

基于自振射流的纸浆搅拌技术试验研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2018.02.008

徐旭¹ 徐浩²
王霞光¹

1. 湖南工业大学
水射流研究所

湖南 株洲 412007

2. 陕西火石咀煤矿有限公司
技术科

陕西 咸阳 713500

摘要:在造纸工业中,纸浆搅拌是整套工艺流程中的重要一环。基于自振射流技术,对纸浆搅拌桶内木材纤维及其混合物的搅拌效果进行试验研究。以木质纤维板为目标冲蚀物,将冲蚀后的木质纤维板料及浆料放入纸浆搅拌桶,分析自振射流对物料的冲蚀及搅拌效果。研究表明:采用自振射流搅拌时,随着喷嘴距桶液面距离的增加,桶内纸浆液中非纤维体积分数先增加后减少,并且射流冲击压力越大,粉碎搅拌效果越好;在相同试验条件下,自振射流搅拌效果优于传统机械搅拌法;与连续射流相比,自振射流对物料冲击压力大、破碎效率高、搅拌效果好。

关键词:自振射流;连续射流;机械搅拌法;纸浆搅拌液;非纤维体积分数

中图分类号: TP69

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2018)02-0051-05

1 研究背景

利用机械方法研磨木、草、竹等纤维质原料制作纸浆在我国造纸工业中占有主要地位,原材料破碎及浆料搅拌是机械制浆中重要的工艺环节。传统纸浆搅拌多采用搅拌桶、搅拌机等装置,这样得到的纸浆非纤维物质大多未被去掉,非纤维成份含量高,制成的纸强度较低,易发黄破碎,不利于长期保存。针对此问题,课题组采用自振射流对纸浆进行前期破碎及后期搅拌。

自振射流是使射流在特殊的机械结构中产生震荡,而无需其他外部激励源。即喷嘴上端射流射入自激振荡腔室,腔室内气体与射入流体发生动量交换,射流与气体作用后形成具有一定厚度的不稳定剪切层。剪切层携带漩涡并随射流一起向下喷嘴方向运动,剪切层在运动过程中不断产生新的漩涡,当其与带有扰动的射流到达碰撞壁时,产生具有固定频率的

压力扰动波。该波迅速反射至上喷嘴入口处,当压力扰动波相位与腔内射流震荡相位相同时,腔内射流振荡被放大,从而产生自振射流。

A. F. Conn^[1]最先提出自振射流这一概念,随后其团队利用流体力学理论与弹性力学理论,推导了自振射流频率模型,为自振射流的发展作出了重要贡献。俄罗斯与日本科学家对自振射流的产生机理及其应用领域进行分析,指出了其未来的发展方向。D. Rockwell等^[2]对振荡腔室内流场进行了研究,发现腔室下游碰撞区未碰撞前流场紊乱无序,碰撞后产生了具有一定频率的漩涡。随后G. L. Chahine^[3]在A. F. Conn研究的基础上对Helmholtz振荡腔进行研究,发现当具有扰动的射流经过Helmholtz振荡腔,并且射流振荡频率与腔体固有频率相同时,会产生自振射流。我国从1980年开始对自振射流及其工业装置进行研究,其中以重庆大学廖振方教授及其团队^[4]的成果最为显著。廖教授及其团队分别研究了射流扰动

收稿日期: 2017-12-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374101), 湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX2017B686)

作者简介: 徐旭(1990-), 男, 河北邢台人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为高效射流理论及应用,

E-mail: 497331412@qq.com

的产生、放大、反馈过程与振荡腔内流场特性，并分析了结构参数与运行参数对射流振荡频率的影响规律。在此基础上，李晓红等^[5]通过分析射流及振荡腔频率特性，重新设计了自振射流系统，射流振荡频率与压力峰值均得到了提高。

国内外关于利用自振射流对纸浆搅拌的研究甚少，本文采用试验方法研究自振射流^[6]对浆料物的冲蚀与搅拌效果。

2 试验研究

2.1 试验系统

自振射流系统如图1所示。系统主要由水箱、水泵、储能器、自振脉冲射流喷嘴、物料桶等组成^[7]。首先在物料桶内装入半成品粉碎料与浆料混合物，启动电源向水泵供水，待供水稳定后启动电机，利用阀门将系统调节至工作压力。由水泵输送的水流先经过储能器降紊，水流经储能器输送至喷嘴处，自振脉冲喷嘴产生的射流直接冲击物料桶内的混合物，同时物料桶呈逆时针晃动，自振喷嘴产生的射流既起到粉碎作用又起到搅拌作用^[8-9]。整套试验系统在工作过程中保持稳定水压，并且采用固定装置防止自振喷嘴产生晃动。

