

钣金成型工艺中的回弹现象及其控制方法

韩涛, 陶文广, 陈亚斌

青岛泰泓轨道装备有限公司 山东青岛 266111

摘要: 分析了钣金成型工艺中回弹现象的成因及其控制策略, 重点分析了材料属性、工艺参数和模具设计对回弹的影响。通过优化材料选择与预处理、调整工艺参数及改进模具设计, 可以有效控制钣金成型中的回弹量, 提升成型精度。

关键词: 钣金成型; 回弹; 控制; 材料; 模具

1 序言

钣金成型是现代制造业中重要的加工工艺之一, 其成型精度直接影响产品的质量和使用性能。然而, 钣金在成型后常常会出现回弹现象, 即在卸载外力后, 材料因弹性恢复而偏离设计形状和尺寸。回弹不仅影响成型件的精度, 还给后续的装配带来困难, 成为钣金成型技术的主要挑战之一。本文旨在探讨回弹现象的成因, 并提出相应的控制策略。通过分析材料属性、工艺参数和模具设计等因素对回弹的影响, 结合试验数据和实际应用经验, 为钣金成型的精密控制提供科学指导和技术支持。

2 回弹现象的成因分析

2.1 回弹现象的机理分析

回弹现象的机理主要源于钣金材料在成型过程中的弹性和塑性变形行为。当外力施加在钣金材料上时, 材料首先经历弹性变形, 然后逐渐进入塑性变形阶段, 这个过程不可逆。然而, 当外力被解除时, 由于材料的弹性恢复能力, 部分变形会被还原, 导致成型件出现尺寸和形状的偏差, 即回弹现象。影响回弹的关键因素之一是材料的屈服强度和弹性模量。一般来说, 材料的屈服强度越高, 塑性变形的抗力越大, 从而在卸载后回弹量更显著。对于常见的6061-T6铝合金, 其屈服强度约为276MPa, 而同样条件下的软钢屈服强度仅为210MPa, 结果是6061-T6铝合金的回弹量显著高

于软钢^[1]。材料的弹性模量也是决定回弹的重要因素, 弹性模量越大, 材料在弹性变形阶段的刚性越强, 卸载后恢复原始形状的能力也更强。不锈钢的弹性模量大约为200GPa, 而铝合金的弹性模量为70GPa, 这使得不锈钢在卸载后出现更大回弹。

回弹的机理还受材料的加工硬化特性影响, 这在高强度材料中表现得尤为明显。加工硬化使材料在塑性变形后进一步变形变得困难, 同时在卸载时回弹量会增大。硬化指数是描述材料硬化程度的重要参数, 硬化指数越高, 材料的塑性变形能力越差, 从而回弹量增加。冷轧钢板的硬化指数较高, 因而在成型过程中会产生较大的回弹量, 特别是在高应变速率下表现得更为显著。试验数据显示, 对于硬化明显的冷轧钢板, 回弹量可达到初始弯曲角度的10%以上。而在不锈钢的U形弯曲试验中, 通过使用圆弧形凸模设计, 可将回弹量减小20%~30%, 显著提高成型精度。此外, 温度也会影响材料的硬化行为和弹性模量, 高温条件下材料的弹性模量和屈服强度会有所下降, 从而导致回弹量减小^[2]。

合理的温度控制和模具设计对于回弹现象的控制至关重要, 这些措施能够显著改善钣金成型件的尺寸精度和表面质量。

2.2 材料属性对回弹的影响

(1) 弹性模量与回弹的关系 弹性模量反映了材料在应力作用下发生变形时的抗力大小。弹性模量越大, 材料在外力卸载后恢复原始形状的能力

越强,因而直接影响钣金成型件的回弹量。具体而言,弹性模量高的材料在成型时虽然能够较好地维持形状,但在卸载后,由于材料内部储存的弹性应变能较大,这部分能量的释放会导致成型件尺寸发生显著回弹。不锈钢的弹性模量约为200GPa,而铝合金的弹性模量约为70GPa,这使得在相同成型条件下,不锈钢的回弹量往往明显大于铝合金。

