

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.09.012

## 旋转锥形射流的参数影响与试验研究

李光荣, 葛英飞, 郑勇, 薛小强

(南京工程学院机械工程学院, 江苏 南京 211167)



李光荣

**摘要:** 为了研究中心有一小孔( $0 \leq d \leq 4$  mm)的不同头数螺旋流槽的圆柱形结构加旋件的旋转锥形磨料射流特性,通过射流打击断面试验研究,确定加旋件头数、有无中心孔、圆锥收缩角、压力和靶距及其范围等喷头结构参数.采用单因素试验法分析各参数对射流断面形状的影响,得出影响趋势图以及回归分析方程.研究表明:射流断面形状为实心圆或圆环.随着工作压力的升高,圆环外径增大,内径几乎不变;单头加旋件的打击效果较2头、3头的差,即射流加旋不均匀;由于加旋件中心孔增大,射流断面外径逐渐减小,收缩角几乎不受影响.靶距存在最佳打击范围,靶距增大导致圆环外径增大,两者呈线性正比例关系.试验为优化喷头及加旋件的结构参数和工作条件提供依据,且为进一步提高射流性能奠定理论和试验基础.

**关键词:** 旋转射流;工作参数;压力;收缩角;加旋件

**中图分类号:** S277.9; TP668 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2013)09-0794-06

李光荣,葛英飞,郑勇,等.旋转锥形射流的参数影响与试验研究[J].排灌机械工程学报,2013,31(9):794-799.

## Effects of nozzle parameters on rotating conical abrasive jet and experiments

Li Guangrong, Ge Yingfei, Zheng Yong, Xue Xiaoqiang

(School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167, China)

**Abstract:** To investigate the characteristics of abrasive jet from a conical nozzle, which is composed of a casing and a core with spiral-grooved cylinder, a series of jet impingement experiments were conducted. The parameters that can affect characteristics of jet include number of grooves, diameter of central hole in cone, working pressure, distance between nozzle outlet and target. The effects of every parameter on jet cross-section shape were investigated by single factor experiment method, a few regression equations were fitted based on the experimental data, and the reasons why those effects were shown are analyzed theoretically. The results showed that the jet cross-section shape is a solid circle or a ring. The ring outer diameter becomes larger with increasing working pressure, while the inner diameter of the ring is almost the same. The impinging load of jet with single groove on the target is lower than that with two or three grooves. With increasing diameter of central hole the outer diameter of jet cross-section is decreased gradually. The cone angle of jet is almost unaffected. There is an optimum range of target distance; the outer diameter of jet cross-section gets large nearly linearly with increasing target distance; meanwhile the inner diameter is expanded as well. These experimental results can provide the basis for nozzle and spiral grooves geometrical parameters optimization and working pressure determination, and establish a theoretical and experimental basis for further improvement in jet performance.

收稿日期: 2012-09-28; 网络出版时间: 2013-09-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20130916.1057.013.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275227); 江苏省科技支撑计划项目(BE2011712); 南京工程学院校级创新课题(CKJB201201)

作者简介: 李光荣(1978—),女,河南新乡人,副教授(grongli@njit.edu.cn),主要从事水射流、CAD/CAPP/CAM/MES研究。

葛英飞(1975—),男,安徽巢湖人,副教授(yingfeige@163.com),主要从事先进制造技术、高速切削研究。

**Key words:** rotating water jet; work parameter; pressure; contraction angle; spinning part

旋转水射流的形成有多种方式,一般需要在喷口上游采用一定的加旋措施.不同的加旋措施所得到的射流形状等特点各不相同.王佰顺等<sup>[1]</sup>采用在喷头两侧安装2个喷嘴的方法,该喷头主要应用于煤矿上的冲煤,不适合于钻具有某一直径的孔.朱兴业等<sup>[2]</sup>采用隙控式全射流喷头,主要特点是在全射流喷头喷管出口处的射流元件及喷头的反向机构,通过水流的反作用力获得驱动力矩,主要应用于喷灌作业中.李红等<sup>[3]</sup>采用基于射流附壁效应的旋转式射流喷头,这种旋转式射流喷头通过喷头本身进行旋转.获得旋转射流的方法还有切向注入法、固定导叶加旋法、管内导流法、机械旋转法和压缩沙层法等<sup>[4-5]</sup>.这些加旋方法有些采用某些或某个机械部件进行机械式的旋转或者添加附件进行旋转,有些用喷头旋转,增加了机械部件和附件的运动不稳定性,又具有高压旋转密封的难题,甚至还会引起材料崩裂.

