doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.041

短程射流共点交汇对撞阀设计与破碎能力检测

张绍英[1]　吴　雪[2]　刘　斌[2]　郭　华[3]

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048;
3. 廊坊通用机械制造有限公司, 廊坊 065001)

摘要: 现有的射流阀均未对水力空化进行合理规划、有效控制和高效利用,存在破碎能量级低、能量构成欠合理、能量分散、能效低、废能占比高、对硬韧性物料破碎能力差等问题。为了提升高压射流破碎中的破碎能量级和密度,减少无效能产出,提出了一种短程射流共点交汇对撞阀结构方案及其水力空化效应机制。利用 CFD 进行了流场模拟,依据模拟结果配置了短程射流共点交汇对撞阀的几何和运行参数,通过捕集羟自由基和电镜成像检测了水力空化强化效果和对微晶纤维素的破碎效果,检测结果表明:与直孔阀相比,短程射流共点交汇对撞阀的羟自由基捕获量提高 41%,无效动能减少 60% ~80%,可使微晶纤维壳层破碎并能剥离出直径约 15 nm 的微原纤。短程射流共点交汇对撞破碎明显提升了溃灭冲击能,可作为硬韧性生物材料超微细化的有效方法。

关键词: 射流破碎; 超微细化; 短程射流共点交汇对撞阀; 水力空化

中图分类号: S226.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)12-0393-07　　**OSID**:

Structure Design and Disrupting Effect Detection of Short Jet Collision Nozzle

ZHANG Shaoying[1]　WU Xue[2]　LIU Bin[2]　GUO Hua[3]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *School of Artificial Intelligence*, *Beijing Technology and Business University*, *Beijing* 100048, *China*
3. *Langfang Tongyong Machinery Co.*, *Ltd.*, *Langfang* 065001, *China*)

Abstract: During the process of pulverizing tough and tensile material through high pressure jet method, inefficiency of energy applications is always a prominent problem. Cavitation involved in high pressure jet operation has not been properly planned, effectively controlled and efficiently used. Short jet collision nozzle which is considered as a new type nozzle in order to promote cavitation effect and enhance collision energy density was investigated. And hydrodynamic cavitation mechanism occurred in short jet collision nozzle was also discussed. The key structure parameter of this nozzle was configured according to the results of computational fluid dynamics simulation. The radial and annular grooves were symmetrically manufactured on the nozzle surface by laser corrosion. Then superfine pulverizing experiments based on short jet collision nozzle were presented. The degree of hydrodynamic cavitation and the superfine effect of microcrystalline cellulose was tested through ·OH level and scanning electron microscope. The experimental results showed that output rate of ·OH was increased by 41% and invalid kinetic energy was cut by 60% ~80% compared with direct-hole nozzle. The micro fibril about 15 nm long can be separated from fiber bundle of microcrystalline cellulose. Impact energy produced by bubble collision in this new type nozzle was promoted obviously. So efficient pulverization can be reached through the application of the short jet collision nozzle which can be perfectly used for superfine pulverizing tough and tensile biomaterials.

Key words: jet pulverization; superfine processing; short jet collision nozzle; hydrodynamic cavitation

0　引言

高压射流破碎可产生强烈的剪切、摩擦、拉伸、碰撞作用,尤其能产生百兆帕级的水力空化冲击能[1-5],是制备纳米级乳液和悬液的有效方法[6]。

高压射流破碎中的能量转化部件为射流阀。为

收稿日期: 2021-06-23　修回日期: 2021-10-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400305)

作者简介: 张绍英(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品加工技术与设备研究,E-mail: cauzsy@cau.edu.cn

了提升速度梯度,强化剪切、碰撞等作用,射流阀常采用流道结构固定的微孔阀,多见直孔阀、折向孔阀和对撞阀 3 种结构形式。相同压力下,直孔阀的液流速度梯度大、剪切作用强;折向孔阀的碰撞、湍流作用显著;对撞阀则是强化了射流撞击作用[7]。3 种射流阀在结构及动力参数上均未对水力空化进行合理规划、有效控制和高效利用,对强度较高的硬、韧性颗粒的破碎能力弱。并且,出阀孔的液流中无效动能残留可达系统输入总能量的 40% ~60%。因此,本文通过射流阀的几何和流体动力学结构优化设计,探索强化水力空化冲击能、减少无效能量产生的方法。

