

牙轮钻头自激振荡脉冲喷嘴的实验研究

沈忠厚 李根生 周长山

(开发系)

摘要 在理论和实验研究的基础上,设计了几种用于牙轮钻头的自激振荡脉冲喷嘴,在常压下进行了射流脉冲压力测试和冲蚀天然红砂岩的实验。实验结果表明,所设计的风琴管自激脉冲喷嘴和亥姆霍兹振荡腔脉冲喷嘴具有很强的脉冲效果,其冲蚀岩石能力大大高于普通锥形喷嘴,其中风琴管自激脉冲喷嘴的脉冲效果和破岩能力最强。实验还表明,自激振荡脉冲喷嘴射流存在最优喷距,最优喷距的大小为喷嘴出口直径的7~14倍。自激振荡脉冲喷嘴可直接应用在钻头上,能提高钻井速度,降低钻井成本。

关键词 钻头;喷嘴;自激;共振;脉冲射流

中图法分类号 TE921.11

0 引言

自70年代末开始,许多研究者对自激振荡脉冲射流产生的原因和机理及清洗破碎物体的效果已进行了大量的研究,取得了可喜的成果^[1~6]。大量的研究都表明,自激振荡脉冲射流具有很强的脉冲特性,它不仅大大地提高破碎岩石的效果,而且由于其极大的压力梯度,可以降低瞬时压力差,有利于清洗除污,是一种很有希望的新型高效射流。本文在理论和实验研究的基础上设计了几种用于石油钻井牙轮钻头的自激振荡脉冲射流喷嘴,在实验室内进行了射流脉冲压力测试和冲蚀红砂岩的实验。

1 自激振荡脉冲射流喷嘴理论与设计

1.1 自激振荡脉冲射流机理

产生射流自激振荡的方法很多,这里主要研究风琴管自激振荡脉冲喷嘴和亥姆霍兹振荡腔自激振荡脉冲喷嘴,如图1和图2所示。

风琴管和亥姆霍兹振荡腔产生流体自激振荡的机理相同,它们都是根据瞬态流和水声学中的流体谐振激励的原理诱发产生的。当稳定的流体通过各种类型的声谐振管,如风琴管或亥

姆霍兹振动腔的出口收缩断面时产生压力扰动,这种压力扰动反射回谐振管入口处与来流本身的压力脉动叠加。当扰动激振频率与射流本身的固有频率匹配时产生谐振,形成驻波,从而在谐振管内产生流体自激振荡,使射流变成断续的涡环流。

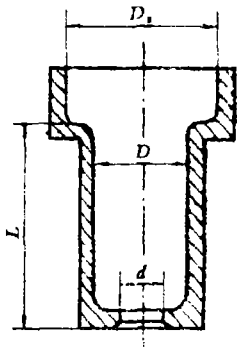


图1 风琴管脉冲喷嘴

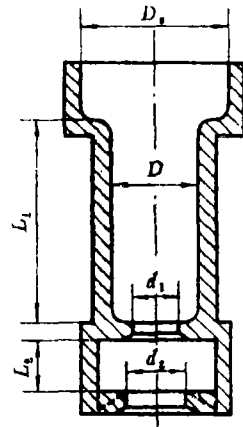


图2 亥姆霍兹振动腔脉冲喷嘴

产生射流的喷嘴是由具有与射流紊流频谱中选定的频率相等的自然音频的供应系统供给的,它必须设计成能在自然射流中形成旋涡环的同时,向供应系统反馈压力振荡,反馈振荡在供应腔中引起共振,接着它又进一步激发射流,直到系统阻尼使之达到平衡为止。在理论上虽然简单,最优系统的设计却十分复杂,常用半经验半理论的方法来研制。