为避免和解决上述加旋方法中喷头机械部件的旋转和密封等难题,文中旋转锥形水射流系统采用具有一中心孔的螺旋槽式加旋件以加旋流体.流体除了在螺道里流动外还通过中心小孔喷出,会形成具有较大扩散角的环形射流断面,且射流能量集中在一定直径的圆环内.通过确定具有合理参数的加旋件及喷头的结构尺寸如喷嘴的直径、圆锥收缩角等,考察参数对旋转锥形磨料射流形成的影响,并进行射流钻小直径孔和清洗除锈小直径管道的试验研究.

## 1 试验参数的预选

为使旋转锥形磨料射流更好地发挥优势,提高其工作能力,探索对小直径管道内壁除锈的效果,研究的关键是射流断面形状<sup>[6]</sup>.为了考察不同参数对射流断面形状的影响,让喷出的旋转锥形磨料射流打击到一定靶距的铁板上,通过改变参数进行相关的试验.试验参数如下:加旋件头数 $t$ 分别为1,2,3;加旋件的螺距 $H$ 分别为8,12,16 mm;圆锥收缩角 $\beta$ 分别为 $20^\circ, 30^\circ$ ;喷嘴直径 $d_1$ 分别为1.7,2.0,2.3 mm;工作压力 $p$ 分别为4,7,8,13 MPa;加旋件中心分为有孔、无孔2种情况,且孔的直径 $d'$ 分别为2.0,3.2,4.0,4.5 mm;工作靶距 $b$ 分别为40,80,100 mm.

对所得试验效果即断面形状的衡量标准是断面的大致形状和尺寸(如直径、长度), $D$ 为外圆直径; $d$ 为内圆直径.数据处理中代号说明: $W_1$ 为加旋件中心无孔; $W_2$ 为加旋件有中心孔,直径为2 mm; $W_3$ 为加旋件有中心孔,直径为3.2 mm; $W_4$ 为加旋件有中心孔,直径为4 mm.如果同时有 $D$ 和 $d$ 且数值不为0,则射流打击截面为圆环面.如果只有 $D$ 数值不为0,则射流打击截面为实心圆.

在试验研究中,射流形成后在不同距离上射流直径不同,可以测定;而扩散角保持固定,因此将扩散角作为评定旋转锥形磨料射流性能的参数之一,也是考察射流扩散程度的指标之一.根据试验中的条件计算旋转锥形磨料射流扩散角 $2\gamma$ 的大小,如图1所示.

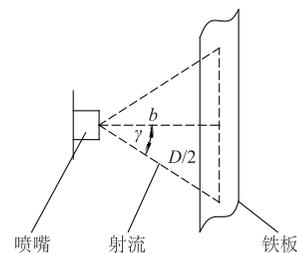


图1 扩散角的计算图

Fig. 1 Diagram for calculating diffusion angle

## 2 喷头结构对射流断面形状的影响

### 2.1 加旋件头数对射流断面形状的影响

喷头结构如图2所示,主要有流槽加旋段、圆锥收缩段、圆管进液段组成.特制的加旋件位于流槽加旋段内,使射流通过该段时获得旋转,经圆锥收缩段后喷出.

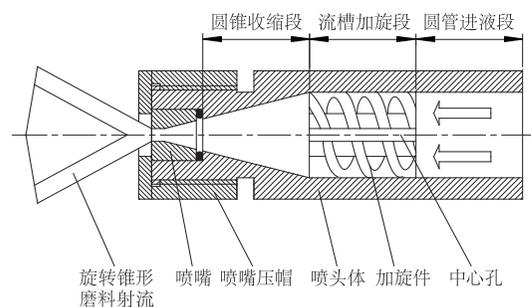


图2 旋转锥形磨料射流喷头结构示意图

Fig. 2 Structure sketch of nozzle of rotating conical abrasive jet

试验中采用的磨料为天然金刚砂. 由于喷嘴直径的限制, 并为了保证混合射流的畅通, 每次装入罐中的砂粒都经过筛分, 磨粒直径 $\leq 0.5$  mm. 磨料传量分数是磨料射流的一个重要参数, 根据前期的试验结果可知该参数最佳范围为30%左右.

