

透平末级叶片材料抗水蚀特性的数值研究

邸娟<sup>1</sup>, 王顺森<sup>2</sup>, 蒋希航<sup>3</sup>, 颜晓江<sup>2</sup>, 周伟<sup>4</sup>

(1. 太原科技大学机械工程学院, 030024, 太原; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;  
3. 纽约州立大学石溪分校机械工程系, 11794, 美国纽约; 4. 中南大学轨道交通安全教育部重点实验室, 410075, 长沙)

**摘要:** 基于非线性显式动力学软件 ANSYS LS-DYNA,采用光滑粒子流体动力学和有限元耦合算法(FEM-SPH)建立了汽轮机典型末级叶片基材 17-4PH(0Cr17Ni4Cu4Nb)的高速水柱射流撞击模型,并进行了网格无关性验证,模拟了高速射流与靶材的撞击过程,研究了射流角度、射流速度和表面粗糙度对靶材水蚀特性的影响。结果表明:相同靶材表面结构下,射流角度越大,靶材水蚀越严重;表面粗糙度对水蚀影响较大,10  $\mu\text{m}$  凹槽试样的质量损失平均为 2  $\mu\text{m}$  凹槽试样的 1.6 倍,2  $\mu\text{m}$  凹槽试样的质量损失约为光滑表面试样的 1.4 倍;提高靶材表面光洁度,能促进水滴压力波的自由扩展,显著降低撞击压力,从而提高材料的抗水蚀性能;射流速度越大,材料水蚀质量损失越多,靶材的水蚀累积质量损失与射流速度成指数关系,拟合得到速度指数约为 3.83。

**关键词:** 叶片;液固冲击;水蚀;表面粗糙度;数值模拟

**中图分类号:** TK263.3   **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202102005   **文章编号:** 0253-987X(2021)02-0038-09



OSID 码

Numerical Research on Water Erosion Resistance Characteristics of the Substrate Material of Last Stage Blades in Steam Turbine

DI Juan<sup>1</sup>, WANG Shunsen<sup>2</sup>, JIANG Xihang<sup>3</sup>, YAN Xiaojiang<sup>2</sup>, ZHOU Wei<sup>4</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;  
2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
3. Department of Mechanical Engineering, State University of New York at Stony Brook, New York 11794, USA;  
4. Key Laboratory of Traffic Safety on Track of Ministry of Education, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** The high-speed water jet impact model of 17-4PH (0Cr17Ni4Cu4Nb) is established by using the smoothed particle hydrodynamics (SPH) and finite element method (FEM) coupling algorithm (SPH-FEM) based on the nonlinear explicit software ANSYS LS-DYNA. The grid independence is verified and the impact process between high-speed jet and target is simulated. The influences of jet angle, jet velocity and surface roughness on the water erosion characteristics of the target material are systematically studied. The results show that under the same target surface structure, the greater the initial jet angle of the target surface is, the more serious the water erosion damage of material becomes. Surface roughness has a great influence on water erosion. The average mass loss of the 10  $\mu\text{m}$  groove samples is 1.6 times that of the 2  $\mu\text{m}$  groove samples. And the average mass loss of the 2  $\mu\text{m}$  groove sample is approximately 1.4 times that of a smooth surface sample. The improvement of the surface smoothness can promote the free

收稿日期: 2020-08-28。 作者简介: 邸娟(1988—),女,讲师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201204);  
山西省高等学校科技创新计划资助项目(2020L0346);山西省优秀博士毕业生来晋工作奖励资助基金资助项目(20202020)。  
网络出版时间: 2020-11-12    网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20201112.1114.004.html>

expansion of the pressure wave of the water droplets and significantly reduce the impact pressure, thereby improve water erosion resistance of the material. The mass loss of the material increases with the increase of jet velocity. There is an exponential relationship between the cumulative water erosion mass loss of the target material and the jet velocity. Fitting results show that the velocity exponent of water erosion is about 3.83.

**Keywords:** blade; liquid-solid impact; water erosion; surface roughness; numerical simulation

火电和核电凝汽式汽轮机的末级叶片长期工作在湿蒸气区,在运行过程中常常遭受严重的水滴冲蚀。冲蚀不仅会导致叶片的气动性能恶化,降低级效率,而且威胁汽轮机的安全运行,是目前亟需解决的关键问题。随着汽轮机末级叶片发展得越来越长,如不采取有效措施,水蚀现象将变得更严重。

目前常用的防水蚀措施主要为2种:主动式和被动式防水蚀。主动式防水蚀是指从汽轮机结构设计方面减少有害水滴的产生。被动式防水蚀是指采用更抗水蚀的叶片材料或针对叶片易水蚀的区域进行强化。被动式防护的核心问题为高速液固撞击引起的材料损伤。研究高速液固撞击机理可为提高叶片水蚀防护能力提供关键性的意见或建议。关于汽轮机叶片水蚀及高速液固撞击问题,国内外许多学者进行了大量研究。