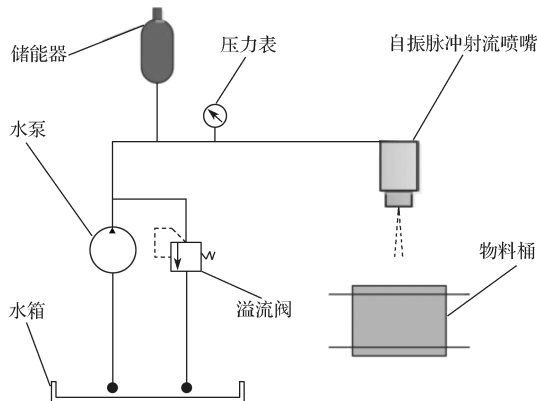


图1 自振射流试验系统

Fig. 1 Experiment system of self-excited oscillation water jet

2.2 试验方法

先按2.1节的程序，将混合物料加入物料桶搅拌，使其混合均匀，再做后期测试。

纸浆品质主要是由纸浆液中纤维形态及其纯净程度所决定。纸浆液中参杂有木素、色素和树脂等非纤维成分，非纤维成分过多会导致生产的纸张变脆易发黄，不能长期保存。采用密度法对纸浆液中非纤维

含量进行计算，利用纸浆密度测定仪测定复合纸浆液密度、纤维密度和非纤维密度，并按下面的方法计算出纸浆液中非纤维的体积分数。

$$\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 - \rho_3 (V_2 - V_1), \quad (1)$$

式中： V_1 为非纤维的体积， cm^3 ；

ρ_1 为非纤维的密度， g/cm^3 ；

V_2 为复合纸浆的体积， cm^3 ；

ρ_2 为复合纸浆的密度， g/cm^3 ；

ρ_3 为纤维的密度， g/cm^3 。

由式(1)得出纸浆液中非纤维的体积分数为

$$v = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\rho_2 - \rho_3}{\rho_1 - \rho_3}, \quad (2)$$

则搅拌后纸浆液中非纤维体积分数可表示为

$$\varepsilon = \frac{V}{V'}, \quad (3)$$

式中 V 为搅拌后纸浆液的体积。

将直径为300 mm、高度为300 mm的物料桶安装在旋转转盘上，利用简易台钳将自振脉冲喷嘴固定在物料桶中心线上端。将半成品粉碎料与浆料混合物放进物料桶，系统启动后喷嘴产生的射流对桶内混合物破碎搅拌。测试射流压力 p (分别为2.5, 5.0, 7.5, 10.0 MPa) 与喷嘴距物料桶液面距离 d (分别为50, 100, 150, 200, 250 mm)^[10] 对破碎搅拌效果的影响，并将自振射流粉碎搅拌效果与机械搅拌效果对比。以上试验完成后，在相同试验条件下利用连续射流对相同物料进行粉碎搅拌，并与自振射流法所得数据对比。利用量筒与纸浆密度测定仪对各工况下纸浆液的复合纸浆密度、纤维密度与非纤维密度进行测量。以冲蚀后物料桶内纸浆液中非纤维的体积分数 ε 来衡量传统机械搅拌法、连续射流法与自振射流法的搅拌效果。

3 试验结果分析

3.1 喷射距离对射流粉碎搅拌效果的影响

在相同试验条件下，测试不同射流压力下物料桶纸浆液中非纤维体积分数随喷嘴距桶液面距离的变化规律，结果如图2所示。

由图2可知，随着喷嘴与桶液面距离的增加，物料桶内纸浆液中非纤维体积分数先增加后减少，当 $d=150$ mm 时，非纤维的体积分数最高。随着射流压力的增加，纸浆液中非纤维的体积分数逐渐降低。在本试验所测试范围内，射流压力越高越利于提高物

料搅拌效率。

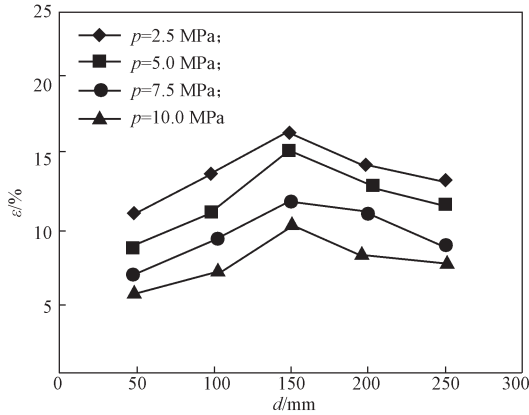


图2 纸浆液中非纤维的体积分数随喷射距离的变化规律

Fig. 2 The variation of the volume fraction of non-fiber with jet distance in pulp liquor