1.2 风琴管自激振荡脉冲喷嘴设计

风琴管内产生强烈自激振荡的条件与喷嘴马赫数、斯特罗哈尔(Strouhal)数及喷嘴的流体阻抗有关。根据理论推导,风琴管内产生强烈谐振时,其结构所应满足的近似关系式为[3]:

$$\frac{L}{d} = \frac{K_N}{M \cdot S_a} \quad (1)$$

式中, L 为风琴管谐振腔长度(mm); d 为风琴管谐振腔出口直径(mm); M 为风琴管谐振腔马赫数(无因次); S_a 为风琴管谐振腔的斯特罗哈尔数(无因次); K_N 为风琴管谐振腔内振荡的模数系数(无因次)。

根据上述研究结果及文献[3,4],结合钻井现场条件,当给定钻井泥浆排量和压力降(马赫数)时,设计出了两种用于牙轮钻头的风琴管脉冲喷嘴,其结构尺寸列于表1。表1中, D_1 为风琴管谐振腔入口直径(mm); D 为风琴管谐振腔直径(mm); d 为风琴管谐振腔出口直径(mm)。

1.3 亥姆霍兹振荡腔自激振荡脉冲喷嘴设计

根据Morel[5]的空气射流实验结果,亥姆霍兹振荡腔内产生强烈谐振的条件为:

表1 风琴管自振脉冲喷嘴设计结果

喷嘴	$(D_1/d)^2$	$(D/d)^2$	L/D
No.1	2.4	2.25	7.5
No.2	3.5	2.25	5.5

$$\begin{aligned}
 N &= 1 \text{ 或 } 2 \\
 S_d &\approx 0.6 \\
 L_2/d_1 &= 0.8 \text{ 或 } 1.6 \\
 d_2/d_1 &= 1.2
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

式中 N 为振荡模数； S_d 为临界斯特罗哈尔数； L_2 为振荡腔长度 (mm)； d_1 和 d_2 分别为振荡腔入口和出口直径 (mm)。

图2中上部是风琴管，下部为亥姆霍兹振荡腔，两者串联而成，其中 No.3 喷嘴振动腔为平面型碰撞壁（如图2实线所示），No.4 喷嘴振动腔为截锥面型碰撞壁（如图2中虚线所示）。亥姆霍兹振荡腔设计结果见表2。

表2 亥姆霍兹振荡腔设计结果

喷嘴	L_2/d_1	d_1/d_2	碰撞壁
No.3	1.0	1.2	平面
No.4	2.0	1.2	截锥面

2 自激振荡脉冲射流实验

2.1 实验装置和方法

全部实验是在石油大学钻井实验馆的常压有机玻璃井筒多功能射流实验架上进行的。两台泥浆泵将清水经高压管线泵入玻璃井筒内的喷嘴产生高压射流，射流冲击井筒底部的测压底盘或岩样，进行喷嘴射流的冲击压力测试和冲蚀岩样试验。喷嘴在井筒内可以上下升降，从而调节射流出口到冲击物面的距离（喷距）。

高压水经喷嘴喷出冲击到测压底盘上，底盘中心开有直径为0.5~1.0mm的测压孔，射流轴心压力通过测压孔传到压力传感器上，传感器将测得的射流压力信号转变为电压信号传送到HP3562动态信号分析仪上进行分析处理，从而得出各种喷嘴射流脉冲压力峰值，脉动幅度等参数变化规律，处理结果直接由绘图仪绘出。

射流冲蚀岩样试验，是利用射流在一定压力、喷距和时间条件下定点冲蚀天然红砂岩心，在岩心上产生冲蚀坑，通过测量冲蚀坑体积的大小衡量射流的破岩能力。

2.2 射流脉动压力测试

对所设计的自激振荡脉冲喷嘴在不同泵压和不同喷距下进行了轴心脉动压力测试实验，并在相同条件下与普通锥形喷嘴相比较。每种喷嘴分别试验了三种泵压，每种泵压下喷距在40~180mm范围内，每间隔20mm测量一次轴心脉动压力，典型的瞬时压力脉动波形如图3所示。

