

可燃容器抽滤模具流量分布优化方法研究

贾楠

(西安理工大学 工程训练国家级实验教学示范中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 由于抽滤工艺形成的薄壁可燃容器毛坯厚度与质量分布不均匀、产品合格率低,且严重影响模压容器的强度和燃尽性,提出可燃容器抽滤模具结构优化方法,通过有限元分析模具内腔流量分布规律,依据细长孔流量公式建立模具内腔各层域流量补偿数学模型,进行流量采集试验,试验结果与流量补偿数学模型计算结果基本一致。利用流量补偿数学模型计算得到了模具内腔流量补偿管道关键尺寸,采用3D打印技术制作了模具样机,并进行了毛坯抽滤试验,获得厚度与质量分布均匀的合格毛坯,验证了所提方法的可行性。

关键词: 薄壁可燃容器;流量补偿;模具结构;优化设计

中图分类号: TH12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2023)01-0137-04

Study on Flow Distribution Optimization Method of Filter Die for Combustible Containers

JIA Nan

(National Experimental Demonstration Teaching Center for Engineering Training, Xi'an

University of Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: With regard to the uneven thickness and mass distribution of thin-wall rough combustible containers formed by pumping and filtering process, the low qualified rate of products and poor strength and burn-out of molded container, a structural optimization method of the die for combustible containers was proposed. The flow distribution in the cavity of the die was analyzed by finite element method, and according to the slender hole flow formula, a mathematical model of the flow compensation data for each layer in the die cavity was established, on which the flow acquisition test was carried out, with the results basically consistent with the calculation results of the flow compensation mathematical model. The key dimensions of the flow compensation pipeline were gained based on the established mode. By 3D printing technology, a mold prototype was made and rough filtering test was conducted to obtain a qualified blank with uniform thickness and mass distribution, which verifies the feasibility of the proposed method.

Keywords: thin-wall flammable container; flow compensation; die structure; optimum design

0 引言

模压可燃军械元器件可燃药筒是一种疏松多孔的、非均质复合含能材料且富含亲水性纤维,其半刚性及燃尽性好是军械元器件发展的主要方向^[1]。但是,现有的可燃容器毛坯抽滤模具抽滤成型壁厚小于1mm的毛坯,其厚度均匀性差,质量偏差大,不能满足薄壁模压可燃容器主要质量指标,这将严重影响容器的燃尽性和弹道性能^[2]。

任文勇等^[2]通过数学计算分析了容器厚度对多弹道性能的影响规律。贾昊楠等^[3]利用称重法研究了环境湿度对可燃药筒燃烧性能的影响规律;王育维等^[4]采用数学建模与仿真的方法研究了可燃容器对压力波的影响规律,为可燃容器结构优化提供了依据。邹伟伟等^[5]利用实验比较法研究了药筒表面空隙特征,为药筒性能提供了依据。李忠山等^[6]用实验方法研究了材料组份对可燃容器力学性能和可燃性能的影响规律,优化了材料组分结构。

为解决壁厚小于1.8mm可燃容器毛坯抽滤困难、厚度不均等问题,提升可燃容器的力学及燃尽性能,本文开展可燃容器抽滤模具结构优化设计研究,通过有限元分析了模具内部各层域流量分布状态,提出了模具内腔结构改进方法,建立了各层流量补偿数学模型;通过抽滤实验数据验证了数学模型;计算了各层域流通管道几何尺寸并制作新模具;最后通过抽滤验证了新模具设计方法和所建模型的可靠性。

1 模具内部流量分布

为获得模具内腔流量分布,进行有限元仿真。仿真初始条件是进口压力为大气压,出口压力为0.08MPa,模型为 $k-\varepsilon$ 紊流模型,液体采用水。仿真结果如图1所示。图2是高度与流量之间的关系。流量与高度成高度线性相关系数为 $\rho=0.943$,可见流经小孔的流量与该孔的高度呈高度线性相关性。因此,需要改善抽滤毛坯厚度均匀性就必须使不同高度流量均匀一致。按照这种思路对抽滤模具进行改进。

基金项目: 西安理工大学工程训练国家级实验教学示范中心开放课题项目(2021ETYB10)