试验条件: 加旋件的头数  $t$  分别为 1, 2, 3; 螺距为 8 mm; 喷嘴直径为 2.0 mm; 圆锥收缩角为  $30^\circ$ ; 工作压力为 8 MPa; 工作靶距为 80 mm; 打击时间为 7 s. 试验数据: 在  $W_1$  条件下, 加旋件头数为 1,  $D$  与  $d$  值分别为 90, 50 mm 和 110, 80 mm; 加旋件头数为 2,  $D$  与  $d$  值分别为 90, 30 mm 和 100, 46 mm; 加旋件头数为 3,  $D$  与  $d$  值分别为 77, 21 mm 和 75, 45 mm.

为了更直观地表示各参数的试验数据对打击结果的影响趋势, 对以上数据作趋势图, 如图 3 所示并进行分析. 图中  $L_1, l_1, L_2, l_2$  分别表示射流断面外径和内径随加旋件头数的不同而呈现的趋势.

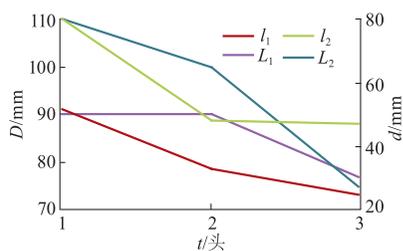


图3 加旋件头数对射流断面形状的影响趋势图  
Fig. 3 Influence of number of grooves on jet cross-section shape

对图中各曲线进行线性回归分析得

$$\begin{cases} L_1: D = -4.5t^2 + 11.5t + 83, \\ L_2: D = 15.5t^2 - 80.5t + 145, \\ l_1: d = 5.5t^2 - 36.5t + 81, \\ l_2: d = -6t^2 + 8t + 108. \end{cases} \quad (1)$$

由以上数据分析和图 3 中曲线可以得出, 1 头的加旋件打击的断面形状为大半圆环, 而 2, 3 头的加旋件则为圆环或圆, 头数对圆环的外径和内径影响较大, 相同螺距、不同头数的条件下得到的圆环或圆的直径大小不同, 在一定范围内头数越大则圆环的内、外径越小; 综合考虑并从实际应用角度(如钻孔、管道除锈)出发, 结论为 1 头的打击效果较 2, 3 头的差, 即射流旋转不均匀; 而 3 头的效果要好于 2 头的, 因为同一截面上螺旋槽越多, 则同一时刻射出的射流股数越多, 形成的水流旋转相对均匀些, 在一定的靶距范围内所得的断面要均匀些即为整个圆环; 同时水的股数越多, 水流之间的相互影响

越大, 即相互作用力包括流体动压力和黏性力(水与水、水和磨料之间)越大, 离心力减小, 在同等条件下水流相对向轴心收缩, 故在一定靶距上圆直径较小. 但并不是头数越多越好, 截面尺寸有一定的限制, 头数越多加工难度越大, 而且所得圆直径更小.

## 2.2 加旋件中心孔大小对射流断面形状的影响

由以上试验分析可知, 若加旋件中心无孔时, 在某一断面上打击的射流形状为圆环, 而中心有一小孔( $d' = 2.0$  mm)时, 打出断面形状接近于圆. 因此, 可以断定在一定工作条件下, 改变中心孔大小, 可以控制断面的形状由圆环到圆的过渡. 若使射流打击出的断面形状为实心圆, 则当旋转锥形射流用于钻孔时, 射流就能均匀地钻进, 从而达到较好的效果.

试验条件: 加旋件为 3 头, 螺距为 8 mm, 中心孔直径  $d'$  分别为 2.0, 3.2, 4.0, 4.5 mm, 喷嘴直径为 1.7 mm, 圆锥收缩角为  $30^\circ$ , 工作压力为 8.13 MPa, 工作靶距为 80 mm, 打击时间为 5 s. 试验数据: 压力为 13 MPa 时,  $D$  与  $d$  值分别为 65, 15 mm, 64, 0 mm, 60, 0 mm 和 54, 0 mm, 用  $L_1$  曲线表示; 压力为 8 MPa 时,  $D$  与  $d$  值分别为 70, 17 mm, 56, 0 mm, 50, 0 mm 和 45, 0 mm, 用  $L_2$  曲线表示, 如图 4 所示.

