curve; sticking suppression

拉深工艺具有生产率高、材料利用率高等优点, 利用拉深工艺可生产各种类型的盒形件、罐件、筒形件, 也可以与其他加工工艺结合制造形状复杂的成形件, 是汽车、航空航天等制造工业中的重要加

工工艺^[1]。目前, 拉深工艺多在传统的机械压力机上进行, 但是传统的机械式压力机由于滑块运动曲线模式固定, 运动特性单一, 冲压力难以控制, 工艺适应性较差, 在冲压时易出现拉裂、粘模、起皱等成形缺陷, 特别是对于一些粘模敏感性较强的材料, 例如: 拉深成形铝外壳时, 在成形过程中容易产生粘结瘤, 使得拉深件的成形质量不能满足工艺要求, 良品率较低, 同时粘结瘤的产生也加剧了模具表面的磨损情况, 减少了模具寿命^[2-4]。因此, 解决压力机在拉深某些金属板料时产生的粘模问题, 在拉深工艺领域具有一定的指导意义。随着伺服压

收稿日期: 2022-05-20; 修订日期: 2022-08-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52005341); 深圳大学与台北科技大学学术合作专题研究项目 (2023010)

作者简介: 徐 腾 (1988-), 男, 博士, 副研究员

E-mail: tengxu@szu.edu.cn

通信作者: 龚 峰 (1982-), 男, 博士, 教授

E-mail: gongfeng@szu.edu.cn

力机的出现和发展,上述问题正在得到逐步解决和改善,伺服压力机是由计算机控制的一种新型智能柔性化压机,其柔性好、精度高,可以对压力机滑块进行精确控制,所以,可以依据不同的加工工艺要求,对拉深行程曲线进行规划与控制,以满足不同金属板料对成形流动速度和冲压力的要求,进而提高拉深件的成形性^[5]。本文通过对粘模磨损现象、伺服行程曲线模式以及国内外相关研究进展进行相应分析,总结并归纳不同影响因素对粘模磨损的影响,提出通过优化伺服行程曲线来改善拉深粘模磨损情况的方法,并详细分析了该方法的可行性及合理性。

1 粘模磨损

1.1 粘模磨损的机理

对于金属的磨损研究,国外很早就开始了相关工作,现行的金属磨损理论大多是在经典的摩擦学理论的基础上进行拓展和完善的。早在 15 世纪,就开始将摩擦学引入到理论研究当中。1785 年,开始对摩擦学进行了较为系统的研究,并提出了摩擦理论。1945 年, Bowden F P、Tabor D 等^[6-7]率先提出了粘着磨损理论,随后众多研究发现粘着磨损是模具磨损的主要类型之一,所以,研究粘着磨损是解决粘模磨损问题的关键。拉深时出现粘着磨损现象,

是由于拉深模具表面和板料表面不是绝对光滑的,存在许多细微凹凸体,所以,拉深时模具与板料上的细微凹凸体发生接触与相互嵌合,如图 1 所示,当在正压力的作用下板料开始滑动时,板料表面和模具表面相互嵌合的细微凹凸体便开始相互推挤,从而产生沿切面方向的剪切力,因为模具的硬度和强度远远大于板料,所以,当剪切力超过一定值时,板料突出的部分会被切断,形成微小碎屑,并且在高压和剧烈的拉深摩擦下,这些微屑会粘着在模具上形成粘结瘤,由于粘结瘤的自身硬化效果,使得其硬度高于板料本身的硬度,在下一次拉深时粘结瘤会与板料表面进行接触与划擦,使得拉深结束后拉深件表面出现划痕,模具经过多次反复拉深后,粘结瘤不断产生和积累,不仅板料表面因为磨损而产生划痕,模具表面也会因为脱落的粘结瘤而产生磨损。此外,也有研究发现,较薄的板料在拉深时,如果接触压力和温度足够高,拉深表面结晶点阵原子的动能会超过集体对它的约束,使得被吸附原子的电子层结构发生改变,两表层原子晶体结构进行重新排列,生成固溶体,两种金属表面形成粘着,最后也会出现粘着磨损^[8-9]。图 2 为某盒型件拉深模具拉深 5 次后模具和板料表面的粘模磨损形貌,在宏观视角下便可以清晰地观察到模具和板料表面出现了磨损和划痕^[10]。

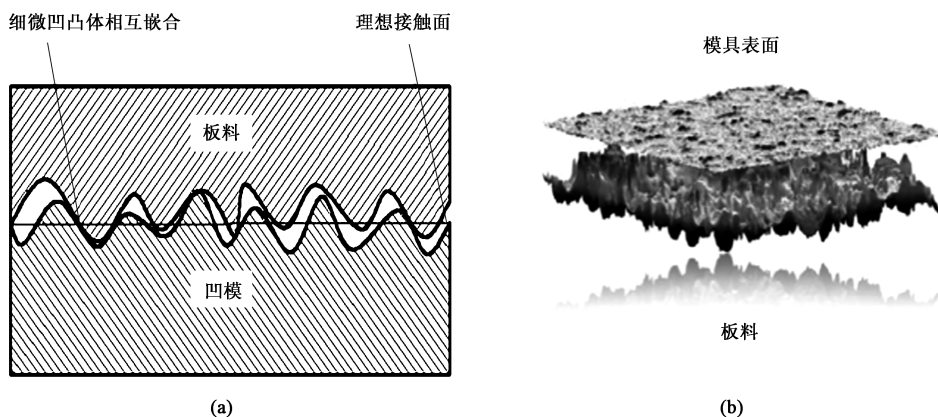


图 1 模具和板料表面的细微凹凸体相互嵌合

(a) 二维模型 (b) 三维模型

Fig. 1 Mutual fit of fine concave and convex bodies at surfaces of die and sheet metal

(a) 2D model (b) 3D model

基于粘着磨损理论,可以得到如图 3 所示的拉深模具受力模型示意图,在拉深凹模圆角区域某一变形瞬间,在 α 角处取一微分单元体,其中 τ 为径向拉力, ds 为单元体宽度, $d\alpha$ 为微分角度,由平衡条件可得圆角变形区的板料受力关系,如式 (1)

所示:

$$q = \frac{t}{R_d} e^{\mu\alpha} \left[1.1\sigma_b \frac{1 - 2\psi_b}{(1 - \psi_b)^2} \ln \frac{R_t}{R} + \frac{\mu F}{\pi R_t^2} \right] \quad (1)$$

式中: q 为凹模圆角处的法向压应力; t 为试样厚度; R_d 为凹模圆角半径; μ 为摩擦因数; α 为试样

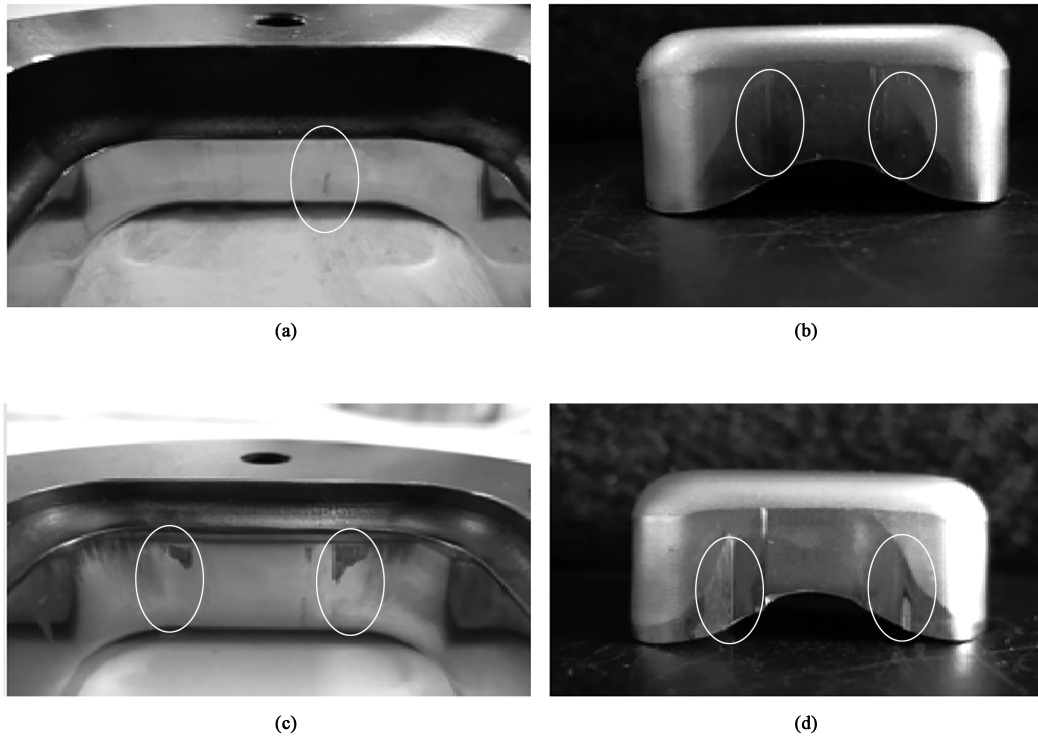


图 2 模具和板料的宏观粘模磨损形貌

- (a) 拉深深度为 15 mm 时模具表面 (b) 拉深深度为 15 mm 时板料表面
(c) 拉深深度为 20 mm 时模具表面 (d) 拉深深度为 20 mm 时板料表面