作者简介: 贾楠(1988—),女,陕西西安人,助教,工学硕士,研究方向为流体机械、曲面抛光技术。

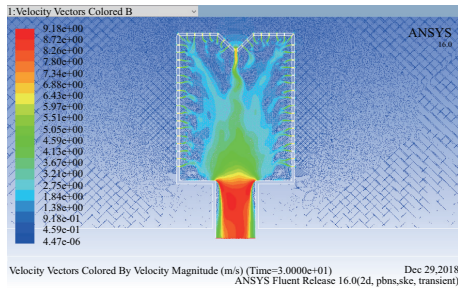


图1 模具内腔流量分布状态

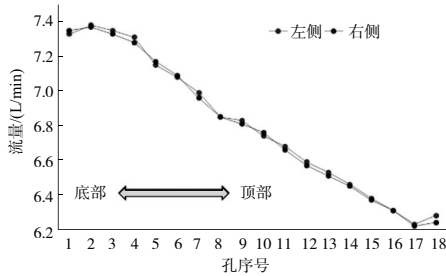


图2 流量随高度变化趋势

2 模具内腔流量补偿方法

2.1 流量分配原理

根据细长管流量式(1)可知流量与管道直径和长度有关。因此提出将模具内腔划分12个层域,每个层接通具有一定长度和直径的管道,模具内部结构如图3所示。通过管道的直径和长度来分配各个层域的流量,让各个层域流量均匀。

$$q = \frac{\pi d^4}{128\mu l} \Delta p = \frac{A^2}{8\pi\mu l} \Delta p \quad (1)$$

式中: d 、 l 分别为管道孔径、长度,mm; A 为通流管道有效面积, mm^2 ; μ 为液体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; Δp 为管道出入口压差,MPa。

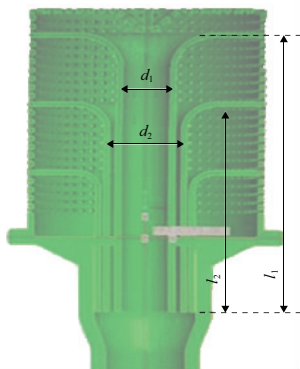


图3 模具内部结构示意图

原模具真空抽滤管道公称直径32mm,抽滤总流量如式(2)所示。

$$\sum q = 12 \frac{k d^4}{\mu l} = \frac{k (\sqrt[4]{12} d)^4}{\mu l} = k \frac{32^4}{\mu l} \quad (2)$$

式(2)表示将模具分为12层,12个层域流量是相等的,则顶层管道理论直径 d'_1 (单位:mm)为

$$d'_1 = 32 / \sqrt[4]{12} = 17.2,$$

为保证足够的流量,所以在设计时顶层管道直径取值

$$d_1 = 20 > 17.2.$$

在得到顶层通流管道的关键尺寸后,下面讨论如何获得其他各层域通流管道有效直径和长度。

2.2 流量补偿数学模型

划分层的目的是将流量重新平均分配,将模具底部多余的流量补偿给不足平均流量的上层。通过仿真可知,在模具内腔流量分布近似线性,且由上至下增大,如图4所示。层越高则流量小,得到的补偿就多。根据三角形几何知识可计算每层的流量补偿系数。

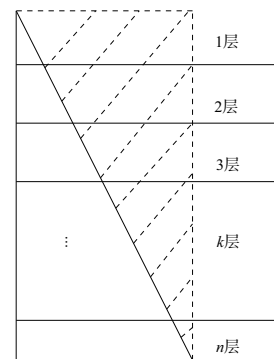


图4 内腔流量补偿示意图(虚线部为补偿流量)

$$\text{第1层: } \sigma_1 = 1 - \left(\frac{n-1}{n}\right)^2$$

$$\text{第2层: } \sigma_2 = \left(\frac{n-1}{n}\right)^2 - \left(\frac{n-2}{n}\right)^2$$

$$\text{第3层: } \sigma_3 = \left(\frac{n-2}{n}\right)^2 - \left(\frac{n-3}{n}\right)^2$$

$$\text{第k层: } \sigma_k = \left[\frac{n-(k-1)}{n}\right]^2 - \left(\frac{n-k}{n}\right)^2$$

$$\text{第n层: } \sigma_n = \left(\frac{1}{n}\right)^2$$

则根据式(2)可得各补偿流量与各层通流管道尺寸之间的比例关系如式(3)所示。

$$\Delta q_1 : \Delta q_2 : \Delta q_3 : \dots : \Delta q_{12} = \frac{A_1^2}{l_1} : \frac{A_2^2}{l_2} : \dots : \frac{A_{12}^2}{l_{12}} = \sigma_1 : \sigma_2 : \dots : \sigma_{12} \quad (3)$$