弹性模量与回弹的关系在实际生产中表现得非常明显。材料在成型过程中会经历弹性变形和塑性变形两种阶段,弹性模量越大,弹性变形部分所占比例也越大,这意味着成型后,材料恢复到接近原始形状的趋势也越强烈,从而导致更大的回弹。以试验为例,当使用高弹性模量的不锈钢进行U形弯曲时,成型后的回弹角度可以达到初始弯曲角度的15%以上。而同样条件下的低弹性模量材料如软钢,其回弹角度仅为5%左右。这种关系不仅适用于常见金属材料,还在特殊合金和高强度钢中有所体现,因此在钣金成型工艺设计中,合理选择和优化材料的弹性模量对于减小回弹量至关重要^[3]。通过调整工艺参数或使用特定的模具设计,如增加成型件的弯曲次数或采用多段成型,可以部分抵消高弹性模量材料的回弹效应,从而提高成型精度。

(2) 屈服强度对回弹的影响 在钣金成型过程中,屈服强度对回弹量有着直接且显著的影响。一般来说,屈服强度越高,材料在受到外力时越不容易发生塑性变形,这也意味着在成型过程中,更多的变形以弹性变形的形式存在。因此,卸载后材料会出现较大的弹性恢复,即回弹现象。屈服强度较高的材料在成型过程中虽然具备较好的形状保持性,但在卸载时会因为弹性应变能的释放而产生更大的回弹。

(3) 材料硬度与回弹量的关联 材料硬度通常用于衡量材料表面的强度和耐磨性。材料硬度与回弹量之间存在复杂的关系,主要体现在硬度对塑性变形和弹性恢复的影响上。一般来说,硬度较高的材料在成型过程中更难发生明显的塑性变形,弹性变形占比相对更大,因而在卸载后出现较大的回弹。硬度高的材料,如高碳钢和某些合金钢,在弯曲成型后,由于塑性变形不够充分,因此容易因弹性恢复而产生显著的回弹现象^[4]。试验数据表明,对于硬度较高的冷轧钢板,弯曲后的回弹角度通常

比硬度较低的软钢板高出15%~20%。这意味着在成型过程中,硬度越高的材料越需要特殊的工艺调整,以有效控制回弹。如铝合金和软钢等硬度较低的材料,虽然在弯曲过程中容易发生塑性变形,但由于塑性变形充分,弹性恢复部分较小,因此回弹量也相对较低。这些材料在成型时更容易保持设计的弯曲角度和尺寸,降低了回弹对成型精度的影响。此外,硬度高的材料在回弹控制中往往需要借助模具设计的改进,如采用弹性凸模或增加过弯量等方法来补偿回弹。通过调整工艺参数,例如增大弯曲力或采用多次弯曲等方式,也可以在一定程度上减小硬度对回弹的影响。综上所述,材料硬度对回弹量的影响是显著的,合理控制硬度以及相应的成型工艺调整是确保钣金件成型精度的关键。

2.3 工艺参数对回弹的影响

钣金成型过程中影响回弹现象的工艺参数包括弯曲半径与材料厚度的比值(r/t)、弯曲角度、弯曲力、模具间隙以及成型速度等。当 r/t 值较小时,材料在弯曲过程中受到的应力较大,塑性变形更充分,因此回弹量相对较小。弯曲半径与材料厚度的比值(r/t)是一个关键参数,较小的 r/t 值能够增加材料的塑性变形,但若 r/t 过小(如 $r/t < 2$),则可能导致材料破裂。研究表明,将 r/t 控制在2~3时,可以减小铝合金的回弹。弯曲角度越大,材料的回弹量也随之增大,因此采用多次弯曲或分段弯曲可以减小单次弯曲引起的回弹。

弯曲力的大小直接影响材料的塑性变形,适度增加弯曲力可以减小回弹,但需避免过大的力而导致材料或模具损坏。控制模具间隙也是影响回弹的关键因素,通过将模具间隙控制在材料厚度的5%~10%,可有效减少材料的弹性恢复。成型速度的调整对回弹的影响则体现在应力分布的均匀性上,较慢的速度可改善应力分布,从而减小回弹^[5]。

2.4 模具设计对回弹的影响

模具设计在钣金成型中对回弹现象有直接影响。采用圆弧形凸模或可调节凸模可以优化材料的受力状态,减小回弹。零间隙凹模设计通过更好地约束材料,减少了成型过程中的弹性恢复。压边装置可以通过控制材料流动来减小回弹,使用弹性元件如聚氨酯橡胶,还可以缓解模具与材料之间的应力集中,从而进一步控制回弹。

