

文章编号: 1001-1986(2010)02-0071-05

水平孔某型喷反装置的结构优化实验

黄华元, 冯 晓, 马春林, 丁伯成
(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 通过类比相关喷反机具设计, 设计并制造了某型喷反装置模型。之后进行了结构优化实验研究, 得到了一系列适于现场工况的喷反装置关键器件优化组合, 并认识到该类喷反装置中, 喉管喷嘴组合模式对吸水效率的影响最大, 而流量参数 m 、间距 S 对吸水效率的影响较小; 喷嘴流速大于 40 m/s 时, 其吸水效率急剧下降。

关键词: 喷反装置; 结构优化; 水平孔; 吸水效率

中图分类号: P634 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.02.018

Structure optimization of a jet-type reverse circulation tool for horizontal hole

HUANG Huayuan, FENG Xiao, MA Chunlin, DING Bocheng
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: On the analogy of relevant design, a preliminary design and experimental prototype of jet-type reverse circulation tool was completed, which could be used for horizontal hole. Based on structural optimization experiments and researches, a series of optimized combinations of key components were derived, which were appropriate to in-situ conditions. According to experiment results, some conclusions were drawn as follows: the water absorption rate was most influenced by the mode composed of jet tube and jet nozzle and little influenced by flow parameter m and span S ; and when the jetting rate exceeded 40m/s, the water absorption rate decreased sharply.

Key words: jet-type reverse circulation tool; structural optimization; horizontal hole; water absorption rate

地质钻探施工中, 常利用特殊设计的喷反钻具进行孔底局部反循环钻进以提高破碎地层的岩心采取率; 水利工程中, 也经常采用射流吸水原理而设计制造喷射泵或抽水泵。这些机具中, 能产生喷射吸水作用的喷反装置是其关键部件, 设计上需重点考虑其外部形状及尺寸限制、内部结构参数的选择及调整、优化等问题, 其目标是在有限条件下使喷反装置达到较优的吸水效率。根据工程的需要, 设计了适用于水平孔中的某型喷反装置, 并对其结构参数进行了优化实验研究, 获得了一些初步认识。

1 实验装置及实验原理^[1-3]

喷反实验装置基本上分为进水管、工作主体、吸水管、排水总成等几部分。工作主体则包括喷嘴和承喷器、混合腔等。其结构见图 1。

喷反装置产生喷射吸水作用的基本原理是: 根据水力学理论, 进水管中送来的流量为 Q_1 、压力为 P_1 和流速为 V_1 的流体进入喷嘴中, 由于喷嘴内腔为锥形, 且喷嘴口断面较小, 因此从喷嘴出来的冲洗

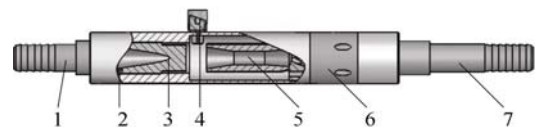


图 1 喷反实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of reversed jet device

1——进水管; 2——主体; 3——喷嘴; 4——真空表接头;
5——承喷器; 6——排水总成; 7——吸水管

液的流速由 V_1 增加到 V_2 而射入承喷器。按流体力学公式:

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \text{常数} \quad (1)$$

式中 Z 为位能; ρ 为流体比重。

水平孔中, 其位能 $Z_1=Z_2$, 流体比重 $\rho_1=\rho_2$, 由于流速增大, 喷嘴出口后的压力则由 P_1 降到 P_2 。在喷嘴出口附近, 当流体以 V_2 高速射入承喷器时, 因其吸附效应并携走混合室内原驻流体或气体物质, 使混合室内压力低于腔外, 在此压差作用下, 喷反装置后端或外围的流体将会通过吸水管进入混合室并被带入承喷器从排水口排出, 从而形成吸水现