Fig. 2 Macro sticking die wear morphologies of die and sheet metal

- (a) Die surface at drawing depth of 15 mm (b) Sheet metal surface at drawing depth of 15 mm
(c) Die surface at drawing depth of 20 mm (d) Sheet metal surface at drawing depth of 20 mm

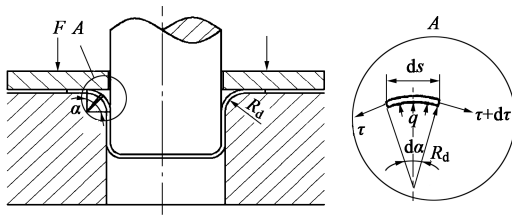


图 3 圆角变形区单元体受力状态

Fig. 3 Force state of element body in fillet deformation zone

凹模圆角处的包角； σ_b 为试样的强度极限； ψ_b 为试样断面收缩率； R_l 为瞬间凸缘变形区外半径； R 为瞬间凸缘变形区内半径； F 为压边力。

由式 (1) 可知，在拉深某瞬间凹模圆角处的法向压应力 q 的大小受拉深材料本身的性能、摩擦因数 μ 等众多参数的影响。而粘结瘤的体积量遵循式 (2)^[11]：

$$V = \frac{\beta q d}{3 R_{el}} = \frac{\beta' q d}{H} \quad (2)$$

式中： V 为粘结瘤的体积量； d 为滑动距离； R_{el} 为材料的屈服强度； β 为粘着磨损系数； β' 为 β 在推导变换后的粘着磨损系数； H 为材料硬度。

从式 (2) 中可看出，粘结瘤的体积量与摩擦面的法向压应力以及滑动距离呈正相关，所以，模具产生的粘着磨损受法向压应力和滑动距离的影响较大。在滑动距离一定的情况下，尽可能减小法向压应力是减少粘模磨损的一大措施，而法向压应力又与材料性能、模具圆角半径等影响因素有着密不可分的关系。为了了解各因素对粘模磨损的影响程度，许多学者针对以上不同参数条件对模具粘着磨损的影响进行了深入研究。

1.2 粘模磨损的表征

虽然模具磨损研究可以通过大量实验来获取相应参数和结果，但是实验的不可控变量较多，实验程序较为繁杂，所以，在研究模具磨损时遇到的困难也较多^[12]。而随着有限元仿真分析的兴起，通过仿真结果表征实验结果可以最大化地简化实验的繁琐步骤，并且仿真分析易于控制、重复性强。因此，国内外也进行了相关磨损模型的表征研究。

Ninshu Ma 和 Nobuhiko Sugitomo^[13] 基于 LS-DYNA 自定义摩擦子程序，建立了考虑摩擦因数随法向压应力 q 、滑动速度 v 、滑动距离 d 、摩擦功 w 、

应变 ε 和温度 T 变化的非线性摩擦模型, 并进行冲压仿真。在实际的冲压过程中, 由于受材料本身和环境因素的影响, 板料和模具间的摩擦因数是不断变动的。图 4 显示了 Ninshu Ma 等^[13] 在实验中测得的不同滑动速度下摩擦因数随滑动距离的变化情况, 结果表明: 在较小的滑动距离下, 较高滑动速度时的摩擦因数会大于较低滑动速度时的摩擦因数; 但是如果滑动距离较大时, 则较高滑动速度时的摩擦因数又会小于较低滑动速度时的摩擦因数, 滑动速度和滑动距离对摩擦因数的影响复杂。为了深入了解不同因素对摩擦因数的影响, Ninshu Ma 等^[13] 考虑了变摩擦因数模型, 根据实验的测量数据得到

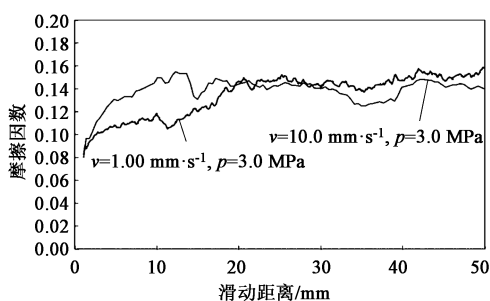


图 4 实测摩擦因数及其随滑动速度和滑动距离的变化
Fig. 4 Measured friction coefficient and its variation with sliding speed and sliding distance

了法向压应力 q 、滑动速度 v 、滑动距离 d 、摩擦功 w 、应变 ε 和温度 T 与摩擦因数 μ 的函数形式, 如式 (3) 所示, 并建立了如图 5 所示的有限元摩擦模型进行验证, 验证结果表明了该模型预测的准确性。

$$\mu = \mu(q, v, d, w, \varepsilon, T) \quad (3)$$

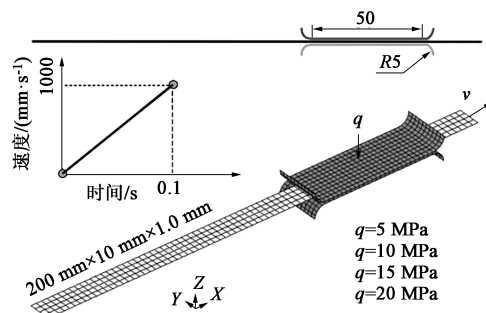


图 5 有限元摩擦模型

Fig. 5 Finite element friction model

Ninshu Ma 等^[13] 使用 LS-DYNA 定制的摩擦接口开发并编写了摩擦因数与上述变量之间的关系程序。将非线性摩擦模型应用于模拟方杯拉深成形, 并与恒摩擦因数的仿真成形结果进行了比较, 见图 6, 其中, DX 为板料边缘中心点与拉深件边缘中心点的距离, t_{\min} 为拉深件最薄处的厚度, t_{\max} 为拉深件最厚处的厚度。

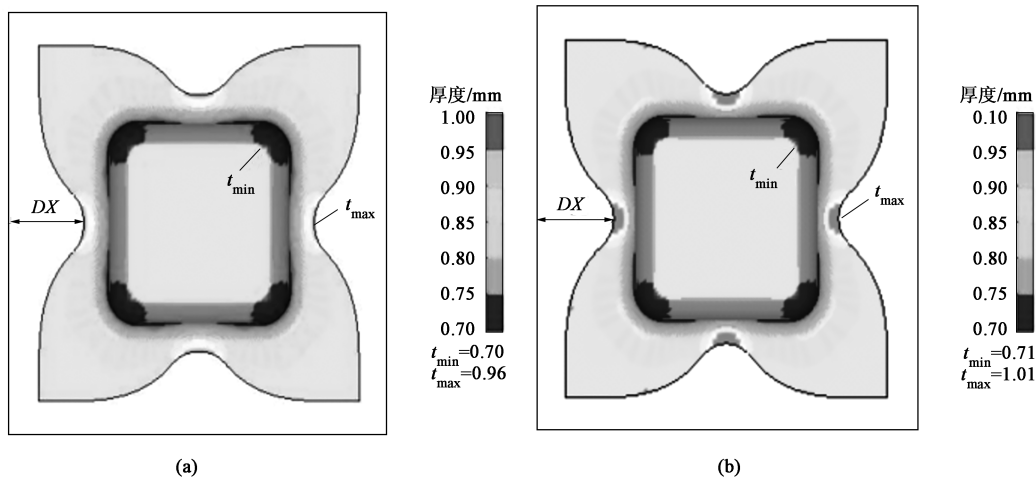


图 6 不同摩擦模型下拉深件厚度分布情况

(a) 恒摩擦模型 (b) 非线性摩擦模型

Fig. 6 Thickness distribution conditions of deep drawing parts under different friction models

