

板料橡皮成形起皱的研究进展

■ 杭州电子科技大学机械设计研究所 (浙江 310018) 陈磊

■ 浙江金固股份有限公司研发中心 (杭州 311400) 汪冬冬 叶燕飞

摘要: 以冲压为例, 对板料成形的起皱进行分析。综述橡皮成形起皱的研究进展, 提出要进一步研究橡皮成形起皱机理和控制方法。



博士后、副教授 陈磊

1. 橡皮成形原理及起皱的研究意义

橡皮成形或高压橡皮成形广泛应用于汽车、飞机、家电和厨卫等钣金零件制造, 对于中小批量的钣金零件来说, 是一种经济的现代成形方式。橡皮成形采用橡皮胎 (包括内胎和外胎) 及唯一的由价格低廉的材料制成的刚性半模成形, 模具生产准备周期

短。在橡皮成形过程中, 经加液压体的液压作用使板料通过柔性胎受压, 并迫使坯料成为刚性半模的形状。橡皮成形过程原理如图1所示。

橡皮成形与其他板料成形模式一样, 也存在着起皱问题。由于起皱, 导致零件外形不靠胎, 需要大量的手工校形才能满足要求, 零件表面布满榔头印, 这对零件的力学性能和生产效率有很大影响。

目前, 钣金成形技术已经发生了巨大的变化, 由于材料塑性成形理论不断发展, 并逐步与可控化技术、数值分析技术以及连续介质力学等现代技术、理论相互交叉结合, 已具备精确制造的条件。国外钣金零件85%以上

已经实现了机械精确一次加工。图2所示为橡皮成形过程凸弯边起皱, 可以看出, 所有零件翻边都发生了起皱。图3所示为橡皮成形零件的内部起皱, 可以看出, 零件内部每个槽的根部都有2个皱纹。目前国内飞机制造公司钣金橡皮成形零件最多, 由于没有进行起皱设计修正, 手工校形工作量很大, 部分零件无法校形, 造成板材及模具的大量浪费, 飞机制造成本居高不下, 使得飞机制造企业很难参与国际竞争。因而开展橡皮成形起皱机理与控制研

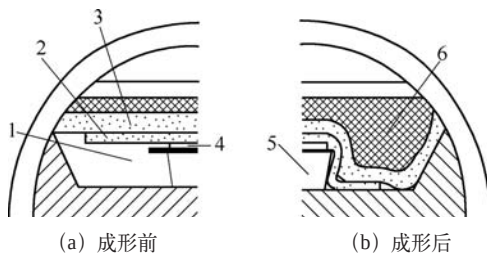


图1 橡皮成形原理

1.板料 2.外胎 3.内胎 4.压边圈 5.模具 6.油



图2 凸弯边起皱



图3 零件内部起皱

究对于降低劳动强度、提高钣金件质量和生产率、缩短研制周期具有重要意义。

2. 板料起皱的研究进展

从力学分析的角度来看，起皱是板块或壳体在某种局部压应力作用下，产生屈曲并出现后屈曲大变形的宏观表现。由于薄壁件某一方向尺寸远小于其他方向尺寸，受压后，当板壳面内压应力达到临界压应力时，容易发生由面内变形转到面外弯曲变形的分叉失稳，即压缩失稳变形。而有效捕获分叉点是预测起皱发生的关键。起皱与回弹、破裂相比，研究难度更大。回弹经过多年的研究，可通过模具补偿和增加拉力法解决，破裂可通过成形极限图FLD预测。而起皱通过研究发现，没有起皱极限图。起皱的复杂性在于其依赖于很多因素，如材料性能、板料形状、加载条件和模具几何形状、缺陷等。因而，对于不同的成形方式，起皱的预测均是不同的，需要分别研究。目前起皱研究较多的是冲压成形，本部分以冲压为例进行分析，相关理论和方法同样适合于橡皮成形。

3. 起皱分类

起皱主要分为两大类：法兰起皱（见图2）和侧壁起皱（见图3）。目前研究起皱，主要基于试验法、分析法和有限元模拟法。试验法主要是采用一些简单几何形状的零件，设计不同的参数来模拟起皱的基本机制；分析法是基于力学准则来推导起皱的临界点，主要有能量法和分叉理论；有限元法是采用有限元软件对成

形过程进行模拟，得到起皱的临界点。

Yoshida试验（吉田起皱试验）是研究起皱采用的一种非常广泛的方法，如图4所示，采用方板对角拉伸来判断板材的抗皱能力。Cao等采用Yoshida试验接触模具进行起皱分析，并进行了起皱过程的预测。Kim采用一个修正的方板对角拉伸的方法，对起皱的临界应力和几何条件进行了分析。Cao等采用改进的Yoshida试验对三角形的板材进行拉伸，采用不同的边界条件分析起皱，进一步验证了没有起皱极限图。