在试验研究方面,Hattori等研究了冲击角对S15C、SUS304和STPA24 3种管道钢材料水蚀的影响,试验结果表明,钢管的冲蚀量与 $V_0 \sin \theta$ 成正比,且3种钢的最大冲蚀深度均可以表达为 $\sin^n \theta$ 的函数,其中指数 $n=1.2 \sim 2.5$ , $V_0$ 为冲蚀速度, $\theta$ 为冲蚀角度<sup>[1]</sup>。Oka等利用水射流设备对几种陶瓷块和涂层材料进行水滴冲击试验,并建立了损伤参数与力学性能之间的关系,结果表明,氧化锆具有良好的耐蚀性,在所有测试的陶瓷材料中,氧化锆的损伤速率最低,潜伏期最长,耐蚀性最好;不同陶瓷材料的水蚀率随液滴速度的变化呈指数关系,在较高的碰撞速度区域,几种陶瓷材料速度指数均为3<sup>[2]</sup>。Thomas基于旋转喷射试验装置,通过几个典型水蚀阶段中靶面的变化,探索了液滴冲蚀下铜、黄铜、低碳钢和硅钢等金属及合金材料的水蚀特性<sup>[3]</sup>。Ahmad等利用磨损试验台,研究了5种汽轮机叶片材料的液滴冲击磨损性能,讨论了液滴冲击速度、冲击角度、表面产生的锯齿及材料的损伤程度等因素对水蚀的影响,并得出水蚀质量损失与冲击速度呈指数关系,为 $\Delta m \propto V_0^n$ ,对于韧性材料, $n=3.3 \sim 5$ ,对于脆性材料 $n=6 \sim 9$ <sup>[4]</sup>。不少研究者试图将材料的抗水蚀性与一组定义良好的宏观力学性能相关

联。研究发现,材料的硬度、回弹率、韧性、抗拉强度、延性和应变能对材料承受液滴冲蚀的能力有显著影响<sup>[4]</sup>。Heymann研究表明,水蚀磨损量一般与维氏硬度的 $2 \sim 2.5$ 次方成正比<sup>[5]</sup>。Di等基于自主研发的高速水柱射流冲击实验台对叶片基材17-4PH和司太立合金的抗水蚀性能及冲后表面形貌进行了研究,结果表明,硬度不是决定司太立合金抗水蚀性能的决定性因素<sup>[6]</sup>。截至目前,还没有一种材料参数或组合参数能成为材料抗水蚀性能的判据<sup>[7-9]</sup>。Kirols等研究了含12%(质量分数)Cr马氏体钢和Ti6Al4V材料表面粗糙度对水蚀性能的影响,结果表明靶材表面抛光处理能显著增加材料潜伏期,且材料表面的粗糙度和不规则性是影响材料水蚀性能的主要因素,这些因素加速了水蚀损伤,从而影响最大水蚀率<sup>[10]</sup>。

在数值模拟方面,国内外许多研究者尝试利用基于有限元的数值方法来讨论材料的水蚀问题。数值方法不仅能够灵活便捷地针对不同因素(如材料类型、颗粒速度、尺寸、形状和冲击角等)的水蚀行为进行模拟,而且可以大大节约试验周期和成本。Mabrouki等使用任意欧拉-拉格朗日耦合方法(ALE)对弹塑性材料铝合金(A2024T3)进行了数值模拟分析,模拟结果很好地展示了撞击过程中射流和靶材的运动<sup>[11]</sup>。Haller等着重模拟了速度为500 m/s,直径为200  $\mu\text{m}$ 的液滴撞击刚体平面的过程,阐述了撞击过程中液体的压缩过程、激波的传递过程及侧向射流的产生<sup>[12]</sup>。Ma将有限元法和光滑粒子流体动力学(SPH)方法相结合,研究了高速水射流冲击靶材的过程并描述了水蚀机理;通过与试验结果的比较,证明了该耦合方法的有效性,并比较了有限元耦合光滑粒子流体动力学方法和ALE方法,指出在相同计算精度条件下,有限元耦合光滑粒子流体动力学方法比ALE方法更节省计算资源<sup>[13]</sup>。Hsu等使用耦合拉格朗日-欧拉法(CEL),模拟了速度为570 m/s的水射流撞击PMMA靶材的过程,发现数值模拟结果与试验结果吻合,且数值模拟对试验难以得到的细节做了很好的补充<sup>[14]</sup>。

汪勇等通过 SPH 耦合有限元算法(FEM)模拟计算了高速液滴撞击 PMMA 的过程,指出撞击后产生的高速侧向射流是固体发生破坏的主要原因,同时对撞击过程的激波动态结构进行了分析,得到了撞击过程中压力分布的合理解释<sup>[15]</sup>。

综上所述,目前已有很多学者针对液固撞击过程进行了大量理论、试验和数值研究。总体而言,由于水蚀过程的复杂性,加之其在不同靶材和不同水蚀环境下的差异性,因此对材料水蚀规律和机理还缺乏深入的理解,如靶材表面形貌在水蚀过程中的演化特征,水蚀失效模式及不同表面强化工艺影响其抗水蚀性能的内在深层原因,材料表面粗糙度、射流速度及角度对水蚀性能的影响等。本文基于 FEM-SPH 耦合算法,分析射流角度、射流速度及材料表面粗糙度对汽轮机典型末级叶片基材 17-4PH 抗水蚀性能的影响,有助于进一步理解叶片材料水蚀规律,指导工艺参数优化。

## 1 液固撞击理论和数值方法

### 1.1 液固撞击理论

Cook<sup>[16]</sup>假定被撞击固体是刚体并且撞击是一维的,在此情况下,根据能量守恒原理,液体在撞击前的动能转化为液体的压缩能,由此可推导出“水锤”的压力公式为

$$P = \rho_0 C_0 V_0 \quad (1)$$

式中: $P$  为液体撞击固体所产生的撞击压力,即“水锤”压力,Pa; $\rho_0$  为未受扰动时液体的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $C_0$  是未受扰动时液体的声速, $\text{m}/\text{s}$ ; $V_0$  为射流速度, $\text{m}/\text{s}$ 。

