

# 喷砂对核燃料管座平面冲蚀的数值模拟研究

周锐焯

中广核铀业发展有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14377

**[摘要]** 本研究采用数值模拟探究气动喷砂对核燃料组件管座平面的冲蚀影响。基于实际工况建立分析模型,利用Fluent软件构建二维轴对称模型,并采用基于欧拉—拉格朗日方法的离散相模型(DPM)进行模拟。通过改变平板与喷嘴距离及颗粒粒径进行多组对照实验,分析其对冲蚀程度和分布的影响。结果表明,流场状态与颗粒运动共同影响冲蚀。板激波和平板压力分布决定了颗粒的一次和多次冲蚀效果,导致平板中心冲击动量最高,并沿径向在波动中递减。优化参数为:喷嘴出口距离约50–100mm,此时冲蚀半径和效果较佳;粒径为0.5–1.0mm时,平板中心平均冲击动量较大。本研究为核燃料管座的设计制造及喷砂工艺优化提供了理论依据,有助于提升管座抗冲蚀性能,延长使用寿命,保障安全运行。

**[关键词]** 喷砂; 管座; 流体仿真

**中图分类号:** TF526 **文献标识码:** A

## Numerical simulation study on the erosion of nuclear fuel tube seat plane by sandblasting

Ruihan Zhou

CGNPC Uranium Resources CO.Ltd

**[Abstract]** This study uses numerical simulation to investigate the erosion effect of aerodynamic sandblasting on the plane of nuclear fuel assembly tube sockets. Establish an analysis model based on actual working conditions, use Fluent software to construct a two-dimensional axisymmetric model, and use a discrete phase model (DPM) based on Euler Lagrange method for simulation. Multiple control experiments were conducted by changing the distance between the plate and nozzle, as well as the particle size, to analyze their effects on the degree and distribution of erosion. The results indicate that the flow field state and particle motion jointly affect erosion. The shock wave and pressure distribution on the plate determine the primary and multiple erosion effects of particles, resulting in the highest impact momentum at the center of the plate, which decreases radially in the wave. The optimized parameters are: the nozzle outlet distance is about 50–100mm, at which point the erosion radius and effect are optimal; When the particle size is 0.5–1.0mm, the average impact momentum at the center of the flat plate is relatively large. This study provides a theoretical basis for the design, manufacturing, and sandblasting process optimization of nuclear fuel tube sockets, which helps to improve their erosion resistance, extend their service life, and ensure safe operation.

**[Key words]** sandblasting; Pipe seat; fluid simulation

### 前言

核燃料组件管座是关键部件,支撑燃料棒、引导冷却剂流并维持几何稳定。其平面作为冷却剂关键界面,其形貌、精度及抗冲蚀性直接影响流动、传热与振动。在反应堆高温高压、辐照及流振等多场耦合环境下,管座平面长期受高速含颗粒冷却剂冲蚀,易导致材料退化与几何失稳,引发安全隐患。研究其冲蚀损伤机理对优化设计和延长寿命至关重要。

气动喷砂是一种利用压缩空气作为动力,将磨料通过喷嘴加速后喷射到工件表面的表面处理技术<sup>[1]</sup>。气动喷砂通过压缩

空气将具有一定尺寸的磨料喷出,使其以高速撞击工件表面,从而实现表面清理、粗糙化、强化等效果<sup>[2]</sup>。喷嘴是气动喷砂系统中的关键部件,其设计直接影响喷砂效率和效果<sup>[3]</sup>。本文主要研究气动喷砂对平板的冲蚀规律,通过建立不同距离的平板以及不同直径的磨料,分别对其进行数值模拟。最后分析喷射距离和磨料直径对冲蚀效果的影响,为工程实践中气动喷砂处理的优化设计提供理论依据和指导。

### 1 有限元仿真设置

#### 1.1 相关假设

由于气动喷砂过程中气流速度极快,因此气相湍流模型选择S-A湍流模型。对于气固两相而言,采用欧拉-拉格朗日法的离散相模型<sup>[4]</sup>。为了进一步研究颗粒的运动状态与冲蚀情况,本模型考虑了气固两相之间的耦合,即使用了双向耦合模型。此外,在实际冲蚀中,影响因素复杂,难以全面考虑颗粒的形状与实际运动状态,所以对于固体颗粒在壁面上的机械冲蚀作用做如下假设:

(1) 固体颗粒对壁面的冲蚀作用与固体颗粒在固壁位置的动量大小成正比<sup>[5]</sup>;

(2) 不考虑固体颗粒温度的影响;

