

doi: 10.7690/bgzd.2016.02.021

枪弹弹壳挤孟组合模新型设计与研究

李晓光¹, 魏志芳¹, 高建中², 王芳¹

(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 黑龙江北方工具有限公司, 黑龙江 牡丹江 157000)

摘要: 为保证弹壳挤孟成形中模具的较高使用寿命, 以冷挤压工艺理论为基础, 结合有限元仿真技术对枪弹弹壳挤孟组合模进行新型设计。利用拉美优化公式计算得到组合模各层直径及径向过盈量, 并通过 DEFORM-3D 软件对枪弹弹壳挤孟成形过程进行数值模拟。仿真结果表明: 组合模内壁可以完全不受切向拉应力的作用, 模具强度和承载能力是整体模的 1.75 倍左右。预应力组合模的合理设计能有效降低模具破裂的风险, 使弹壳挤孟成形得到保证。

关键词: 枪弹弹壳; 组合模; DEFORM-3D; 挤孟成形; 数值模拟

中图分类号: TJ411 **文献标志码:** A

New Design and Research of Bullet Casings Extrusion Combined Die

Li Xiaoguang¹, Wei Zhifang¹, Gao Jianzhong², Wang Fang¹

(1. School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Heilongjiang North Tool Co., Ltd., Mudanjiang 157000, China)

Abstract: To ensure long service life of dies in the cartridge case extrusion forming, the combined extrusion die for cartridge cases was newly designed by finite element simulation based on cold extrusion process theory. Diameters of each layer of the combined die and shrink ranges between neighboring layers were calculated using lame optimal formula, and extrusion forming process for cartridge cases was simulated with DEFORM-3D software. It was proved that the inner wall of combined die can be completely free from tangential tensile stress, and the corresponding structural strength and bearable load was 1.75 times of integral die. So, the fracture risk would be reduced effectively and the cartridge case extrusion forming was achieved with the suitable design of pre-stressed combined die.

Keywords: cartridge cases; combined die; DEFORM-3D; extrusion forming; numerical simulation

0 引言

我国弹壳制造原材料已由覆铜钢改为圆钢, 下料冲孟改为冷挤孟。挤孟成形作为枪弹弹壳加工制造的基础工序, 属于冷挤压过程^[1]。枪弹弹壳挤孟成形毛坯的变形程度达到 80%以上^[2], 挤孟模不仅承受高接触压力和剧烈的摩擦, 应力集中部位也可能超过材料的屈服极限而导致模具失效; 因此, 对挤孟模进行设计, 保证弹壳挤孟成形中模具较高的使用寿命, 已成为枪弹弹壳加工制造的关键问题之一。

陈再良、孟令先等对冷作模具的失效形式进行了研究, 断裂失效作为最常见的损坏形式, 主要因为载荷超过模具的强度极限或应力集中而产生^[3-4]; 陈友鹏等运用理论分析和数值模拟相结合的方法验证了凹模是冷挤压成形加工中最重要的零件, 金属处于三向不均匀高压状态, 内壁承受的切向拉应力是凹模发生开裂的根本原因^[5]。文献[6]表明单纯采用增加外径的方法并不能进一步提高模具的强度; 通过预应力圈把凹模制成两层或三层组合模, 可以抵消加工过程中内层凹模由于受到内壁压力而产生拉应力, 使凹模处于安全范围, 从而避免发生纵向开裂。

笔者以拉美理论为基础对枪弹弹壳挤孟组合模进行了新型设计, 采用 DEFORM-3D 软件对弹壳挤孟过程进行了数值模拟, 验证了预应力组合模能够有效降低模具开裂的风险, 其强度和承载能力也得到显著提高。

1 挤孟组合模设计

已知某机枪弹壳整体挤孟模如图 1。

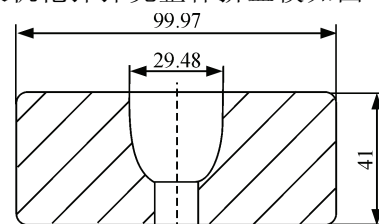


图 1 整体式挤孟模结构示意图

组合模设计首先确定采用两层或三层组合模; 其次确定内凹模和各预应力圈的直径及径向过盈量。枪弹加工中通常以硬质合金作为内凹模材料, 抗拉强度很低甚至为零, 设计时必须设定其不允许在拉应力下工作, 当单位挤压应力 $p \leq 1\ 100\ \text{MPa}$ 时采用两层组合模; 当 $1\ 100\ \text{MPa} < p \leq 1\ 900\ \text{MPa}$ 时采用三层组合模。