(a) Constant friction model (b) Nonlinear friction model

国内董文正、林启权等^[14] 基于 Archard 理论模型在有限元分析软件上进行了粘模磨损的表征与相应分析。Archard 理论模型用于计算粘着磨损率, 其与 Holm 理论模型在粘模磨损研究中的应用最为广泛, 相比 Holm 理论模型, Archard 理论模型能够更

为真实地反映拉深粘着磨损情况, 因此, 大部分粘着磨损均是在此模型的基础上加以修正而成的。Archard 经典方程式^[15] 为:

$$V_1 = K \frac{q \times d}{H} \quad (4)$$

式中: V_1 为磨损体积; K 为磨损系数。

通过 Archard 经典方程式可知, 在模具本身材料、润滑条件等不变的情况下, 磨损体积仅与法向压应力、滑动距离的乘积相关, 为了方便分析模具的磨损深度, 董文正等^[14]通过公式替换得到线磨损深度的转换表达式:

$$h = \frac{V_1}{A} = \frac{K}{H} \int_0^{t'} \frac{q}{A} v_t dt' = \frac{K}{H} \int_0^{t_{\text{总}}} q_t v_t dt' \quad (5)$$

式中: h 为线磨损深度; t' 为时间步长; A 为接触面积; v_t 为相对滑动速度; q_t 为瞬间压力; $t_{\text{总}}$ 为总时间步长。

图 7 为董文正等^[14]通过有限元仿真分析得到的方盒形件拉深过程中的模具线磨损深度分布图, 为了方便分析模具各个区域的磨损程度, 将方形模具表面划分为拉深区、弯曲区以及模具圆角区。从图 7 可知: 模具磨损最严重的部位是与凹模圆角相隔一定距离的直壁区域, 另外模具圆角部位和直边、圆角交接部位均为磨损较为严重的区域。图 8 为董文正等^[14]开展不同拉深次数后模具与板料的宏观粘模磨损情况, 如图 8 所示, 随着拉深次数的增加, 粘模磨损量不断增大, 且不断向凹模模具下方扩展, 拉深粘模区域的实验结果与模拟仿真结果具有较好的一致性。

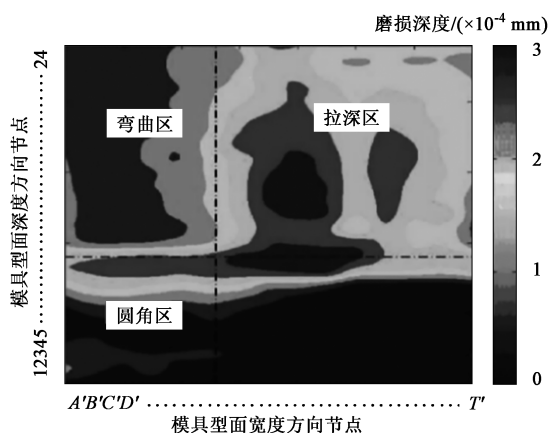


图 7 方盒形件拉深模具线磨损深度分布

Fig. 7 Line wear depth distribution of deep drawing die for box-shaped part

Ninshu Ma 等^[13]基于自定义摩擦因数模型进行了拉深仿真, 能够较为真实地反应拉深过程中摩擦因数的变化情况, 但其未考虑磨损的累积效应, 也未进行粘模磨损的表征分析; 董文正等^[14]基于 Archard 理论模型在有限元分析软件上进行了粘模磨损的表征分析, 能够较好地反映实际的磨损情况, 但未考虑在拉深过程中法向压应力、滑动速度、滑

动距离、摩擦功、应变和温度变化等对摩擦因数的影响。此外, Ninshu Ma 等^[13]和董文正等^[14]的研究均为基于方盒形件拉深进行的研究, 未对筒形件的拉深粘模磨损进行相应的研究和分析。董文正等^[14]的磨损表征研究表明: 模拟仿真在一定程度上可以较好地预测实际的磨损情况, 如果同时考虑变摩擦因数的影响, 建立变摩擦因数模型, 结合 Archard 理论磨损模型进行有限元仿真得到的结果, 可能会与实验结果更为贴切, 从而提高粘模磨损的模拟预测精度。

所以, 在进行拉深磨损实验前, 可以在有限元仿真软件中进行磨损预测, 设置好相应的实验条件, 便可以得到不同条件下拉深粘模磨损的磨损分布以及磨损深度情况, 然后再针对某一关键影响因素进行详细的研究和实际的实验验证, 以找到一种减少粘模磨损的方法。

1.3 粘模磨损的影响因素

粘模磨损涉及的研究范围较广, 一般是利用有限元分析法和实验法对粘模磨损因素进行研究分析。目前, 研究模具本身特性或内部条件对粘模磨损影响的研究较多, 如通过模具本身材料、模具涂层、粗糙度等方面对粘模磨损进行研究。而研究外部条件, 一般是考虑不同润滑条件对粘模磨损的影响。本文将一些学者在粘模磨损领域具有较好借鉴意义的相关研究的数据和结果进行了归纳整理。

1.3.1 内部影响因素

(1) 模具涂层

模具涂层一般通过气相沉积法在模具表面生成一种薄膜涂层, 气相沉积法在半导体工业应用广泛, 随着该技术的发展, 在冲压模具磨损防治方面也得到了应用。Marchin N 等^[16]研究了掺杂碳对 TiSiN 涂层的摩擦性能和耐磨性能的影响, 并比较了 TiSiN 和 TiSiN 涂层在冷成形模具上的摩擦性能, 研究结果表明: 涂层改变了模具的主要磨损模式, 从粘着磨损变为磨料磨损, 磨损率降低了 2/3。同时拉深实验的结果显示, 有 TiSiN 涂层的模具寿命为无涂层模具寿命的 10 倍。国内林启权等^[17]利用化学气相沉积、物理气相沉积和直流等离子化学气相沉积方法在 SLD 钢表面制备了不同材料的超硬涂层, 在半干摩擦条件下测试不同沉积方法制取不同材料涂层的拉深模具的磨损情况, 研究结果表明, 采用涂层模具可以有效地减少粘模磨损现象的产生, 且采用直流等离子化学气相沉积方法得到的 DLC-Si 涂层模具的抗粘模能力最强。