(3) 不考虑固体颗粒对壁面的具体冲蚀程度,只考虑不同条件下颗粒对壁面冲蚀位置及相对冲蚀量<sup>[6]</sup>。

### 1.2 冲蚀磨损的定义

根据Fluent中内置的相关模块得到磨损率,磨损速率公式见式(1)。

$$R_{erosion} = \sum_{p=1}^{N_{particles}} \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^b(v)}{A_{face}} \quad (1)$$

式中 $C(d_p)$ ——颗粒直径函数;

$\alpha$ ——颗粒对壁面冲击角(侵入角);

$f(\alpha)$ ——侵入角函数;

$v$ ——颗粒相对壁面的速度;

$b(v)$ ——相对速度的函数,缺省情况下, $C=1, f=1, b=0$ 。

### 1.3 计算区域

由于喷嘴流场复杂,在喷嘴出口处,气体流动状态与具体的空间结构相关,而平板的加入对气体流场的影响很大,因此需要研究与喷嘴距离不同的平板,对气体流场有何影响。平板的位置如图1所示,平板a-d距喷嘴出口的距离分别为10mm, 50mm, 100mm, 200mm,研究气动喷砂对不同位置平板的冲蚀情况。

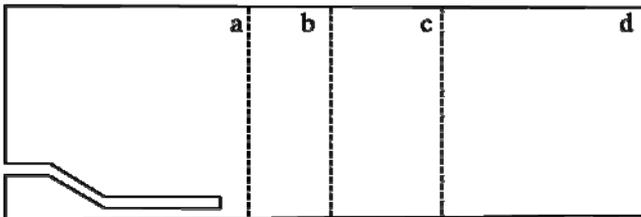


图1 平板位置图

### 1.4 网格划分与边界设置

图2为距喷嘴出口的距离为200mm的平板的网格划分,同时标注了仿真时的边界设置。1为压力入口边界,2为对称轴,3为喷砂处理的壁面(平板表面),4和5为压力远场边界(无反射边界),6为喷嘴的内外壁面。应用非结构的三角形网格划分的计算域,并在喷嘴出口和平板表面加密网格,以便能够更好的捕捉到喷嘴出口处的流场和壁面冲蚀信息。

## 2 平板的冲蚀的仿真结果及分析

### 2.1 气体流场仿真分析

通过仿真获得不同距离平板对应的速度场,经对称处理得

到图3。分析平板a速度场:气流离开喷嘴出口瞬间速度急剧增加;在平板前方存在速度骤减区域(板激波)。这是因为超声速喷流受平板阻挡,气流相互作用被迫形成激波,使速度降至亚声速。

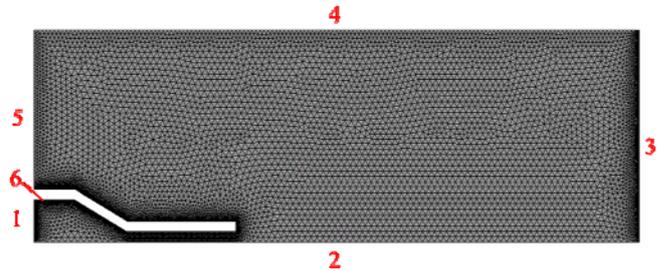


图2 网格划分与边界设置

进一步观察平板b-d:在喷嘴中轴线上观察到明显的马赫盘(一种经典气体现象)。当超声速气流离开喷嘴时,与大气压相互作用产生激波与膨胀波的交替,形成等间距圆环状马赫盘。随着平板距喷嘴出口距离L增大,平板对气流影响减弱,第一马赫盘位置逐渐远离喷嘴出口。L增大至阈值,平板对上游气流影响显著减弱,第一马赫盘位置趋于稳定。针对平板b、c:超声速气流因压力高于空气而向外扩展,当压力低于临界值又受外界气压作用向内收缩,反复形成等间距圆环,最终在平板处形成板激波。但由于L已较大,此板激波范围和影响较小。L继续增大(平板d):气流离开喷嘴一定距离后,压力和速度不再反复,呈现随距离逐渐降低趋势,此时平板前几乎不再产生板激波。