1 短程射流共点交汇对撞阀技术方案

水力空化发生时可形成稳定空泡(蒸汽泡)和非稳定空泡(真空泡)。蒸汽泡主要由温度、压力变化导致的液气相转换产生;真空泡则由流速骤升导致的流体连续性破坏产生。空泡的溃灭一般都伴随压力的升高以及流速、温度的降低[8-11]。

根据水力空化经典理论,空化数 σ 是判定水力空化的初生条件,而流体在某处的压力低于空化初生临界压力是稳定空泡在该处产生的基本条件。空化数计算公式为

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^2} \times 100\% \tag{1}$$

式中 p_∞——稳定流场中某处的压力

v_∞——稳定流场中某处的速度

ρ——液体密度

p_v——饱和蒸汽压

当边壁结构、流体构相比较复杂时,用空化数及空化初生临界压力判断蒸汽泡产生的离散度大,以流体在"某处压力低于该处的饱和蒸汽压"作为蒸汽泡产生的基本条件则更具实用性。真空泡的形成条件复杂,尤其是在多组分高速液流瞬间通过微孔时尤为复杂。但原则上,流道内的速度梯度越高,形成真空泡的可能性越大;在流动方向上流道内速度不降、压力不升,则溃灭的可能性较小。

理论上,蒸汽泡产生量多,溃灭冲击能总量也多。但当蒸汽泡存量过多且不能同时溃灭时,溃灭冲击能易被周围的蒸汽泡吸收产生能量自噬。大量可伸缩性蒸汽泡的存在,既不利于真空泡的形成,又会吸收真空泡溃灭的冲击能。另外,根据射流阀的结构和流体运动特点,为了获得高能量密度的溃灭冲击能,既要促进真空泡的形成、抑制蒸汽泡的产生,又需控制空泡的集中溃灭,以利于提升能量级别,汇聚能量密度。

为了进一步强化射流阀的水力空化作用,提高能量量级和能效,提出了一种短程射流共点交汇对撞阀技术方案(图 1)[12]。其技术要点及预期效果包括:

(1)在阀孔内造就速度渐升的高速液流,促进真空泡形成。

(2)通过缩短射流的管程,抑制蒸汽泡的发育。

(3)利用多股射流共点交汇形成的"水力靶板"效应,使液流降速、升压,实现射流中空泡的集中溃灭,产生冲击能汇聚。

(4)利用射流对撞,将出阀孔高速射流中的无效动能进一步转化为冲击破碎能,提高能效。

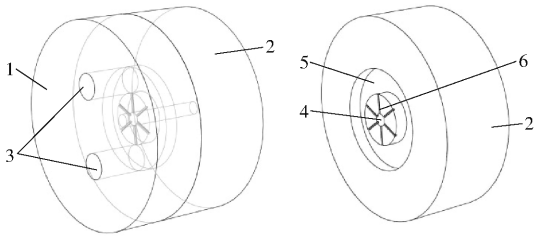


图 1 短程射流共点交汇对撞阀结构示意图

Fig. 1 Short jet collision nozzle structure

1. 盖片 2. 槽片 3. 进料孔 4. 汇流孔 5. 分流环槽 6. 阀槽

短程射流共点交汇对撞阀(图 1)由圆盘状的盖片和槽片叠合构成,利用封盖阀槽形成共点交汇的多个阀孔。载有物料的高压液流经由进料孔注入分流环槽,并由分流环槽分别进入各阀孔,在各阀孔中形成多股高速射流共点交汇后由汇流孔排出。

高压液流在阀孔进口及阀孔内的短程、急剧加速过程有助于真空泡的形成,而在交汇点处的集中溃灭有助于溃灭冲击能的汇聚。

对于短程射流共点交汇对撞阀而言,液流压力是破碎能产生的基础动力,而射流阀构造及几何参数配置决定着压力能转化为破碎能的效率。压力越高,转化的各种破碎能量的量级越高。在满足技术经济性的前提下,为保证超微破碎效果和能效,短程射流共点交汇对撞阀的作业压力宜在 100 MPa 以上。

