

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.03.12

# 基于增材制造技术的 空间曲面核燃料组件下管座设计

韩元吉<sup>1,2</sup>, 刘孟龙<sup>1,2</sup>, 简文均<sup>2</sup>, 张博<sup>2</sup>, 朱发文<sup>2</sup>, 蒲曾坪<sup>2</sup>

1. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213

2. 核能增材制造四川省重点实验室, 四川 成都 610213

**摘要:** 针对核燃料组件下管座在异物过滤、冷却剂流通与结构承载三大功能之间相互制约的设计难题, 本文基于增材制造技术一体成形的工艺特点, 引入 TRIZ(发明问题解决理论)创新设计方法, 通过技术矛盾分析与发明原理应用, 提出了一种具有空间曲面过滤流道的下管座功能一体化创新结构。该结构将传统平面过滤方式转化为空间曲面扫掠肋形式, 实现了异物过滤与结构承载的功能融合。在此基础上, 选取指数、多项式、贝塞尔、线性及正弦五种扫掠函数模型, 构建下管座典型结构单元, 开展异物过滤性能、冷却剂流通性能与结构强度的对比分析。数值分析结果表明, 所设计下管座在异物过滤方面表现优异, 最高过滤效率可达 93.3%, 其中贝塞尔与线性模型对细长型异物的过滤效率达 96.7%; 在冷却剂流通性能方面, 贝塞尔与正弦模型较多项式模型压降降低约 29%; 各模型结构强度差异较小, 曲面形式对承载性能影响不显著。综合多性能评价, 贝塞尔曲线扫掠模型在异物过滤、流通性能和结构强度三方面表现均衡, 为最优选型。本研究验证了增材制造与创新设计方法相结合在核燃料组件关键结构件研发中的可行性, 可为高性能下管座的设计与工程应用提供参考。

**关键词:** 核燃料组件; 增材制造; 空间曲面; 异物过滤; TRIZ

中图分类号: TL352 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)03-0088-07

## Design of Spatially Curved Bottom Nozzle of Fuel Assembly based on Additive Manufacturing Technology

HAN Yuanji<sup>1,2</sup>, LIU Menglong<sup>1,2</sup>, JIAN Wenjun<sup>2</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>, ZHU Fawen<sup>2</sup>, PU Zengping<sup>2</sup>

1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China

2. Nuclear Power Additive Manufacturing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610213, China

**Abstract:** To address the inherent design contradiction among the three primary functions of a nuclear fuel assembly bottom nozzle—debris filtration, coolant flow capacity, and structural load-bearing—this paper proposes an integrated functional-structural design featuring a spatially curved filtration channel. Leveraging the integral forming advantages of additive manufacturing technology and employing the TRIZ methodology through technical contradiction analysis and inventive principles, the proposed design transforms conventional planar filtration into a spatially curved swept-rib structure, achieving functional integration of debris filtration and structural support. Based on this concept, five swept-function models—exponential, polynomial, Bezier, linear, and sinusoidal—were selected to construct representative structural units of the bottom nozzle. Comparative analyses were conducted on debris filtration efficiency, coolant flow performance, and structural strength. Numerical results indicate that the designed bottom nozzle exhibits excellent debris filtration performance, with a maximum filtration efficiency of 93.3%. Specifically, the Bezier and linear models achieve a filtration efficiency of 96.7% for elongated debris. Regarding coolant flow performance, the Bezier and sinusoidal models reduce pressure drop by approximately 29% compared to the polynomial model. Differences in structural strength among the five models are negli-

收稿日期: 2025-12-15 修回日期: 2026-01-30

基金项目: 中核集团“青年英才项目”; 中国核动力研究设计院青年人才基金(KJCX-2024-QR-04)

作者简介: 韩元吉(1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事核燃料组件研究。E-mail: hanyuanji\_dut@163.com。

gible, suggesting that the curved geometry has a limited impact on load-bearing capacity. Based on a comprehensive multi-performance evaluation, the Bezier curve swept model demonstrates the most balanced performance across debris filtration, coolant flow capacity, and structural strength, making it the optimal design. This study validates the feasibility of integrating additive manufacturing with innovative design methodologies for the development of key structural components in nuclear fuel assemblies and provides a reference for the design and engineering application of high-performance bottom nozzles.