根据式(3)和顶层通流管道直径 $d_1 = 20 \text{ mm}$,可计算得到模具内腔其他各层通流管道的尺寸。

按照上述方法计算,将模具内腔划分12层,补偿系数计算结果如下: $\sigma_1 : \sigma_2 : \dots : \sigma_{12} = 12 : 10.5 : 10.3 : 8.2 : 7.5 : 7.1 : 5.1 : 3 : 2.2 : 1.0 : 0.5 : 0.25$ 。

2.3 流量采集实验

各层域通流管道尺寸的计算以该层补偿流量为依据。为了获得各层域补偿流量关系,设计抽滤实验,实验方案如图5所示。将模具内腔划分为12个层域,在各层域接通同等的通流管道,如图6所示。由于模具内腔12个层

域流量不相等,则在节流阀开口大小相同的情况下,通过的流量必然不同;此时,调节各管道上的节流阀,使得各层域流量相等,即 $q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_{12}$,则此时各节流阀开口大小不同。

为了通过各节流阀开口大小来度量模具内腔各层域流量大小,保持各节流阀开口大小不变,将其接通至同等条件管道上,测得通过各节流阀的流量。由于节流阀开口不同,则通过其流量也不同,则通过各节流阀流量的比值即是模具内腔各层域补偿流量比值。

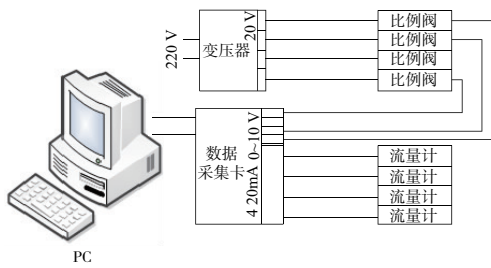


图5 流量采集实验原理

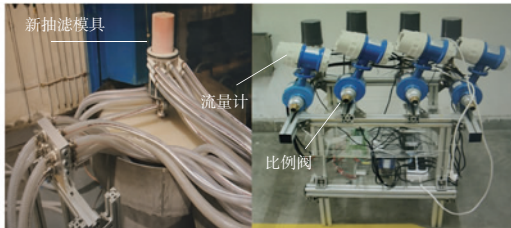


图6 流量采集实验现场

按照上述试验方法获得各层域流量补偿比例为 $\Delta q_1 : \Delta q_2 : \Delta q_3 : \dots : \Delta q_{12} = 11.0 : 10.8 : 10.1 : 8.0 : 7.8 : 7.1 : 5.0 : 3.0 : 2.2 : 1.0 : 0.6 : 0.2$ 。

将2.2部分的计算数据和2.3部分的实验数据绘制成曲线,如图7所示。

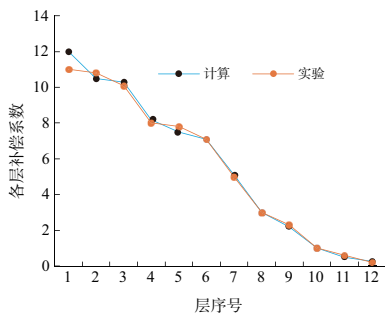


图7 实验与理论值

从图7可知,实验值和理论数值有一定差异,由于在实验过程中各层划分的均匀性、流量分布的线性度变化等因素都会造成补偿数据的差异。但是实验数据和计算数据之间有较好的吻合趋势,证明理论方法具有模具结构设计指导意义。