2 短程射流共点交汇对撞阀关键结构参数

在液料构成及操作参数不变时,与破碎能力相关的结构参数主要有阀孔径 d、孔深 L 以及出口到水力靶板的距离 S(图 2)。

2.1 阀孔径 d

d 的确定,既要保证破碎能转化效率,又要兼顾物料的通过性。阀孔径越小,产生的破碎作用越强,而大孔径则会降低径向速度梯度,产生无效流量。

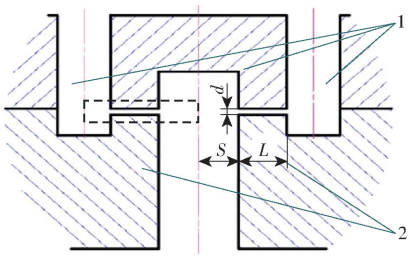


图 2　短程射流共点交汇对撞阀关键尺寸示意图

Fig. 2　Key size of short jet collision nozzle

1. 盖片　2. 槽片

射流破碎前，颗粒物料一般进行预微粉碎处理。为与预破碎对接，并保证 200 目以下颗粒全部通过，应使 $d \geqslant 75$ μm。

2.2　阀孔深 L

L 直接与促进真空泡的形成、抑制蒸汽泡的发育有关。空泡的生命周期包括初生、聚并和膨胀、收缩、溃灭阶段，整个生命周期仅为数十微秒[13]。为避免空泡在阀孔内溃灭，L 的确定原则是使液流流经阀孔的时间短于空泡的生命周期。依据上述原则确定 L 时，还需兼顾阀孔内液流流速、压力以及 d。另外，阀孔是由封盖阀槽形成，为形成接合面处的密封带，L 取值应大于并接近 0.5 mm，作业压力越高 L 宜越大。

2.3　出口到水力靶板的距离 S

空泡充分发育并能产生撞击压力脉冲时，存在与压力无关、仅与 d 和 S 有关的无因次最优喷距（S/d 为 8 ~ 15）[14]。由于出阀孔后的高速射流存在明显的散射，为保证共点交汇和空泡集中溃灭，在无因次最优喷距范围内，S/d 的取值以偏低为宜。

2.4　短程射流共点交汇对撞阀模拟

高压射流破碎处理的物料可为液-液、液-胶和液-固混合态，流场内状态复杂，而空化效应进一步加剧了流态的复杂程度。另外，水力空化不仅与温度、压力和流速 3 个标志性参数相关，还受流体粘度、表面张力、杂质种类及含量、边壁状态等多重因素影响[2-3]。水力空化发生时，空泡的生成、生长及溃灭仅持续数十微秒[13]。因此，射流破碎过程中的水力空化是影响因素多、关联关系极其复杂的瞬间过程，通过理论解析或仪器监测极其困难。目前，常利用计算流体动力学（Computational fluid dynamics，CFD）[15-20]和间接现象检测[21-24]对空化的发生进行数值模拟和间接评判。

参照关键结构参数的确定依据及选值限制条件，确定 $d = 75$ μm；S 分别为 0.5、1.0、2.0 mm；压力分别为 100、200、300 MPa 后，确定了图 2 中虚线框标识的计算域（图 3）。

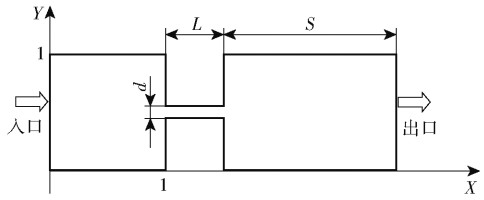


图 3　计算域几何尺寸

Fig. 3　Geometry of computational domain

应用 Fluent 数值分析软件，采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型，基本控制方程和湍流模型方程为[9]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{U}) = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial (\rho \boldsymbol{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{U} \otimes \boldsymbol{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \boldsymbol{U}) = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} (\nabla \boldsymbol{U})^{\mathrm{T}}) \tag{3}$$

其中

$$\mu_{eff} = \mu + C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

式中　$\boldsymbol{U}$——速度矢量，m/s

p'——流体微元体上压力，Pa

μ——动态粘度，Pa·s

μ_{eff}——有效粘度，Pa·s

k——湍动能，m^2/s^2

ε——湍动耗散率，m^2/s^3

C_{μ}——常数

$\otimes$——张量积运算符号

∇——梯度运算符号

对射流阀孔内及进、出口附近区域的压力和速度分布进行了模拟（图 4），以考察阀孔内压力、速度变化，为短程射流共点交汇对撞阀的阀孔结构和操作压力匹配提供理论参照。

由图 4 可见，阀孔内存在大面积高速（$5.5 \times 10^2 \sim 1.2 \times 10^3$ m/s）流区域，表明进口至出口液流加速显著，具备促进真空泡产生的基础条件。各种参数配置下，在距出口 0.5 mm 以外区域流速快速下降、流束明显散射。