**Keywords:** nuclear fuel assembly; additive manufacturing; spatially curved surface; debris filtration; TRIZ

引用格式:韩元吉,刘孟龙,简文均,等.基于增材制造技术的空间曲面核燃料组件下管座设计[J].电焊机,2026,56(3):88-94.

Citation:HAN Yuanji, LIU Menglong, JIAN Wenjun, et al. Design of Spatially Curved Bottom Nozzle of Fuel Assembly based on Additive Manufacturing Technology[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(3): 88-94.

## 0 引言

核电是我国能源结构转型、实现“双碳”目标的重要基荷能源,2023年,中国新开工核电机组5台,核电工程建设投资完成额949亿元,创近5年最高水平。截至2023年底,在建核电机组26台,总装机容量3030万千瓦,均保持世界第一<sup>[1]</sup>。核燃料组件是核能反应堆中的核心部件,国内每年核燃料市场规模超200亿元,但欧美核发达国家占据市场98%,自主化燃料占比仅2%。为了适应核电的迅速发展和打破国外核发达国家的关键技术封锁,我国核燃料行业亟需突破核燃料技术封锁,确保核电粮食安全。核燃料的破损率是一项核心技术指标,燃料破损可导致数亿的经济损失,严重时可引发核事故危害公众安全。根据IAEA相关报告,因异物导致燃料破损占比已超30%,且逐年攀升。为降低燃料破损率,需要突破防异物下管座“卡脖子”关键技术。

核燃料组件下管座“支撑”“冷却剂流通”和“异物过滤”三大功能之间存在着内在的耦合和制约的关系,该产品的设计涉及结构力学、流体力学及两者耦合的学科研究,高性能核燃料组件下管座研发难度极大。目前商用堆中广泛应用的是分体式的结构设计,如法国AFA3G燃料组件,即将支撑和异物过滤功能分离设置在下管座不同零件,通过平面滤板实现异物过滤,该种设计各零件功能相互独立且异物过滤效率低。

近年来,增材制造技术在核燃料领域的应用得到重视和逐步推广,该技术的应用可为核燃料组件下管座的设计拓展了创新设计的空间。美国西屋公司于2020年已实现了对核燃料组件用阻流塞的

增材制造,并将其入堆应用<sup>[3]</sup>。中核建中核燃料元件有限公司也基于增材制造技术开展了核燃料组件下管座工艺研制,验证了该项制造技术应用于核燃料组件下管座的可行性和经济性<sup>[4]</sup>。中国核动力院的李权等基于SLM工艺,开展核燃料组件下管座全流程增材制造工艺研究,产品尺寸精度和表面粗糙度良好,产品力学性能较好<sup>[5]</sup>。上述研究主要聚焦于核燃料组件下管座的工艺方面,而增材制造一方面为核燃料下管座提供了新的制造途径,更为下管座的设计拓展了创新的空间,为突破下管座创新设计难题提供了新的解题思路。

本文基于增材制造技术的相应设计思维,对核燃料组件下管座采用了创新设计方法,形成了基于增材制造工艺的空间曲面特征的核燃料组件下管座创新方案,并进一步围绕着曲面参数选型开展了多方面的性能分析对比,形成了综合性能优良的核燃料组件下管座。

## 1 创新设计

### 1.1 创新设计方法

创新设计方法是一系列系统化的工具和流程,旨在激发创造性思维、解决复杂问题并推动突破性解决方案的产生,其中TRIZ(发明问题解决理论)旨在为各类发明问题寻找到具有范式的解决问题的创新途径<sup>[6-7]</sup>。

### 1.2 功能分析

下管座是核燃料底部部件,是核燃料组件的支撑结构,负责承载整个组件的重量,并将其稳定地固定在反应堆中。坚固的下管座可以确保核燃料

组件在运行过程中的稳定性;下管座的结构帮助确保冷却剂能够有效流过核燃料组件,从而保持适宜的温度,防止过热和潜在的安全风险;下管座设计中通常包含过滤结构,可以有效阻止反应堆内的异物(如金属颗粒、零件碎片等)进入核燃料组件。这些异物如果进入组件,可能会对燃料的热安全、流体动力学和反应堆的整体运行产生负面影响。上述三大功能是核燃料组件下管座的核心功能。