收稿日期: 2009-11-14

作者简介: 黄华元(1962—), 男, 湖北武汉人, 硕士, 高级工程师, 从事钻探与机械工程研究工作。

象。喷反装置工作原理见图 2。

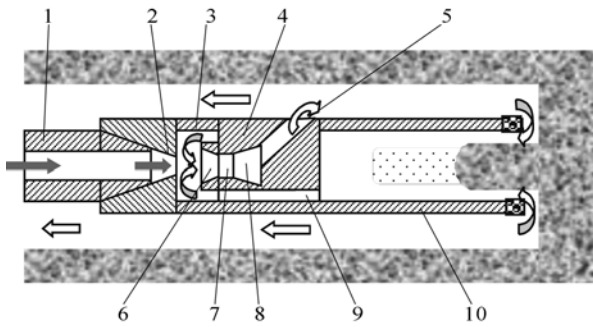


图 2 喷反装置工作原理示意图

Fig. 2 Principle of reversed jet device

1—进水; 2—喷嘴; 3—工作主体; 4—分水接头; 5—排水孔;
6—混合室; 7—承喷器; 8—扩散管; 9—吸水孔; 10—吸水管

喷反装置的工作效能主要以吸水效率来计算，其计算公式为：

$$\eta = (Q_2 / Q_1) \times 100\% \quad (2)$$

式中 η 为吸水效率，%； Q_1 为进水流量，L/min； Q_2 为吸水流量，L/min。

2 实验目的及方法

由于所设计的喷反装置一般处于水平工作状态，其工作主体内的流场状态将与垂直工作状态时有所不同。尤其混合腔内的负压吸水效能是由腔内复杂的混合流场综合作用而形成的结果，当前尚不能从理论计算及数值模拟上完全认清其规律。因此，实验研究的目的是通过类比垂直工作状态的喷反机具并与实验相结合，从而完成适用于水平孔的、具有较优吸水效率的特殊喷反装置的设计。

据相关资料介绍，在结构边界及形状已确定的条件下，影响喷反装置吸水效率的几个主要因素是：

输入流量 Q_1 、喷嘴直径 d 、承喷器喉管直径 D 、喷嘴与承喷器端口距离 S 等。在外部形状尺寸满足相关限制条件、内部主要零件几何尺寸参考相关资料且主体结构尺寸基本相同的情况下，设计加工了喉管直径分别为 $\Phi 12$ 、 $\Phi 18$ 、 $\Phi 25$ 的承喷器，喷嘴直径分别为 $\Phi 5$ 、 $\Phi 7$ 、 $\Phi 8$ 、 $\Phi 10$ 、 $\Phi 15$ 的喷嘴，喷嘴与喉管间距在 0~40 mm 可调的组合式喷反装置实验模型(图 1)。同时，按采用大进水流量(95~250 L/min)及小进水流量(低于 95 L/min)2 种工况来考虑调整优化范围。实验流体为清水。

实验布局及实验方法如图 3 所示。

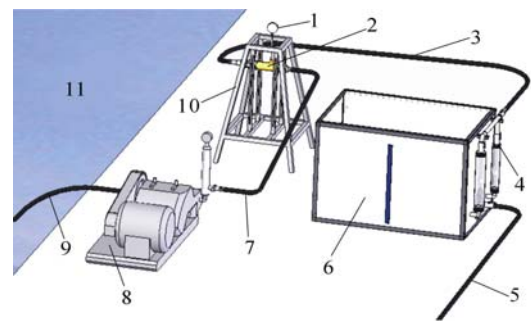


图 3 喷反装置实验系统布局示意图

Fig. 3 Configuration of reversed jet system

1—真空表; 2—喷反装置; 3—吸水管; 4—流量计;

5—水箱进水管; 6—水箱; 7—泥浆泵排水管;