另外，由压力云图可见，阀孔内压力均低于一般作业温度（20 ~ 80℃）下的饱和蒸汽压，故应尽量减小 L，以避免蒸汽泡在阀孔内的发育、溃灭[13]。计算发现，当 $L < 1.0$ mm 时，液流通过阀孔的时间可控制在 2×10^{-6} s，远低于蒸汽泡的生命周期。

综上分析，短程射流共点交汇对撞阀整体技术方案中的短流道配置，存在促进真空泡形成、抑制蒸汽泡发育的可能性。S 的取值控制在 0.5 mm 附近，即可使含有真空泡的多股射流共点交汇、集中溃灭，在交汇处汇聚微爆冲击能。

由 CFD 模拟的短程射流共点交汇对撞阀阀孔

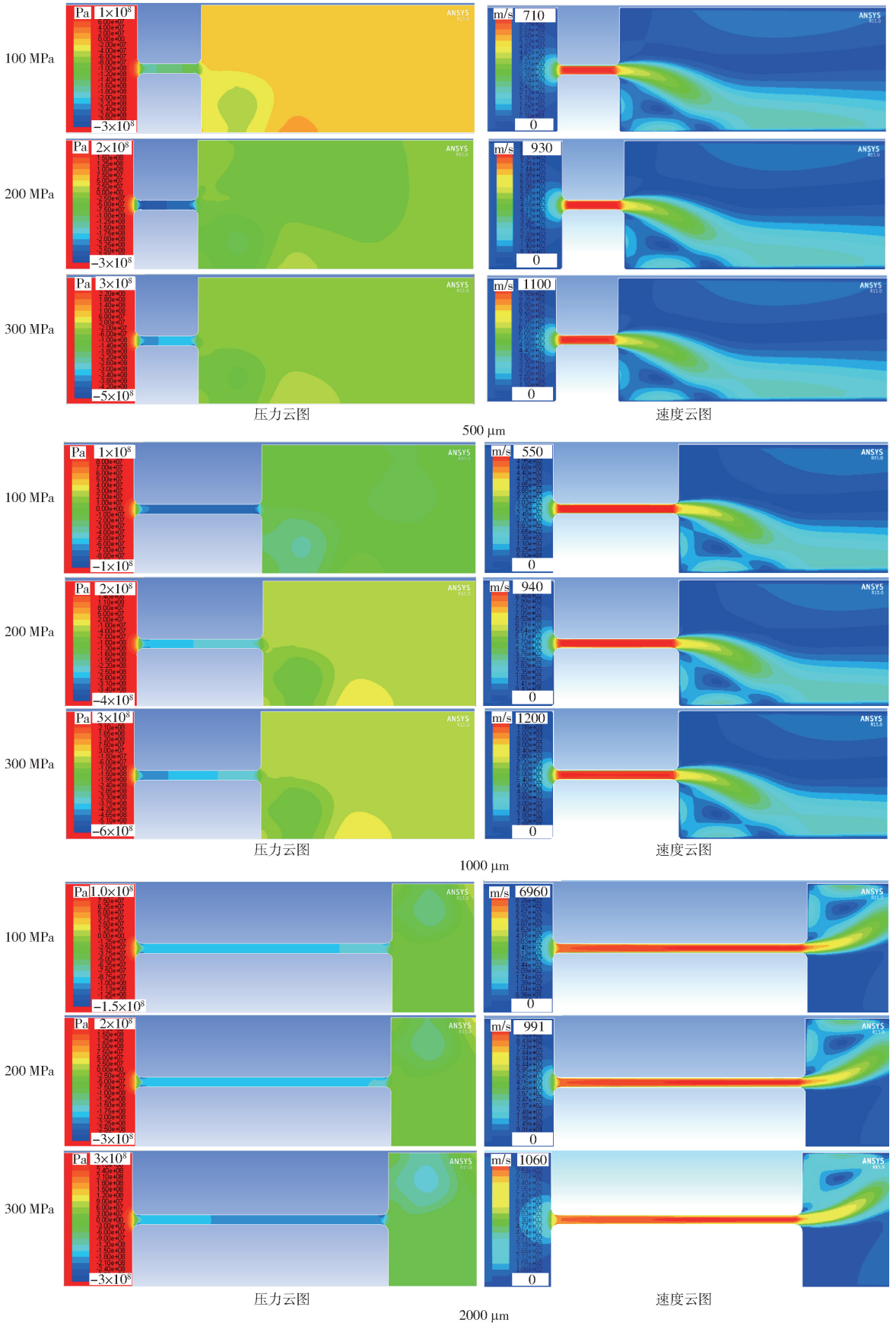


图 4 阀孔及进出口压力速度场分布

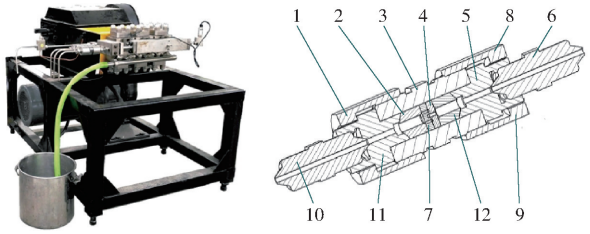
Fig. 4 Distribution of pressure and velocity in inlet and outlet of nozzle

及进、出口附近的压力及速度场,仅分布在 ϕ3 mm × 0.1 mm 的狭小空间内,阀出口外 0.5 mm 处即为交汇对撞点,在不改变阀结构和保证密封性的前提下,已无传感器的布置空间,故未能对 CFD 模拟结果进

行直接检测。

3　破碎效果验证

依据关键参数确定依据，以 NCJJ－0.2/200 型射流破碎机（廊坊通用机械制造有限公司，操作压力 0～200 MPa，最大处理量 200 L/h）为试验平台（图 5a），选择、确定了一组用于微晶纤维素超微细化的阀结构（图 5b）和运行参数（6 槽，d = 120 μm，L = 0.9 mm，S = 0.75 mm），对短程射流共点交汇对撞阀技术方案的有效性进行了试验验证，并与试验平台上配备的直孔阀（3 孔，d = 200 μm，L = 1.5 mm）的水力空化及破碎性能进行了比较。



(a) NCJJ-0.2/200型射流破碎机　(b) 短程射流共点交汇对撞阀剖面图