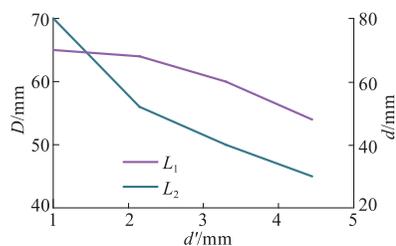


图4 中心孔  $d'$  对射流断面形状的影响趋势图  
Fig. 4 Influence of diameter of central hole on jet cross-section shape

对图 4 中曲线进行线性回归分析得

$$\begin{cases} L_1: D = -2d'^2 + 10d' + 53, \\ L_2: D = 2.1d'^2 - 22.5d' + 106.7. \end{cases} \quad (2)$$

由数据和图 4 中曲线分析可得, 当中心孔直径  $d' = 2.0$  mm 时, 射流打击断面形状基本为圆环, 而当中心孔直径  $d' = 3.2$  mm 时, 可以形成实心圆的断面; 但随着中心孔的增大, 在相同工作条件下, 一定靶距  $b$  断面上, 打出射流扩散的外径  $D$  逐渐减小, 从环形断面慢慢趋向于实心圆断面. 因为在起流阶段, 混合流到达加旋件前端时受到不同力的作用, 主要有流体动压力  $F$ 、摩擦力  $T_1$ 、加旋件阻力  $T_2$ 、中

心孔造成的内外压力差  $p_1$  以及螺旋通道造成的内外压力差  $p_2$ . 当加旋件的中心孔直径  $d' \leq 2.0$  mm 时,其中流体有 2 种流动趋势:一种是进入螺旋通道进行旋转流趋势;另一种是混合流通过中心孔直接喷出,这种条件下  $p_1 \geq p_2$  (因  $p_i$  方向与流体流动方向相反),其他作用于流体上的力都相同,所以混合流在中心孔处受的总阻力相对较大,故混合流几乎全部进入螺旋通道作旋转流运动. 当加旋件的中心孔直径  $d'$  逐渐增大(如  $d' \geq 3.2$  mm)时,此时螺旋通道不变, $p_1$  与  $p_2$  的值逐渐趋于平衡,故在综合作用力下混合流有一部分进入螺旋通道进行旋转流运动,其余部分则直接通过中心孔喷出,再经锥形收缩段和喷嘴进行加速喷出. 由于经螺旋道加旋后的射流切向速度逐渐减小,动量和能量也相应减小,射流的旋转程度随之变小,射流扩散角缩小,打击断面直径减小,而中心处的小股直射流则达到断面的中心部位,综合起来即可得到全断面.

### 2.3 圆锥收缩角对射流断面形状的影响

试验条件:加旋件的头数为 2,3 头,螺距为 8 mm,喷嘴直径为 1.7 mm,圆锥收缩角  $\beta$  分别为  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,工作压力为 13 MPa,工作靶距为 80 mm,打击时间 7 s. 试验数据:当收缩角  $\beta = 30^\circ$ ,加旋件为 2 头,  $W_2$  的情况下,  $D$  与  $d$  值分别为 70,14 mm 和 76,16 mm,而在  $W_1$  的情况下,  $D$  与  $d$  值分别为 80,32 mm 和 84,31 mm;当加旋件为 3 头,  $W_2$  的情况下,  $D$  与  $d$  值分别为 63,13 mm 和 65,15 mm;  $W_1$  的情况下,  $D$  与  $d$  值分别为 70,35 mm 和 75,25 mm.