当喷嘴距桶内液面距离 d 为 50~150 mm 时, 根据自振射流冲蚀特性, 射流冲蚀强度随靶距增加而减弱^[11], 因此在 $d=50$ mm 时, 自振射流对物料粉碎搅拌效果最佳。这是由于在 50~150 mm 内, 射流压力梯度大、冲蚀强度高; 随着物料桶的均匀旋转, 射流既可以对物料进行粉碎, 又能起到搅拌的作用。但是当 $d>150$ mm 时, 射流冲蚀效率又随 d 的增大而逐渐增加, 主要是因为随靶距增加, 射流剪切层边缘卷起, 增加了有效粉碎搅拌面积。

由图 2 可以看出, 非纤维含量随喷射距离的变化而变化, 且存在最大值。这是由于随着喷射距离的变化, 射流冲击能量也随之变化, 当 $d=150$ mm 时, 射流对纸浆液冲蚀能力最弱, 因此纸浆液中非纤维含量较高。

通过试验观察可知, 自振射流在对桶内物料粉碎搅拌时, 块状物料粉碎速度加快, 且在射流的冲击作用下与周围液体快速融合, 当射流压力 $p=10.0$ MPa 时, 射流对物料的粉碎搅拌作用更加明显。由图可知, 当 $d=150$ mm 时, $p=2.5$ MPa 与 $p=5.0$ MPa 所对应的非纤维体积分数约为 15%。这表明在临界点处, 射流压力较小时 (2.0~5.0 MPa) 桶内非纤维含量变化较小。此外, 试验中主要采集了喷射距离 50~250 mm 内的数据, 对于喷射距离小于 50 mm 的相关研究将后续进行。

3.2 机械搅拌法与自振射流搅拌效果对比

采用试验的方法, 对比研究自振射流搅拌与机械搅拌时, 搅拌桶纸浆液中非纤维体积分数变化的规律。试验参数设置如下: 射流压力 $p=7.5$ MPa, 喷嘴

距桶液面距离 $d=50$ mm, 纸浆液中非纤维体积分数初始值为 18%。实验结果如图 3 所示。

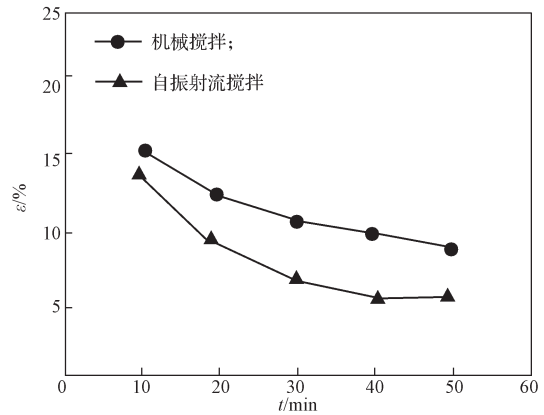


图3 纸浆液中非纤维体积分数随搅拌时间的变化规律

Fig. 3 The variation of the volume fraction of non-fiber with stirring time in pulp liquor

由图 3 可知, 分别采用自振射流搅拌与机械搅拌, 随着搅拌时间 t 的增加, 纸浆液中非纤维体积分数均逐渐降低; 并且采用自振射流搅拌时, 非纤维体积分数降幅较大。当 $t=10\sim20$ min 时, 自振射流搅拌的效果明显优于传统机械搅拌。传统机械搅拌是将黏稠浆料搅拌均匀, 很难使浆料中固相物料粉碎; 自振射流不仅可以破碎固相物料, 而且可对黏稠浆料起到搅拌作用。

根据自振射流搅拌获得的数据曲线可知, 当 $t>40$ min 时, 纸浆液中非纤维体积分数保持在 5% 左右。这说明自振射流搅拌法存在最佳搅拌时间段, 即当 $t<40$ min 时, 自振射流搅拌效率较高, 纸浆液中非纤维含量降幅显著; 超过最佳搅拌时间后, 自振射流搅拌效果逐渐降低。这种现象是由于当自振射流冲击到固相物料表面时, 射流速度迅速减小, 作用于物料表面的压力迅速增大^[12], 这时物料不仅受力后破碎并且具有了初动能。随着搅拌时间的增加, 物料桶内固相物料成分逐渐减少, 射流粉碎搅拌效率不再增加。因此在实际应用中, 采用射流搅拌时应将工作时间尽量控制在最佳工作时段内。此外, 与机械搅拌法相比, 自振射流搅拌能耗低、无死角, 设备维修方便。