收稿日期: 2015-10-11; 修回日期: 2015-11-17

作者简介: 李晓光(1987—), 男, 河南人, 在读研究生, 从事武器系统现代设计理论与方法研究。

弹壳挤孟成形挤压应力 p 为 1 850 MPa 左右；内层凹模为 YG20，许用应力 $[\sigma]=3\ 100$ MPa；中、外加强圈为合金结构钢 5CrNiMo，许用应力 $[\sigma_2]=[\sigma_3]=1\ 200$ MPa，弹性模量 $E=(2.09\times 10^5)$ MPa。三层挤孟组合模外形结构见图 2，组合锥面配合的斜度设为 1.50。

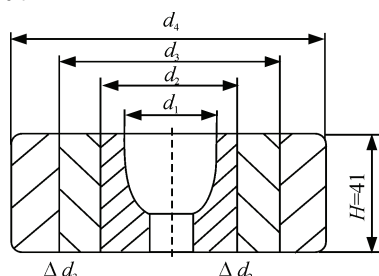


图2 组合式挤孟模结构示意图

根据结构等强度理论，拉美公式优化结果^[7]为：

$$d_2 = \frac{d_1}{Q_1}; \quad (1)$$

$$d_3 = \frac{d_2}{Q_2}; \quad (2)$$

$$d_4 = \frac{d_3}{Q_3}; \quad (3)$$

$$Q = Q_1 Q_2 Q_3; \quad (4)$$

$$\Delta d_2' = \frac{d_2}{E} \frac{2p - [\sigma_1](1+Q^2)}{1-Q_2^2 Q_3^2}; \quad (5)$$

$$\Delta d_3 = \frac{d_3}{E} [\sigma_1] \left(\frac{[\sigma_3]}{[\sigma_1]} - Q^2 \right); \quad (6)$$

$$Q_1 = \sqrt{\frac{1}{3} \left\{ 1 + \frac{[\sigma_2]}{[\sigma_1]} + \frac{[\sigma_3]}{[\sigma_1]} - \frac{2p}{[\sigma_1]} \right\}}; \quad (7)$$

$$Q_2 = \sqrt{\frac{[\sigma_1]}{[\sigma_2]}} \times Q_1; \quad (8)$$

$$Q_3 = \sqrt{\frac{[\sigma_1]}{[\sigma_3]}} \times Q_1. \quad (9)$$

考虑中外层加强圈装配时的尺寸变化，加工时取内层与中层之间的过盈量为

$$\Delta d_2 = \Delta d_2' - \frac{d_2}{E} \frac{[\sigma_1](1-Q_3^2)}{1-Q_2^2 Q_3^2} \left(\frac{[\sigma_3]}{[\sigma_1]} - Q^2 \right). \quad (10)$$

式中： d_1 为模腔孔径； d_2 为中加强圈内径； d_3 为外加强圈内径； d_4 为外加强圈外径； Q_1 为凹模内径与中加强圈内径之比； Q_2 为中加强圈内径与外加强圈内径之比； Q_3 为外加强圈内外径之比； Δd_2 为内模与内加强圈之间过盈量； Δd_3 为中、外加强圈之间过盈量。

将模腔孔径 $d_1=29.48$ 代入计算公式，优化得到各圈直径和过盈量见表 1。

设计变量	直径			过盈量	
	d_2	d_3	d_4	Δd_2	Δd_3
结果	67.0	94.4	133.0	0.14	0.38

2 有限元模型的建立

2.1 模型简化和假设

弹壳挤孟加工实际工况比较复杂，数值模拟难以将全部因素都考虑在内；因此，笔者忽略次要因素，这样既保证模拟顺利进行，又能使模拟接近于实际情况。从实际问题出发作假设如下：