核燃料组件下管座的三大功能相互制约、互相耦合,下管座结构强度和冷却剂流通性能之间存在着矛盾,下管座结构强度越强,相应地下管座中的结构材料越多,则冷却剂流通性能越弱;下管座结构强度与异物过滤性能之间相互耦合,下管座异物过滤性能越强,异物过滤孔尺寸即越小数量越多,相应的结构材料体积增大,下管座结构强度越强;而异物过滤性能越强,异物通过下管座的难度增大,往往意味着冷却剂通过下管座的难度也随之增大,因此下管座冷却剂流通性能降低。

### 1.3 解决方案

基于核燃料组件下管座功能分析中发现的核燃料组件下管座三大功能的相互制约关系,可以梳理得到两对技术矛盾,“防异物性能强,而冷却剂流通性能弱”和“冷却剂流通性能强,而结构强度弱”,即可针对技术矛盾采用相应的发明原理予以解决。

针对“防异物性能强,而冷却剂流通性能弱”的技术矛盾,梳理了该技术矛盾影响的通用技术参数,即改善了异物等负面因素的影响,但恶化了冷却剂流通过程中的能量损失。

为确保核燃料组件下管座防异物性能及冷却剂流通性能,采用分割原理,结合核燃料组件燃料棒及导向管的布置特征,将下管座截面分割成单个小空间,在每个小空间中单独设计防异物结构,如图1所示。

在分割原理设计的基础上,基于增材制造赋予的结构设计空间,运用曲面化原理,将在平面上防异物的设计理念,转化为空间上实现过滤的设计理念,采用光滑平顺的扫掠曲线形成了具有高防异物性能特征的防异物结构单元,如图2所示。将该单元与分割后的下管座组合,形成下管座创新方案。

而针对“冷却剂流通性能强,而结构强度弱”的

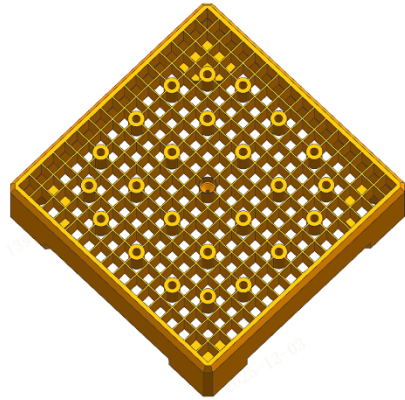


图1 下管座分割原理方案

Fig. 1 The bottom nozzle segmentation principle

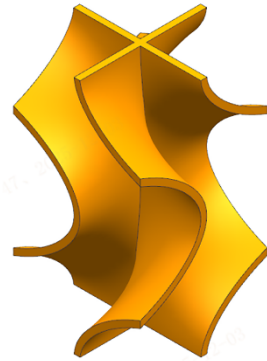


图2 扫掠肋空间曲面过滤单元

Fig. 2 The filtration element with spatial surface

技术矛盾,运用局部质量原理,形成了分割肋片与扫掠肋片非均匀厚度的设计,加厚分割肋片,具体如图3所示,充分运用直肋承载性能强的特征,节省截面空间的占用。最终形成了基于增材制造的空间曲面核燃料组件下管座初步方案,如图4所示。

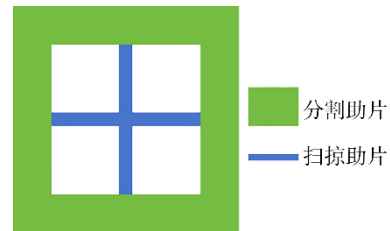


图3 扫掠肋和分割肋非均匀厚度示意

Fig. 3 Swept ribs and split ribs non-uniform thickness schematic diagram

## 2 曲面参数选型及方案评价

### 2.1 曲面参数选型

在形成的核燃料组件下管座初步方案的基础

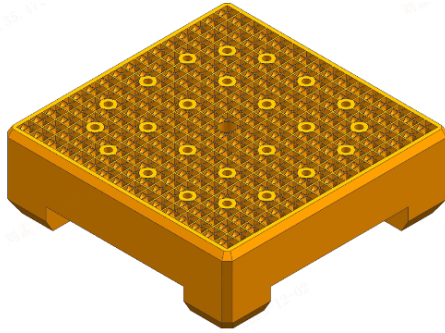


图 4 基于增材制造的空间曲面核燃料组件下管座初步方案  
Fig. 4 Preliminary design of nuclear fuel bottom nozzle based on additive manufacturing

