

# 具有共振腔的喷嘴紊流射流 特性试验研究

沈忠厚 王汝元 李兆敏

(开发系)

**摘要** 对带有共振腔的特种喷嘴进行了试验研究。试验得到了脉冲射流并给出了定量数据。这种脉冲射流除了具有脉冲性能外,还同样具有一般射流的特性。射流结构分为初始段和基本段,且在基本段中射流存在自模性。本文给出了其数学表达式以及轴心速度沿喷距的变化规律。文中给出的脉冲射流的定性和定量结果将有助于射流技术的发展及其在喷射钻井中的应用。

**关键词** 脉冲射流;紊流射流;相似性;速度分布

## 0 引言

射流技术在工业中得到了广泛的应用。例如水力采煤、破岩及喷射钻井等。国内外专家学者们对于紊流射流进行了大量的研究<sup>[1~3]</sup>,尤其对射流的动力特性研究得较多,喷嘴的几何形状是得到理想射流的重要参数,不同的喷嘴型面变化规律产生不同性能的射流。而不同的射流特性将用于不同的工业场合。具有较大冲击力的射流可用于采煤、破岩及钻井工程中,或用于切割金属材料。提高射流冲击力的方法较多,如提高泵压,改变喷嘴形状;减少沿程阻力和局部阻力损失;增加射流的脉冲性能等。本文通过试验设计出特种型面变化规律的喷嘴,获得了脉冲射流。本文给出的定量数据,对钻井工程中的喷射钻井所需的喷嘴设计、选型和进而对提高破岩能力及钻速具有一定的指导意义。

## 1 喷嘴型面

喷嘴的几何形状见图1。喷嘴的上部具有两次共振腔。其第二次共振腔与流线性型面相接,几何尺寸见表1。喷嘴出口为喇叭形。

表1 喷嘴主要几何尺寸(mm)

$D_s$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$
23	16	8.6	16	25	44	30	2	6

本文收到时间: 1989-12

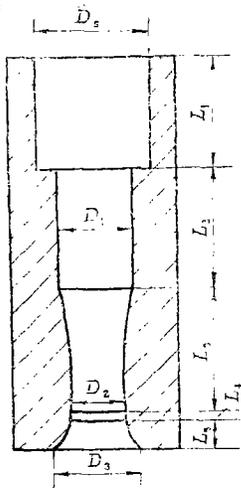


图1 喷嘴的几何形状

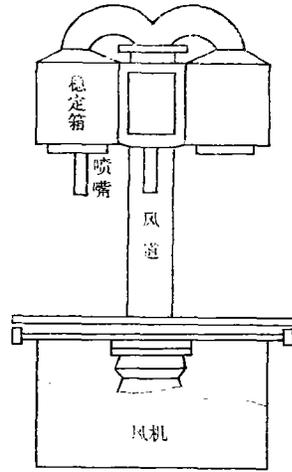


图2 DQS-1型实验台

## 2 实验设备

试验是在 DQS-1型空气动力学多功能实验台上进行的, 见图2。风机产生的模拟气流经过风道进入稳定箱, 稳定后经喷嘴产生高速射流射入大气。试验过程中充分考虑到实验设备的稳定状态、仪器仪表的精度以及不同实验截面的不同参数测定的滞后性等。在本实验条件下, 雷诺数 ( $Re$ ) 为  $8.48 \times 10^4$ , 马赫数 ( $M$ ) 为 0.141。由气体动力学可知, 当  $M \leq 0.3$  时, 气体的可压缩性很小, 其密度的变化可以忽略不计, 视为不可压缩流体, 故本试验结果完全适用于液体, 实验流程见文献[4]。

## 3 试验数据处理及其结果分析

数据处理的方法详见文献[4]。由不可压缩流体 Bernoulli 方程

$$P_1 = P_2 + \frac{\gamma}{2g} u^2 \quad (1)$$

有

$$u = \phi \left( 2g \frac{P_1 - P_2}{\gamma_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中,  $u$  为所测点的速度, m/s;  $P_1$  为所测点处的总压强, Pa;  $P_2$  为所测点处的静压强, Pa;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $\gamma_1$  为流体重度, N/m<sup>3</sup>;  $\phi$  为测速管校正系数。