3.3 自振射流搅拌与连续射流搅拌效果对比

当射流压力 $p=10.0$ MPa, 搅拌时间 $t=40$ min 时, 试验研究自振射流与连续射流的搅拌效果随喷嘴与桶液面距离 d (50, 100, 150, 200, 250 mm) 的变化规律, 结果如图 4 所示。

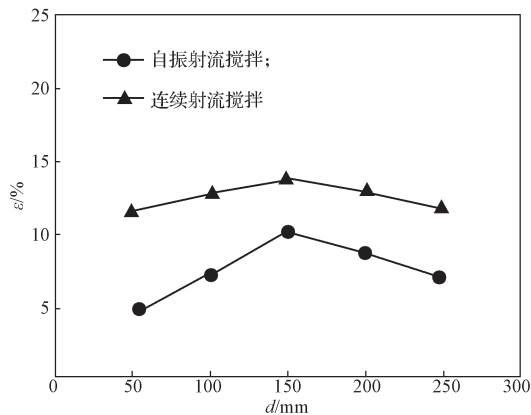


图4 纸浆液中非纤维体积分数随喷射距离的变化规律

Fig. 4 The variation of the volume fraction of non-fiber with jet distance in pulp liquor

由图4可知,当喷嘴离桶液面距离相同时,自振射流搅拌后纸浆液中非纤维体积分数小于连续射流搅拌后非纤维体积分数。即相同冲击距离下,自振射流搅拌效果明显优于连续射流。通过分析所得数据曲线可知,采用连续射流搅拌时,随着冲击距离的增加,纸浆液中非纤维体积分数变化较小;而采用自振射流搅拌时,随着冲击距离的增加,纸浆液中非纤维体积分数变化较大^[13]。

与连续射流相比,自振射流会产生极强的瞬时压力^[14],更有利于桶内物料的破碎搅拌。此外随着喷射距离的增加,自振射流冲击破碎作用与搅拌作用均存在,并且不同阶段两者效果不同。即当自振射流冲击距离较短时,射流以冲击破碎为主;当自振射流冲击距离较长时,由于射流产生发散,此时以搅拌为主。连续射流从喷嘴射出后,随着喷射距离的增加,其能量逐渐衰减,而且在进入液固混合物后,射流速度迅速降低至零,仅有部分能量传递给目标物料。

试验中发现,连续射流与自振射流均可对桶内浆料进行无死角破碎搅拌,在自振射流作用下,桶内物料波动范围更大,即更有利于物料间的混合。通过观察粉碎搅拌后的物料可知,自振射流作用后的纸浆液中多为细小颗粒,而连续射流作用后纸浆液中多为中等尺度颗粒。

4 结论

综上所述可得如下结论:

1) 随着喷嘴距物料桶液面距离的增加,自振射流对纸浆液中非纤维物质的破碎搅拌效率先降低后缓慢增加。

2) 自振射流压力越大,对桶内物料破碎搅拌效果越好。

3) 与机械搅拌法相比,自振射流搅拌后桶内纸浆液中非纤维体积分数明显较低;并且自振射流搅拌能耗低、无死角,设备结构简单、易维护。

4) 随着喷嘴距物料桶液面距离的增加,自振射流与连续射流作用后,纸浆液中非纤维体积分数变化规律相似,均先增大后减小,但自振射流的对物料的破碎搅拌效果明显优于连续射流。

参考文献:

- [1] CONN A F. The Fluid Dynamics of Submerged Cavitating Jet Cutting[J]. Intl. Symp. on Jet Cutting Tech., 1980, 30(7): 201-209.
- [2] ROCKWELL D, NAUDASCHER E. Self-Sustained Oscillations of Impinging Free Shear Layers[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1979, 11(1): 67-94.
- [3] CHAHINE G L, JR V E J. Mechanics and Applications of Self-Resonating Cavitating Jets[C/OL]. [2017-12-19]. https://www.researchgate.net/publication/234096029_Mechanics_and_Applications_of_Self-Resonating_Cavitating_Jets.
- [4] 廖振方, 唐川林, 张风华. 自激振荡脉冲射流喷嘴的试验研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, 25(2): 28-32.
LIAO Zhenfang, TANG Chuanlin, ZHANG Fenghua. Experiments of the Self-Excited Oscillation Pulsed Jet Nozzle[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2002, 25(2): 28-32.
- [5] 李晓红, 杨林, 王建生, 等. 自激振荡脉冲射流装置的固有频率特性[J]. 煤炭学报, 2000, 25(6): 641-644.
LI Xiaohong, YANG Lin, WANG Jiansheng, et al. The Natural Frequency Characteristic of the Self-Excited Oscillation Pulsed Water Jet Device[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(6): 641-644.
- [6] 唐川林, 胡东, 张风华, 等. 自振脉冲气液射流振动分析[J]. 力学学报, 2013, 45(4): 534-540.
TANG Chuanlin, HU Dong, ZHANG Fenghua, et al. Vibration Analysis of the Self-Excited Oscillation Pulsed Air-Water Jet[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(4): 534-540.
- [7] 高传昌, 赵礼, 刘新阳, 等. 淹没条件下自激脉冲射流冲蚀试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(1): 53-56.