- 1) 忽略变形中的温度效应(模拟分析过程中视模具温度不变)；
- 2) 计算中忽略重力、惯性力的影响；
- 3) 根据弹壳挤孟工序变形特点，冲子向下运动，挤孟模固定不动；
- 4) 整体模型呈现轴对称性，为节省求解时间，提高计算精度，简化为 1/4 进行模拟。

2.2 整体式挤孟模有限元模型

几何模型(包括挤孟冲子、挤孟模、圆饼毛坯和顶杆)都在 NX 中创建，并调整好各自的配合位置，然后通过数据转化接口输出为 STL 文件格式，再导入到 DEFORM-3D 中。考虑模具弧度、结构和尺寸效应等因素，网格划分如下：1) 毛坯采用相对方式进行网格划分，单元数目 10 000 个；2) 挤孟模以绝对方式进行网格划分，单元最小尺寸 1 mm，尺寸比为 2。有限元仿真模型如图 3 所示。

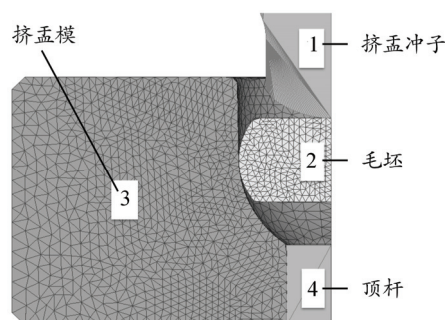


图3 整体式挤孟成形有限元模型

文中主要分析对象挤孟模为弹性体，圆饼毛坯为各向同性的塑性体，挤孟冲子和顶杆为刚体。毛坯材料取 20 钢，本构模型 $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}_1, T)$ ，其中 $\bar{\sigma}$ 为塑性流动应力； $\bar{\varepsilon}$ 为等效塑性应变； $\bar{\varepsilon}_1$ 为等效塑性应变速率； T 为温度。挤孟模材料 YG20，性能参数见表 2。

表 2 材料性能参数

材料	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
YG20	500 000	0.24	3 100
5CrNiMo	212 000	0.23	1 200

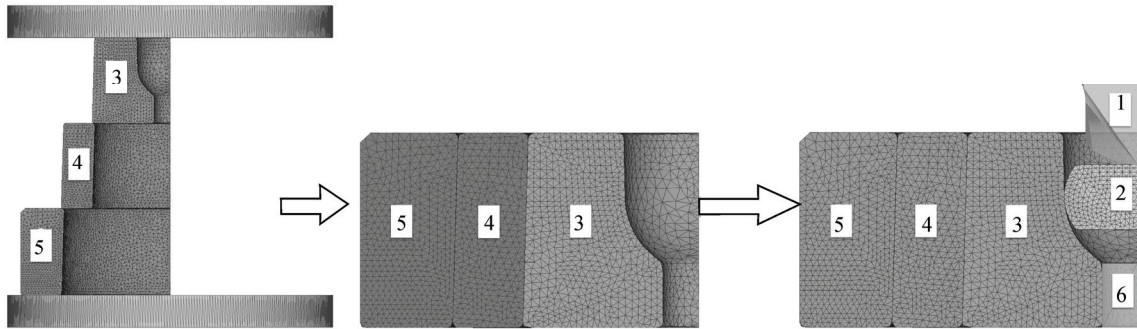
参数设置：挤孟冲子速度 100 mm/s，总行程 12 mm，步长 0.2 mm(不能超过最小单元边长的 1/3)，模拟步数 120 步。毛坯与挤孟冲子以及挤孟模之间的摩擦系数设为 0.08，其余接触摩擦均不计。

2.3 组合式挤孟模有限元模型

与整体式相比，组合式挤孟成形有限元模型建立的关键在于通过施加过盈量来产生预应力，为更

加接近真实工况，笔者通过动态模拟的方式来实现。首先在 NX 中建模按照给定的过盈量进行设置并调整好相互位置关系；然后导入 DEFORM-3D 软件，挤孟内模和中加强圈再以一定的速度(1 mm/s)压入外加强圈来产生过盈量。