为了提高测试的精度, 采用多管压力计, 介质为酒精, 故被测点的速度公式为:

$$u = \phi \left( 2g \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \Delta h \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中,  $\gamma_2$  为测压计内液体 (酒精) 重度 (N/m<sup>3</sup>);  $\Delta h$  为测点的总静压强相当的液柱高 (m)。

本文测试了喷距  $x=0, 10, 20, 30, 50, 70$ mm 处各断面上的速度分布, 见图3。由试验数据可见脉冲射流的外边界呈波浪形。在射流的外边界上存在不平衡的剪切层, 静止的流体将不断地掺入射流中, 形成漩涡层, 引起速度方向的变化, 使得测压管中的液柱时高时低, 当探针位于涡核时, 测压管液柱降低, 否则液柱高度增加。这种卷吸现象体现出射流具有抽吸作用, 不断将周围流体引入射流中, 使射流流量增加。这种现象在射流的初始段和基本段均存在, 喷嘴共振性更加剧了卷吸现象。由试验得到射流外边界随喷距  $x$  变化的表达式为:

$$y = 5.46 + 0.159x \quad (4)$$

由图 4 可见, 随喷距的增加, 外边界也增宽, 且成良好的线性关系。该方程的回归系数  $s=0.9964$ , 协和方差  $\sigma=2.02$ , 可见用线性关系描述射流外边界既方便又可靠。

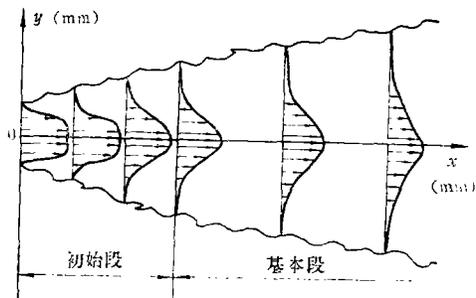


图3 速度剖面

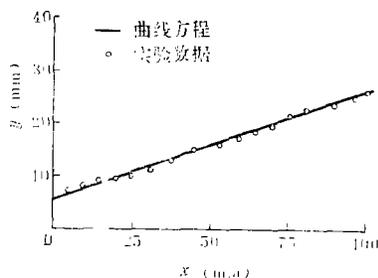


图4 射流边界随喷距变化规律

通常的喷嘴所产生的射流在喷嘴内部不会出现涡旋, 因此射流不具有脉冲性。这种射流, 其涡旋的起始点是在喷嘴的外边界处, 尽管射流的外边界随喷距的变化也成线性关系, 与式 (4) 相似, 为  $y=a+bx$ , 式中截距  $a$  应等于喷嘴的半径。外边界线为涡旋中心点连成的直线, 其上流体的速度为零, 见图 5。

实际上, 射流均属紊流射流, 流体质点具有紊动性, 紊动的结果使涡旋的运动不象图 5 所示的那样, 而涡旋中心连线为曲线, 见图 6。这一结论与图 4 中的实测点有规律地分布在直线两侧的结果是吻合的。

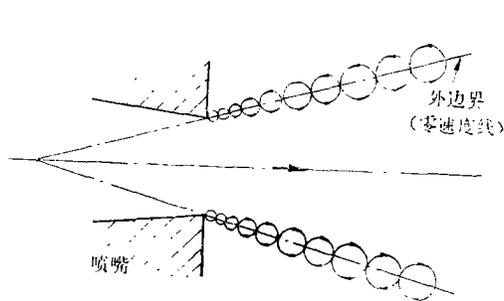


图5 一般喷嘴外边界涡旋示意图

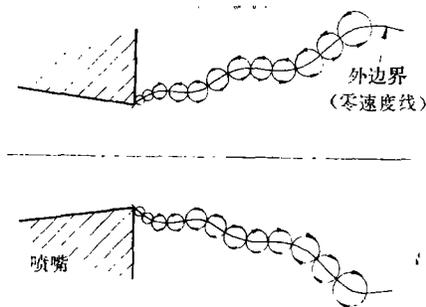


图6 一般喷嘴外边界曲线

对于脉冲喷嘴的射流, 起始涡旋在喷嘴内部, 见图 7。由于靠近喷嘴出口处的流通面积逐步扩大, 附面层逐渐增厚, 最后产生分离。在分离点处产生了起始涡旋, 涡旋区在喷嘴出口以后继续扩大、延伸, 其涡旋的中心连线就形成了射流外边界。因此喷嘴出口处射流的外边界半径  $R'$  将小于喷嘴出口半径  $R$ , 本文给出的公式 (4) 中的截距  $a$  为  $5.46\text{mm}$ , 小于喷嘴出口半径  $R$  ( $8\text{mm}$ )。