图 5　短程射流共点交汇对撞阀试验系统

Fig. 5　Experimental system of short jet collision nozzle

1、8、9. 螺帽　2、12. 压套　3. 阀套　4. 槽片　5、11. 接管　6、10. 转接器　7. 盖片

3.1　材料与方法

3.1.1　材料

微晶纤维素（上海阿拉丁生化科技股份有限公司）、亚甲基蓝（$C_{16}H_{18}ClN_3S\cdot 3H_2O$，相对分子量 373.90，分析纯，福晨（天津）化学试剂有限公司，亚甲基蓝质量分数 98.5% 以上）、蒸馏水、20℃ 无离子水。

3.1.2　仪器与方法

（1）亚甲基蓝（MB）自由基检测[21]：UVmini－11240 型紫外－可见分光光度仪（日本岛津公司）。波长范围：190～1 100 nm；波长正确度：±1 nm；基线平直度：±0.010 Abs。亚甲基蓝浓度为 8 μmol/L。

（2）破碎效果检测：Phenom ProX CeB6 型飞纳台式扫描电镜（荷兰 Phenom－World 公司）。上样质量分数 0.02%、导电胶承托、晾干喷金。

3.2　试验结果与分析

3.2.1　强化水力空化效果观察及检测

图 6 为 8 μmol/L 亚甲基蓝溶液原样以及 150 MPa 压力下分别通过直孔阀和短程射流共点交汇对撞阀后的褪色效果。由图 6 可见，通过两种阀后的亚甲基蓝溶液均有褪色，表明处理过程有羟自由基产生。短程射流共点交汇对撞阀的褪色效果优于直孔阀，表明强化水力空化措施有效。

用亚甲基蓝自由基检测方法[21]对两种射流阀

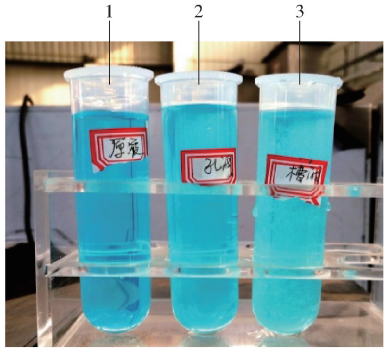


图 6　两种射流阀处理后亚甲基蓝溶液的颜色变化

Fig. 6　Color difference of methylthionine chloride processed by two type jet nozzles