挤孟内模(弹性体)材料 YG20，中、外加强圈(弹塑性体)选用 5CrNiMo，材料性能参数分别见表 2。挤孟内模和中、外加强圈都以绝对方式进行网格划分，最小单元为 1 mm，尺寸比为 2，其他参数设定都与整体式保持相同。挤孟成形有限元模型如图 4。



1. 挤孟冲子；2. 毛坯；3. 挤孟内模；4. 中加强圈；5. 外加强圈；6. 顶杆。

图 4 (组合式)挤孟成形有限元模型

3 结果分析与讨论

3.1 整体式挤孟模应力分析

根据理论分析：挤压终了时的挤压力应达到最大，此时模具内腔壁所承受的应力水平也为最大值。图 5 为整体式挤孟模挤压终了时等效应力分布云图，弹壳挤孟成形挤孟模内壁所受应力为拉应力，最大值 1 700 MPa，出现在模具内腔根部附近。

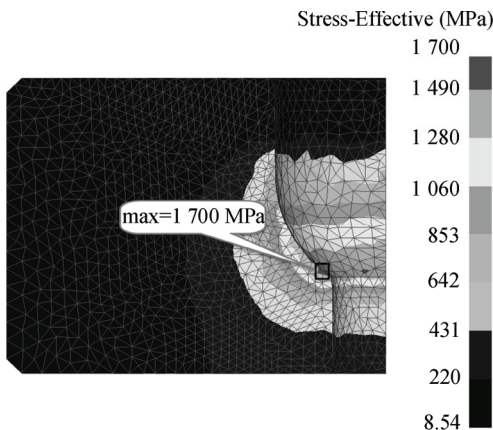


图 5 等效应力分布云图

为准确获得模具内部应力分布情况，笔者选取挤孟模内表面典型的 3 个点，如图 6 所示。这 3 个点在整个挤压过程中等效应力、切向应力随时间变化曲线如图 7 和图 8 所示。

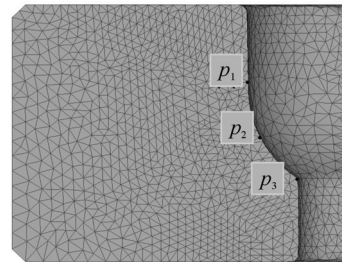


图 6 点迹跟踪分析

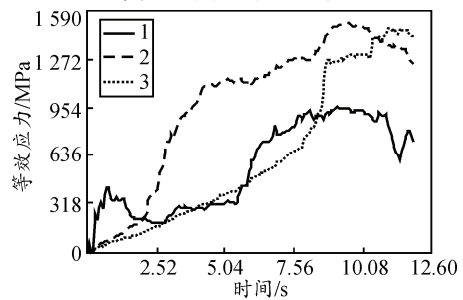


图 7 等效应力变化曲线

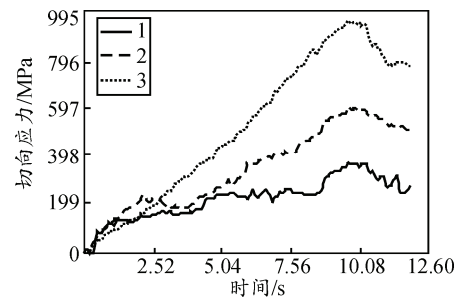


图 8 切向应力变化曲线

从图7可知,整个挤压过程中,凹模内壁所承受的应力较高,其分布较为复杂。挤孟冲子向下运动时,内壁各点($p_1 \sim p_3$)等效应力值各不相同。在挤压终了阶段,冲子挤孟力接近最大值,使得挤孟模内腔底部的应力也急剧上升,根据 Von-Mises 屈服准则,最大等效应力将出现在 p_3 点附近区域,即在挤孟模内壁根部表面。从图8可知:冲子运动至 9.7 mm 时,切向应力最大为 1 160 MPa,仍出现在模具根部,此部位反复挤压容易因疲劳开裂导致模具率先失效。