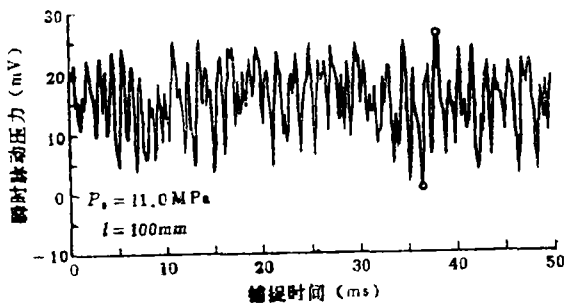


图3 No.1风琴管喷嘴瞬时脉动压力波形

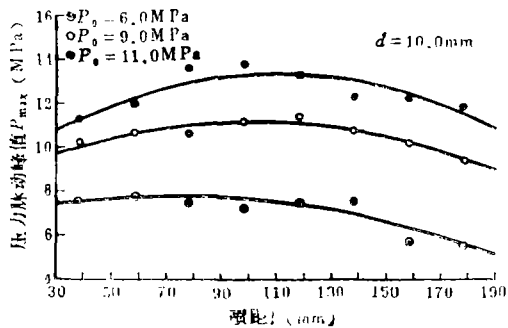


图4 No.1风琴管喷嘴压力脉动峰值与喷距关系曲线

从一定压力和喷距条件下测得的瞬时压力脉动曲线上读出压力最大值（峰值）和最小值，并分别用压力脉动峰值 P_{max} 和压力脉动幅度 ΔP 表示喷嘴的压力脉动特性。压力脉动幅度 ΔP 为：

$$\Delta P = P_{max} - P_{min} \quad (4)$$

式中， ΔP 为一定泵压喷距下喷嘴射流压力脉动幅度， P_{max} 为最大值， P_{min} 为最小值，单位均为MPa。

图4和图5分别是No.1风琴管喷嘴在三种泵压下 P_{max} 和 ΔP 随喷距 l 的变化规律，图6和图7分别是所试验的五种喷嘴压力脉动峰值和压力脉动幅度的比较。其中No.1和No.2是风琴管脉冲喷嘴，No.3和No.4是亥姆霍兹振荡腔脉冲喷嘴，No.5是用来对比的普通锥形喷嘴。这五种喷嘴最优喷距下的压力脉动特性比较列于表3。