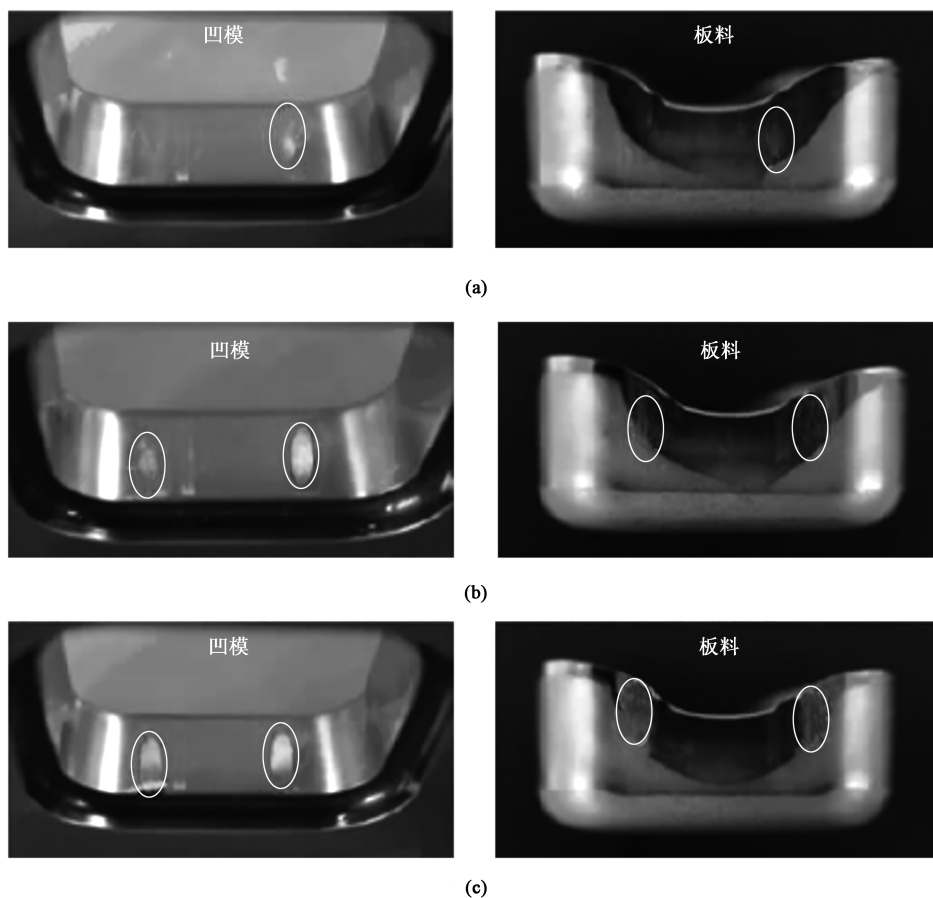


图 8 不同拉深次数下的模具和板料磨损分布

(a) 拉深次数为 1 (b) 拉深次数为 6 (c) 拉深次数为 13

Fig. 8 Wear distributions of die and sheet metal at different deep drawing times

(a) Deep drawing time of one (b) Deep drawing time of six (c) Deep drawing time of thirteen

(2) 模具材料

目前,拉深模具一般采用合金工具钢作为模具材料,较常见的有SKD、SKS系列工具钢,由于不同模具钢的力学性能、组织结构以及化学成分不同,在拉深时,其粘模磨损程度也会有所差异,通常硬度、刚度较高的材料的抗粘模效果较好,所以,通过更换模具材料以减少粘模磨损是当前比较有效的防治粘模磨损的措施。但金属模具在拉深时如果温度较高,模具和板料的化学成分相近或者晶格类型相同时,粘模磨损程度还会进一步加剧。因此,刘浩等^[18]使用具有高强度、低密度、耐高温等优异性质的Si₃N₄陶瓷材料代替金属模具作为钼拉深模具进行拉深实验,结果表明,Si₃N₄陶瓷可以有效地抑制纯钼板拉深件表面粘结瘤的产生。

(3) 模具热处理

模具的表面热处理也是当前减少模具磨损的主

要措施之一,通过表面淬火或渗碳、渗氮等化学热处理对模具表面进行强化,从而增大模具的表面硬度。Wang C等^[19]利用新型渗碳工艺对XCr13钢模具材料进行热处理,通过销盘实验、模具磨损模拟实验等测试了该模具的耐磨性能,实验结果表明渗碳后的XCr13钢的耐磨性显著提高。

1.3.2 外部影响因素

(1) 模具圆角

模具圆角的形状及大小会影响金属板料的塑性流动和法向接触压力的变化,进而影响模具与板料的粘模磨损程度。Xu F S等^[20]研究了5A06铝合金板材在不同模具圆角轮廓以及模具圆角半径下的冲压成形质量,结果表明:模具圆角半径会影响冲压的成形深度,且在3种模具圆角轮廓(标准圆形、高椭圆形和扁椭圆形)中,扁椭圆形轮廓的模具的圆角磨损最严重,采用标准圆形轮廓的模具圆角最适合箱体冲压成形。

(2) 润滑剂

润滑是减少模具磨损最普遍的一种方法，使用润滑剂能够有效减缓粘模，但不同润滑剂的价格成本、适用对象的差异较大，对减少粘模磨损的效果也不同。其中 Trzepieciniski T^[21]以经济性为目标，研究了 6 种植物油（亚麻籽油、棕榈油、葵花油、棉籽油、大豆油和椰子油）在金属板料成形中对摩擦因数的影响，研究表明：油的粘度和密度是影响摩擦因数的重要因素，且在标准压力下棕榈油、葵花油和棉籽油的润滑效果好，摩擦因数数值下降了 11%~16%，而亚麻籽油和椰子油的润滑效果最差。

除了上述粘模磨损因素的研究外，还有许多学者也做了粘模磨损因素的相关研究和总结归纳^[22-30]。如对粘模的机理和因素进行阐述和分析，并给出一些实用的、克服粘着磨损的措施（合理选择摩擦副材质，保证充分的润滑条件等），或是对毛坯形状、凹凸模间隙、凹模高度等工艺参数对粘模位置及粘模磨损的影响展开研究，或是利用有限元进行磨损仿真以及模具寿命预测研究等。

为了更好地展示不同条件对粘模磨损的影响，本文对粘模磨损的影响因素进行了分类，得到如表 1 所示的不同因素对粘模磨损的影响。

表 1 不同因素对粘模磨损的影响

Table 1 Influences of different factors on sticking die wear

研究方向大类	具体研究方向	对粘模磨损的影响
改变内部条件	更换模具材料	±
	添加模具涂层	±
	模具表面热处理（增大硬度）	+
改变外部条件	提高拉深速度	-
	提高拉深行程	±
	改善润滑条件	+
	增大模具圆角半径	+
	更改模具圆角形状	±
	增大压边力	±
	增大模具间隙	+
	降低拉深温度	+

注：+表示有利于减少粘模磨损，-表示不利于减少粘模磨损，±表示在一定范围或一定条件下有利于减少粘模磨损。

表 1 的研究结果以及相关的研究工作表明，影响粘模磨损的因素较为广泛，更改某一外部条件或内部条件均会对模具磨损产生不同程度的影响。而对于上述一些主流的防治粘模磨损的措施，均有自

身的一些利弊，如调整模具圆角形状可以达到减少模具圆角处磨损的效果，但未对整个模具区域进行磨损优化，缺少对整个磨损区域的考量；添加润滑剂是减少磨损的有效措施，但多次拉深后润滑的效果就会大大降低，需要重新进行润滑，且大量使用润滑剂会造成一定的资源浪费以及环境污染；使用刚度更高或者力学性能更好的材料替换原有模具材料，在一定程度上可以减少粘模磨损，但模具材料成本可能也会相应增大；采用涂层模具也可以较好地解决粘模磨损问题，但是采用涂层模具的处理工艺较复杂，成本较高。而其他的一些影响因素对应的措施，如增大压边力、增大模具间隙等，也可以减少粘模磨损，但同时也会导致橘皮、拉裂等新的问题出现。所以，使用不同方法解决粘模磨损的同时，也应考虑该方法对拉深造成的其他负面影响。如何在减少粘模磨损的同时又能够降低该方法的不利影响、综合提高拉深质量是当前值得考虑的一个问题，而伺服压力机的出现和普及为解决该问题提供了一种新的思路，本文将基于伺服压力机对伺服行程曲线的相关研究进行概述，探讨和分析伺服行程曲线对粘模磨损的影响和作用。

2 伺服行程曲线模式对粘模的影响

2.1 伺服压力机

作为传统机械压力机的替代品，伺服压力机的突出优势在于伺服控制，可以对滑块的行程、速度、压力等进行人为控制^[31]。图 9 为传统机械压力机与伺服压力机的结构原理简图。传统机械压力机中的电机需要通过飞轮、离合器和制动器连接到齿轮上；而在伺服压力机中，伺服电机可以直接与齿轮连接，因为伺服电机是可控的，所以可以在任意拉深工艺

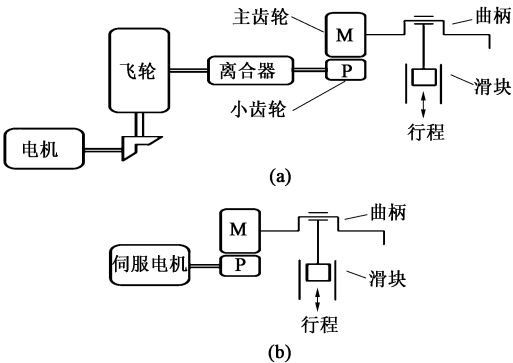


图 9 传统机械压力机 (a) 与伺服压力机 (b) 结构对比
Fig. 9 Structure comparison between traditional mechanical press (a) and servo press (b)