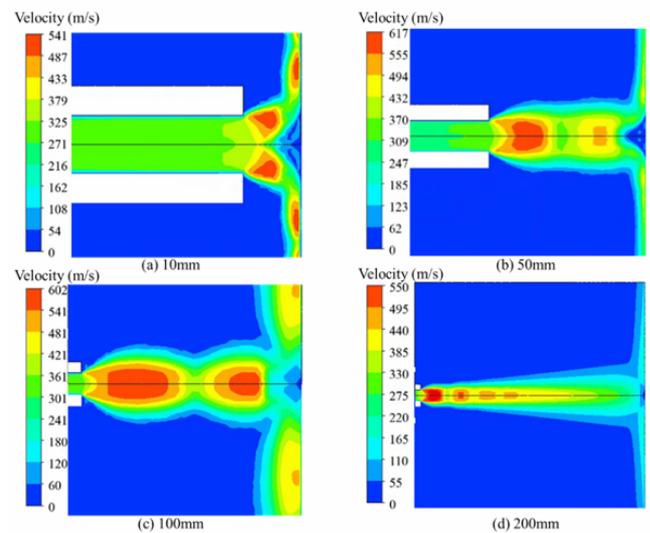


图3 平板在不同位置下的速度分布云图

图4展示了不同L时平板沿径向的压力分布:无论L大小,整体压力趋势均沿径向逐渐降低。但平板a和b(距喷嘴很近)出现特殊情况:靠近中心区域压力呈现先降后升,随后在波动中降低。原因在于:L较小导致平板整体压力较高,板激波作用下表面压力与大气压强烈相互作用,引发不稳定波动。针对平板a:中心压力大,但在特定半径圆环上压力再次升高(最大值并非在中心)。这是板激波与喷流激波相交形成的剪切层所致。激波对平

板a影响强烈, 内部气体形成气团, 其外缘强烈作用平板导致压力峰值出现在该圆环处。

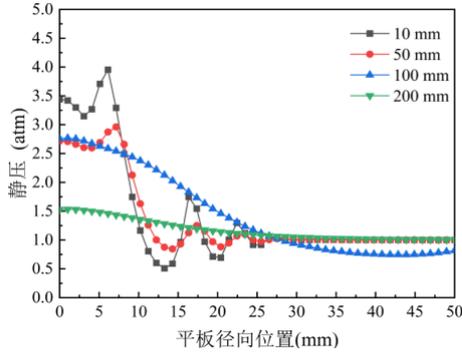


图4 平板上的静压分布曲线

2.2 固体颗粒对平板的冲蚀

为得到固体颗粒对平板的冲击动量的分布, 本模型不考虑壁面材质的影响, 将式(1)中相关参数的设置为 $C=1, f=1, b=1$ , 则固体颗粒对平板的平均冲击动量单位为固体颗粒动量/(面积×时间)。

图5展示了0.5mm、1.0mm与2.0mm粒径颗粒对不同距离平板的平均冲击动量分布。分析发现:

(1) 平板距离(L)的影响:

$L=10\text{mm}$  (平板a): 中心受冲击最大, 但冲击动量不高, 且在5mm径向距离内迅速衰减。板激波及气流影响导致颗粒到达表面时速度未达最大, 易在中心积聚, 影响喷砂效果。

$L$ 增大 (平板b-c): 颗粒被气体加速距离延长, 冲击半径变大, 冲击动量值较高, 适合作为最佳工艺参数区间。

$L$ 过大 (平板d): 因气流速度衰减和颗粒分散, 冲击半径显著减小。

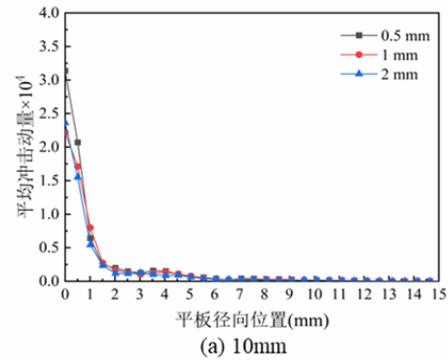
最佳 $L$ 范围: 综合考虑冲击效果,  $L=50-100\text{mm}$ 较佳。在 $L=100\text{mm}$ 时, 冲击动量沿径向下降且波动明显, 可能与近壁面气流波动及颗粒多次冲蚀效应有关。

$L$ 变化规律:  $L=10-50\text{mm}$ 时, 冲蚀动量随 $L$ 增大而增加, 此时气体加速距离延长为主因;  $L=50-100\text{mm}$ 时, 冲蚀动量随 $L$ 增大而下降时, 此时速度损失为主因;  $L=200\text{mm}$ 时, 因冲蚀范围显著减小导致中心处平均冲蚀动量反而增加。

