

水力高能束磨料占比对木料冲蚀影响分析

余 葵¹, 周昱焘², 李瑞朝¹, 刘文敏¹

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学航运与船舶工程学院, 重庆 400074)

摘要: 山区河流洪水泛滥, 漂浮物聚集与江面形成漂浮复合体, 极易导致系泊航标、船舶锚缆走锚、失控及侧翻, 严重影响通航安全。解决漂浮复合体竹木清除难题已成为山区河流系泊安全工作的迫切需求。为此, 提出一种锚缆缠绕物清除方法。在此基础上, 通过数值分析软件 ANSYS 的 LS-DYNA 模块, 建立水力高能束磨料占比对木料冲蚀影响的相互作用模型, 研究掺料占比对木料冲蚀效果的影响, 为锚缆缠绕物清除装置的研发提供技术支持。结果表明, 掺料水力高能束冲蚀过程中的水柱速度要比纯水更加集中, 在冲蚀过程中对靶体的应力大于纯水, 冲蚀深度优于纯水, 但随着磨料占比的增加这种影响并不增大, 磨料的有无对其木料冲蚀口径的大小影响甚微。

关键词: 缠绕物清除; 水力高能束; 数值仿真; 冲蚀

中图分类号: U672.7⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)11-0275-07

山区河流水流湍急, 水位陡涨陡落, 洪水泛滥时, 容易出现小径木为主的众多复杂多样的漂浮物, 漂浮物会在水流的作用下聚集在航标船锚缆处, 极易造成航标走锚、失控及侧翻, 导致航标定位出错, 失去船舶导航作用, 影响通航安全, 如图 1 所示。

目前常用的清除缠绕物主要是使用机械爪和刀具切割的方法, 不仅成本高、施工周期长、通用性低, 而且一旦面临小型水上工具如航标船, 则需要频繁前往航标船工作位置进行维护, 如图 2 所示。因此, 急需一种新的切割方法去解决问题。



图 1 缠绕物泛滥



图 2 缠绕物清理

保、低温工作、无极调压等显著优点, 无疑是当今世界的技术宠儿^[1-4]。

有不少学者对水力高能束中的高压水射流技术进行了相关研究。杨志鹏等^[5]使用 ALE (Arbitrary Lagrange-Euler) 法构造了水射流破土的数值仿真模型, 探究各项参数对水射流破土特性的影响; 蒋一峰等^[6]使用光滑粒子法 (smoothed particle hydrodynamics, SPH) 和有限元方法 (finite element method, FEM) 验证射流直径与射流速度对破岩效率的影响; Wang 等^[7]通过用颗粒水射流冲击和破碎岩石, 发现岩石破碎是由于冲击动载荷和应力波冲击引起的岩石软化而实现的, 应力波的范围具有明显的局部效应; Anwar 等^[8]为了克服 AWJ

1 研究现状

高压水射流作为高能束的一种, 具有清洁环

收稿日期: 2024-03-07

基金项目: 重庆市研究生导师团队建设项目 (JDDSTD2022009)

作者简介: 余葵 (1955—), 男, 重庆人, 研究员, 博士研究生导师, 研究方向为桥梁防撞与水上安全; 通信作者周昱焘 (1998—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 研究方向为水力高能束; 李瑞朝 (1998—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向为水工结构; 刘文敏 (1998—), 女, 四川梁山人, 硕士研究生, 研究方向为通航安全保障。

(磨料水射流)在铣削中很难进行深度控制的问题,尝试对在不同的射流横向速度、泵压和控制深度(即铣削)模式下工作的磨料水射流足迹进行建模、仿真和验证。Giannaros 等^[9]使用 LS-DYNA 中的 SPH 粒子法研究碳纤维增强聚合物复合材料和产生的二次碎片的超高速冲击响应,并提出了一种使用 SPH 方法对复合材料层压板建模的验证程序。