点提供任意所需扭矩。国内外有关伺服压力机的研究和应用十分广泛，伺服压力机的类型也较多，常见的有曲柄、多连杆、直动式、螺旋式和液压式等多种传动类型的伺服压力机^[32]。表 2 为伺服压力机与传统机械压力机的特性比较，除了伺服压

力机独特的编程可控优点外，伺服压力机在成形速度、工具寿命、生产效率等方面也具有较大优势，充分体现了锻压机床的未来发展趋势。但是，由于伺服压力机的构造更为精密和复杂，所以制造成本也较高，不过伺服压力机具有的高生产率、高柔性、高精度和节能环保等优点，能够在实际生产中得到更多的优质产品，降低产品的不良率，提高产品的利润，可以弥补制造成本较高的缺点。

2.2 经典行程曲线模式及其优化方式

行程曲线模式优化在冲压工艺中非常重要。图 10 为不同冲压工艺下常见的行程曲线优化模式，从图 10 可知，不同的冲压工艺对应不同的冲压行程曲线优化模式，且优化模式的差别较大。例如，对于拉深工艺，可将滑块行程曲线划分为下行快速进给区、拉深工作区和快速回程区 3 个工作区域，为了提高拉深的工作效率，下行快速进给区和快速回程

表 2 传统机械压力机与伺服压力机特性对比

Table 2 Comparison of characteristics between traditional mechanical press and servo press

特性	伺服压力机	传统机械压力机
成形速度	高	较高
能量消耗	低	高
生产率	高	低
制造成本	高	低
工具寿命	高	低
噪声	小	大
柔性	好	差
产品质量	好	较差

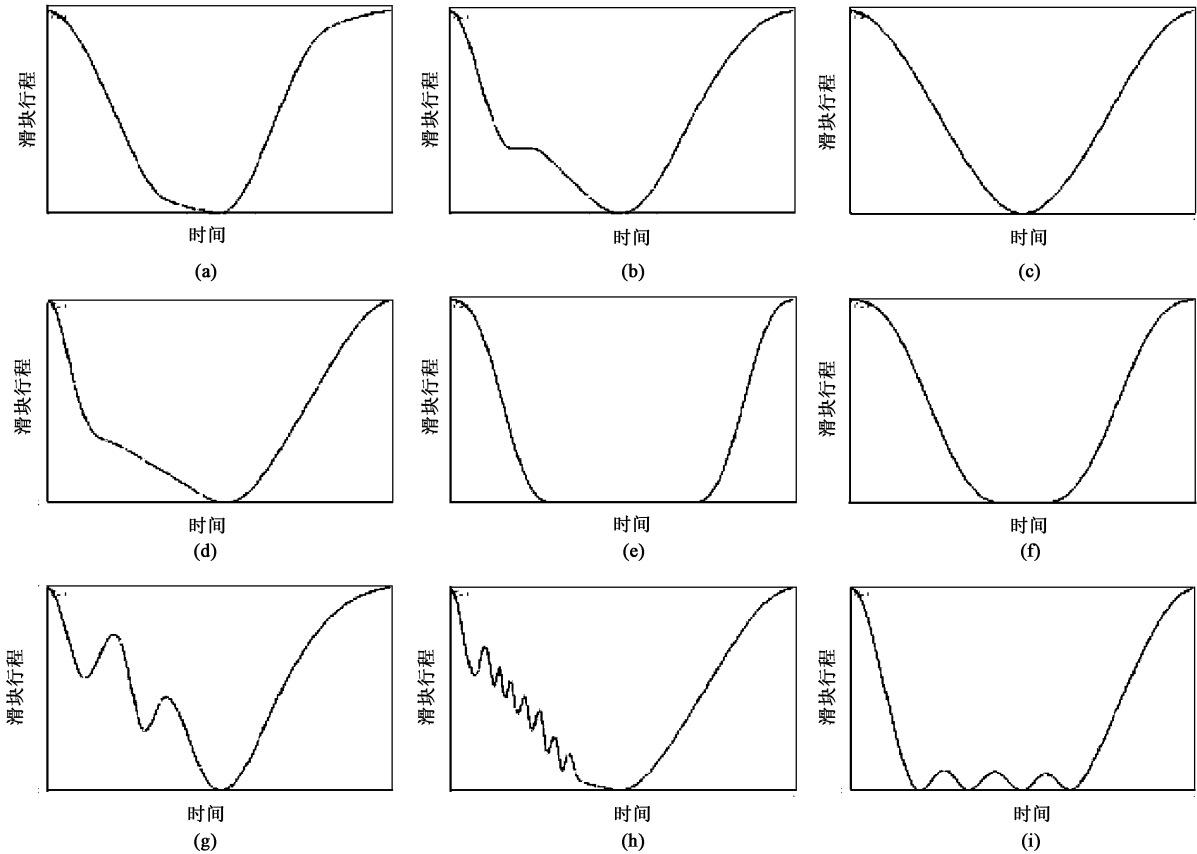


图 10 不同冲压工艺常用的行程曲线优化模式

- (a) 冷挤压工艺行程曲线 (b) 深拉深工艺行程曲线 (c) 锻造工艺行程曲线 (d) 落料工艺行程曲线
(e) 带压边深拉深工艺行程曲线 (f) 压印工艺行程曲线 (g) 大脉冲行程曲线 (h) 小脉冲行程曲线 (i) 振荡行程曲线
- Fig. 10 Optimization modes of stroke curves for different stamping processes
- (a) Stroke curve of cold extrusion process (b) Stroke curve of deep drawing process (c) Stroke curve of forging process
(d) Stroke curve of blanking process (e) Stroke curve of deep drawing process with blank holder (f) Stroke curve of imprinting process
(g) Large pulse stroke curve (h) Small pulse stroke curve (i) Oscillating stroke curve

区的时间应尽量减少；同时，拉深工作区的速度柔性可调，以得到合适的位移和速度，保证拉深件的成形质量。对于弯曲工艺，会在下死点保压一定时间以减少成形件的回弹。根据不同的冲压工艺，需要选择相对应的行程曲线模式进行优化，而伺服压力机可以根据不同的工艺要求快速切换行程曲线。图 11 为日本天田公司生产的 Amada 伺服压力机及其操作屏控制界面^[33]，通过该操作界面可以实现对行程曲线的调节与优化，优化后的曲线可以更好地适应材料的成形特性，提高成形件的质量与生产效率。

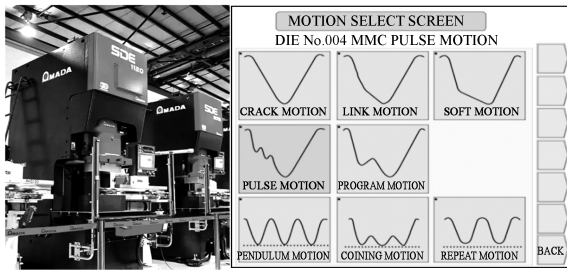


图 11 Amada 伺服压力机及其操作界面

Fig. 11 Amada servo press and its operating interface

相较于普通机械压力机固定的正弦运动曲线，经典工艺行程曲线的优化模式虽然可以在一定程度上改善成形质量，但是，经典拉深行程曲线优化模式未充分利用伺服压力机的特点，具有一定局限性，由于伺服压力机可以对滑块进行任意位置速度的控制，所以，利用这一特点可以对行程曲线模式进行不同方式的优化，然后输入至伺服压力机的程序中，伺服行程曲线优化是在满足冲压工艺的基础上，通过插值或拟合方法将冲压工艺点进行连接得到完整的行程曲线，使其具有光顺性和高阶可导性等特点。目前对伺服行程曲线的优化主要有两种方式：（1）采用分段式对拉深各个阶段分别进行优化拟合的方式，例如采用多种曲线模式组合的自由曲线模式；（2）采用特定曲线拟合方法对整条行程曲线进行拟合优化，例如采用最小二乘法、三次样条函数法、NURBS 曲线法、牛顿插值法、多项式拟合法等对整条拉深行程曲线进行拟合优化。两种处理方式均有各自的特点，均能够达到较好的优化效果。但方式 1 需要对每个不同阶段分别进行拟合，过程较为繁琐。方式 2 的不同拟合方法得到的曲线形状不同，即使在同一方法下改变曲线因子也会影响拟合曲线的形状。以 NURBS 曲线拟合方法为例，NURBS 曲线的定义如式（6）所示：