1. 原样　2. 直孔阀处理　3. 短程射流共点交汇对撞阀处理

的空化效果进行了量化检测，回归标定出的标准曲线方程为

$$A = 0.029\,4x + 0.039\,4 \tag{5}$$

式中　A——亚甲基蓝溶液 664 nm 处的吸光度

x——亚甲基蓝溶液浓度，μmol/L

羟自由基捕获量计算公式为

$$C_{\cdot OH} = (A_1 - A_2)/0.029\,4 \tag{6}$$

式中　$C_{\cdot OH}$——羟自由基捕获量，μmol/L

A_1——8 μmol/L 亚甲基蓝溶液在 664 nm 处的吸光度

A_2——经过射流阀后亚甲基蓝溶液在 664 nm 处的吸光度

由式(6)计算出的羟自由基捕获量见表 1。与直孔阀相比，采用水力空化强化措施后的短程射流共点交汇对撞阀的羟自由基捕获量提升了 41%。

表 1　两种射流阀处理后样品中的羟自由基捕获量

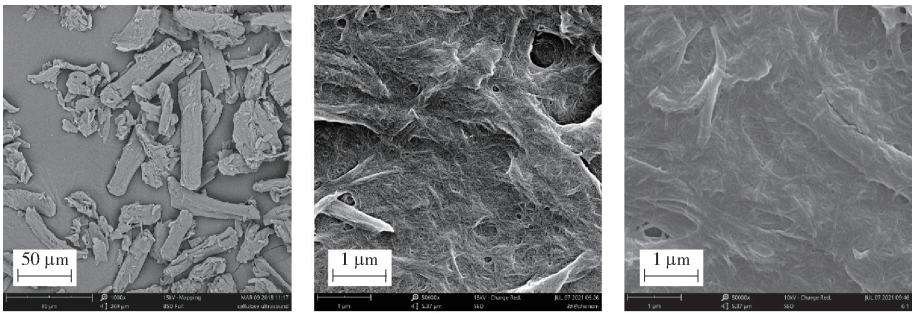
Tab. 1　Yield of ·OH by different jet nozzles

射流阀类型	取样序号	紫外吸光度 A		羟自由基捕获量
		原液 A_1	样品 A_2	$C_{\cdot OH}$/(μmol·L^{-1})
短程射流共点交汇对撞阀	1	0.198	0.174	0.827
	2	0.199	0.174	0.827
	3	0.198	0.174	0.827
直孔阀	1	0.198	0.181	0.588
	2	0.199	0.181	0.588
	3	0.198	0.181	0.588

试验时发现，在压力大于 100 MPa 时，液流经过短程射流共点交汇对撞阀时可产生强烈的水激振动，每次过阀后料温升高 20～22℃，较直孔阀温升提高约 10℃。扣除温升能耗后，短程射流共点交汇对撞阀可将出阀口射流中无效动能的 60%～80% 转化为参与破碎的有效能。

3.2.2　对微晶纤维素超微细化效果

在试验压力 150 MPa 时，质量分数 1.5% 的微晶纤维素悬液分别由直孔阀和短程射流共点交汇对撞阀处理 3 次后的外观形态见图 7。



(a) 微晶纤维素原料形态 (b) 直孔阀处理 (c) 短程射流共点交汇对撞阀处理

图 7 纤维素超微细化效果电镜观察

Fig. 7 SEM images of cellulose treated by two different jet nozzles

由图 7 可见,射流破碎后原直径 20 μm 的棒状微晶纤维素的整体结构已被碎解,并暴露出大量直径约数十纳米的细纤束。与直孔阀相比,短程射流共点交汇对撞阀能得到更细的纤维束,且纤维束轮廓更模糊,产物也呈现准溶胶体系的形态。

根据纤维素构造理论[25]初步判断为,射流破碎不仅可破坏微晶纤维素的整体结构,并能进一步肢解直径 25 ~ 30 nm 的大原纤构造,而使直径约 15 nm 的微原纤构造暴露出来。上述现象印证了短程射流共点交汇对撞阀具有对硬韧性生物原料进行超微细化的能力。