由式(1)可知,撞击产生的压力在发生撞击之后会急速下降,这是因为在这之后从撞击区域向液体和靶材中释放了压力波。如果撞击持续进行,由伯努利方程可推得,撞击压力将会达到一个稳定值。平稳阶段的撞击压力为

$$P_s = \frac{1}{2} \rho_0 V_0^2 \quad (2)$$

在 Cook 对水锤压力理论研究的基础上,Heymann 指出公式(2)仅在低速撞击的情况下近似成立,在高速撞击时液体的声速  $C_0$  应该被相应于液体压力升高和质点速度改变的激波波速  $C'_0$  取代<sup>[17]</sup>。Heymann 利用质量守恒方程和动量守恒方程推导出改进后的“水锤”压力公式

$$P = \rho_0 C'_0 V_0 \quad (3)$$

式中: $C'_0$  为液体的激波波速( $\text{m}/\text{s}$ ),数学表达式为

$$C'_0 = C_0 + kV_0 \quad (4)$$

其中  $k$  为考虑液体性质的常数,在液体是水的情况下取 2。

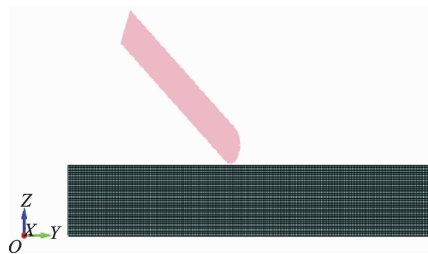
考虑到在数值计算中通常采用三次方关系的激波关系式<sup>[18-19]</sup>,它比 Heymann 线性拟合的关系式(3)准确度高,因此之后在讨论水锤压力理论值时都用激波三次方关系式计算得出的数值,即

$$C'_0 = C_0 + 2.56V_0 - 1.986V_0^2 C'_0 + 0.226 \ 8V_0^3 C_0'^2 \quad (5)$$

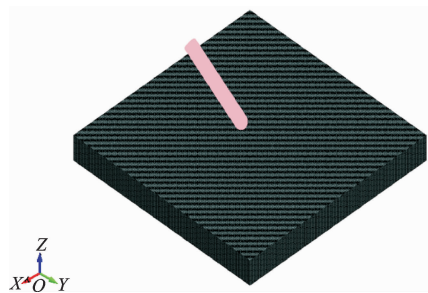
在本模拟中,水柱射流速度为  $650 \text{ m}/\text{s}$ ,水中声速为  $1 \ 480 \text{ m}/\text{s}$ ,解得  $C'_0 = 2 \ 858 \text{ m}/\text{s}$ , $P = 1.854 \text{ GPa}$ 。

### 1.2 计算模型

图 1 是水柱射流冲击靶材的计算模型,取射流直径为  $0.15 \text{ mm}$ ,射流高度为  $1 \text{ mm}$ 。射流与靶材之间取间隔距离为  $0.1 \text{ mm}$ ,以防止在计算前模型有初始穿透。设置靶材长、宽均为  $1 \text{ mm}$ ,高度为  $0.3 \text{ mm}$ 。将固体靶材底面完全约束,并在其底面和 4 个侧面上施加无反射边界条件以模拟无穷大平板的射流撞击过程。



(a) 计算模型正视图



(b) 光滑靶材等轴视图

图 1 水柱射流冲击靶材的计算模型

为与高速水柱射流冲击试验条件匹配,射流参数选取和试验条件一致,如表 1 所示,具体试验参数及试验步骤见文献[20-21]。采用 17-4PH 作为靶材材料,射流速度取为  $650 \text{ m}/\text{s}$ ,靶材在试验过程中绕轴旋转,轮盘转速  $n_0$  为  $1 \ 500 \text{ r}/\text{min}$ ,根据式(6)计算其在碰撞点的旋转线速度为

$$V_r = \omega r = 2\pi n_0 r \quad (6)$$

式中: $r$ 是与碰撞点射流相对应的圆盘半径。本试验中 $r=144\text{ mm}$ ,求得旋转线速度 $V_r\approx 22.62\text{ m/s}$ 。

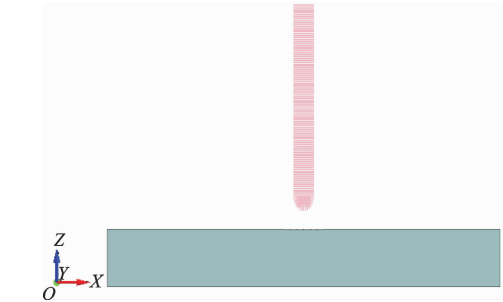
表 1 模拟采用射流参数

| 射流直径/mm | 射流速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 射流角度/( $^\circ$ ) |
|---------|---------------------------------------|-------------------|
| 0.15    | 650                                   | 30,60,80,90       |

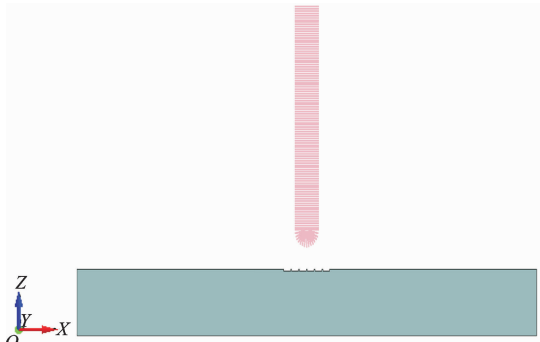
在数值模拟中,将靶材的旋转速度等效为 $22.62\text{ m/s}$ 的平动约束,计算时间为 $2.3\text{ }\mu\text{s}$ 。通过在靶材表面开设 6 个凹槽结构的方式模拟靶面初始粗糙度,凹槽深度分别为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10\text{ }\mu\text{m}$ ,见图 2。本文共模拟计算了 4 个角度射流撞击靶材的过程。