在射流的基本段中, 不同的喷距上其速度绝对值大小不同 (见图 3)。但是, 取相对参数时, 其速度分布规律均相同, 即脉冲射流也具有自模性, 见图 8。本文给出了基本段中无因次速度分布的数学表达式为:

$$\frac{u}{u_m} = \left[ 1 - 0.281 \left( \frac{y}{y_{0.5}} \right)^{1.34} \right]^2 \quad (5)$$

式中,  $u_m$  为射流轴心线上的速度;  $y$  为试验点的纵坐标;  $y_{0.5}$  为速度  $\frac{u_m}{2}$  处的纵坐标。由图 8 可见, 本文给出的模式与试验结果十分吻合。

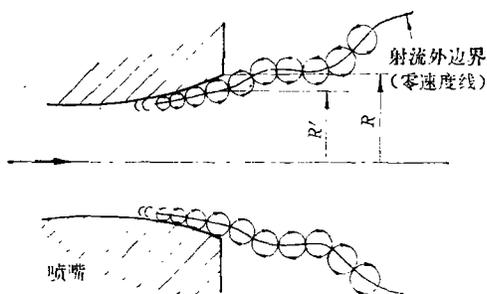


图7 脉冲喷嘴外边界形成情况

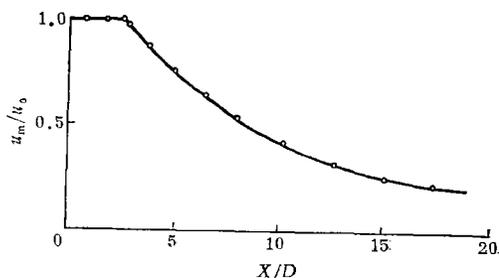


图8 基本段无因次速度分布

在射流的起始段中, 脉冲射流同样存在等速核区, 该区内的速度等于喷嘴出口速度  $u_0$ 。而在基本段中, 由于外界流体不断地掺入射流中, 使射流的流量不断增加, 而速度逐渐减小, 从而使轴心线上的速度  $u_m$  随喷嘴增加而减少, 见图 9。其轴心线上的速度随喷嘴的增加而变化, 也遵循一定的规律, 其数学表达式为:

$$\frac{u_m}{u_0} = 1.15 \exp\left(-0.1 \frac{x}{D}\right) \quad (6)$$

式中  $D$  为喷嘴出口直径。

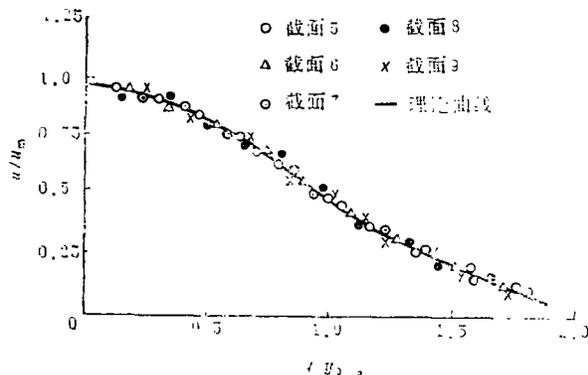


图9 射流轴心速度随喷嘴变化规律

在试验过程中, 测出了射流中沿轴向一维的压强脉动。试验发现, 在喷嘴距  $x$  为 20~80mm (相对喷嘴  $x = 1.25 \sim 5.0$ ) 时均存在压强脉动, 其值见表 2。