3.2.3 微晶纤维素悬液的形态变化

微晶纤维素分散在水中时表现为典型的悬液特征,停止扰动后可快速沉降,经射流破碎处理后,一是沉降速度变缓,二是浊相体积明显增加。破碎次数增加该现象加剧,且短程射流共点交汇对撞阀较直孔阀表现更加突出。

图 8 为经短程射流共点交汇对撞阀分别处理 1、2、3 次后的质量分数 1.5% 微晶纤维素悬液的沉降效果(静置时间 72 h 以上)。处理 3 次时,质量分数 1.5% 微晶纤维素悬液已呈现出准溶胶体系的特征,粘度、流动性、体系稳定性均显著增加。这表明微晶纤维素经短程射流共点交汇对撞阀处理后可释放纤束间的亲水组分,暴露出更多的无定型结构区域。

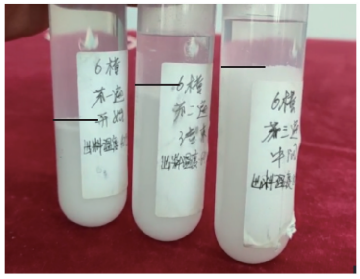


图 8 微晶纤维素悬液沉淀效果

Fig. 8 Deposition of cellulose treated by short jet collision nozzle structure

4 结论

(1)相同运行条件下,短程射流共点交汇对撞阀较直孔阀羟自由基捕获量提高了 41%;证明强化水力空化措施促进了溃灭冲击能的产生。

(2)短程射流共点交汇对撞阀能将微晶纤维壳层破碎,并能进一步打开大原纤结构,剥离出直径约 15 nm 的微原纤,使典型悬液体系向准溶胶体系转变,可作为生物材料超微细化和改性处理的有效方法。

(3)短程射流共点交汇对撞阀可将出阀孔射流中无效动能的 60% ~80% 转化为对撞破碎能。

参 考 文 献

[1] HARRISON M. An experimental study of single bubble cavitation noise[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1952,24(6):776 - 782.

[2] JONES I R, EDWARDS D H. An experimental study of forces generated by the collapse of transient cavitles in water[J]. J. Fluid Mech. ,1960,7(4):596 - 609.

[3] KIREJCZYK J. The energy flux of cavitating flow[C]//Proc. 6th Int. Conf. on Fluid Machinery. BudaPest,1979:555.

[4] 李根生, 沈忠厚, 周长山, 等. 自振空化射流研究与应用进展[J]. 中国工程科学, 2005, 7(1): 27 - 33.
LI Gensheng, SHEN Zhonghou, ZHOU Changshan, et al. Advances in investigation and application of self-resonating cavitating water jet[J]. Engineering Science, 2005,7(1):27 - 33. (in Chinese)

[5] 吴雪, 张绍英, 冯涛, 等. 高压均质过程中射流噪声与空化效应的关联分析与实证[J]. 农业工程学报,2011,27(1):170 - 174.
WU Xue, ZHANG Shaoying, FENG Tao, et al. Correlation analysis and experimental investigation of jet noise and cavitation during high pressure jet homogenizing process[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(1):170 - 174. (in Chinese)

[6] 李杨, 和铭钰, 吴长玲, 等. 空化射流条件下酶法制油豆渣蛋白结构与理化特性研究[J/OL]. 农业机械学报,2020, 51(12):332 - 340.

LI Yang, HE Mingyu, WU Changling, et al. Effect of cavitation jet on structure and physicochemical properties of soybean residue protein produced by enzymatic oil production[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 332 - 340. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20201236&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.036. (in Chinese)

[7] 吴雪. 高压射流破碎过程空化作用的强化研究[D]. 北京：中国农业大学, 2011.
WU Xue. Research on cavitation enhancement during high pressure jet crush process[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011. (in Chinese)

[8] 余冬梅. 水力空化发生的影响因素及评价[D]. 天津：天津科技大学, 2010.
YU Dongmei. Influence factors and appraise of hydraulic cavitation occurring[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)

[9] YONG A P, ISLAM M A, HASAN N. A review: effect of pressure on homogenization[J]. Sigma J. Eng. & Nat. Sci., 2017, 35(1): 1 - 22.