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p'}(u) \omega_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p'}(u) \omega_i}, \quad a \leq u \leq b \quad (6)$$

式中： $C(u)$ 为非均匀有理 B 样条曲线的位移； u 为节点矢量； $N_{i,p'}(u)$ 为节点 i 的 p' 次 B 样条基函数； p' 为曲线的幂次； ω_i 为权因子； P_i 为控制顶点； n 为节点数量； a 为曲线首端节点矢量； b 为曲线末端节点矢量。

将式（6）分解，可令：

$$R_{i,p'}(u) = \frac{N_{i,p'}(u) \omega_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p'}(u) \omega_i} \quad (7)$$

则式（6）可写成：

$$C(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,p'}(u) P_i \quad (8)$$

式中： $R_{i,p'}(u)$ 为 $u \in [0, 1]$ 上的分段有理奇函数。

通过式（8）可知，NURBS 曲线的轨迹受权因子和控制顶点的影响，通过改变权因子或者控制顶点即可以实现曲线调节，得到不同的行程曲线。图 12 为不同权因子下的曲线轨迹示意图，可以看到，权因子会影响曲线的曲率变化，使用不同曲线得到的最后的拉深成形效果也不同，所以，需要对不同拟合曲线进行拉深实验对比，通过正交实验、田口实验等方法找到最优的拟合方式与拟合曲线。目前，应用较多的伺服拉深曲线拟合方式有 NURBS 曲线拟合、三次样条曲线拟合^[34-40]。

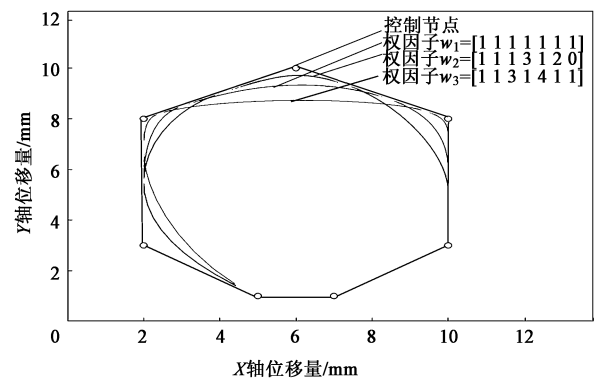


图 12 权因子对 NURBS 曲线的影响

Fig. 12 Influence of weight factor on NURBS curve

2.3 伺服行程曲线优化对成形质量的影响

以上分析了伺服行程曲线在冲压工艺中的作用以及曲线优化的方式和意义，本节将国内外有关曲线拟合优化应用于伺服拉深行程曲线的研究及进展进行归纳和详细分析。在伺服曲线优化研究领域，

目前主要以成形减薄率为质量目标展开了一系列研究,并主要有以下 3 类研究方式。

(1) 单曲线模式优化类

单曲线模式优化类是指针对某一曲线模式采用不同方法进行拟合优化,是伺服曲线优化领域常见的研究方法。其中,王俊等^[41]利用 Inventor 软件进行伺服压力机建模和分析,并采用三次 B 样条修正典型工艺曲线,优化后的曲线平滑光滑,能够有效地降低冲压过程中的波动幅度,削减曲率突变,最大程度消除设备的噪声、震动与冲击。徐李娜^[42]通过调节 NURBS 曲线的权因子和控制点对行程曲线进行优化,并对优化后的行程曲线进行仿真和实验研究,实验结果表明:优化行程曲线可以进一步提高制件的极限拉深系数,减少拉裂危险,同时金属板料的成形厚度分布更加均匀。

(2) 多曲线模式对照类

多曲线模式对照类是指选取不同模式曲线进行对照研究分析,找到提升成形质量效果最优的曲线模式,该方法能够较方便地得到实验结果,简单直观,但缺少了曲线的具体优化过程,且主观随意性较大。在此研究方法中,施于庆等^[43]采用 ANSYS 软件对 4 种拉深行程曲线(普通压力机曲线、短台阶下降曲线、凸凹形曲线、脉动曲线)进行了拉深数值模拟实验,测量拉伸后工件母线方向 9 个测量点的厚度值,实验结果表明,短台阶下降曲线使工件厚度的减薄率最小,并在伺服压力机上进行了实验验证,实验结果与模拟结果较吻合。常琛扬等^[44]基于 Dynaform 软件研究了滑块运动方式对制件拉深成形的影响规律,对比了普通机械压力机的正弦行程曲线和伺服压力机的阶梯式行程曲线模式下的拉深成形件质量,实验结果表明,阶梯式行程曲线模式可以有效地提高制件的成形质量。此外,朱梅云等^[45]和喻建军^[46]也对不同曲率的拉深速度曲线进行了对比研究,实验结果均表明,采用递减速率的拉深速度曲线得到的工件的成形质量较好。

(3) 曲线工艺参数优化类

曲线工艺参数优化类是指对影响曲线变化规律的关键因素进行正交实验,探究不同工艺参数对成形质量的影响规律和影响程度,进而选择最佳参数组合进行曲线优化设计,该方法能够较准确地得到最优化行程曲线,在该领域具有较好的研究趋势。在此类研究方法中,Kuo C C 等^[47]对比了脉动行程曲线与普通行程曲线下拉深的成形质量,结果表明优化后的行程曲线将成形件的最大拉深深度提高了

12 mm,且成形件的减薄率也得到了改善,同时,基于田口法、灰色关联分析法设计了脉动曲线工艺参数正交实验,得到了成形时间、减薄率和成形力之间的最佳参数组合曲线,并对组合曲线进行了实验验证,结果表明,相较于普通行程曲线,该曲线的成形时间更短,同时制件的成形质量也满足要求。Bang J 等^[48]基于田口方法进行销盘摩擦实验,用于模具磨损预测模型,对信噪比和方差分析结果进行统计分析,选择了接触压力、滑动距离、滑动速度作为模具磨损的研究参数,实验结果表明,接触压力和滑动距离在拉深过程中对模具磨损的影响较大,滑动速度对模具磨损的影响较小。Chen D C 等^[49]基于拉深阶段速度的变化次数设置了 4 组不同速度梯度的拉深行程曲线模式,并设计了曲线模式、模具间隙、模具圆角和模具温度的正交参数表,通过田口法、方差分析和响应面法等来确定最佳实验参数组合,实验结果表明,不同曲线模式对成形件减薄率和成形深度的影响显著,冲头圆角半径为 8.5 mm、模具圆角半径为 8.5 mm、间隙为 1.5t、曲线模式 3、模具温度为 20 ℃的参数组合下的拉深成形效果最好。国内张在房等^[50]、王苏静等^[51]、施为钟等^[52]也开始在冲压成形质量研究中利用类似方法进行相应的工艺参数优化工作。

综上,虽然目前对伺服曲线优化的研究较多,但研究方向较窄,总体可归纳为表 3,主要是针对成形性进行深入研究,对于影响制件表面质量的粘模的磨损研究涉及较少,出现这种现象可能是与以下几点原因有关:(1)粘模磨损问题对表面质量要求较高的制件影响较大,而目前伺服曲线优化研究对表面质量要求高的制件考虑较少;(2)体积较小、厚度较薄、成形深度较深的制件是粘模磨损研究的重点对象,如钽电容器外壳等,而目前伺服曲线优化研究的对象大多数为大型制件,如汽车尾门板等;(3)目前伺服曲线优化研究方向较集中,主