上,对防异物结构特征扫掠肋进一步开展曲面参数选型和性能对比分析。目前已探索适合下管座防异物扫掠肋的扫掠函数模型共有 5 型,分别为指数模型、多项式模型、贝塞尔模型、线性模型、正弦模型。考虑下管座防异物功能需求,在各个模型参数中确定下管座扫掠肋扫掠角度规则为 $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 0^\circ$ ,以实现在小的扫掠角度条件下无通孔,确保高异物过滤性能。具体扫掠角度模型如下:

指数模型:

$$Ft = 90 \exp(-4 \times (2 \times t - 1)^2) \quad (1)$$

多项式模型:

$$Ft = 2880t^2 \times (1 - t)^2 \times (1 - 2 \times t + 2 \times t^2) \quad (2)$$

贝塞尔模型:

$$Ft = 1440t^2 \times (1 - t)^3 + 1440t^3 \times (1 - t)^2 \quad (3)$$

线性模型:

$$Ft = 180 \times (0.5 - \text{abs}(t - 0.5)) \quad (4)$$

正弦模型:

$$Ft = 90 \sin(180 \times t)^2 \quad (5)$$

上述各式中  $Ft$  为肋截面扫掠的角度,单位为 $^\circ$ ;  $t$  为在高度方向的扫掠行程归一化无量纲参数,范围为 $[0, 1]$ 。

由于上述各模型对应的核燃料组件下管座总体框架相同,仅扫掠肋防异物结构存在曲面特征差异,因此通过下管座特征单元对上述各模型的异物过滤性能、冷却剂流通性能和结构强度等方面的性能开展数值模拟和对比分析。

### 2.2 结构强度分析

基于有限元分析方法,对下管座结构特征单元开展结构强度有限元分析以对各型模型进行对比

评价。

有限元分析模型选取了具有代表性的典型异物过滤结构单元,对分析模型的两个相邻侧面设置固定约束,在分析模型上表面位于固定约束对角的端点设置了 120 N 下压力载荷,有限元模型网格单元采用实体有限元单元。

有限元分析结果见图 5,由图可知,对于不同的扫掠角度曲线模型,形成的下管座防异物结构整体刚度基本一致,差异很小。

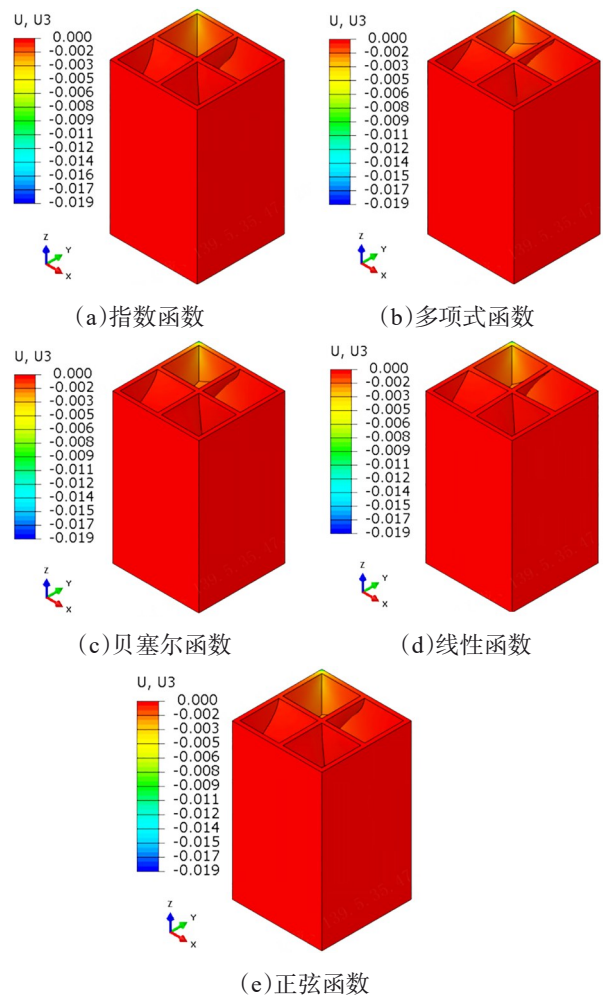


图 5 下管座典型单元模型力学分析位移结果(单位: mm)  
Fig. 5 mechanical analysis results of typical bottom nozzle element (unit: mm)