- GAO Chuanchang, ZHAO Li, LIU Xinyang, et al. Experiment Research on Erosion of Self-Excited Inspired Pulsatile Jet in Submerged Conditions[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(1): 53-56.
- [8] 葛兆龙, 周哲, 卢义玉, 等. 影响自激振荡脉冲射流性能的喷嘴结构参数研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(5): 160-165.
- GE Zhaolong, ZHOU Zhe, LU Yiyu, et al. Study on the Nozzle Structure Parameters Affecting the Performance of Self-Excited Oscillation Pulsed Jet[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(5): 160-165.
- [9] 裴江红, 唐川林, 胡东. 双腔室自激振荡喷嘴频率特性研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(4): 29-32.
- PEI Jianghong, TANG Chuanlin, HU Dong. Self-Excited Oscillation Frequency Feature of a Pulsed Water Jet Nozzle with Double-Chamber[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(4): 29-32.
- [10] ZHANG X, JEFFREY R G, BUNGER A P, et al. Initiation and Growth of a Hydraulic Fracture from a Circular Wellbore[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(6): 984-995.
- [11] DEHKHODA S, HOOD M, ALEHOSSEIN H, et al. Analytical and Experimental Study of Pressure Dynamics in a Pulsed Water Jet Device[J]. Flow Turbulence and Combustion, 2012, 89(1): 97-119.
- [12] 胡东, 唐川林, 张风华, 等. 脉冲气液射流冲蚀特性实验分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(11): 141-144.
- HU Dong, TANG Chuanlin, ZHANG Fenghua, et al. Erosion Characteristic of a Pulsed Air-Water Jet[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(11): 141-144.
- [13] 唐川林, 王晓明, 胡东, 等. 自振脉冲喷嘴中异形结构对射流振荡频率的影响[J]. 矿山机械, 2015, 43(1): 15-20.
- TANG Chuanlin, WANG Xiaoming, HU Dong, et al. Influence of Special-Outlet Self-Exciting Oscillation Pulsed Nozzle on Oscillation Frequency[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(1): 15-20.
- [14] 倪红坚, 马琳, 艾尼瓦尔, 等. 自吸环空流体式自激振荡脉冲射流性能分析与优化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(6): 76-80.
- NI Hongjian, MA Lin, ANWAR, et al. Performance Analysis and Optimization of Self-Excited Pulsed Jet Suck-in Annulus Fluids[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2011, 35(6): 76-80.

Study on Technology of Pulp Stirring Based on Self-Excited Oscillation Water Jet

XU Xu¹, XU Hao², WANG Xiaguang¹

(1. Modern Jetting Department, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Engineering Department, Shaanxi Flint Coal Mine Co., Ltd., Xianyang Shaanxi 713500, China)

Abstract: In paper manufacturing industry, pulp stirring is an important step in the whole technological process. The stirring effects of wood fiber and its mixture in agitator based on self-excited oscillation water jet were studied. Taking the wood fiber board as the erosion target, the crushed wood fiber board and slurry were put into the pulp stirring drum, the erosion and stirring effects of self-excited oscillation water jet on target material were analyzed. The results showed that when using the self-excited oscillation water jet to stir materials, the volume fraction of non fiber residues increased first and then decreased with the increase in the distance between the nozzle and the barrel level, and the stirring effects of jet improved with the increase in the jet pressure. The stirring effect of self-excited oscillation water jet was better than that of traditional mechanical agitation method under the same condition. The self-excited oscillation water jet had a greater pressure on target material compared with continuous water jet, and performed with high crushing efficiency and good stirring effect.

Keywords: self-excited oscillation water jet; continuous jet; mechanical agitation method; pulp stirring liquid; non-fiber volume fraction