[10] 王惠敏, 孙三祥. 水力空化中雷诺数与空化数关系的研究[J]. 环境工程, 2008, 26(6): 15 - 19.
WANG Huimin, SUN Sanxiang. Investigation on the relation between cavitation number and reynolds number in hydrodynamic cavitation[J]. Environmental Engineering, 2008, 26(6): 15 - 19. (in Chinese)

[11] 王巍, 安昭阳, 唐滔, 等. 射流控制水翼空化流动的多工况适应性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 186 - 194.
WANG Wei, AN Zhaoyang, TANG Tao, et al. Adaptability of cavitation flow controlled by active jet under multi-cavitation conditions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 186 - 194. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20201021&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.021. (in Chinese)

[12] 张绍英, 刘婷, 吴雪, 等. 短程射流共点交汇对撞阀: 201810888300.6[P]. 2020 - 03 - 13.

[13] TOMITA Y, SHIMA A. High-speed photographic observations of laser-induced cavitation bubbles in water[J]. Acustica, 1990, 71(3): 161 - 171.

[14] 杨会中. 水力空化强化效应实验研究[D]. 大连：大连理工大学, 2006.
YANG Huizhong. Experimental study on enhancive effect of hydrodynamic cavitation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)

[15] 刘照东. 喷管流场水力空化的 CFD 数值模拟[D]. 大庆：东北石油大学, 2011.
LIU Zhaodong. CFD numerical simulation of hydrodynamic cavitation on nozzle flow[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011. (in Chinese)

[16] 王智勇, 张晓冬, 杨会中. 文丘里管中空化流场的数值模拟[J]. 计算机与应用化学, 2006, 23(10): 940 - 942.
WANG Zhiyong, ZHANG Xiaodong, YANG Huizhong. Numerical simulation of cavitation flow field in the Venture[J]. Computers and Applied Chemistry, 2006, 23(10): 940 - 942. (in Chinese)

[17] 王常斌, 王敏, 于远洋, 等. 文丘里管水力空化现象的 CFD 模拟[J]. 管道技术与设备, 2013(1): 10 - 12.
WANG Changbin, WANG Min, YU Yuanyang, et al. CFD simulation of Venturi tube hydraulic cavitation pipeline[J]. Technique and Equipment, 2013(1): 10 - 12. (in Chinese)

[18] 张赟阁, 李日红, 林少云, 等. 水力空化气液混溶器中空化流场的数值模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(5): 1111 - 1119.
ZHANG Yunge, LI Rihong, LIN Shaoyun, et al. Numerical investigation of cavitating flow in a hydrodynamic cavitation gas - liquid reactor[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(5): 1111 - 1119. (in Chinese)

[19] 王永杰. 基于孔板及射流的水力空化数值模拟及实验研究[D]. 太原：中北大学, 2017.
WANG Yongjie. Numerical simulation and experimental study of hydrodynamic cavitation based on orifice plate and jet[D]. Taiyuan: North University of China, 2017. (in Chinese)

[20] 章昱. 水力空化及 CFD 数值模拟[D]. 杭州：浙江工业大学, 2011.
ZHANG Yu. Hydrodynamic cavitation and numerical simulation with CFD[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011. (in Chinese)

[21] 张晓冬, 杨会中, 李志义. 水力空化强度与空化自由基产量的关系[J]. 化工学报, 2007, 58(1): 27 - 32.
ZHANG Xiaodong, YANG Huizhong, LI Zhiyi. Relationship between strength of hydrodynamic cavitation and amount of induced hydroxyl radical[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2007, 58(1): 27 - 32. (in Chinese)

[22] RENAUDIN V, GONDREXON N, BOLDO P, et al. Method for determining the chemically active zones in a high-frequency ultrasonic reactor[J]. Ultrasonic Sonochemistry, 1994, 1(2): 81 - 85.

[23] 张凤华, 廖振方, 唐川林, 等. 空化水射流的化学效应[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(1): 32 - 35.
ZHANG Fenghua, LIAO Zhenfang, TANG Chuanlin, et al. The chemical effects of cavitating water jets[J]. Journal of Chongqing University, 2004, 27(1): 32 - 35. (in Chinese)

[24] MCMURRAY H N, WILSON B P. Mechanistic and spatial study of ultrasonically induced luminol chemiluminescence[J]. J. Phys. Chem. A, 1999, 103(20): 3955 - 3962.

[25] 高洁, 汤烈贵. 纤维素科学[M]. 北京：科学出版社, 1999.