1.3 物性参数及边界条件

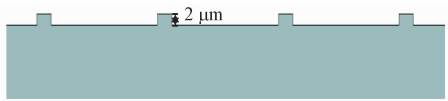
考虑到汽轮机末级的实际工作环境,将试验箱体内气压设置为 $0.1\sim 0.15$  个大气压,故可认为射



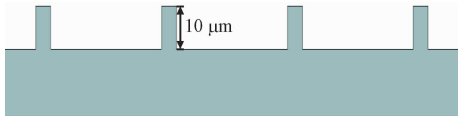
(a)2 μm 凹槽 90°模型图



(b)10 μm 凹槽 90°模型图



(c)2 μm 凹槽结构局部放大图



(d)10 μm 凹槽结构局部放大图

图 2 2 μm 和 10 μm 凹槽 90°模型图

流从喷嘴中喷出后空气对其影响很小,在模拟过程中忽略空气的存在,仅考虑水柱射流和固体靶材的相互作用。

本文选用马氏体基材 17-4PH 作为靶材,对其进行高速水柱射流水蚀模拟。靶材的本构模型选用随动塑性材料模型,具体材料参数如表 2 所示。

表 2 靶材的材料参数

| 材料    | $\rho_{\text{材}} / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $E / \text{GPa}$ | $\nu$ | $\sigma / \text{MPa}$ | $E_{\text{tan}} / \text{GPa}$ |
|-------|---------------------------------------------------|------------------|-------|-----------------------|-------------------------------|
| 马氏体基材 | 7 861                                             | 196.5            | 0.29  | 724                   | 1.324                         |

注: $E$ 为弹性模量; $\nu$ 为泊松比; $\sigma$ 为屈服强度; $E_{\text{tan}}$ 为切线模量。

由于水滴在撞击时压力较高,受到较大压力,因此需考虑其压缩性。采用 Mie-Gruneisen 状态方程<sup>[19]</sup>描述水在撞击过程中的状态。试验中射流由蒸馏水箱中经过高速射流发生器产生,故考虑其温度为室温。水射流采用常温常压下的物性参数。水的初始物性参数按标准大气压下 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时选取, $C$ 为 $U_s-U_p$  曲线(冲击波速度 $U_s$ 和质点速度 $U_p$  曲线)的截距,即当地声速; $\gamma_0$ 为 Gruneisen 常数; $\mu$ 为水的动力黏性系数,取 $1.002\times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ; $a$ 是 $\gamma_0$ 的一阶修正系数; $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 为 $U_s-U_p$  曲线的斜率系数,也称为水状态方程系数。水的物性参数和 Mie-Gruneisen 状态方程参数见表 3<sup>[19]</sup>。

表 3 水的物性参数和 Mie-Gruneisen 状态方程参数<sup>[19]</sup>

| $\mu / (\text{Pa}\cdot\text{s})$ | $\rho_{\text{水}} / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $C / (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | $\gamma_0$ | $a$  | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$   |
|----------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------|------------|------|-------|-------|---------|
| 0.001                            | 998.2                                             | 1 480                              | 0.5        | 2.67 | 2.56  | 1.982 | 0.226 8 |

1.4 模型验证

水柱射流冲击刚性靶材的初始冲击压力 $P$ 为 $1.954\text{ GPa}$ ,如图 3 所示。与理论水锤压力相比,计算误差为 $5.4\%$ ,在误差允许范围内。

将靶材材料设置为刚体,在保证 SPH 粒子均匀分布的情况下,逐渐增加粒子密度,直到粒子撞击靶

材过程中撞击压力网格无关。最终选择的 SPH 粒子密度为每层 209 个,共 107 层。确认 SPH 粒子密度后,将靶材网格密度从长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $150\times 150\times 15$  增加到 $320\times 320\times 32$ ,计算所得初始撞击压力随网格密度的变化如图 4 所示。从图中可以看出,网格划分大于 $240\times 240\times 24$  以后初始撞击压力趋于

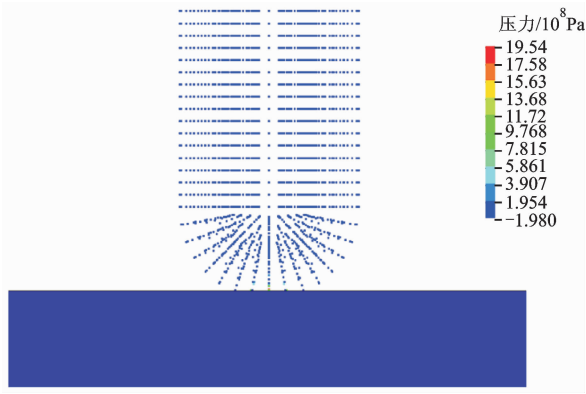


图 3 水射流垂直冲击刚性靶材的初始冲击压力云图

稳定,  $300 \times 300 \times 30$  时初始撞击压力为 1.954 GPa,  $320 \times 320 \times 32$  时初始撞击压力为 1.96 GPa, 相差 0.31%, 可认为靶材网格无关, 取网格尺寸为  $300 \times 300 \times 30$ 。有限元模型的网格拓扑关系见图 5, 采用三维六面体 8 节点实体显式单元 solid164 对靶材进行划分网格。