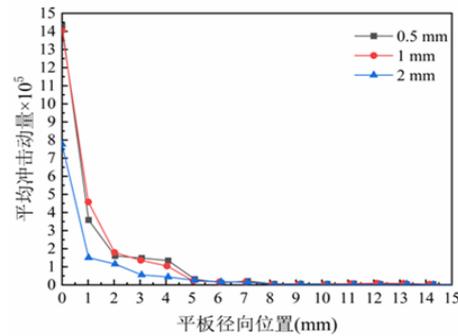
(2) 颗粒粒径(d)的影响:

$d=2.0\text{mm}$ : 在所有 $L$ 下平均冲蚀动量最小, 因其加速状态和冲蚀角度不佳。

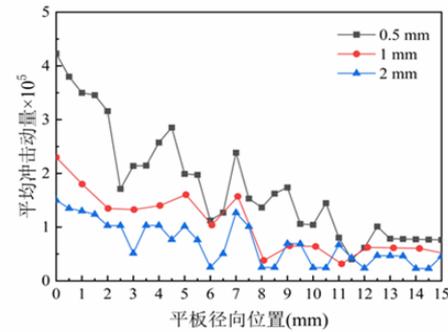
$d=0.5-1.0\text{mm}$ : 冲蚀效果较好。  $d=0.5\text{mm}$ 颗粒通常有更均匀的冲蚀范围和更高的动量, 但与 $d=1.0\text{mm}$ 颗粒的效果差异不具决定性, 具体选择需结合实际冲蚀需求。综上所述, 当平板距离喷嘴出口50-100mm时能有较大的冲蚀范围, 此时颗粒受所利用的气流动量也较多。具体的冲蚀动量与平板距喷嘴出口的距离及冲蚀范围有关, 通常而言当颗粒粒径处于0.5-1.0mm区间内能有较好的冲蚀效果。具体的距离与颗粒粒径选取仍需要根据实际工况来确定。



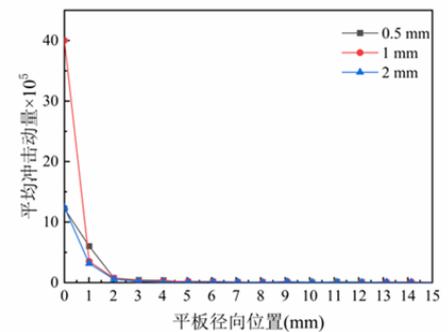
(a) 10mm



(b) 50mm



(c) 100mm



(d) 200mm

图5 固体颗粒对平板的冲量分布

通过上述仿真得到的结果可以为工程中的实际应用提供指导, 可以根据实际待喷砂处的位置与材料特性, 来选择磨料粒径

和喷嘴距工件的距离等具体参数。

### 3 结语

(1) 通过建立喷嘴与平板的几何模型, 结合S-A湍流模型与欧拉-拉格朗日的气固两相模型, 最终建立喷砂的模拟模型。

(2) 通过仿真研究气体流场, 结合颗粒的实际冲蚀效果可以发现, 流场的运动状态与固体颗粒对不同位置的平板的冲蚀情况有较强联系。板激波与平板上的压力分布影响着颗粒的一次冲蚀与多次冲蚀效果, 最终形成了平板中心冲蚀动量高, 且冲蚀动量沿平板径向在波动中逐渐降低的现象。

(3) 对具体冲蚀工艺而言, 当平板距离喷嘴出口约50-100mm时有着较好的冲蚀半径及冲击效果; 而0.5-1.0mm粒径下的磨料尺寸对平板中心有着较大的平均冲击动量。

### [参考文献]

[1] 冯益华. 新型陶瓷喷砂嘴的研究开发及其冲蚀磨损机理

研究[D]. 济南: 山东大学, 2003.

[2] 李成贤. 喷砂在零件表面处理中的应用[J]. 材料保护, 1994, 27(8): 33-36.

[3] 王丽, 冯益华. 基于气固两相流理论的陶瓷喷砂嘴冲蚀磨损研究[J]. 山东轻工业学院学报, 2005, 15(2): 1-4.

[4] 叶旭初, 胡道和. CFD技术与工程应用[J]. 中国水泥, 2003, (2): 29-32.

[5] 毛亚黎. 超声速喷流撞击平板的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2000.

[6] 傅德彬, 姜毅. 燃气射流气固两相数值模拟与颗粒冲刷分析[J]. 弹簧与制导学报, 2004, 24(1): 63-66.

### 作者简介:

周锐焱(1998--), 男, 汉族, 四川宜宾人, 硕士, 助理工程师, 从事核燃料质量监督与控制研究。