以上学者主要的研究多集中于碎石、陶瓷、复合材料、合金等切割,缺少水力高能束切割水上漂浮物以及模拟掺料水力高能束侵彻木质材料方面的研究。

本文通过 LS-DYNA 软件建立了水力高能束冲蚀木块的两种模型,使用 ALE 法研究水力高能束磨料占比对冲蚀木料的影响分析,以期水力高能束锚缆缠绕漂浮物切割装置的研发提供技术支持。

2 ALE 法简介

ALE 法融合了 Lagrange 法和 Euler 法,不仅拥有 Lagrange 法在计算物质结构边界运动时,能快速跟踪物质结构的边界运动的特点,同时还拥有 Euler 法在计算多物质时能够保持多物质中各个物质独立存在的优点,是二者的集大成者。ALE 网格可以根据使用人的具体需要更改网格参数,让数值仿真变得更佳灵活,从而减少出现网格不正常畸变的概率,与此同时,大大减少了前处理时间和计算时间。

ALE 法在计算过程中需要引入一个参考坐标 y 来表示各物理量的物质导数被转换为相应物理量的参考导数,若设该方程为 $F(x, t)$,可以得到以下公式^[10]:

$$\frac{\partial F(X_i, t)}{\partial t} = \frac{\partial F(x_i, t)}{\partial t} + w_i \frac{\partial F(x_i, t)}{\partial x_i} \quad (1)$$

式中: X_i 为 Lagrange 坐标系; x_i 为 Euler 坐标系; w_i 为物质相对于网格的速度; t 为时间。

而其控制方程转换到参考坐标下可表示为

(1)质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + w_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (2)$$

(2)动量守恒方程:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho w_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f \quad (3)$$

(3)能量守恒方程:

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} = \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial q_i}{\partial x_j} - \rho w_i \frac{\partial e}{\partial x_i} \quad (4)$$

式中: ρ 为物质的密度; f 为单位流体的体力; σ_{ij} 为 Cauchy 应力张量; e 为单位质量的内能; q_i 为热通量; v_i 为速度。

3 水力高能束仿真建模

3.1 材料模型及参数

3.1.1 材料模型

为了使仿真过程变得简单但又需要接近真实情况,先做如下假设:①所有掺料视为可流动液体,并在水柱中随机分布;②磨料与磨料之间、水颗粒与磨料之间的相对运动不考虑在内;③木料为标准的各项异构材料,并视为平放于地面上,不考虑边界造成的影响。

水、空气及磨料均使用没有剪切刚度的 NULL (空材料),其中水和磨料使用 Gruneisen 状态方程 (p),公式为

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (5)$$

式中: ρ_0 为液体密度; C 为冲击波速度与指点速度在 Y 轴上的相对距离; $S_1 \sim S_3$ 为常数; γ_0 为 Gruneisen 常数; α 为 Gruneisen 常数的一阶体积修正系数; μ 为空气的比体积, $\mu = 1/V - 1$, V 为相对体积; E 为初始内能。

空气使用 Linear Polynomial 状态方程,具体参数见表 2,公式为

$$P = c_0 + c_1 \mu + c_2 \mu^2 + c_3 \mu^3 + (c_4 + c_5 \mu + c_6 \mu^2) E \quad (6)$$

式中: $c_0 \sim c_6$ 为常数。

为了能在仿真过程中体现木材的各项异构特性,本次仿真木材的本构模型用 LS-DYNA 材料库中 MAT221 _ ORTHOTROPIC _ SIMPLIFIED _ DAMAGE 材料模型,根据张利朋等^[11]所述,当作用于木材的冲击力方向为垂直于木材纵向,并主要造成切向与横向面的损伤时,其主要失效机制为顺纹受压和顺纹受拉,但由于顺纹受压会影响顺纹受拉,反之不会,因此在模拟失效时,不考虑顺纹受压的影响。

3.1.2 材料参数

模型中所用到的材料参数见表 1~表 4。

3.2 边界条件与几何模型

基于以上原则,速度单位为 m/ms,密度单位为 kg/m³,应力单位为 GPa,进行模型构建。

表 1 水与磨料的模型参数^[12]