### 2.3 流场分析

基于有限体积法,对各模型的下管座结构单元开展冷却剂流场分析以对各型模型的冷却剂流通性能进行对比评价。

流场分析模型选取了具有代表性的典型异物

过滤结构单元,冷却剂入口流速取 5 m/s,出口为压力出口,四周非下管座区域设置为对称平面,下管座特征单元表面设置为壁面,计算模型取 Standard k-e 模型。

各个模型流场数值模拟结果如图 6 所示。流速分布云图结果表明,指数模型、贝塞尔模型、正弦模型出口流场相对均匀;而流场压力云图及压降结果表明,贝塞尔模型和正弦模型对比其余模型结构流阻更低,压降对比最大的多项式模型可降低约 29%。这表明采用不同的扫掠曲线模型,对于结构流阻的提升是具有明显效果的。

## 2.4 异物过滤分析

在冷却剂流场分析结果的基础上,采用有限体积法耦合离散元方法,对核燃料组件下管座异物过滤开展了数值模拟分析。数值模拟选取了核电站反应堆回路常见异物中较小的异物,考核各型过滤结构的异物过滤性能。在异物过滤分析中,异物在下管座周边冷却剂流场的驱使下,从下管座下方进入,大部分异物被阻挡在过滤结构外或卡滞在过滤结构中,由此实现了核燃料组件对冷却剂中的异物过滤,每种异物过滤结构每种规格异物均开展一次异物过滤分析,每次分析投入 15 个异物。

各型模型的异物分析结果如表 1 所示,典型异物过滤模拟结果见图 7,模拟结果表明本曲面结构设计下管座过滤结构均具有良好的异物过滤性能,部分模型异物过滤效率能够超过 90%,特别是对于细长型异物,能够实现高效过滤,贝塞尔模型和线性模型对于细长型异物(钢棒、弹簧)的过滤效率可达 96.7%。

各型模型过滤效率方面,线性模型>多项式模型>贝塞尔模型>指数模型>正弦模型。

## 2.5 增材制造工艺可行性分析

核燃料组件下管座主要使用 316L、304L 等牌号的不锈钢制造,该类核用级不锈钢已存在增材制造的下管座产品,如 Framatome 的 316L 不锈钢下管座、中核集团制备的 316L 不锈钢下管座<sup>[5]</sup>等,因此本文各型扫掠模型的下管座在材料方面均具有增材制造可行性。