3 回弹现象的控制策略

要有效控制钣金成型中的回弹现象，需要综合材料选择、工艺参数优化和模具设计的改进。这些控制策略不仅可以减少回弹，还能提升整体成型精度和效率。

3.1 材料选择与预处理

优先选用屈服强度低、弹性模量适中且硬化指数小的材料，如铝合金、软钢等。这些材料在成型过程中具有更好的塑性变形能力，回弹量相对较小。例如，屈服强度低于200MPa的软钢材料在弯曲后回弹角度 $<5^\circ$ ，显著低于高强度钢材的回弹表现。通过热处理如退火，可以调整材料的内部应力结构，从而进一步降低回弹量。应力计算公式 $\sigma = E\varepsilon$ （其中 σ 为应力， E 为弹性模量， ε 为应变）可以用于预测材料在不同热处理条件下的弹性恢复特性。通过合适的热处理工艺，可将某些高强度钢材的回弹减少10%~15%。表面处理技术如喷丸和滚压能在材料表面引入残余压应力，提高表面硬度的同时有效控制回弹。喷丸处理对不锈钢板的测试显示，经过处理后，回弹量可减小5%~10%。此外，材料的预热处理能够降低材料的硬化效应，进一步减小回弹。例如，在较高温度下处理的铝合金弯曲件回弹角度比常温成型降低了约12%。

3.2 工艺参数优化

通过精确控制弯曲半径与材料厚度的比值（ r/t ），可减小回弹量。 $r/t = R/h$ （其中 R 为弯曲半径， h 为材料厚度）用于设定最优比值，以确保足够的塑性变形。调整弯曲角度和弯曲力也是优化的重要手段，通过多次弯曲和分段弯曲，可将回弹控制在可接受范围内。试验数据表明，通过将弯曲力从50kN调整至65kN，可将软钢材料的回弹减小约15%。

通过调节成型速度，可以改善材料在成型过程中的应力分布。较慢的速度（如降低20%~30%）能够更好地控制材料的弹性变形，使成型件表面质量得到改善，回弹量可减小10%~15%。在实际生产中，可使用数控设备精确控制这些参数，以获得最佳的成型效果^[6]。

3.3 模具设计与改进

通过优化凸模和凹模的几何结构，可以显著减小回弹量。凸模的圆弧设计能够减少应力集中，

使材料的弹性恢复减少。对于凹模，采用零间隙设计可以更好地控制材料流动和形状，减少不必要的弹性恢复。研究表明，使用零间隙模具时，材料的回弹可减小20%~30%。压边装置和弹性元件如聚氨酯橡胶的引入，通过额外施加的压边力限制材料的过度变形，从而减小回弹。对于高强度钢，合理调节压边力可将回弹量减小约15%。多级弯曲和分段成型技术适用于形状复杂的成型件，通过逐步施加弯曲力的方式控制材料的变形路径，试验结果显示，这种方法可将回弹控制在10%以内。提升模具刚性和增加模具支撑可以减少模具自身变形，进一步减小回弹量，确保高精度成型。采用这些综合措施，钣金成型的回弹现象可以得到显著改善，为制造业的精密生产提供强有力的技术支持。

4 结束语

回弹现象是钣金成型中不可忽视的问题，通过合理选择材料、优化工艺参数及改进模具设计，可以显著减小回弹，提高成型件的尺寸精度。本文提出的控制策略结合了多种技术手段，未来的研究和应用应继续深入优化这些控制策略，以进一步推动钣金成型技术向高精度、高效率方向发展，为制造业的高质量发展提供技术支撑。

参考文献：

- [1] 蔡霞. 多角弯曲件冲压回弹预测研究[D]. 广州：华南理工大学，2010.
- [2] 李轩颖，徐雪峰，付春林，等. 某型飞机钛合金钣金件热冲压成形工艺参数优化[J]. 塑性工程学报，2017，24（1）：92-97.
- [3] 张于贤，王红，陈德淑. 关于计算最佳弹塑性界面半径的探讨[J]. 重庆大学学报（自然科学版），2004（6）：30-31，40.
- [4] 李萍，许梅. 屈服损伤对高压容器用Ni3V钢力学性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程，2003（6）：42-43，49.
- [5] 陶军，闫栋. 基于特征的车床钣金外壳快速设计系统[J]. 农业装备与车辆工程，2022，60（4）：135-138，148.
- [6] 刘靓静，马或. 机械设备造型设计的结构性分析[J]. 包装工程，2018，39（12）：203-207.