名称	$\rho_0 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$C / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	S_1	S_2	S_3	α	γ_0
磨料	4	4 569	1.49	0	0	0.46	2.17
水	1	1 480	2.56	-1.99	0.288 6	1.397	0.49

表 2 空气的模型参数^[12]

名称	$\rho_0 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
空气	0.001 25	0	0	0	0	0.4	0.4	0

表 3 木料的材料参数

ρ_0 / MPa	E_L / MPa	E_R / MPa	E_T / MPa	G_{LR} / MPa	G_{TR} / MPa	G_{LT} / MPa	μ_{RL}	μ_{TL}	μ_{TR}
0.50	11 254.09	846.92	469.37	844.80	41.2	700.00	0.031 2	0.020	0.371

表 4 木料的拉伸破坏应变

纵向拉伸破坏应变	模向拉伸破坏应变	切向拉伸破坏应变
0.004 0	0.006 6	0.012 0

把水力高能束水柱模型构建为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的长方体,由 2 560 个 ALE 网格组成,空气模型构建为 $16 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} \times 27 \text{ mm}$ 的长方形,由 512 000 个 ALE 网格组成,木材模型构建为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的正方体,由 442 368 个 Lagrange 网格组成,冲蚀靶距为 2 mm,即水柱底部与木材顶部的距离为 5 mm,并且保证空气模型网格与水柱网格接触位置共节点。具体模型如图 3 所示,图 3(b)为掺料水力高能束,图 3(a)为不掺料水力高能束。其中绿色部分为水、蓝色部分为磨料、黄色部分为空气、红色部分为木材。模型参考借鉴了 Xue 等^[13]和周沛兴^[14]所创建的磨料水射流模型。

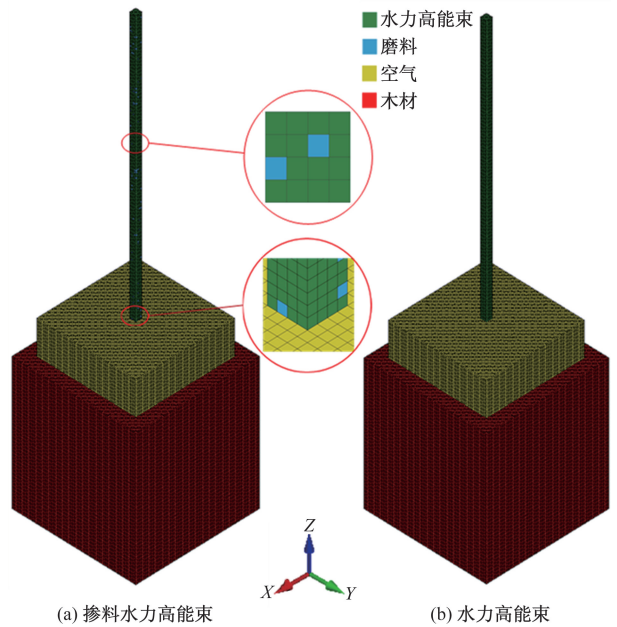


图 3 掺料水力高能束与水力高能束模型

将木料底部全部约束,以防止木料出现不可控的位移,对目标木料的边界采用无反射边界条件,这是为了防止应力波对边界的干扰。ALE 耦合采用 LAGRANGE_IN_SOLID 方法,将主面定义为 Euler 网格(空气、水、磨料),将从面定义为 Lagrange 网格(木料)。

3.3 模型有效性验证

图 4、图 5 分别为数值模型对照实验的实验装置和实验现场。通过该设备实验得到的木块冲蚀效果如图 6(a)所示。

定义时间为 $400 \mu\text{s}$,冲蚀速度为 200 m/s ,磨料浓度为 5%,靶距为 5 mm,得到的数值仿真冲蚀结果如图 6(b)所示。

从数值仿真和实物实验结果的正上方以及侧方观察,它们均在中心部位出现了明显的冲蚀成孔的效果,且在孔的两端有明显的裂纹出现,进一步分析发现,数值仿真结果的裂纹更加明显。这是因为数值仿真在结束时仍继续受到了水力高能束的冲击力,但实物冲蚀在这个时刻已经没有冲击力作用于它,因此才会出现数值仿真裂纹显得更加明显