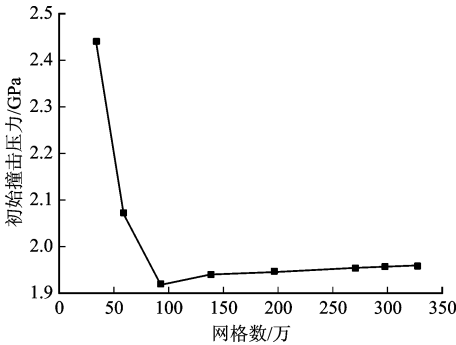


图 4 初始撞击压力随网格密度变化曲线

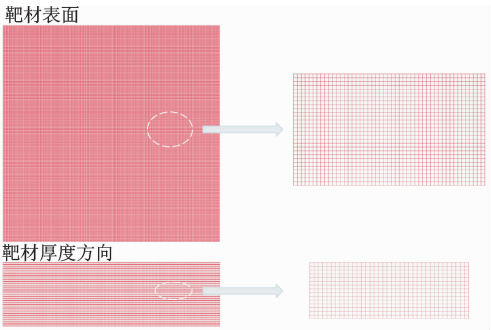


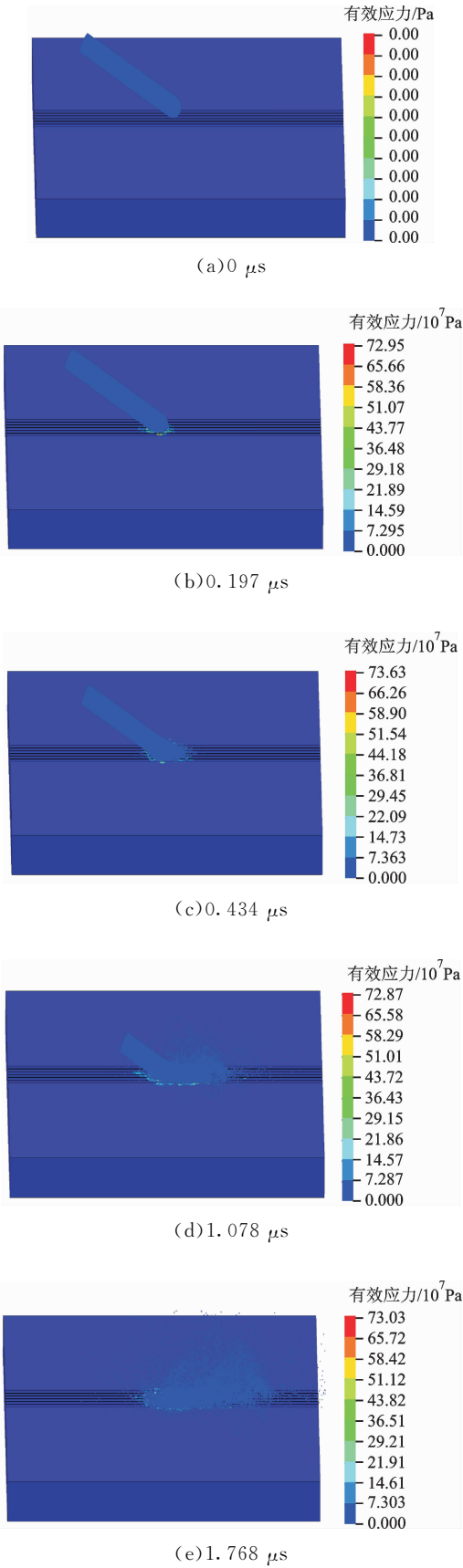
图 5 有限元模型的网格拓扑关系图  
(放大倍数约为 5)

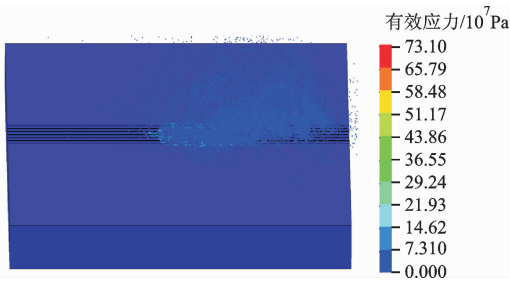
2 数值计算结果与分析

图 6 以  $30^\circ$  水柱射流撞击  $10 \mu\text{m}$  凹槽靶材为例, 选取 6 个典型时刻展示水柱射流过程。

从图 6 可以看出, 水柱与靶材发生初始接触时并不会产生碰撞, 需要射流继续向前运动与靶材相

互作用才会开始碰撞过程。水柱与靶材碰撞瞬间, 没有产生侧向射流, 水柱前端为压缩状态。随后靶材表面应力呈环状由撞击中心区域向外部区域传





(f) 2.214  $\mu\text{s}$

图 6 10  $\mu\text{m}$  凹槽模拟粗糙平面 30°射流冲击过程

播,水柱射流在发生初始撞击后出现侧向射流,且撞击后由撞击表面产生压力波向射流内部传播,应力最大值出现在射流水柱外圈与靶材接触的环状区域。随后不再有新的高应力区出现,之前产生的应力波继续向靶材内部传播。随着射流继续撞击靶材,靶材表面逐步被破坏,形成冲坑。

图 7 为不同粗糙度(光滑靶材、2  $\mu\text{m}$  及 10  $\mu\text{m}$  凹槽)靶材内部最大有效应力随冲击过程的变化,可以看到,2  $\mu\text{m}$  和 10  $\mu\text{m}$  凹槽靶材内部最大有效应力最终均稳定在 730 MPa 附近,而光滑靶材内部最大有效应力最终稳定在 280 MPa 左右,比带凹槽结构靶材的最终稳定应力小得多。

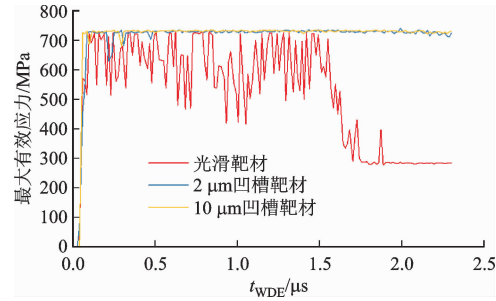
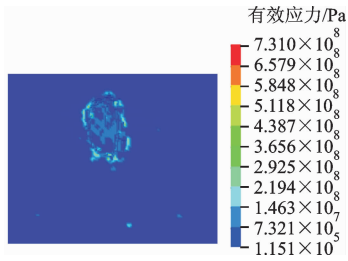