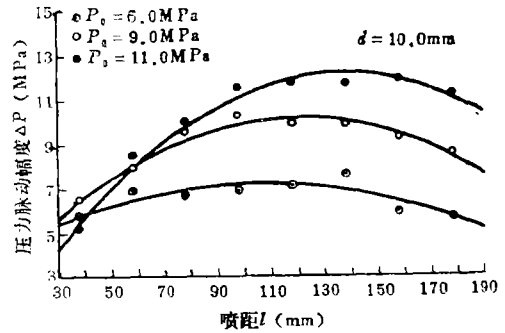


图5 No.1风琴管喷嘴压力脉动幅度与喷距的关系曲线

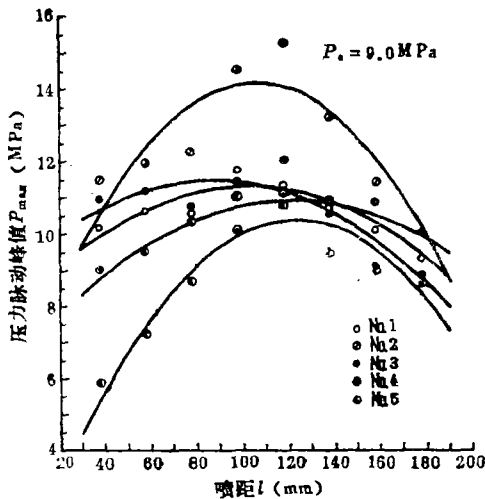


图6 相同泵压下几种喷嘴压力脉动峰值比较

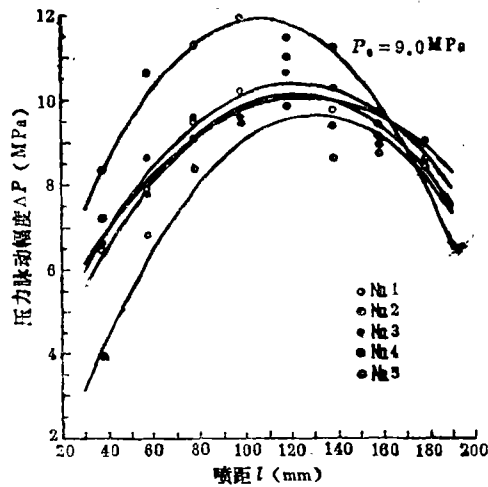


图7 相同泵压下几种喷嘴压力脉动幅度比较

2.3 喷距对射流压力脉动性能的影响

由图4和图5可以看出，No.1风琴管喷嘴的压力脉动峰值和压力脉动幅度在一定喷距范围内达到最大值，其它喷距时则较小。将压力脉动峰值和幅度达到最大值时的喷距称为最优喷距。在三种泵压(60, 90, 11.0MPa)条件下进行试验，No.1喷嘴的最优喷距范围分别为80~100, 100~120, 120~140mm.随着泵压的增加，最优喷距呈增大的趋势。习惯上常使用无因次喷距，即喷距与喷嘴出口直径的比值。试验得出，No.1喷嘴的无因次最优喷距为8~14，其它喷嘴的试验也得出了类似的规律，如图6、图7和表3所示。从表3可以看出，在试验条件下，各种喷嘴的无因次最优喷距都在7~14范围内。

最优喷距的存在是喷嘴内流体自激振荡产生的断续涡环流发展和衰减的结果。喷嘴内流体自激振荡使喷嘴出口射流变成断续涡环流。随着喷距的增大，涡环流发展壮大，到一定喷距时发展至最大，射流压力脉动最强，这时的喷距就是最优喷距。喷距进一步增大时，由于

表3 最优喷嘴下各种喷嘴压力脉动性能比较

喷嘴	风琴管喷嘴				振荡腔喷嘴				锥形喷嘴		
	No.1		No.2		No.3		No.4				
泵压 P_0 (MPa)	6.0	9.0	11.0	6.0	9.0	11.0	6.0	9.0	11.0	6.0	9.0
最优喷嘴 l^* (mm)	80~100	100~120	120~140	80~100	100~120	80~100	80~100	80~120	120~140	80~100	100~140
无因次最优喷嘴 l^*/d	8~10	10~12	12~14	8~10	10~12	8~10	8~10	8~12	12~14	8~10	10~14
压力脉动峰值 P_{max} (MPa)	7.8	11.3	13.4	10.2	14.1	12.9	7.4	11.5	12.8	5.8	7.8
压力脉动幅度 ΔP (MPa)	7.2	10.2	12.2	9.2	11.9	11.7	6.9	10.4	11.7	5.6	7.4

射流周围流体的剪切粘滞作用, 涡环流由最大逐渐衰减, 射流脉动性减弱。因此, 在实际应用时应尽量使喷距在最优喷距内, 以便得到最佳效果。

2.4 泵压对射流压力脉动性能的影响

由图4和图5可以看出, 随着泵压的增加, No.1风琴管喷嘴射流的压力脉动峰值和脉动幅度随之增大。从表3可以看出, 在所实验的三种泵压条件下, 随着泵压的增加, 其它几种喷嘴在最优喷距下的压力脉动峰值和脉动幅度也呈增大的趋势。

由于泵压的增加, 喷嘴射流速度增大, 射流滞止压力提高, 压力脉动峰值随之提高。另外, 由于射流速度增大, 马赫数增大, 斯特罗哈尔数减小; 射流自激振荡增强, 涡环流强度提高, 因而射流压力脉动峰值和幅度随之提高。