法兰起皱目前研究较多的有凸弯边起皱（见图2）、冲压法兰起皱（见图5）。Cao提出了一个分析模型，基于能量法和塑性弯曲理论，对临界起皱应力和起皱长度进行计算，并应用于方盒拉伸法兰起皱中。Wang等对凸弯边冲压成形过程的数学模型和起皱准则进行了推导，并编制一个计算机程序来分析翻边过程。Chu等基于Hill的分歧理论，对冲杯的法兰起皱进行分析，得到起皱的临界应力和起皱的波纹数量。Saxena等采用Hill的分歧理论分析了方盒成形过程的法兰起皱，并结合有限元法分析不同的影响因素（材料、各向异性及模具几何



图4 Yoshida 试验



赛帕埃惜

日本サイバーRC株式会社

日本进口



Tool Regrind Machine
五轴全自动刀具磨床



Tool Regrind Machine
四轴全自动刀具磨床



Automatic Drill-Honing Machine
自动钻头钝化机

对象刀具

刀具种类	钻头、铣刀、丝锥、铰刀、3刃钻头、侧刃、3刃倒角刀、不等分铣刀、雕刻刀、枪钻
刀具材质	高速钢 (HSS)、钨钢/硬质合金 (carbide)
刀具最大把持直径	φ20 (φ26 ※) ※φ26 规格为选配
刀具长度	45 ~ 200mm

特征

- 操作简单 自动对刀、自动补正偏心 自动研磨
- 对应多种刀具
- 任意设置刀具参数
- 不需编程、可追加新程序，进行版本升级

地址：苏州吴中区金枫路216号
东创科技园C幢108

联系人：代女士

手机：13651758961

电话：0512-62695591

QQ：642504730

邮箱：cybercc_dll@aliyun.com

◆广告 查询编号：0035

形状等)对起皱的影响。Correia等对深冲圆形杯的起皱进行分析,采用有限元法和分歧理论,发现各向异性很大程度上影响着起皱的临界应力。Correia等基于不同的屈服准则和分歧理论,分析得到了起皱极限曲线,并采用有限元法对成形进行分析,这与Cao等的研究出现分歧,他们认为没有起皱极限图。

另外一种侧壁起皱,研究较多的有圆锥杯拉深(见图6)、油底壳成形(见图7)等。Narayanasamy等研究了钢板拉伸通过圆锥杯的起皱行为,发现极限拉伸比LDR与起皱的关系很大。Kim等采用有限元法和分歧理论,研究了各向异性对冲杯侧壁起皱的影响,发现起皱行为与



图5 冲压法兰起皱



图6 起皱试验



图7 油底壳起皱

各向异性的关系很大。Shafaat等研究了锥形杯的侧壁起皱问题,采用能量法和有限元分析技术,发现临界起皱应力与瞬态模量间存在直接关系,屈服面也对起皱的有效应力有影响。

4. 起皱控制

如何把以上判定准则正确、有效地应用于各种具体问题并进而控制起皱,是该研究领域的主

题。要进行起皱的控制,起皱的影响因素非常重要。Kim等研究了各向异性板材的起皱极限图,发现调整起皱的最佳方法是改变材料的厚度。Wang等采用神经网络方法来研究板材成形中的几何对起皱的影响,发现高度梯度对起皱的影响最大。

对起皱的控制,很多学者进行了研究。Lee等研究了STS304不锈钢的深冲能力,采用盒形件拉伸。发现起皱是由于不均匀的流动引起的。并用有限元法确定了一个优化的板料形状,最终得到了一个无缺陷的零件。Morovvati等研究了双层板圆柱形杯的法兰起皱问题,发现采用提高压边力的方法可以消除法兰起皱。Chen等分析了冲压阶梯形方盒的侧壁起皱和模具设计,采用修改阶梯模具为单个盒形模具的方法消除了起皱。Ahmetoglu等研究了方盒拉伸法兰起皱的压边力控制方法,采用三种不同形状的板材,发现由于大部分压边力集中于法兰变厚的区域,因而边缘的起皱不可避免,需要采用变压边力或者拉延筋来控制起皱。优化方法也被用于起皱控制中。Sivasankaran等采用神经网络的方法

研究了不同等级的纯铝板材拉伸通过锥形模具的起皱控制,得到了控制的方法。Shivpuri等研究了板材冲压成形中空间不同的摩擦分布对降低起皱的稳健设计,对压边圈和模具分为多个部分,进行摩擦系数的不同设置,然后进行遗传算法优化,最终得到最优的摩擦分布。Koyama等采用数据库和有限元辅助的智能冲压控制系统对拉深过程的压边力进行控制,最终消除了侧壁起皱。