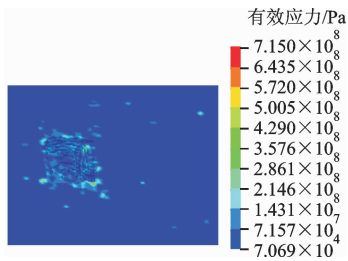
图 7 不同粗糙度光滑靶材内部最大有效应力随冲击过程的变化

2.1 表面粗糙度和射流角度对水蚀的影响

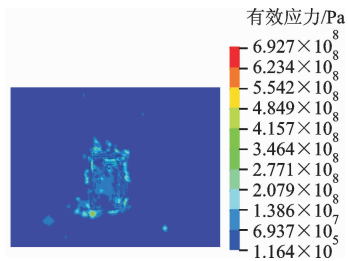
图 8~图 10 分别为光滑表面、2  $\mu\text{m}$  及 10  $\mu\text{m}$  凹槽表面在不同射流角度(30°、60°、80°、90°)水柱射流冲击下,靶材的微观形貌和有效应力(即 von Mises 应力)云图。可以看出,对于每一种表面结构,



(b) 光滑表面 60°冲击



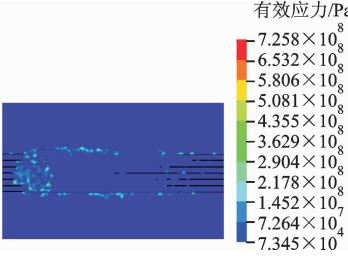
(c) 光滑表面 80°冲击



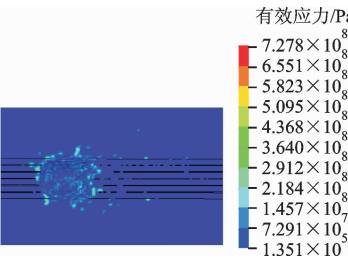
(d) 光滑表面 90°冲击

图 8 光滑平面靶材受 4 个角度水柱射流冲击的靶材微观形貌和有效应力

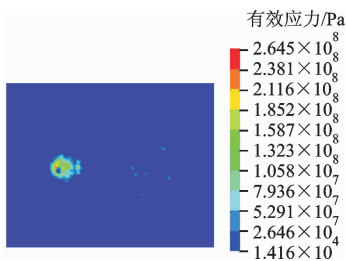
90°冲击时形成的冲坑最严重,质量损失也最大,30°射流冲击下试样冲坑最浅,尤其是光滑表面,基材仅冲出非常浅的冲坑;在其他条件相同的情况下,靶材



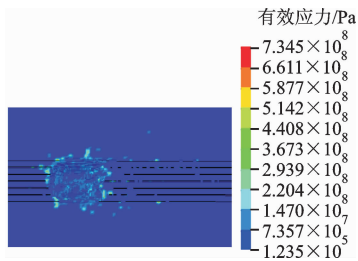
(a) 2  $\mu\text{m}$  凹槽 30°冲击



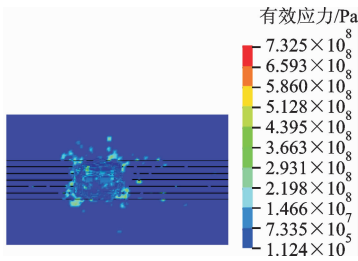
(b) 2  $\mu\text{m}$  凹槽 60°冲击



(a) 光滑表面 30°冲击

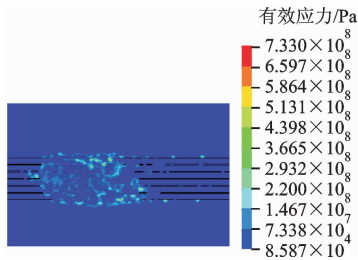


(c) 2  $\mu\text{m}$  凹槽 80°冲击

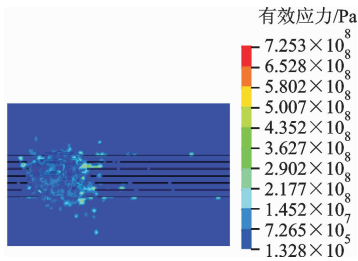


(d) 2  $\mu\text{m}$  凹槽 90°冲击

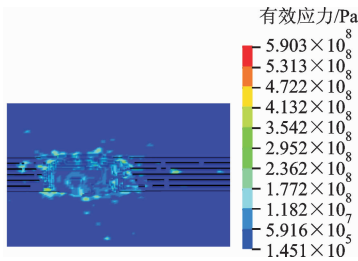
图 9 2  $\mu\text{m}$  凹槽靶材受 4 个角度水柱射流冲击的靶材微观形貌和有效应力