根据式(3)可知

$$\frac{A_1^2}{l_1} : \frac{A_2^2}{l_2} : \frac{A_3^2}{l_3} : \frac{A_4^2}{l_4} : \dots : \frac{A_{12}^2}{l_{12}} = 12.0 : 10.5 : 10.3 :$$

$$8.2 : 7.5 : 7.1 : 5.1 : 3.0 : 2.2 : 1.0 : 0.5 : 0.25$$

由此可知,流量补偿比值可以转化为通流管道的有效通流直径和长度之间的比例关系,这样就可以在模具内腔4个层域增加通流管道来调节4个层域流量,使得4个层域流量相等,从而获得厚度均匀一致的可燃容器毛坯。按照这种思路可以设计新的可燃容器毛坯抽滤模具。

2.4 模具结构设计

根据上述流量比例可以确定通流管道有效直径与长度之间的比例关系。如果知道某一层通流管道的有效直径和长度,按照上述比例,可以计算得到其他层域通流管道有效直径和长度。

根据模具外形尺寸,可知顶层管道几何尺寸: $d_1 = 20$, $l_1 = 500$,第2层管道长度, $l_2 = 460$,由式(3)可得

$$\begin{cases} A_2 = \frac{\pi}{4} d_2^2 \\ \frac{A_1^2}{l_1} : \frac{A_2^2}{l_2} = 12.0 : 10.5 \end{cases}$$

可得第2层通流管道有效直径

$$A_{2\text{有效}} = \frac{\pi}{4} d_2^2 = \frac{\pi}{4} (20.25)^2 = \frac{\pi}{4} d_{2\text{实际}}^2 - \frac{\pi}{4} d_{1\text{实际}}^2 = \frac{\pi}{4} d_{2\text{实际}}^2 - \frac{\pi}{4} (20+3+3)^2$$

则实际直径为 $d_{2\text{实际}} = 32.96 \text{ mm}$ 。

同理可得其他层域通流管道的实际和有效尺寸。

3 新模具抽滤实验

利用3D打印技术可以制作新模具,如图8所示。抽滤时间3s,液体浓度3%。利用新旧模具做抽滤试验,一是检测各层域流量,二是检测抽滤毛坯厚度均匀性。将利用2.3节所提抽滤实验方法获得的新旧模具内腔各层域流量补偿数据绘制曲线,如图9所示。可以看出旧模具在高度方向上流量曲线梯度大;新模具流量曲线变化梯度小,曲线平坦;这证明改进的新模具对流量均匀性有显著改善作用。



图8 改进结构的新模具

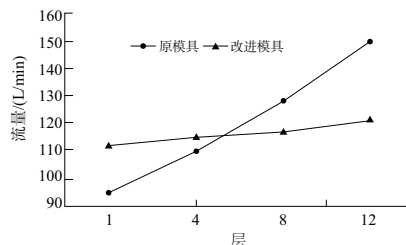


图9 流量变化趋势

按照一定的溶液浓度和抽滤时间进行毛坯抽滤试验,利用新模具抽滤的毛坯模压后质量一致性较好,壁厚减薄到1mm左右,壁厚最大与最小值之差由原来的0.5mm降低到0.3mm,壁厚均匀一致性提高,毛坯密度均匀一致性

提高,符合质量技术指标,如图 10 所示。



图 10 模压容器实物

上述试验结果验证了本文所提模具设计方法的可靠性。

4 结语

本文研究了模压可燃容器毛坯抽滤模具结构优化方法,获得以下结论。

- 1) 通过有限元仿真了模具内部流量分布状态;结果表明从上至下流量呈增大趋势。
- 2) 提出了将模具内腔划分为多个层域的结构改进方法,并根据细长孔流量公式建立了流量补偿比例计算模型,建立了获取各层流量补偿数据的实验方法;实验和计算结果一致。

3) 利用所提方法计算获得了新模具各层域通流管道有效尺寸,利用 3D 打印技术制作了新模具并开展抽滤试验,获得的毛坯厚度与质量分布均匀,符合质量指标,验证了新模具结构优化方法是可靠性。

参考文献:

- [1] 田书春,胡义文,袁小丽,等. 叠氮类热塑性弹性体对模压可燃药筒燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2018, 41(2): 147-152.
- [2] 任文勇,潘玉田,梁庆林,等. 不同厚度可燃药筒燃烧对内弹道性能影响研究[J]. 机械工程与自动化, 2014(2): 94-95, 98.
- [3] 贾昊楠,王琦,路桂娥,等. 环境湿度对可燃药筒燃烧性能的影响[J]. 弹道学报, 2013, 25(1): 81-84.
- [4] 王育维,郭映华,董彦诚,等. 可燃容器对小号模块装药压力波影响的研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(2): 31-35, 45.
- [5] 邹伟伟,肖乐勤,菅晓霞,等. 模压可燃药筒的孔隙结构分析[J]. 火炸药学报, 2011, 34(3): 65-68, 82.
- [6] 李忠山,田书春,周逸,等. 纤维素甘油醚硝酸酯基模压可燃药筒的制备与性能[J]. 火炸药学报, 2019, 42(5): 521-525, 530.