8—BW-320 型泥浆泵; 9—泥浆泵进水管; 10—支架; 11—水池

3 实验过程及实验数据

3.1 喷嘴射流的观测结果

喷嘴的射流特性对喷反效果有直接影响。取喷嘴 d 的变化范围为 $\Phi 5$ 、 $\Phi 7$ 、 $\Phi 8$ 、 $\Phi 10$ 、 $\Phi 15$ ，水平放置下调节其输入泵量，记录喷射时泵压读数，观察射流状况。实验结果如表 1。

表 1 喷嘴射流实验记录
Table 1 Jet experiment record

喷嘴直径/mm	喷嘴面积/mm ²	输入泵量 /L·min ⁻¹	计算流速 /m·s ⁻¹	计算泵压 /MPa	泵压读数 /MPa	射流状况
Φ5	19.63	95	80.66	3.35	2.0~5.0 振动	完全雾状
		144	122.27	7.60	系统超压	/
		204	173.2	15.10	系统超压	/
Φ7	38.47	95	41.16	0.95	1.0 稳定	水柱状
		144	62.35	2.04	2.8~3.2 振动	水雾状
		204	88.33	4.00	4.5~6.0 振动	完全雾状
Φ8	50.24	95	31.51	0.60	0.6 稳定	水柱状
		144	47.81	1.24	1.1~1.4 振动	水柱状 + 雾
		204	67.73	2.40	3.0~3.6 振动	水雾状
Φ10	78.5	95	20.17	0.30	0.3	水柱状
		144	30.53	0.50	0.8	水柱状
		204	43.25	1.04	1.5	水柱状
Φ15	176.63	95	8.86	0.14	0.1	水柱状
		144	13.44	0.19	0.1	水柱状
		204	19.03	0.29	0.2	水柱状

从该组实验中得知：

a. 喷射发生时, $Z_1=Z_2$ $r_1=r_2$, V_1 很小, $P_2=0.1$ MPa 左右, 由式(1)可知 $P_1=r/2g(V_2^2-V_1^2)+P_2$, 故泵压表读数 P_1 (喷嘴前端压力)与喷速 V_2 的平方基本成正比关系。因此, 在选择喷速时, 应注意过高的喷速容易使喷嘴前端系统压力过高。

b. 喷速在约 40 m/s 以内时, 射流均呈水柱状; 当喷速在 40~70 m/s 时, 射流在中心水柱的外围上呈现出其逐渐加强的雾化效果; 而当喷速达到 80 m/s 以上时, 射流则呈现出几乎完全的雾化状态。从理论上讲, 射流产生雾化效果时将对喷反吸附作用产生不利影响。

c. 随着射流雾化效果的逐渐加强, 泵压也逐渐出现幅度较大的振动, 表明随着喷速加大, 喷嘴处的流场产生了复杂的变化。在泵压出现振动的情况下, 应提防系统压力超限的问题。

3.2 大进水流量实验

实验采用 95 L/min、144 L/min、204 L/min 3 档流量。

3.2.1 喷嘴与喉管的组配实验

实验喷嘴 d 值取 5、7、8、10、15; 实验喉管 D 取 12、18、25; 喷嘴与喉管间距先取固定值 $S=25$ mm。实验得到如下一些结果：

a. 3 组喉管(12、18、25)组合中, 以 18 喉管组合的平均吸水效果最好。

在每一组喉管组合实验中, 以吸水效果较明显的 7、8、10 三个喷嘴共 9 组流量实验的吸水效率累计后取平均值, 则 12 喉管组合的平均吸水效率为 23.4%, 18 喉管组合为 67.3%, 25 喉管组合为 33.9%。可见, 18 喉管组合的平均吸水效率最高, 其实验情况见表 2。

b. 5 个喷嘴(5、7、8、10、15)组合实验中, 以 7 喷嘴组合平均吸水效率最高, 并以 7 喷嘴与 18 喉管为当前条件下吸水效率最高组合。

5 喷嘴在当前泵量条件下导致系统压力过高, 如 144 L/min 泵量时压力达 8.5 MPa, 即已超出 BW-320 泥浆泵此状态下的限压值 4.9 MPa, 所以它不可取。而 15 喷嘴在当前实验泵量条件下基本不产生吸水效果, 甚至在混合腔产生正压而向吸水管排水, 所以它也是不可取方案。在 18 喉管组合的 3 组流量实验中, 以每一喷嘴的 3 组流量实验的吸水效率累计后取平均值, 则 7 喷嘴的平均吸水效率为 75.2%, 8 喷嘴为 71.6%, 10 喷嘴则为 55%, 可见 7 喷嘴最高。