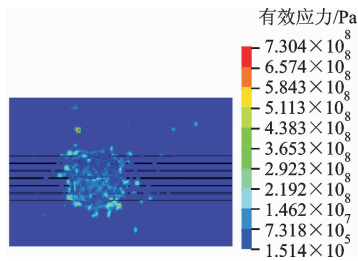
(a) 10  $\mu\text{m}$  凹槽 30°冲击



(b) 10  $\mu\text{m}$  凹槽 60°冲击



(c) 10  $\mu\text{m}$  凹槽 80°冲击



(d) 10  $\mu\text{m}$  凹槽 90°冲击

图 10 10  $\mu\text{m}$  凹槽靶材受 4 个角度水柱射流冲击的靶材微观形貌和有效应力

蚀性能越差。

图 11 给出了不同粗糙度(光滑表面、2  $\mu\text{m}$  凹槽、10  $\mu\text{m}$  凹槽)马氏体基材的质量损失随水柱射流冲击角的变化。可以看出,随着基材表面粗糙度的增加,水蚀累积质量损失增大,水蚀破坏加剧,且最大质量损失发生在冲击角为 90°;10  $\mu\text{m}$  凹槽时基材的质量损失平均为 2  $\mu\text{m}$  凹槽试样的 1.6 倍,2  $\mu\text{m}$  凹槽试样的平均质量损失约为光滑面试样的 1.4 倍。90°水柱射流冲击试验中,表面未抛光的线切割基材质量损失平均为其抛光样的 1.86 倍。结合数值模拟结果,充分说明表面粗糙度对材料水蚀性能影响显著,随着靶面粗糙度的增加,水蚀损伤加剧。Hancox 也报道了类似的研究<sup>[9]</sup>:以 18/8 不锈钢为研究对象,射流直径为 1.3 mm,试样的表面粗糙度从 37  $\mu\text{m}$  变为 1  $\mu\text{m}$ ,测量了表面凹陷形成和材料去除所需的冲击次数,发现当表面粗糙度从 12  $\mu\text{m}$  变为 1  $\mu\text{m}$  时,水蚀破坏减少了 40%。

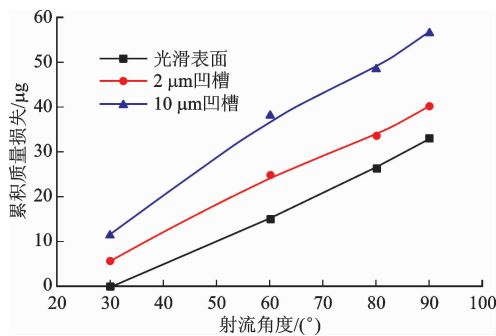


图 11 马氏体基材在不同粗糙度下质量损失随水柱射流角度的变化

为进一步分析材料表面粗糙度对水蚀性能影响的深层机理,对不同粗糙度下靶材最大冲击压力进行了统计。图 12 展示了不同粗糙度的马氏体基材 17-4PH 的最大冲击压力随水柱射流冲击角的变化。可以看出,材料的最大冲击压力随水柱射流冲击角的增加而增大,当射流角度为 90°时,撞击压力

最大;随着表面粗糙度的增加,各射流角度下,靶面最大冲击压力升高,靶材质量流失加剧,因此抗水蚀性能较差。基材最大撞击压力与靶面粗糙度的关系,充分说明提高材料表面光洁度能促进水滴压力波的自由扩展,降低材料最大撞击压力可以提高材料的抗水蚀性能。

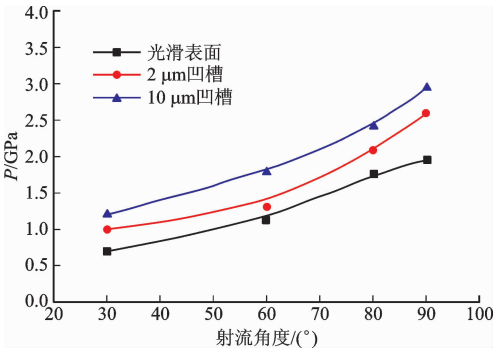


图 12 不同粗糙度马氏体基材的最大冲击压力随水柱射流角度的变化

图 13 给出了 30°射流角度的水柱冲击光滑表面,马氏体基材最大压力随冲击时间的分布。可以看出,靶材最大冲击压力在水柱与靶面的接触瞬间迅速增加,随着射流冲击过程的继续进行,最大压力在 250~700 MPa 范围内波动,在 1.9 μs 后,压力最终稳定在 200 MPa 附近。

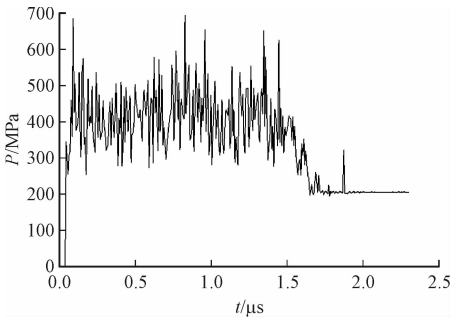


图 13 光滑表面马氏体基材在 30°水柱射流冲击下最大压力随冲击时间的变化

2.2 射流速度对水蚀的影响

以 2 μm 凹槽粗糙度为例,选择 4 种水柱射流冲击速度 325、418、563、650 m/s 分析水柱射流速度对水蚀的影响。

水蚀质量损失  $\Delta m$  和射流速度  $V_0$  具有以下指数关系

$$\Delta m \propto V_0^n \tag{7}$$

式中: $n$  为速度指数。使用对数坐标图拟合得到马氏体基材 17-4PH 速度指数  $n \approx 3.83$ ,见图 14。从图 14 中可以看出,射流速度越高,水蚀累积质量损

失越大,材料水蚀损害越严重。Ahmad 等研究结果显示,对于高屈服强度钢合金, $n = 3.3 \sim 4.5$ ;对于 Ti6Al4V, $n \approx 5^{[4]}$ 。本文研究的马氏体基材 17-4PH 属于高屈服强度钢合金,拟合所得速度指数  $n \approx 3.83$ ,与文献[4]报道的结果吻合。