由于试验条件的限制,只进行了 2 种圆锥收缩角的试验. 由数据定性分析可得,随着收缩角  $\beta$  的增大,在一定断面上射流打击的圆或圆环的直径会相应增大,其中外径增大程度比内径大,而内径几乎不受圆锥收缩角  $\beta$  变化的影响,圆锥收缩角  $\beta$  增大范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$ . 当圆锥收缩角  $\beta$  增大时,相应圆锥段变短,从螺旋通道流出的混合流在较短时间和较小容积内急剧地旋转收缩,所以混合流的动量相应的增大. 当混合流从喷嘴喷出时,切向速度值较大,射出的扩散角增大,使得打击断面的外径增大<sup>[7-9]</sup>.

### 2.4 圆锥收缩角对射流钻孔的影响

为考察喷头参数用于钻孔的实际空间结构以及对钻孔效果的影响,进行了试验研究. 调速电动机转速为 16 r/min(进给速度为 80 mm/min),磨料质量分数为 30%,对人工煤块钻孔. 所谓人工煤块是指由水泥和煤粉按一定比例混合,然后经特殊模具制成,考虑到试验的可比性,选用 1:1,1:3,1:5

(简称 1:1 试块、1:3 试块、1:5 试块)3 种,体积为 100 mm × 100 mm × 100 mm,试块硬度经试验压力机测得.

通过钻孔试验结果分析,随着收缩角  $\beta$  增大,在相同工作条件下,孔外径  $d$  呈增大趋势,但影响不明显;孔平均深度  $\bar{h}$  却随之降低,内锥高度  $h$  减小,从而使得孔体积稍微增大,但不明显. 可见,圆锥收缩角  $\beta$  对钻孔结果的影响不是很大.

## 3 工作条件对射流断面形状的影响

### 3.1 工作压力对射流断面形状的影响

试验条件:加旋件的头数为 2,3 头,螺距为 8 mm,喷嘴直径为 1.7 mm,圆锥收缩角为  $30^\circ$ ,工作压力为 4,7,13 MPa,工作靶距为 80 mm,打击时间为 7 s. 试验数据:在加旋件头数为 2 头,  $W_2$  条件下,  $D$  与  $d$  值分别为 0,0 mm, 73,13 mm 和 76,16 mm,  $W_1$  条件下  $D$  与  $d$  值分别为 0,0 mm, 82,26 mm 和 87,31 mm;在加旋件头数为 3 头,  $W_2$  条件下,  $D$  与  $d$  值分别为 56,10 mm, 65,15 mm 和 65,15 mm,用曲线  $L_1, l_1$  表示,而  $W_1$  条件下  $D$  与  $d$  值分别为 64,16 mm,75,25 mm 和 75,25 mm,用曲线  $L_2, l_2$  表示,如图 5 所示.

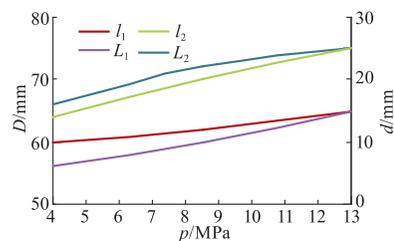


图5 工作压力对射流断面形状的影响趋势图  
Fig. 5 Influence trend diagram of working pressure to jet section shape

对图 5 中各曲线进行线性回归分析得

$$\begin{cases} L_1: D = 0.5p^2 + 25p + 53, \\ L_2: D = -0.5p^2 + 7.5p + 57, \\ l_1: d = 0.5p^2 + 0.5p + 9, \\ l_2: d = -1.5p^2 + 10.5p + 7. \end{cases} \quad (3)$$

由数据和图 5 中曲线分析得,随着工作压力  $p$  增大,在其他相同条件下,所得圆或圆环的外径  $D$  增大,而内径  $d$  受其影响较小,但也呈上升趋势,其中加旋件中心有孔的效果基本为圆,中间有一很小的孔未受打击;加旋件中心无孔的效果为标准圆环,断面大小相应增大,即圆或圆环的直径增大. 随

着泵压力升高,相同时间内流过同一截面的流量增大,喷出后的射流产生更大的动能,导致打击结果较好,圆的直径相应增大<sup>[10-12]</sup>.

### 3.2 工作压力对射流钻孔的影响

加旋件头数为2,3头,螺距为8 mm,初始靶距为70 mm,喷嘴直径为1.7 mm,圆锥收缩角为30°,工作压力分别为4,8,13 MPa,打击时间为30 s.