表2 各喷嘴下的压力脉动

喷嘴 $x$ (mm)	20	30	50	60	70	80
压力脉动 (Pa)	17.5	27.8	31.8	19.8	17.5	17.5

表2中数据表明,在 $x=50\text{mm}$  ( $\bar{x}=3.12$ )处出现最大脉冲。由图1知,在第一次共振腔中流体产生涡旋源,在第二次腔(等截面)中将产生第二次涡旋,到末端的喇叭口处产生第三次涡旋。涡旋的产生便伴随有压强的脉动,同时产生压力波,压力波在流体中是以声速向上、下游传播的。由于射流速度小于声速(射流速度为 $50\text{m/s}$ 左右),故压力波能逆流上传而达到共振腔。在腔中,压力波与涡旋产生的压力脉动叠加,叠加后压力波又向上、下游传播。这些压力波叠加的过程十分复杂,目前还不能从理论上求解,只能通过试验来研究。如果脉动频率匹配得好,能使压力脉动增加,产生脉冲射流。试验证实,本文所设计的喷嘴产生了较强的脉冲。表2数据显示,在喷嘴距 $x$ 为 $20\sim 80\text{mm}$ 时存在脉冲现象,且在 $x=50\text{mm}$  ( $\bar{x}=3.12$ )处脉冲达到了最大值,  $\Delta P=31.8\text{Pa}$ 。这一试验结果对提高射流冲击力具有重要意义。

## 4 结 论

- (1) 脉冲射流的外边界呈扩散的波浪形,得到了其变化规律的表达式。
- (2) 脉冲射流在基本段中具有速度相似性,其速度分布遵循一定的规律。
- (3) 脉冲射流轴线速度随喷嘴距的变化,遵循一定的衰减规律。
- (4) 脉冲射流在喷嘴距 $x$ 为 $20\sim 80\text{mm}$  ( $\bar{x}$ 为 $1.25\sim 5.0$ )处出现脉冲现象,最大脉冲发生在 $x=50\text{mm}$  ( $\bar{x}=3.12$ )处,其压力变化值为 $31.8\text{Pa}$ 。

## 参 考 文 献

- 1 张绍槐. 喷射钻井理论与计算. 北京: 石油工业出版社, 1986
- 2 赵国珍. 关于喷射钻井井底水力参数的计算. 石油钻采工艺, 1980; (2): 15~20
- 3 谢象春. 湍流射流理论与计算. 北京: 科学出版社, 1975
- 4 王汝元, 孙兴文, 程林松. 流线型喷嘴湍流射流结构与动量特性的试验研究. 华东石油学院学报, 1986; 10(4): 15~20
- 5 李兆敏, 王汝元. 具有共振腔的喷嘴紊流射流. 中国力学学会北方七省市第三屆学术交流会论文集, 3: 53~56

# THE EXPERIMENTAL STUDY ON TURBULENT JET CHARACTERISTICS OF A NOZZLE WITH RESONANT CAVITY

Shen Zhonghou Wang Ruyuan Li Zhaomin

(Dept. of Petroleum Engineering)

**Abstract** A nozzle with resonant cavity was designed and tested under pulse jet condition to give quantitative data. This pulse jet displayed the properties of pulsation and jet flow in general. The structure of the jet flow included a beginning section and a basic section. The basic section showed similar dimensionless velocity distribution. The mathematical expressions of velocity distribution and the change of axial velocity with jet distance were obtained. The conclusions could help the development of jet technology and its application to jet drilling.

**Key words** Pulse jets; Turbulent jets; Similarity; Velocity distribution

---

科技简讯

## “七五”国家重点科技攻关项目“稠油热采技术” 通过鉴定验收

我校与胜利石油管理局辽河石油管理局和新疆石油管理局等单位共同承担的“七五”国家重点科技攻关项目“稠油热采技术”，于1990年12月20日在杭州通过了由国家计委委托中国石油天然气总公司组织的鉴定和验收。

在“稠油热采技术”攻关中，我校与胜利石油管理局等单位合作完成了“单家寺稠油注蒸汽驱开采技术”等项目。鉴定委员会认为，我校与胜利石油管理局等单位提交鉴定验收的23项技术中，有13项达到先进水平，居国内领先地位，其中包括我校完成的“稠油热采井筒工况分析及应用研究”、“稠油集输管网运行参数优选”、“稠油加工厂脱盐脱水技术”、“稠油催化裂化技术”和“稠油超临界溶剂抽提技术”。

(赵焕卿供稿)