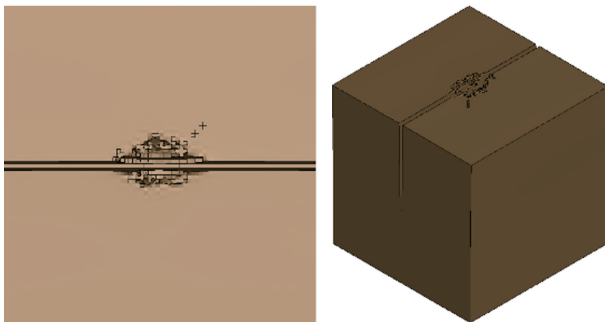
图 4 水力高能束装置



图5 实验现场



(a) 实验冲蚀结果



(b) 仿真冲蚀结果

图6 冲蚀结果对比

的效果。对比分析它们都有明显的“V”字冲蚀形状,可见该数值仿真与实物模型实验结果相近,数值仿真模型具有有效性。

4 仿真冲蚀效果分析

4.1 高能束水柱速度云图对比分析

表5为数值仿真实验工况,表5中编号1参数与编号2参数水柱4种时刻 T 在空气中的速度云图对比如图7所示。

表5 实验工况

编号	磨料占比/%	冲蚀速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	喷嘴直径/ mm	靶距/mm	冲蚀时间/ μs
1	0	200	1.2	5	400
2	5				
3	10				
4	15				
5	20				

由图7可知,在冲蚀刚开始的阶段 $T=100\ \mu\text{s}$ 时,两者速度云图虽然没有明显差别,可见在最开始的时候水柱速度与是否掺杂磨料无关,但从 $T=100\ \mu\text{s}$ 之后掺杂5%磨料的水柱速度要比没有磨料的水柱速度要更加集中,尤其是随着时间的增加这种情况更加明显,在 $T=400\ \mu\text{s}$ 时这种现象最为明显。虽然二者都呈现出“刀尖”形状的速度云图,但是掺杂磨料一方的速度云图颜色明显更深且范围更大,原因在于,磨料的密度远大于水,从而具有更大动量,由动量守恒公式可知,动量由物体质量与速度共同决定,在质量、初速度一定的情况下,掺料水力高能束具有更高的动量,这让掺料水力高能束在冲蚀过程中不易因为外界原因造成速度损失。

4.2 木料冲蚀应力云图对比分析

表5中,编号1模型与编号2模型3种时刻的Mises应力云图对比如图8所示。可以看出,在 $T=200\ \mu\text{s}$ 、 $T=300\ \mu\text{s}$ 两个时刻中掺料水力高能束的应力明显要大于纯水力高能束的应力,并且应力对外辐射的范围也要远大于纯水力高能束的辐射范围,仅在 $T=400\ \mu\text{s}$ 的时候最大应力相近,这是因为随着冲蚀深度和裂缝的增加,冲蚀木料底部留存的压力水起到了水垫的作用,水垫面积又会随着裂缝的增加而增加,从而减小了水力高能束的冲蚀能力,使两种水力高能束的最大应力逐渐接近^[11]。

4.3 磨料占比冲蚀效果对比分析

为了可以更加直观地看出磨料占比对冲蚀效果的影响程度,将磨料百分比划分等级,分别为0%、5%、10%、15%、20%,使用Python编程制作出符合磨料占比的5种仿真模型,得到的冲蚀效果如图9所示。

4.3.1 冲蚀深度对比

图10所示为5种磨料占比模型对木料的冲蚀深度统计。从图中可以看出,在水力高能束中是否掺杂磨料对冲蚀深度的影响巨大,从无磨料到5%磨料,冲蚀深度增加了近1/4。但是从这之后,随着磨料的增加,冲蚀深度并没有明显提升,从5%磨料到20%磨料,冲蚀深度仅仅增加了0.5 mm。