2.5 喷嘴压力脉动性能比较

由图6和图7可以明显看出, 在泵压相同的条件下, 所实验的自激振荡脉冲喷嘴的压力脉动峰值和脉动幅度都大于普通锥形喷嘴, 其中No.2风琴管自激振荡脉冲喷嘴的压力脉动峰值和脉动幅度最大, 其脉冲效果最好。从表3可看出, 自激振荡脉冲喷嘴的压力脉动峰值和脉动幅度分别比锥形喷嘴提高6%~37%和5%~24%。其原因是很自然的, 因为自激振荡脉冲喷嘴经过理论设计, 有合理的压力反馈和放大结构, 能产生流体自激振荡, 从而形成断续的涡环流, 增强射流的脉冲效果。锥形喷嘴没有压力反馈放大条件, 不能产生自激振荡, 其射流的压力脉动完全来自于管路流体的不稳定扰动和射流与周围流体剪切层旋涡的不稳定扰动, 因而这种压力脉动比自激振荡脉冲射流的压力脉动小得多。

2.6 射流冲蚀岩石试验

为了比较各种喷嘴冲蚀岩石的能力, 用No.1风琴管脉冲喷嘴、No.3和No.4亥姆霍兹振荡腔脉冲喷嘴以及锥形喷嘴在相同条件下做了定点冲蚀天然红砂岩的实验。射流以一定的压力并在一定的喷距和冲蚀时间条件下冲击到芯心表面上, 产生冲蚀坑。通过比较同一芯心面上不同喷嘴射流冲蚀坑体积的大小来确定喷嘴冲蚀岩石的能力。

冲蚀岩石试验的岩样是从天然红砂岩块上取得的直径为125mm、厚度为100mm的圆柱形岩心, 共试验了20多块岩心, 每种喷嘴在相同条件下试验都重复三次以上。表4给出了三种喷嘴在 P_0 为80MPa、 L 为35mm的不同岩心上冲蚀120s时的冲蚀坑体积。由表4可以看出, 虽然由于岩性不同, 同一种喷嘴在几块岩心上的冲蚀坑体积有差别, 但它们的规律是一致的。在每块岩心上, 风琴管脉冲喷嘴的冲蚀坑体积最大, No.4亥姆霍兹振荡腔喷嘴次之, No.3振荡腔喷嘴最小。三种喷嘴冲蚀坑体积比值列于表5, 从中可以看出, 在所试验的每块岩芯上, 三种喷嘴冲蚀体积的比值是非常相近的, No.1风琴管喷嘴的冲蚀坑体积平均是No.3振荡腔喷嘴的2.73倍, 是No.4振荡腔喷嘴的1.82倍。

在相同条件下, 用锥形喷嘴也进行了冲蚀岩石实验对比, 如图8所示, 锥形喷嘴冲蚀坑极小, 基本上不产生冲蚀坑, 这证明自激振荡脉冲喷嘴射流的冲蚀岩石效果比锥形喷嘴好得多。

综上所述, 通过对喷嘴结构进行特殊设计, 利用流体自激振荡产生脉冲射流, 可以显著增大射流的压力脉动效果, 从而大大提高射流的破岩能力, 将这种喷嘴应用于钻头上, 取代

表4 脉冲喷嘴冲蚀岩石的体积速率(mm^3/s)

喷 嘴	岩 心			
	No.4	No.5	No.6	No.15
No.1风琴管	13.30	4.92	10.60	9.25
No.3振荡腔	4.70	1.93	3.78	—
No.4振荡腔	7.30	2.75	—	5.00

表5 脉冲喷嘴冲蚀岩石体积的比值

喷 嘴	岩 心				平 均
	No.4	No.5	No.6	No.15	
No.1风琴管与 No.3振荡腔之比	2.83	2.55	2.80	—	2.73
No.1风琴管与 No.4振荡腔之比	1.82	1.79	—	1.85	1.82
No.4振荡腔与 No.3振荡腔之比	1.53	1.42	—	—	1.48