表 3 伺服行程曲线优化结果归纳

Table 3 Summary of servo stroke curve optimization results

研究对象	现有研究结果
伺服拉深行程曲线优化	减少起皱缺陷
	降低拉裂风险
	成形厚度均匀
	增大成形深度
	减小回弹
	消除震动
	减小冲击

要还是对常见的成形性问题进行研究, 尚未建立对制件质量整体性、系统性的研究。

2.4 基于伺服行程曲线优化的粘模改善研究展望

通过上述 1.1 节的分析可知, 拉深粘模磨损问题主要是由于生成粘结瘤, 发生粘着磨损而产生的, 而粘着磨损受法向接触压力和滑移距离的影响较大, 如果在某些条件一定的情况下 (如模具材料、凹模圆角大小、压边力大小等不变时), 可以通过改变或者优化伺服拉深行程曲线来减少粘模磨损现象。虽然目前有关伺服行程曲线优化与粘模磨损影响的研究较少, 但从伺服行程曲线相关研究可以发现, 改变或者优化伺服行程曲线, 对拉深件的成形质量的影响较大, 优化的伺服行程曲线由于能够提供合适的拉深速度和冲压力, 能够降低拉深时法向接触压力的影响, 减小金属塑性流动阻力, 而粘模磨损跟法向接触压力、摩擦因数等因素息息相关, 所以, 在粘模磨损、起皱、拉裂等缺陷方面可以有良好的防治效果。此外, 伺服行程曲线还可以最大程度地改善拉深条件, 例如优化后的脉动曲线在拉深过程中可以将润滑油及时吸入到模具表面进行润滑, 减小模具与板料的摩擦, 可以进一步抑制粘结瘤的产生。同时, 伺服行程曲线也具有较高的灵活性, 可以针对不同条件进行优化调整。综上所述, 通过优化伺服行程曲线模式来减少粘模磨损的可行性较高, 并且在仿真实验中得到了初步验证。

3 结论

(1) 金属板料拉深粘模磨损问题不是某一因素造成的结果, 其形成与多方面因素相关, 但众多研究表明粘着磨损是其主要成因之一, 减少粘模磨损的关键在于减少粘着磨损, Archard 磨损模型能够较好地反应真实的粘着磨损情况, 为了方便表征拉深粘模磨损现象, 基于 Archard 理论模型的变摩擦因数磨损数值模拟分析可以用于预测粘模磨损实验结果。

(2) 由于伺服压力机具备高柔性、高效率等优异性能, 在拉深成形方面较传统机械压力机有较大优势, 可以对滑块行程进行任意控制, 这种伺服可控性为拉深行程曲线优化提供了便利, 拉深行程曲线优化是通过三次样条曲线、NURBS 曲线等方法对原始关键工艺点进行拟合, 得到高阶可导的光滑曲线, 再将该曲线应用于拉深成形当中, 相关的研究表明, 伺服行程曲线对拉深成形质量的影响较大,

可以有效地减少板料起皱、破裂等缺陷, 提高拉深质量。

(3) 伺服行程曲线优化的目的在于通过优化曲线为拉深过程提供良好的成形条件, 输出合适的拉深力与拉深速度, 降低拉深过程中的法向接触压力, 减少金属板料成形的流动阻力, 利用综合影响因素来减少粘模磨损, 同时在伺服行程曲线优化的仿真研究中也初步验证了该方法的可行性, 伺服行程曲线优化为减少粘模磨损研究提供了一种新的解决方法, 拓展了伺服行程曲线优化的研究领域。

参考文献:

- [1] Atul S T, Babu M C L. A review on effect of thinning, wrinkling and spring-back on deep drawing process [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233 (4): 1011-1036.
- [2] 李欣芮, 王晓康, 何万飞. 不锈钢制件拉深成形防粘结瘤的研究 [J]. 模具工业, 2020, 46 (5): 61-65.
Li X R, Wang X K, He W F. Study on avoiding seizing tumor on die parts in drawing process of stainless steel parts [J]. Die & Mould Industry, 2020, 46 (5): 61-65.
- [3] 林启权. 汽车用高强度钢板拉深多尺度粘模机制研究 [A]. 第十二届设计与制造前沿国际会议 [C]. 沈阳: 国家自然科学基金委员会, 2016.
Lin Q Q. Research on the multi-scale die sticking mechanism in deep drawing of high-strength steel plates for automobiles [A]. The 12th International Conference on Frontiers in Design and Manufacturing [C]. Shenyang: National Natural Science Foundation of China, 2016.
- [4] 吴亮. 汽车用铝合金结构件冲压模具磨损仿真研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 155-159.
Wu L. Simulation study on wear of stamping die for aluminum alloy structural parts of automobile [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 155-159.
- [5] 孙友松, 章争荣. 伺服成形技术及其若干发展动向 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (1): 1-16.
Sun Y S, Zhang Z R. Servo forming technology and its several developing trends [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (1): 1-16.
- [6] Bowden F P, Moore A J W, Tabor D. The ploughing and adhesion of sliding metals [J]. Journal of Applied Physics, 1943, 14 (2): 80-91.
- [7] Bowden F P, Gregory J N, Tabor D. Lubrication of metal surfaces by fatty acids [J]. Nature, 1945, 156 (3952): 97-101.
- [8] 铁争鸣. 基于响应面法的幅板冲压成形模具磨损 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 174-178.
Tie Z M. Wear of stamping mould for shield based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 174-178.
- [9] Tröber P, Welm M, Weiss H A, et al. Temperature, thermoelec-

- tric current and adhesion formation during deep drawing [J]. Wear, 2021, 477: 203839.
- [10] 温俊杰. 毛坯形状及压边力对方盒形件拉深粘模行为的影响 [D]. 长沙: 湘潭大学, 2019.
- Wen J J. Effect of Blank Shape and Blank Holder Force on the Galling Behavior in Square Cup Drawing Produce [D]. Changsha: Xiangtan University, 2019.
- [11] 续海峰. 粘着磨损机理及其分析 [J]. 机械管理开发, 2007, (S1): 95-96, 98.
- Xu H F. Adhesion wear mechanism and analysis [J]. Mechanical Management and Development, 2007, (S1): 95-96, 98.
- [12] 熊垒, 林有希. 模拟仿真技术在磨损预测中的应用现状 [J]. 机械制造与自动化, 2013, 42 (5): 116-119.
- Xiong L, Lin Y X. Research progress of analogue simulation in the wear prediction [J]. Machine Building & Automation, 2013, 42 (5): 116-119.
- [13] Ninshu Ma, Nobuhiko Sugitomo. Development and application of non-linear friction models for metal forming simulation [J]. Optimization and Engineering, 2011, (12): 382-389.
- [14] 董文正, 林启权, 王志刚. 基于 FEM-Archard 模型的高强钢冲压成形粘模行为评估 [J]. 材料科学与工艺, 2015, 23 (3): 35-38.
- Dong W Z, Lin Q Q, Wang Z G. On the galling behavior in HSS sheet metal forming process by FEM-Archard model [J]. Materials Science & Technology, 2015, 23 (3): 35-38.
- [15] Aghababaei R, Zhao K. Micromechanics of material detachment during adhesive wear: A numerical assessment of Archard's wear model [J]. Wear, 2021, 476: 203739.
- [16] Marchin N, Ashrafizadeh F. Effect of carbon addition on tribological performance of TiSiN coatings produced by cathodic arc physical vapour deposition [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 407: 126781.
- [17] 林启权, 彭大暑, 王志刚, 等. 高强度钢板方盒形件拉深粘模行为 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40 (6): 1529-1534.
- Lin Q Q, Peng D S, Wang Z G, et al. Deep drawing sticking behavior of high-strength steel plate square box-shaped parts [J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2009, 40 (6): 1529-1534.
- [18] 刘浩, 陈再良, 王昌儒. 钼板的冲杯实验和拉深实验研究 [J]. 锻压技术, 2019, 44 (6): 150-153.
- Liu H, Chen Z L, Wang C R. Research on cupping test and drawing test of tantalum sheet [J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44 (6): 150-153.
- [19] Wang C, Chen J. Experimental and numerical investigations of wear resistance characteristics of XCr13 during advanced high-strength steel stamping [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30 (6): 4484-4493.
- [20] Xu F S, Deng Y L, Zhang J, et al. Influence of fillet-radius and lubrication on stamping quality of multi-recessed aluminum panels [A]. Mechanics and Materials Science: Proceedings of the 2016 International Conference on Mechanics and Materials Science [C]. Guangzhou: World Scientific, 2018.
- [21] Trzepieciński T. Polynomial multiple regression analysis of the lubrication effectiveness of deep drawing quality steel sheets by eco-friendly vegetable oils [J]. Materials, 2022, 15 (3): 1-18.
- [22] 杨成康, 程晓农, 张洁, 等. W-Mo-V 改进型 H13 模具钢的力学性能与磨损行为 [J]. 金属热处理, 2021, 46 (4): 30-37.
- Yang C K, Cheng X N, Zhang J, et al. Mechanical properties and wear behavior of W-Mo-V modified H13 tool steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46 (4): 30-37.
- [23] 张松泓, 徐颖若. 基于响应面法发动机连杆热锻模具磨损失效分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 178-184.
- Zhang S H, Xu Y R. Analysis on wear failure of hot forging die for engine connecting rod based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 178-184.
- [24] 谢晖, 李江曼, 王诗恩, 等. 超高强钢板冲压模具磨损 CAE 分析研究与应用 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42 (8): 15-21.
- Xie H, Li J M, Wang S E, et al. Research and application of die wear CAE analysis of ultra high strength steel stamping [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42 (8): 15-21.
- [25] 曲雪苓. 基于 Simufact Forming 的涡轮叶片热锻模具磨损计算机仿真分析 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (21): 196-198, 202.
- Qu X L. Computer simulation analysis on wear of hot forging die for turbineblade based on Simufact Forming [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (21): 196-198, 202.
- [26] Flegler F, Groche P, Abraham T, et al. Dry deep drawing of aluminum and the influence of sheet metal roughness [J]. JOM, 2020, 72 (7): 2511-2516.
- [27] Phanitwong W, Thipprakmas S. Multi draw radius die design for increases in limiting drawing ratio [J]. Metals, 2020, 10 (7): 1-17.
- [28] 陈杰. H13 钢表面磨损行为的数值模拟研究及模具寿命预测 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- Chen J. Numerical Simulation Research on Surface Wear Behavior of H13 Steel and Prediction of the Mould Life [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [29] 周文兵. 基于滚动调度的冲压模具磨损数值模拟分析 [J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2020, 38 (4): 109-112, 116.
- Zhou W B. Numerical simulation analysis of stamping mould wear based on rolling scheduling [J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2020, 38 (4): 109-112, 116.
- [30] 熊英超, 夏琴香, 叶福源, 等. 多工位级进模冲裁工序模具磨损行为的数值分析及寿命预测 [J]. 精密成形工程, 2017, 9 (3): 89-93.
- Xiong Y C, Xia Q X, Ye F Y, et al. Numerical analysis and life prediction of die wear behavior in multi-position progressive die blanking [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9 (3): 89-93.
- [31] Del Prete A, Primo T. Sheet metal forming optimization methodology for servo press process control improvement [J]. Metals,