3.2.2 喷嘴与喉管间距 S 的优化实验

采用 7 喷嘴、18 喉管组合, 泵量取 95 L/min、144 L/min, 拟定 S 值的取值范围为 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm、35 mm、40 mm。通过调整 S 值, 寻找最优 S 值范围。

实验结果如图 4 所示。

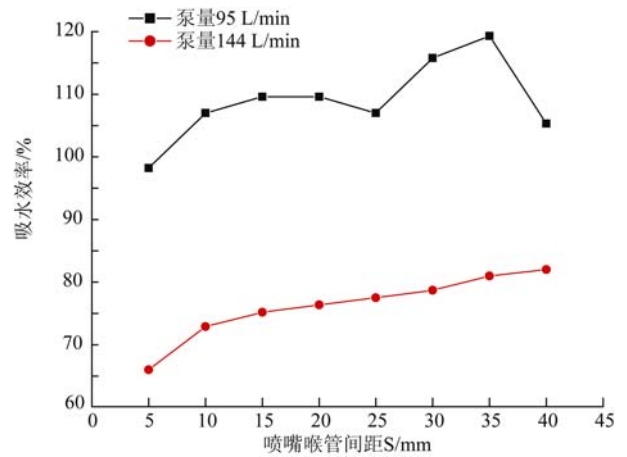


图 4 7 喷嘴的 S 值与吸水效率关系曲线

Fig. 4 Relation between s value of 7 jet and water adsorption

从图 4 中 S 值与吸水效率的变化关系曲线可以看出: 在 7 喷嘴与 18 喉管组合中, 泵量 95 L/min 时, 最优 S 值范围为 30~35 mm; 泵量 144 L/min 时, S 值在 35~40 mm 时其吸水效率较高。

表 2 $\phi 18$ 喉管($S=25$ mm)大流量实验记录
Table 2 Experiment record of $\phi 18$ tube with large inflow

喷嘴直径 d/mm	流量参数 $m=(D/d)^2$	输入泵量 $/L \cdot min^{-1}$	喷嘴射速 $/m \cdot s^{-1}$	吸水泵量 $/L \cdot min^{-1}$	吸水效率 $/\%$	混合腔压力 $/MPa$	泥浆泵表压 $/MPa$
$\phi 5$	12.96	95	80.66	96.7	101.8	0.04 跳	2.5~3.5
		144	122.27	100.0	69.4	0.04 跳	7.5~8.5
		204	173.20	-	-	-	~
$\phi 7$	6.61	95	41.16	98.3	103.5	0.04	1.5
		144	62.35	103.3	71.8	0.03	2.5~3.0
		204	88.33	102.5	50.2	0.04	4.0~5.5
$\phi 8$	5.06	95	31.51	95.0	100.0	0.04	0.4~0.6
		144	47.81	96.7	67.1	0.04	1.2~1.6
		204	67.73	97.5	47.8	0.04	3.0~3.5
$\phi 10$	3.24	95	20.17	54.2	57.0	0.08	0.25
		144	30.53	89.2	61.9	0.05	0.7
		204	43.25	94.2	46.2	0.04	1.4~1.5