核用不锈钢目前最成熟的核燃料组件下管座

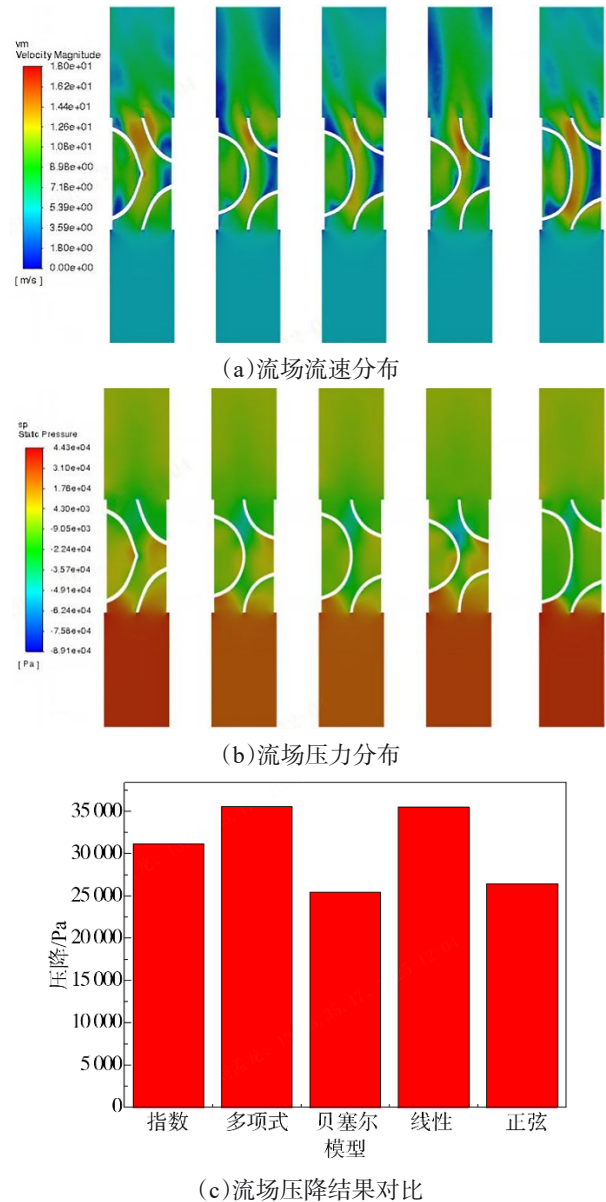


图 6 下管座典型单元模型流场分析结果

Fig. 6 Fluid analysis results of typical bottom nozzle element

增材制造工艺为选区激光熔化(SLM),该工艺应用于空间曲面结构时,需要结构设计具有自支撑结构特征或易去除支撑结构,本文各型扫掠模型的下管座创新方案中空间曲面结构特征体现在扫掠肋结构,具体参考图 2,该结构为小角度的平滑曲面结构,无大角度横折结构,依靠下管座扫掠肋结构自身即可实现自支撑,因此本文各型扫掠模型的下管座在工艺和结构支撑方面均具有增材制造可行性。

## 2.6 方案评价及小结

通过对各型扫掠模型的下管座过滤结构单元

表1 各型异物过滤结构单元异物过滤效率

Table 1 Debris filtration efficiency of typical bottom nozzle element

异物类型	指数模型	多项式模型	贝塞尔模型	线性模型	正弦模型
钢棒 $\Phi 1 \times 8$	9/15	11/15	12/15	12/15	10/15
钢棒 $\Phi 1.8 \times 10$	15/15	15/15	15/15	15/15	15/15
钢棒 $\Phi 1 \times 16$	15/15	15/15	15/15	15/15	15/15
钢棒 $\Phi 1 \times 32$	15/15	15/15	15/15	15/15	15/15
螺母 M2 $\times 1.2$	9/15	10/15	8/15	11/15	6/15
螺母 M3 $\times 1.8$	15/15	15/15	15/15	15/15	15/15
弹簧 1.8 $\times 10$	15/15	15/15	15/15	15/15	15/15
异物过滤效率	88.6%	91.4%	90.5%	93.3%	86.7%

注:表格中分子为被拦截的异物数量,分母为总的异物数量。

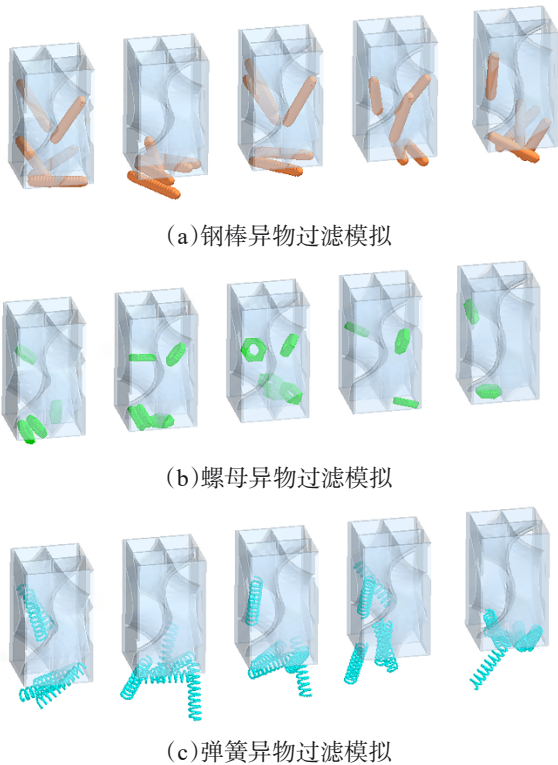


图7 下管座典型单元模型异物过滤模拟

Fig. 7 Debris filtration analysis results of typical bottom nozzle element

的性能分析,结果表明:

(1)扫掠模型的选取对结构强度影响较小,各型模型对应的有限元分析结果中在相同载荷作用下的变形量基本一致。

(2)选用合适的扫掠模型能够有效地降低结构流阻,贝塞尔模型和正弦模型对比其余模型结构流阻更低,压降对比最大的多项式模型可降低约29%。

(3)本下管座空间曲面异物过滤结构具有良好

的异物过滤性能,部分模型异物过滤效率能够超过90%,特别是对于细长型异物,能够实现高效过滤,贝塞尔模型和线性模型对于细长型异物(钢棒、弹簧)的过滤效率可达96.7%。

(4)各型扫掠模型的下管座在材料、工艺和结构支撑方面均具有良好的增材制造可行性。

综合结构强度、冷却剂流阻及异物过滤等三方面性能考虑,优选贝塞尔曲线扫掠模型的空间曲面核燃料组件下管座。

### 3 结论

依托增材制造技术赋予的广阔设计空间,本文基于创新设计方法的技术矛盾、发明原理等创新工具,形成了具有高异物过滤性能、高流通性能的结构一体化核燃料组件下管座创新方案。该方案既实现了核燃料组件下管座性能的提升,也为后续基于增材制造的相关结构设计提供了启发和参考。在此基础上对多种扫掠模型的下管座曲面结构单元开展了性能分析,结果表明:

(1)扫掠模型的选取对空间曲面下管座结构强度的影响较小。

(2)本下管座设计具有优良的异物过滤性能,最高异物过滤效率可达93.3%。

(3)优选贝塞尔曲线扫掠模型作为下管座异物过滤单元的扫掠曲线模型,实现异物过滤、冷却剂流通和结构强度三方面俱佳的创新方案。

### 参考文献:

[1] 中国核能行业协会. 中国核能发展报告 2024 [R]. 2024.

[2] 张莉,蔡莉,赵松. 核领域3D打印技术进展与应用[J]. 国外核新闻,2021(4):27-29.  
ZHANG L, CAI L, ZHAO S. Progress and Application of 3D Printing Technology in the Nuclear Field[J]. Foreign Nuclear News, 2021(4): 27-29.

[3] YOSRA K. Westinghouse successfully installed metal 3D-Printed thimble plugging device in Exelon's Byron Unit 1 Nuclear plant [EB/OL] (2020-05) [2026-01-03]. <https://3dadept.com/westinghouse-successfully-installed-metal-3d-printed-thimble-plugging-device->

- in-exelons-byron-unit-1-nuclear-plant/.
- [4] 邓话,秦国鹏. 核燃料零部件的金属增材制造技术研发[J]. 中国核电, 2020(13):769-773+787.  
DENG H, QIN G P. The Research on Metal Additive Manufacturing Technology of Nuclear Fuel Parts [J]. China Nuclear Power, 2020(13): 769-773+787.
- [5] 李权,任全耀,郑美银,等. 燃料组件下管座增材制造技术研究[J]. 原子能科学技术, 2023(57):238-245.  
LI Q, REN Q Y, ZHENG M Y, et al. Research on Additive Manufacturing Technology for Bottom Nozzle of Fuel Assembly [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2023(57):238-245.
- [6] 创新方法研究会. 创新方法教程[M]. 北京:高等教育出版社, 2012.
- [7] 赵敏,张武城,王冠殊. TRIZ进阶及实战:大道至简的发明方法[M]. 北京:机械工业出版社, 2015.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第66页

- martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2016, 108:308-318.
- [14] ZHANG M, YANG Y, WANG D, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V gradient structures manufactured by selective laser melting [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 736:288-297.
- [15] 蒋军杰,王永彪,肖志玲,等. 退火温度对激光选区熔化成形TA15钛合金微观组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(7):241-428.  
JIANG J J, WANG Y B, XIAO Z L, et al. Effect of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of selective laser melted TA15 titanium alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(7):241-248.
- [16] LUECKE W E, SLOTWINSKI J A. Mechanical properties of austenitic stainless steel made by additive manufacturing [J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2014, 119:398-418.
- [17] 李维,康聪,侯智敏,等. 热处理对Ti31合金显微组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(16):169-173.  
LI W, KANG C, HOU Z M, et al. Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti31 Alloy [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(16):169-173.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>