收稿日期: 2022 - 04 - 19

(上接第 112 页)

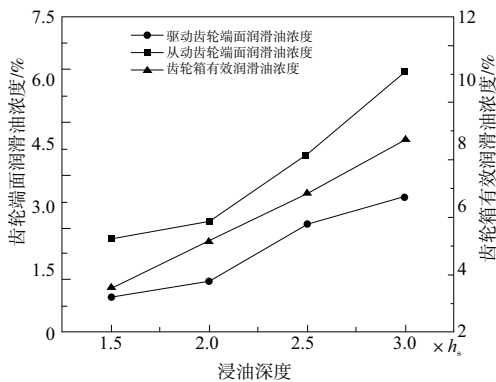


图 6 不同初始油量齿轮箱有效润滑油浓度与齿轮端面润滑油浓度

由图 6 可知,润滑油初始油量的增加时,准稳态条件下齿轮箱内有效润滑油浓度近似线性增加,驱动和从动齿轮端面润滑油浓度逐渐增大。这是由于齿轮副转速一定时,从动齿轮搅起箱体底部的润滑油油量随着初始油量的增大而增大,在箱体内部空间的润滑油浓度也逐渐增大,准稳态条件下有效润滑油浓度线性增加,粘附在齿轮端面的润滑油油量不断增大。

5 结语

基于 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和 VOF 两相流模型,对某型高速列车齿轮箱的内部流场进行模拟仿真,以准稳态下箱体内部压力场、有效润滑油浓度、齿轮端面润滑油浓度为特征参数,分析内部流场分布规律以及齿轮副的转速、润滑油初始油量对其分布的影响。分析结果如下。

1) 准稳态下,齿轮箱内部的润滑油主要分为箱体底部油池积存的润滑油和箱体内部近似均匀分布的润滑油。内部流场压力最大的位置在齿轮副即将啮合处,最小压力出现在齿轮副转出部位。

2) 为了提高箱体有效润滑油浓度,可以适当增大润滑油初始油量,提高齿轮副的转速,但随着齿轮副转速增加,齿轮箱内有效润滑油浓度先升高后趋于稳定。

3) 为提高齿轮端面润滑油浓度,可以增大初始油量,提高齿轮转速可以增大驱动齿轮端面润滑油浓度,但会降低从动齿轮端面润滑油浓度,需要综合考虑。

参考文献:

- [1] LEMFELD F, FRANA K, UNGER J. Numerical simulations of unsteady oil flows in the gearbox[J]. Journal of Applied Science in the Thermodynamics and Fluid Mechanics, 2007, 1(1): 1-5.
- [2] 张志彬,张开林,姚远. 机车传动齿轮箱温度场数字仿真[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(6): 14-16.
- [3] 任崇会,魏静,马跃,等. 基于动网格的齿轮箱内部流场数值模拟[J]. 机械强度, 2013, 35(6): 789-794.
- [4] 董春锋,林腾蛟,何泽银. 基于动网格的齿轮箱内部流场数值模拟[J]. 机械研究与应用, 2011, 24(2): 17-19, 22.
- [5] 高超,张开林,张雨,等. 基于流固耦合理论的高速齿轮箱内部流场数值分析[J]. 润滑与密封, 2018, 43(8): 69-75, 92.
- [6] 张鸣远,景思睿,李国君. 高等工程流体力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2012.
- [7] 江帆,黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
- [8] GUEYFFIER D, LI J, NADIM A, et al. Volume-of-fluid interface tracking with smoothed surface stress methods for three-dimensional flows[J]. Journal of Computational Physics, 1999, 152(2): 423-456.

收稿日期: 2021 - 10 - 08