3.3 小进水流量实验

实验采用 20 L/min、45 L/min、70 L/min、95 L/min 4 档流量。

3.3.1 喷嘴与喉管的组配实验

实验喷嘴 d 为 5、7、8, 实验喉管 D 为 12、18、25, 喷嘴与喉管间距先取固定值 $S=25$ mm。实验得到如下一些结果：

3 组喉管(12、 18、 25) 组合中, 以 18 喉管组合的平均吸水效果最好。

在每一组喉管组合实验中, 以 5、 7、 8 三个喷嘴共 12 组流量实验的吸水效率累计后取平均值, 则 12 喉管组合的平均吸水效率为 62.5%, 18 喉管组合为 111.0%, 25 喉管组合为 53.0%。可见 18 喉管组合的平均吸水效率最高, 其实验情况见表 3。

表 3 $\Phi 18$ 喉管($S=25$ mm)小流量实验记录
Table 3 Experiment record of $\Phi 18$ tube with small inflow

喷嘴直径 d/mm	流量参数 $m=(D/d)^2$	输入泵量 $/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	喷嘴射速 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	吸水泵量 $/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	吸水效率 $\% / \%$	混合腔压力 $/\text{MPa}$	泥浆泵表压 $/\text{MPa}$
$\Phi 5$	2.96	20	16.98	38.3	191.7	0.09	0.2
		45	38.20	68.3	151.8	0.08	0.6
		70	59.43	106.7	152.3	0.05	1.2~1.5
		95	80.66	108.3	114.0	0.05	2.5~3.0
$\Phi 7$	6.61	20	8.66	23.3	116.7	0.10	0.1
		45	19.50	43.3	96.3	0.09	0.1
		70	30.33	66.7	95.2	0.07	0.5
		95	41.16	96.7	101.8	0.05	0.8
$\Phi 8$	5.06	20	6.63	15.3	76.7	0.10	0.1
		45	14.93	33.3	74.1	0.10	0.2
		70	23.22	55.0	78.6	0.09	0.4
		95	31.51	78.3	82.5	0.07	0.6

在 18 喉管组合的 3 个喷嘴共 12 组流量实验中, 以每一喷嘴的 4 组流量实验的吸水效率累计后取平均值, 则 5 喷嘴的平均吸水效率为 152.5%, 7 喷嘴为 102.5%, 8 喷嘴则为 78.0%。可见 5 喷嘴最高。

3.3.2 喷嘴与喉管间距 S 的优化实验

采用 5 喷嘴、18 喉管组合, 泵量取 20 L/min、45 L/min、70 L/min、95 L/min, 拟定 S 值的取值范围为 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm、35 mm、40 mm。通过调整 S 值, 寻找最优 S 值范围。其实验结果如图 5 所示。

从图 5 中 S 值与吸水效率的变化关系曲线, 可以看出: 在 5 喷嘴与 18 喉管组合中, 泵量 20~95 L/min 时, 最优 S 值范围为 15~30 mm。

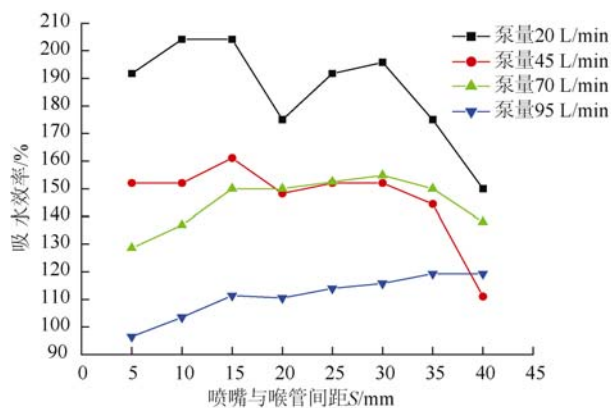


图 5 $\Phi 5$ 喷嘴的 S 值与吸水效率关系曲线

Fig. 5 Relation between s value of $\Phi 5$ jet and water adsorption

4 实验结论

a. 采用现有喷反实验结构及模型, 在 3 组喉管(12、 18、 25)与 5 个喷嘴(5、 7、 8、 10、 15)及泵量从 20~204 L/min 的组配实验中, 按喷反吸水效率 η 及结合泵压等综合因素衡量, 以 18 喉管组合效果最好。

b. 喷反装置吸水效果较佳的组配方式是：

20~70 L/min 泵量范围, 5 喷嘴(喷速 17~60 m/s)、18 喉管组合、 $S=25\sim 30$ mm 吸水效率 η 约 192%~152%, 泵压低于 1.5 MPa。