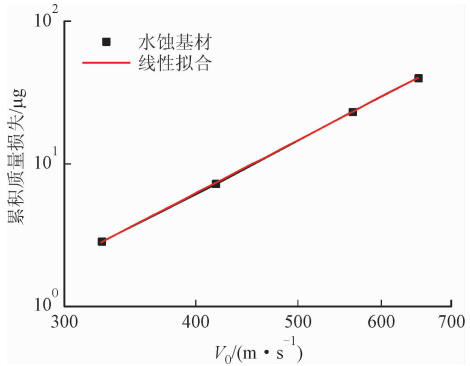


图 14 马氏体基材累积质量损失随水柱射流速度的变化

3 结 论

本文采用 SPH-FEM 耦合算法建立了水柱射流撞击模型,模拟了高速射流与靶材的撞击过程。通过数值方法分析得到了固体靶材在不同角度、不同速度射流撞击下的应力变化及表面粗糙度对射流撞击过程的影响,主要结论如下。

(1)相同靶材表面结构下,射流角度越大,靶材水蚀越严重。

(2)靶材表面粗糙度对水蚀影响较大。10 μm 凹槽时材料的质量损失平均为 2 μm 凹槽试样的 1.6 倍,2 μm 凹槽试样的平均质量损失约为光滑面试样的 1.4 倍。

(3)提高靶材表面光洁度,能促进水滴压力波的自由扩展,显著降低撞击压力,从而提高材料的抗水蚀性能。

(4)冲击速度越大,材料水蚀失重越多。靶材的水蚀累积质量损失与其射流速度成指数关系,拟合得到速度指数  $n \approx 3.83$ 。

参考文献:

[1] HATTORI S, KAKUICHI M. Effect of impact angle on liquid droplet impingement erosion [J]. Wear, 2013, 298: 1-7.

[2] OKA Y, MIYATA H. Erosion behaviour of ceramic bulk and coating materials caused by water droplet impingement [J]. Wear, 2009, 267(11): 1804-1810.

[3] THOMAS G, BRUNTON J. Drop impingement erosion of metals [J]. Proceedings of the Royal Society of

- London: A Mathematical and Physical Sciences, 1970, 314(1519): 549-565.
- [4] AHMAD M, CASEY M, SÜRKEN N. Experimental assessment of droplet impact erosion resistance of steam turbine blade materials [J]. *Wear*, 2009, 267(9/10): 1605-1618.
- [5] HEYMANN F. Toward quantitative prediction of liquid impact erosion [C]// *Characterization and Determination of Erosion Resistance*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA: Westinghouse Electric, 1970: 212-243.
- [6] DI Juan, WANG Shunsen, YAN Xiaojiang, et al. Experimental research on water droplet erosion resistance characteristics of turbine blade substrate and strengthened layers materials [J]. *Materials*, 2020, 13(19): 4286.
- [7] HEYMANN F. Liquid impingement erosion [M]// *ASM Handbook: Friction, Lubrication and Water Technology*. Vail, Colorado, USA: ASM, 1992, 18: 221.
- [8] THOMAS G, BRUNTON J. Drop impingement erosion of metals [J]. *Proceedings of the Royal Society of London: A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1970, 314(1519): 549-565.
- [9] HANCOX N, BRUNTON J. A discussion on deformation of solids by the impact of liquids, and its relation to rain damage in aircraft and missiles, to blade erosion in steam turbines, and to cavitation erosion: the erosion of solids by the repeated impact of liquid drops [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A Mathematical and Physical Sciences*, 1966, 260(1110): 121-139.
- [10] KIROLS H, KEVORKOV D, UIHLEIN A, et al. The effect of initial surface roughness on water droplet erosion behaviour [J]. *Wear*, 2015, 342: 198-209.
- [11] MABROUKI T, RAISSI K, CORNIER A. Numerical simulation and experimental study of the interaction between a pure high-velocity waterjet and targets: contribution to investigate the decoating process [J]. *Wear*, 2000, 239(2): 260-273.
- [12] HALLER K, VENTIKOS Y, POULIKAKOS D, et al. Computational study of high-speed liquid droplet impact [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(5): 2821-2828.
- [13] MA Li, BAO Ronghao, GUO Yimu. Waterjet penetration simulation by hybrid code of SPH and FEA [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(9): 1035-1042.
- [14] HSU C Y, LIANG C C, TENG T L, et al. A numerical study on high-speed water jet impact [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 72: 98-106.
- [15] 汪勇, 谢永慧, 张荻. 液固高速撞击时材料表面损伤的数值模拟 [J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(11): 1435-1440.
- WANG Yong, XIE Yonghui, ZHANG Di. Numerical simulation of material surface damage by high speed liquid-solid impact [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(11): 1435-1440.
- [16] COOK S S. Erosion by water-hammer [J]. *Proceedings of the Royal Society of London: Series A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1928, 119(783): 481-488.
- [17] HEYMANN F. High-speed impact between a liquid drop and a solid surface [J]. *Journal of Applied Physics*, 1969, 40(13): 5113-5122.
- [18] LIU M, LIU G, LAM K. Investigations into water mitigation using a meshless particle method [J]. *Shock Waves*, 2002, 12(3): 181-195.
- [19] STEINBERG D J. Spherical explosions and the equation of state of water [R/OL]. (1987-02-01)[2020-05-10]. <http://www.osti.gov/servlets/purl/6766676>.
- [20] DI Juan, WANG Shunsen, YAN Xiaojiang, et al. Experimental investigation on effect of surface strengthening process and roughness on water droplet erosion behavior in turbomachinery [J]. *Tribology International*, 2020: 106647.
- [21] ZHANG Zheyuan, ZHANG Di, XIE Yonghui. Experimental study on water droplet erosion resistance of coatings (Ni60 and WC-17Co) sprayed by APS and HVOF [J]. *Wear*, 2019, 432: 202950.

(编辑 亢列梅)