5. 橡皮成形起皱

以上研究多是冲压过程的起皱,橡皮成形与冲压过程类似,本质是相同的,起皱也存在着法兰起皱和侧壁起皱,但是凹模变成了橡皮,因而又有不同。橡皮成形起皱目前研究较少。在橡皮成形的起皱试验研究方面,陈磊等采用正交设计方法对影响凸弯边成形过程的几个因素如模具半径、倒角半径、翻边高度和压力进行了试验研究,分析了不同因素和不同材料对凸弯边的起皱影响。发现对于不同材料,随着强度的增加,起皱趋势也增加。随着材料强度的增加,倒角半径对起皱的影响降低,压力和翻边高度对起皱的影响增加,模具半径对起皱的影响最大。

在橡皮成形理论分析方面,Nader采用分析法建立了橡皮成形凸弯边的分析模型,发现起皱程度是常规模具(刚性模具和冲头)的几倍。赵凌霄采用能量法分析了橡皮成形凸弯边起皱的临界条件,研究了临界橡皮压力和起皱波数。在数值模拟方面,陈磊等基于Pamstamp软件建立了橡皮成形的模拟模型,并模拟了凹

弯边的成形过程。

橡皮成形起皱的控制方法目前进行了一些研究,主要采用侧压块方法。孙永娜等基于有限元模拟和试验设计,对不同几何参数下的侧压块橡皮成形进行了有限元模拟,分析了几何参数对起皱指标的影响程度,应用响应面法建立侧压块几何参数和起皱评价指标间的函数关系,并用拟牛顿法对其进行优化。建立了优化参数和成形指标间的近似函数关系及侧压块优化设计模型。通过试验验证了该优化方法的有效性和正确性。

笔者也对侧压块方法进行了先期研究,如图8所示,发现采用侧压块容易导致板材过度变薄,且板料存在压入难题,需要增加板料的长度,在成形后要进行进一步的剪切,容易导致变形,因而侧压块方法存在着一定的局限性,在生产中并未广泛采用。另外,控制起皱还可采用侧面开槽的方法,如图9所示,将起皱的多

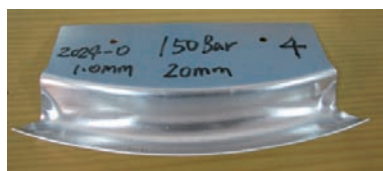


图8 侧压块结果



图9 侧面开槽控制起皱实例

余材料压入到槽内,控制起皱发生在内部,不影响装配,同时不影响强度。进一步研究探索橡皮成形过程的起皱机理及控制是非常必要的。

6. 结语

橡皮成形作为一种特定的钣金成形方法,在飞机生产中具有广泛的应用。橡皮成形的起皱问题是影响零件质量的主要因素之一。目前,对冲压方面的起皱已经进行了广泛深入的研究,而在橡皮成形起皱方面研究很少,主要的机理和控制方法需要进一步研究,以适应我国大型飞机研制的需要。

参考文献:

- [1] J. Cao, S. H. Cheng, H. P. Wang, et al. Buckling of Sheet Metals in Contact with Tool Surfaces[J]. Annals of the CIRP, 2007 (56) : 253-256.
- [2] J.B. Kim, J.W. Yoon, D.Y. Yang. Wrinkling initiation and growth in modified Yoshida buckling test: Finite element analysis and experimental comparison[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000 (42) : 1683-1714.
- [3] Wang C.T., Gary Kinzel, Taylan Altan. Failure and wrinkling criteria and mathematical modeling of shrink and stretch flanging operations in sheet-metal forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995 (53) : 759-780.

MW (收稿日期: 20170418)



赛帕埃惜

日本サイバーRC株式会社

日本进口



Tool Regrind Machine
五轴全自动刀具磨床



Tool Regrind Machine
四轴全自动刀具磨床



Automatic Drill-Honing Machine
自动钻头钝化机

对象刀具

刀具种类	钻头、铣刀、丝锥、铰刀、3刃钻头、侧刃、3刃倒角刀、不等分铣刀、雕刻刀、枪钻
刀具材质	高速钢 (HSS)、钨钢/硬质合金 (carbide)
刀具最大把持直径	φ20 (φ26 ※) ※φ26 规格为选配
刀具长度	45 ~ 200mm

特征

- 操作简单 自动对刀、自动补正偏心 自动研磨
- 对应多种刀具
- 任意设置刀具参数
- 不需编程、可追加新程序,进行版本升级

地址: 苏州吴中区金枫路216号
东创科技园C幢108

联系人: 代女士

手机: 13651758961

电话: 0512-62695591

QQ: 642504730

邮箱: cyberrc_dll@aliyun.com

◆广告 查询编号: 0035