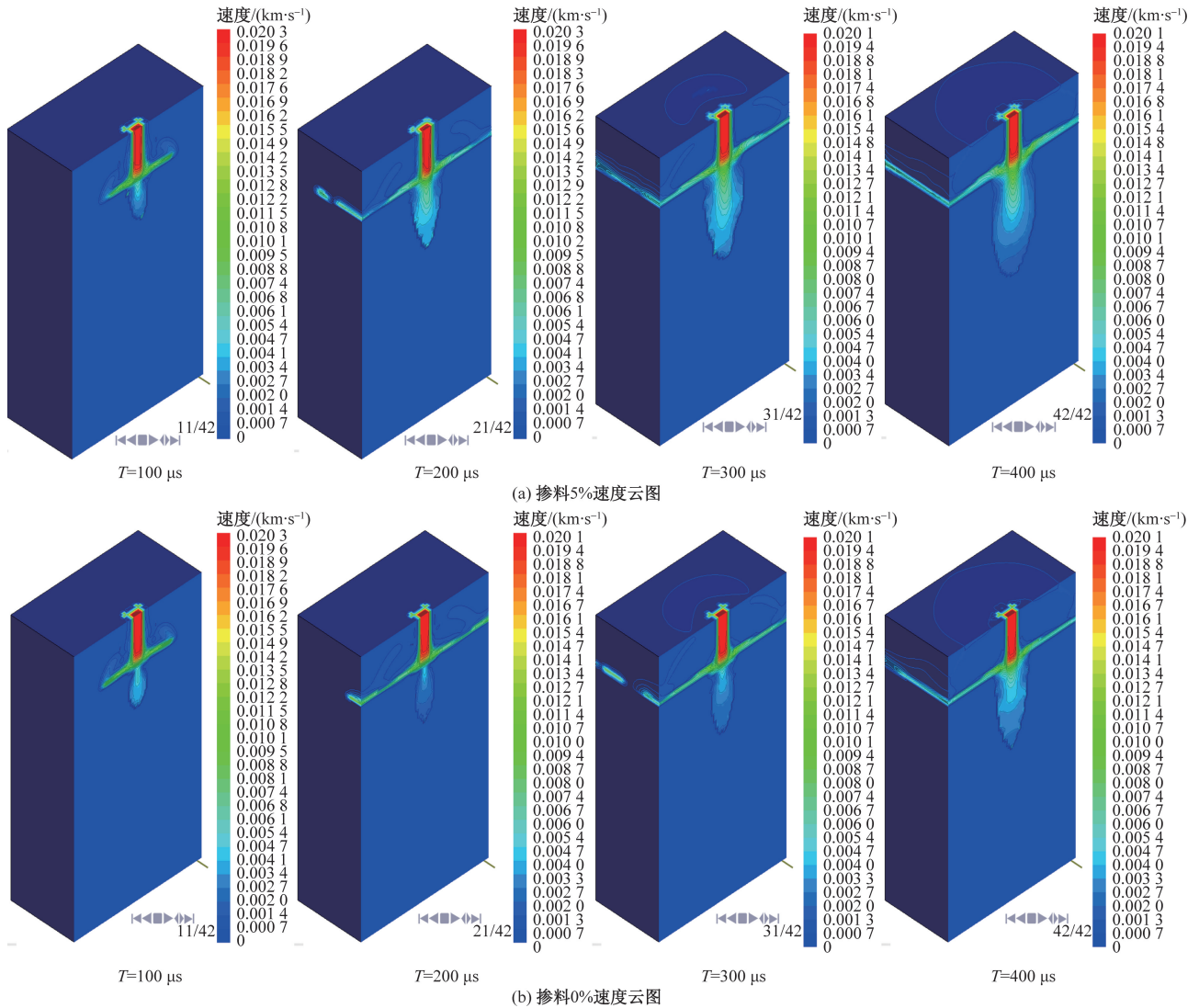


图 7 掺料 5%与掺料 0%水柱空气中的速度云图

4.3.2 冲蚀口径对比

图 11 所示为 5 种磨料占比模型对木料的冲蚀口径统计。从图中可以看出,虽然随着磨料占比的增加冲蚀口径会有增加,但是这种增加显得微不足道,从纯水力高能束到 20%磨料占比的掺料水力高能束,冲蚀口径仅仅增加了 0.3 mm,可见磨料占比对口径的影响很小。