- 2020, 10 (2): 1-21.
- [32] 张永帅, 苏倩辉, 刘洪河, 等. 伺服压力机的技术应用及发展趋势 [J]. 锻造与冲压, 2019, (16): 54-56.
Zhang Y S, Su Q H, Liu H H, et al. Technical application and development trend of servo press [J]. Forging & Metalforming, 2019, (16): 54-56.
- [33] Amada Co., Ltd. <http://www.amada.co.jp/english/>.
- [34] 李健. 基于 ARM 的伺服压力机拉深曲线的控制研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
Li J. Research on Control of Drawing Curve of Servo Press Based on ARM [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [35] 房欢欢, 杨帅军, 穆宏. 曲线仿真在伺服冲压线生产中的应用 [J]. 锻造与冲压, 2021, (14): 32-37.
Fang H H, Yang S J, Mu H. Application of curve simulation on the servo press production line [J]. Forging & Metalforming, 2021, (14): 32-37.
- [36] 尚万峰, 赵升吨. 伺服压力机加工工艺的 Bezier 模型及其优化研究 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46 (3): 31-35.
Shang W F, Zhao S T. Servo press processing Bezier-model with optimum [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46 (3): 31-35.
- [37] 陈岳云, 郭为忠, 高峰. 基于 NURBS 曲线的伺服压力机冲压过程建模与加工工艺轨迹规划 [J]. 上海交通大学报, 2009, 43 (1): 138-142.
Chen Y Y, Guo W Z, Gao F. NURBS-based feature modeling and trajectory planning for ram motion of servo mechanical presses [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43 (1): 138-142.
- [38] Shi M. Rational Bézier curves approximated by Bernstein-Jacobi hybrid polynomial curves [J]. Computational and Applied Mathematics, 2020, 39 (3): 1-15.
- [39] Jin Y, Zhao S, Wang Y. An optimal feed interpolator based on G2 continuous Bézier curves for high-speed machining of linear tool path [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32 (1): 1-10.
- [40] 殷强, 刘冬, 汪建余. 基于伺服压力机生产线的曲线模拟工作研究 [J]. 锻造与冲压, 2020, (22): 20-22.
Yin Q, Liu D, Wang J Y. Research on curve simulation of servo press production line [J]. Forging & Metalforming, 2020, (22): 20-22.
- [41] 王俊, 李明. 基于工艺要求的伺服压机行程曲线优化 [J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43 (3): 10-14.
Wang J, Li M. The optimization of servo press stroke curve based on process requirements [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014, 43 (3): 10-14.
- [42] 徐李娜. 肘杆式伺服机械压力机冲压工艺特征曲线研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2012.
Xu L N. Research on Stamping Process Characteristic Curves of the Elbow Pole Type Servo Mechanical Press [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012.
- [43] 施于庆, 管爱枝. 变凸模运动曲线对板料成形极限性能的影响 [J]. 浙江科技学院学报, 2014, 26 (5): 321-326.
Shi Y Q, Guan A Z. Influences of variable die motion curves on limited forming property of sheet metal [J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2014, 26 (5): 321-326.
- [44] 常琛扬, 翟敬梅, 夏琴香, 等. 基于伺服压力机的凸缘筒形件拉深成形数值分析 [A]. 第五届锻压装备与制造技术论坛九届二次学术交流会议论集 [C]. 广州: 中国机械工程学会, 2011.
Chang C Y, Zhai J M, Xia Q X, et al. Numerical analysis of deep drawing process for cylindrical cup with flange based on servo-press [A]. Proceedings of the Ninth Second Academic Exchange Conference of the Fifth Forum on Forging Equipment and Manufacturing Technology [C]. Guangzhou: Chinese Mechanical Engineering Society, 2011.
- [45] 朱梅云, 傅建, 王玥, 等. 上盖板冲压成形中的缺陷分析与数值模拟 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (6): 68-71, 90.
Zhu M Y, Fu J, Wang Y, et al. Defect analysis and numerical simulation for the upper cover plate drawing [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16 (6): 68-71, 90.
- [46] 喻建军. 基于伺服压力机冲压速度对板料成形性的影响 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
Yu J J. The Influence of Stamping Speed Based on Servo Press on Sheet Metal Formability [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [47] Kuo C C, Huang H L, Li T C, et al. Optimization of the pulsating curve for servo stamping of rectangular cup [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 990-1000.
- [48] Bang J, Park N, Song J, et al. Tool wear prediction in the forming of automotive DP980 steel sheet using statistical sensitivity analysis and accelerated U-bending based wear test [J]. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2021, 11 (2): 1-20.
- [49] Chen D C, Yeh Y K. Using finite element analysis to discuss the study of drawing of servo stamping curve [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13 (11): 1-11.
- [50] 张在房, 徐冯, 孙习武. 火箭贮箱箱底充液拉深成形工艺的多目标优化 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (5): 78-86.
Zhang Z F, Xu F, Sun X W. Multi-objective optimization of hydroforming process of rocket tank bottom [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58 (5): 78-86.
- [51] 王苏静, 邓沛然, 宣守强. 6061 高强度铝合金拉深工艺参数优化 [J]. 模具工业, 2021, 47 (2): 6-10.
Wang S J, Deng P R, Xuan S Q. Optimization of drawing parameters for 6061 high strength aluminum alloy [J]. Die & Mould Industry, 2021, 47 (2): 6-10.
- [52] 施为钟, 龚红英, 姜天亮, 等. 基于 Dynaform 和响应面法的带凸缘圆筒件拉深工艺优化 [J]. 上海工程技术大学学报, 2020, 34 (2): 168-173.
Shi W Z, Gong H Y, Jiang T L, et al. Drawing process optimization of cylinder with flange based on Dynaform and response surface method [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2020, 34 (2): 168-173.