通过试验结果分析在相同材质、相同条件下,压力越大,则孔外径越大,孔的平均深度先增大后逐渐减小;孔的内锥高度呈较缓的上升趋势并逐渐趋于平稳,孔的体积 $V$ 也相应增大.因为压力升高,导致流体和磨粒的动量增大,喷出后流体质点的切向速度增大,射流扩散角增大,所以钻孔效果较好.

### 3.3 工作靶距对射流断面形状的影响

试验条件:加旋件头数为2,3头,螺距为8.0 mm,喷嘴直径为2.0 mm,圆锥收缩角为30°,工作压力为8 MPa,工作靶距为40,80,100 mm,打击时间为7 s.试验数据:当加旋件为2头, $W_2$ 条件下, $D$ 与 $d$ 值分别52,6 mm,90,30 mm和112,38 mm,用 $L_1, l_1$ 曲线表示;在 $W_1$ 条件下, $D$ 与 $d$ 值分别为58,24 mm,100,46 mm和120,57 mm,用 $L_2, l_2$ 曲线表示;加旋件为3头, $W_2$ 条件下 $D$ 与 $d$ 值分别为52,11 mm和77,21 mm, $W_1$ 条件下 $D$ 与 $d$ 值分别为47,19 mm和75,45 mm,如图6所示.

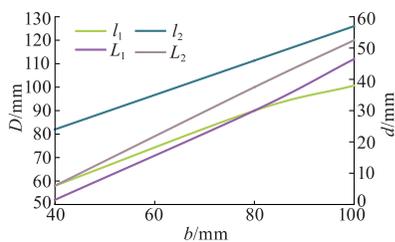


图6 工作靶距对射流断面形状的影响趋势图  
Fig. 6 Influence target distance on jet cross-section shape

对图6中各曲线进行线性回归分析得

$$\begin{cases} L_1: D = 30.0b + 24.7, \\ L_2: D = 31.0b + 30.7, \\ l_1: d = 16.0b - 7.3, \\ l_2: d = 16.5b + 9.3. \end{cases} \quad (4)$$

由数据和图6中曲线分析得,在相同工作条件下,靶距 $b$ 越大,则在一定距离断面上打出的圆环外径 $D$ 越大,两者呈线性正比例关系,同时内径 $d$ 也相应增大;但靶距并不是越大越好,因为喷出的是空心圆锥体射流,所以随着靶距 $b$ 增大,离喷口越

远,锥体外径 $D$ 也越大,而喷出后射流环厚基本不变,内径 $d$ 相应增大.

## 4 结论

1) 通过单因素试验分析和研究,证明了采用加旋件为带有流槽的圆柱形元件结构是可行的,打击断面形状为圆形或者圆环形,对钻孔和小直径管道的除锈清洗比较适合.

2) 通过试验得出了加旋件等喷头结构参数对射流断面形状的影响.3头和2头的加旋件比1头的打击效果要好,而3头的打击效果好于2头,加旋件中心孔的大小也直接影响了射流断面,随着中心孔的增大,射流断面外径 $D$ 逐渐减小,断面形状从圆环逐渐过渡到实心圆.收缩角 $\beta$ 增大则打击出的射流断面外径 $D$ 增大而内径 $d$ 几乎不受影响.

3) 试验得出工作条件参数对射流也会产生影响.随着工作靶距 $b$ 增大则射流打击的断面外径 $D$ 增大且呈线性正比关系,内径 $d$ 也相应增大.应用射流进行了部分的钻孔应用分析,为进一步优化加旋件结构和工作参数提供了参考,且为提高射流的工作效果奠定了基础.

## 参考文献 (References)

- [1] 王佰顺,丁旭东.水力冲孔喷头结构参数设计及试验研究[J].煤炭工程,2012(7):42-44.  
Wang Baishun, Ding Xudong. Design and experiment study on nozzle structure parameters of hydraulic bore-hole flushing[J]. Coal Engineering, 2012(7):42-44. (in Chinese)
- [2] 朱兴业,袁寿其,向清江,等.旋转式射流喷头设计与性能正交试验[J].农业机械学报,2008,39(7):76-79.  
Zhu Xingye, Yuan Shouqi, Xiang Qingjiang, et al. Orthogonal experiment on design and performance of a rotational jet sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(7):76-79. (in Chinese)
- [3] 李红,袁寿其,谢福琪,等.隙控式全射流喷头性能特点及与摇臂式喷头的比较研究[J].农业工程学报,2006,22(5):82-85.  
Li Hong, Yuan Shouqi, Xie Fuqi, et al. Performance characteristics of fluidic sprinkler controlled by clearance and comparison with impact sprinkle[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5):82-85. (in Chinese)
- [4] 张彬,任立侠,黄建喜,等.水气同轴喷嘴结构对提