3.2 组合式挤孟模应力分析

图9为组合式挤孟模挤压终了时的等效应力分布云图,挤孟模腔内壁承受等效应力最大值为 973 MPa。

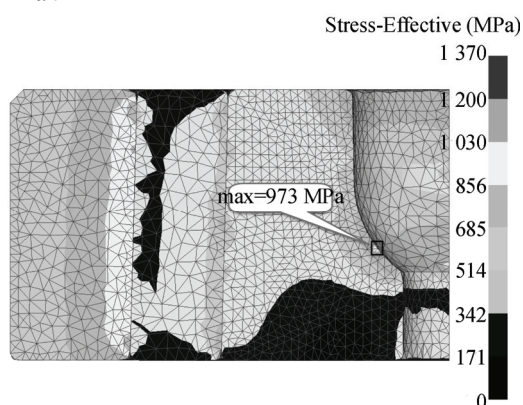


图9 等效应力分布云图

图10为弹壳挤孟成形过程冲子不同下压量时,在挤孟模内壁的3个点附近切向应力变化曲线,其坐标值与整体式挤孟模分析时所取坐标保持一致。

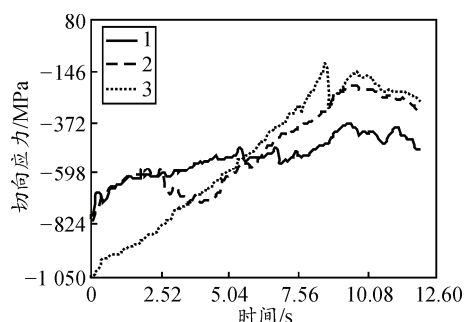


图10 切向应力变化曲线

挤孟模内壁切向应力开始为压应力,这是因为组合模的中、外加强圈对挤孟内模外壁施加有预压力作用的结果。这使挤压过程中产生的拉应力与切向预应力叠加而导致切向拉应力减小,当冲子行程为 10.8 mm 时, p_3 点附近切向应力最大为 -127 MPa。

3.3 结果讨论

挤孟模内腔壁最大切向应力和径向应力模拟结果见表3。对比等效应力可知:组合式挤孟模强度和承载能力是整体式的 1.7 倍;最大切向应力因为受拉变为受压,模具内壁完全不受切向拉应力作用,从而有效避免模具发生切向开裂。这是由于组合式模具存在预加应力作用,使模具内壁产生的切向压应力与挤压时产生的拉应力相互抵消,从而降低了脆性材料受拉力作用时易出现断裂的危险。由此可见:预应力组合挤孟模的合理设计有助于提高模具强度,改善挤压过程中由于应力交替而出现模具早起疲劳失效的现象,延长模具的使用寿命。

表3 最大应力模拟结果 MPa

方案	最大切向应力	最大等效应力
整体式	1 160	1 700
组合式	-127	973

4 结束语

1) 笔者就枪弹弹壳挤孟模提出了一种新型设计方法,采用拉美优化公式计算得到了组合模各圈的直径和最佳过盈量。

2) 针对整体模和组合模,笔者分别建立了弹壳挤孟成形有限元模型并进行了数值模拟分析。结果表明:采用新型设计方法后,模具受到的切向拉应力大大减小甚至消失,有效降低了模具发生破裂的风险,其强度和承载能力与整体模相比也有了显著的提高。

3) 将枪弹弹壳挤孟模新型设计方法和有限元仿真技术应用于生产实践,有助于指导挤孟模的设计,提高模具产品的质量。

参考文献:

- [1] 《枪弹弹壳制造》编写组. 枪弹弹壳制造[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977: 7-8, 14-16.
- [2] 彭连友, 黄志星, 张琦. 一种新的孟子毛坯成形工艺技术[J]. 模具制造技术, 2013(2): 34-36.
- [3] 陈再良, 佟晓辉, 林丽华, 等. 典型冷作模具失效规律和机理分析[J]. 机械工程材料, 1989(4): 47-50.
- [4] 孟令先, 宋学进, 张元国. 冷作模具的实效分析与预防措施[J]. 锻压技术, 2007, 32(3): 134-136.
- [5] 陈友鹏. 冷挤压模具结构与预应力组合凹模实用设计方法研究[D]. 青岛: 青岛建筑工程学院, 2006: 5-6.
- [6] 贾俐俐. 挤压工艺及模具[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 120-124.
- [7] 徐荣珍. 反挤压凹模内压力的有限元模拟及组合凹模优化[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003: 27-28.