5 结论

对比了掺料水力高能束和纯水高能束在冲蚀木料时的状况,列出了 5 种不同磨料占比的水力高能束对冲蚀木料的效率,得到以下结论。

(1)在 $T=100\ \mu\text{s}$ 时,水柱速度与是否掺杂磨料无关,在时间增加后,掺料水力高能束在工作过程中的水柱速度要比纯水高能束的速度更加集中、范围更大,可知掺料水力高能束可以在磨料的作用下

更集中于一点去冲蚀,其阻止了力的扩散,同时也增加了冲蚀的力。

(2)掺料水力高能束对木料的应力在最开始时会大于纯水力高能束,随着冲蚀时间的增加二者之间的差距会减少。但是掺料水力高能束对木料应力的辐射范围始终更大。

(3)掺杂了 5%磨料之后的水力高能束对木料的冲蚀深度有明显的提高,但是继续增加磨料占比后提升的幅度很小,故选用掺杂 5%磨料才能取得最优的效果。

(4)磨料占比的多少对掺料水力高能束冲蚀木料的口径影响很小,几乎没有影响。

参考文献

- [1] 刘海青,王志文,成明,等. 高压水射流切割技术发展及应用现状[J]. 机床与液压, 2018, 46(21): 173-179.

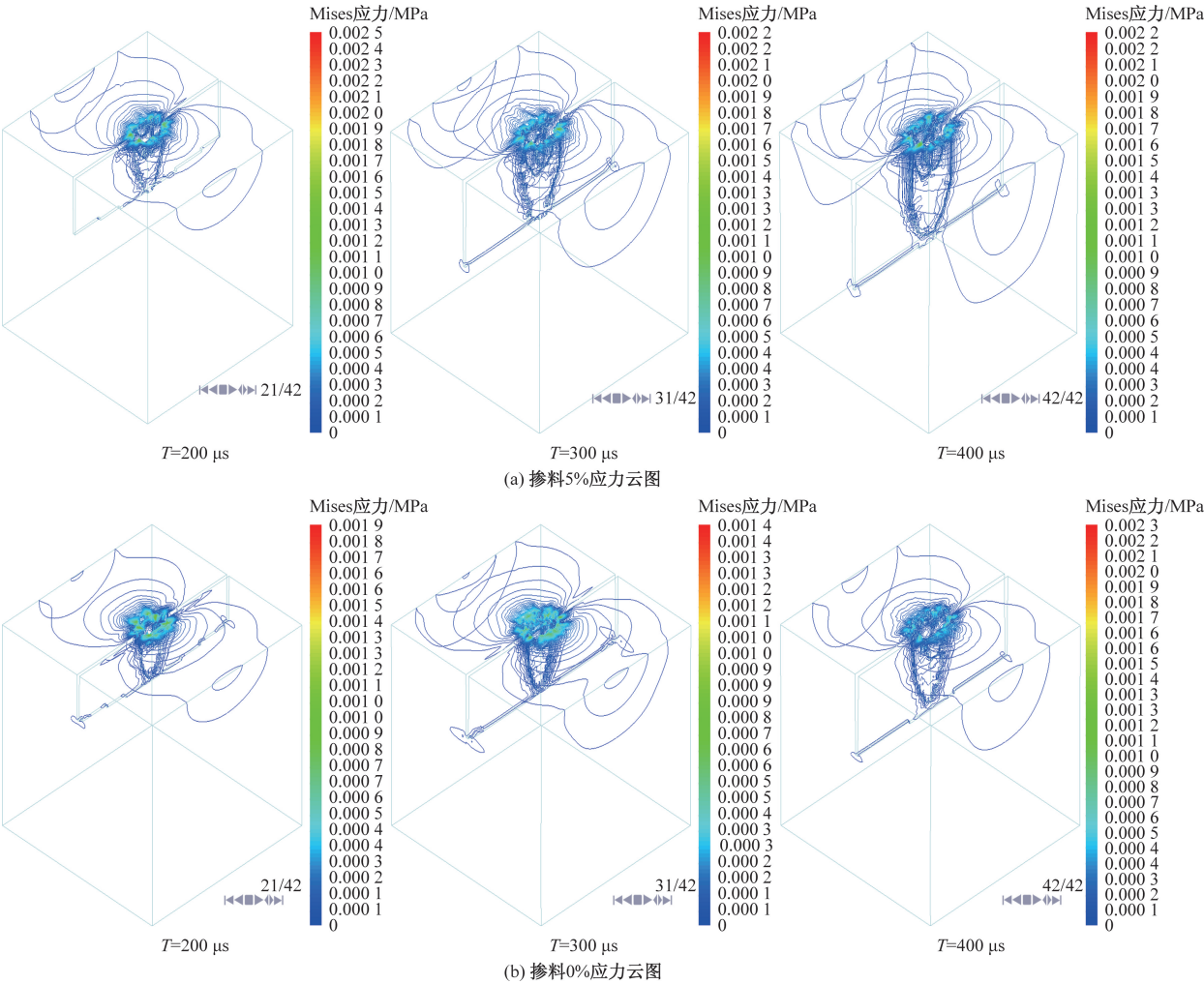


图 8 不同磨料占比的 Mises 应力云图

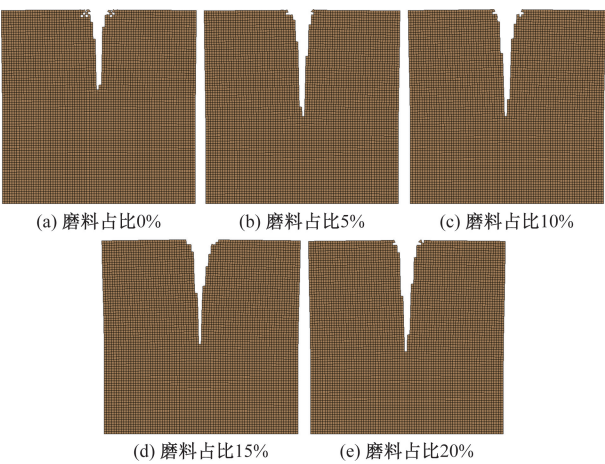


图 9 不同磨料占比的水力高能束仿真效果

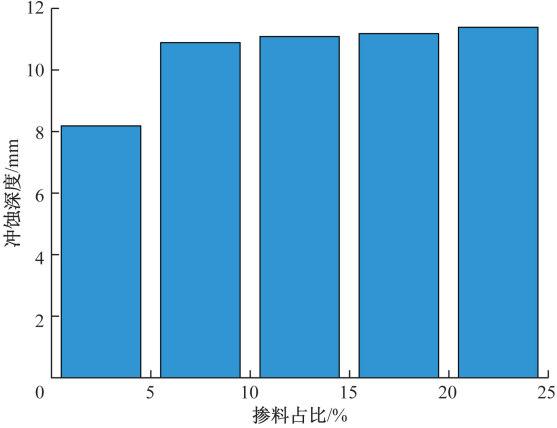


图 10 冲蚀深度统计

[2] 弓永军. 磨料水射流切割技术研究现状及其发展趋势[J]. 液压与气动, 2016(10): 1-5.

[3] 庄静伟, 王强, 史亮, 等. 高压水射流的发展与应用[J]. 木材加工机械, 2007(4): 47-49.