- 高水射流喷射能力的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2011, 37(6):47-50.
- Zhang Bin, Ren Lixia, Huang Jianxi, et al. Influence of structure of air-water coaxial nozzle on improvement of water-jet capacity [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2011, 37(6):47-50. (in Chinese)
- [5] Lopatnikov S L, Gillespie J W, Morand C, et al. The new test method for high velocity water jet impact[J]. Experimental Mechanics, 2012, 52(9):1475-1481.
- [6] 胡鹤鸣. 旋转水射流喷嘴内部流动及冲击压强特性研究[D]. 北京:清华大学水利水电工程系, 2008.
- [7] 巴胜富, 任启乐, 苏吉鑫, 等. 超高压纯水射流除漆效率的影响因素及优化设计[J]. 流体机械, 2010, 39(5):34-37.
- Ba Shengfu, Ren Qile, Su Jixin, et al. Influence factors and optimal design of removal paint by UHP waterjet [J]. Fluid Machinery, 2010, 39(5):34-37. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] Green S, Perrottet D, Richerzhagen B. Damage-free dicing of sic wafers by water-jet-guided laser[C]//Proceedings of the CS MANTECH Conference. Vancouver, Canada:[s. n.], 2006:145-146.
- [10] Janković P, Radovanović M. Water quality used by water jet machines[J]. Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering, 2008, 7(17):1534-1538.
- [11] Zohoor M, Nourian S H. Development of an algorithm for optimum control process to compensate the nozzle wear effect in cutting the hard and tough material using abrasive water jet cutting process [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61(9/10/11/12):1-10.
- [12] Gobet M, Obi S, Pavius M, et al. Implementation of short-pulse lasers for wafer scribing and grooving applications[J]. Journal of Laser Micro Nanoengineering, 2010, 5(1):16-20.
- (责任编辑 谈国鹏)
- 
- (上接第 793 页)
- [8] 彭旭东, 刘伟, 白少先, 等. 热弹变形对核主泵用流体静压型机械密封性能的影响[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23):146-153.
- Peng Xudong, Liu Wei, Bai Shaoxian, et al. Effects analysis of thermo-elastic deformation on the performance of hydrostatic mechanical seals in reactor coolant pumps [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(23):146-153. (in Chinese)
- [9] 肖睿, 辛明道, 朱恂. 微矩形槽道内的气体滑移流动和传热分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2001, 24(1):99-103.
- Xiao Rui, Xin Mingdao, Zhu Xun. Analysis of gaseous slip flow and heat transfer in micro rectangular channels [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2001, 24(1):99-103. (in Chinese)
- [10] 肖睿, 辛明道. 边界条件对滑移区气体微槽流动和传热的影响[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(10):1067-1071.
- Xiao Rui, Xin Mingdao. Boundary condition effects on gaseous slip flow and heat transfer in micro rectangular channels [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(10):1067-1071. (in Chinese)
- [11] 丁雪兴, 蒲军军, 韩明君, 等. 基于二阶滑移边界的螺旋槽干气密封气膜刚度计算与分析[J]. 机械工程学报, 2012, 47(23):119-124.
- Ding Xuexing, Pu Junjun, Han Mingjun, et al. Calculation and analysis of gas film stiffness in the spiral groove gas seal based on the second order slip boundary [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 47(23):119-124. (in Chinese)
- [12] 韩明君, 李有堂, 苏虹, 等. 干气密封螺旋槽内润滑气膜的热力过程[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(4):457-462.
- Han Mingjun, Li Youtang, Su Hong, et al. Thermodynamic process of lubricating gas film in dry gas seals with spiral grooves [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4):457-462. (in Chinese)
- (责任编辑 谈国鹏)