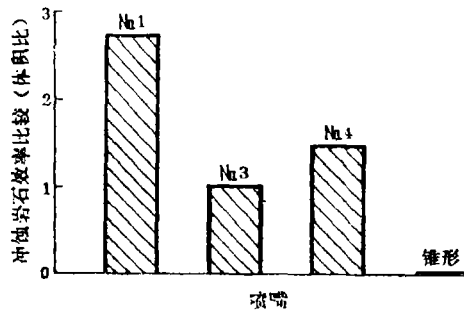


图8 几种喷嘴冲蚀岩石效果比较

普通喷嘴，可在不增加地面泵功率的前提下达到提高机械钻速、降低钻井成本的目的。特别是风琴管自激振荡脉冲喷嘴，由于结构简单，脉冲特性好，是一种很有希望的新型高效射流喷嘴，可望在钻头上得到广泛应用。

3 结 论

(1) 自激振荡脉冲喷嘴的最优喷距为出口直径的7~14倍。随泵压增加，最优喷距呈增大的趋势。

(2) 在泵压相同条件下，自激振荡脉冲喷嘴的压力脉动效果明显优于普通锥形喷嘴，其中风琴管脉冲喷嘴的压力脉动效果最好，其压力脉动峰值比锥形喷嘴提高约40%，压力脉动幅度提高24%。随着泵压增加，喷嘴的压力脉动效果呈增大的趋势。

(3) 自激振荡脉冲喷嘴冲蚀岩石能力大大高于锥形喷嘴，其中风琴管喷嘴最强，相同条件下的冲蚀岩石体积是亥姆霍兹振荡腔脉冲喷嘴的2~3倍。

(4) 自激振荡脉冲喷嘴是一种很有希望的新型高效喷嘴，可直接应用于钻头，取代普通喷嘴，提高钻井速度，降低钻井成本。

注 井89届毕业生汪海阁，王长生和井90届毕业生丁士东、陈瑞道参加了部分实验工作。

参 考 文 献

- 1 Rockwell D, Naudascher E. Review-sustained Oscillation of Flow Past Cavities. J Fluids Eng, 1978, 100(6)
- 2 Johnson JrVE, Conn AF et al. Self-Resonating Cavitating Jets 6th Int

- Symp on Jet Cutting Tech, Paper A1, 1982: 4
- 3 李根生,沈忠厚.常压下淹没自振空化射流冲蚀岩石效果的试验研究.华东石油学院学报(自然科学版),1987,11(3):1~10
 - 4 Shen Zhonghou, Li Gensheng et al. Experimental Study on Rock Erosion by Self-Resonating Cavitating Jets. Int Water Jet Symposium, Beijing, 1987: 2-35~2-43
 - 5 Morel T. Experimental Study of a Jet Driven Helmholtz Oscillator. ASME J Fluid Eng, 1979, 101(9): 383~390
 - 6 Shen Zhonghou, Wang Zhiming. Theoretical Analysis of a Jet-Driven Helmholtz Resonator and Effect of Its Configuration on the Water Jet Cutting Property. 9th Int Symp on Jet Cutting Tech, 1988; 189~201
 - 7 廖振方,唐川林.自激振动脉冲射流装置的理论分析和实验研究.全国第四届高压水射流技术情报讨论会论文,1987

EXPERIMENTAL STUDY ON SELF-EXCITED RESONANT PULSE JET NOZZLE FOR ROLLER BIT

Shen Zhonghou Li Gensheng Zhou Changshan

(Department of Petroleum Engineering)

Abstract A number of self-excited resonant pulse jet nozzles for deep hole bits were designed on the basis of theoretical analysis and experimental results. The jet pressure pulsation and rock erosion ability were tested. The experimental results showed that the pressure pulsation and rock erosion with self-resonating organ-pipe nozzles and Helmholtz resonator nozzle were more effective than conical nozzle. The optimum jet distance for jet pressure pulsation was about 7—14 times of nozzle exit diameter. This study shows that self-resonant pulse jet nozzles can be directly used in deep-hole bits to improve drilling action and reduce drilling cost.

Key words Drill bit; Jet nozzle; Self excitation; Resonance pulse jet