[4] 张伟, 徐东平, 魏晓霞, 等. 应用超高压水射流切割木材

的研究[J]. 江西林业科技, 2011(1): 35-37.

[5] 杨志鹏, 刘剑, 蓝雄东, 等. 基于 ALE 算法的水射流破土特性[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6378-6384.

[6] 蒋一峰, 阚瞳, 卜晓颖, 等. 基于光滑粒子流体动力学耦合有限元方法的水射流破煤参数数值模拟分析[J]. 煤矿安全, 2017, 48(1): 137-140.

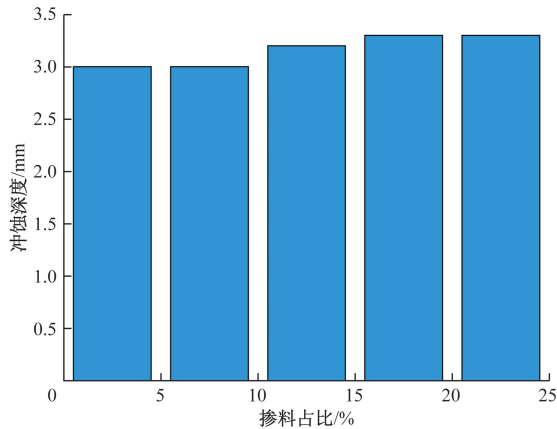


图 11 冲蚀口径统计

- [7] WANG F, WANG R, ZHOU W, et al. Numerical simulation and experimental verification of the rock damage field under particle water jet impacting[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 102: 169-179.
- [8] ANWAR S, AXINTE D, BECKER A. Finite element mod-

- elling of abrasive waterjet milled footprints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213 (2): 180-193.
- [9] GIANNAROS E, KOTZAKOLIOS A, KOSTOPOULOS V, et al. Hypervelocity impact response of Cfrp laminates using smoothed particle hydrodynamics method implementation and validation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 123: 56-69.
- [10] 黄飞. 水射流冲击瞬态动力特性及破岩机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [11] 张利朋, 谢启芳, 吴亚杰, 等. 木材本构模型研究进展[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(5): 286-304.
- [12] 张文超, 武美萍, 任仲贺. 基于 LS-DYNA 仿真的射流加工参数分析[J]. 表面技术, 2017, 46(10): 268-276.
- [13] XUE Y, SI H, CHEN G. The fragmentation mechanism of coal impacted by water jets and abrasive jets[J]. Powder Technology, 2020, 361: 849-859.
- [14] 周沛兴. 磨料水射流切割氧化铝陶瓷材料工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.

Analysis of the Influence of Abrasive Water Jet on Wood Erosion by Abrasive Ratio

YU Kui¹, ZHOU Yutao², LI Ruizhao¹, LIU Wenmin¹

(1. College of Shipping and Marine Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In mountainous areas, the flooding of rivers causes the accumulation of floating debris, forming a floating composite on the river surface. This can easily lead to dragging off mooring navigation marks, ships' anchor cables coming loose, loss of control, and capsizing, severely impacting navigational safety. The removal of bamboo and wood debris in the floating composite has become an urgent need for the safety work of mooring in mountainous river areas. A method is proposed for removing anchor cable entanglements. Based on this, the LS-DYNA module of the numerical analysis software ANAYS is utilized to establish a model of the interaction between the proportion of high-energy abrasive particles in hydraulic jets and their erosion effect on wood materials. The research investigated the influence of abrasive particle proportions on the erosion effect of wood materials, providing technical support for the development of devices for removing anchor cable entanglements. The results show that during the erosion process of abrasive particles in hydraulic jets, the water column velocity is more concentrated compared to pure water. The stress on the target body during erosion is greater than with pure water, resulting in better erosion depth compared to pure water. However, the increase in abrasive particle proportion does not significantly increase this impact, and the presence or absence of abrasive particles has minimal effect on the size of the erosion aperture on wood materials.

Keywords: winding material removal; hydraulic high-energy beam; numerical simulation; erosion