95 L/min 泵量范围, 7 喷嘴(喷速 41 m/s)、18 喉管组合、 $S=30\sim 35$ mm, 吸水效率 η 约 120%, 泵压低于 1.5 MPa。

144 L/min 泵量范围, 8 喷嘴(喷速 48 m/s)、18 喉管组合、 $S=25$ mm, 吸水效率 η 约 67%, 泵压约 1.5 MPa。

204 L/min 泵量范围, 10 喷嘴(喷速 43 m/s)、18 喉管组合、 $S=25$ mm, 吸水效率 η 约 46%, 泵压低于 1.5 MPa。

5 几点认识

a. 该类喷反装置中, 在外部尺寸及限制条件相同的情况下, 喉管喷嘴组合模式对吸水效率的影响最大, 而流量参数 m 、喷嘴与喉管间距 S 对吸水效率的影响较小。如: 流量参数 $m=6.61$ 的 18 喉管 7 喷嘴组合, 泵量 95~204 L/min 时, 平均吸水效

率约 75.2%。而流量参数与之相近的 $m=6.25$ 时, 25 喉管 10 喷嘴组合, 相同泵量情况下, 平均吸水效率则仅约 2.0%。对 S 距离的调整方面, 其优化获益不高。如 5 喷嘴在 20~95 L/min 泵量范围, S 调到优化值 25~30 mm 时, 与 $S=25$ mm 相比, 其吸水效率的增益低于 5%。

b. 分析单个喷嘴的喷速与吸水效率的关系(图 6、图 7、图 8), 可以看出: 当喷速大于 40 m/s 时, 其吸水效率均急剧下降, 这可能与喷速大于 40 m/s 时, 喷嘴射流出现逐渐加强的雾化现象有关。

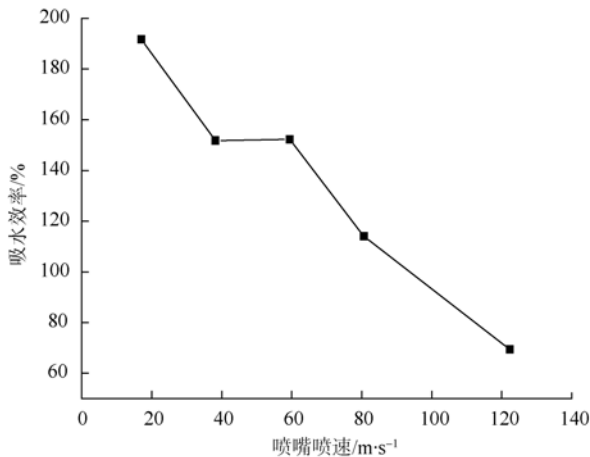


图 6 $\phi 5$ 喷嘴的喷速与吸水效率的关系曲线

Fig. 6 Relation between jetting speed of $\phi 5$ jet and water adsorption

c. 当吸水口封闭后进行混合腔内的压力值(真空值)测量时, 不能选用指针式真空表, 因为表针跳动剧烈, 难以获得精准测量结果。这反映出喷反作用过程中, 喷反装置混合腔内的压力状况变化剧烈、复杂。

d. 当吸水口开启且有吸水流量时, 可采用指针式真空表测量混合腔内的压力值。其测量结果表明(大气压按 0.10 MPa 考虑): 泵量在 20~45 L/min 范围、吸水效率最高时, 其混合腔内的压力值一般在 0.08~0.09 MPa; 泵量在 70~204 L/min 范围、吸水效率最高时, 其混合腔内的压力值一般则在 0.04~0.05 MPa。

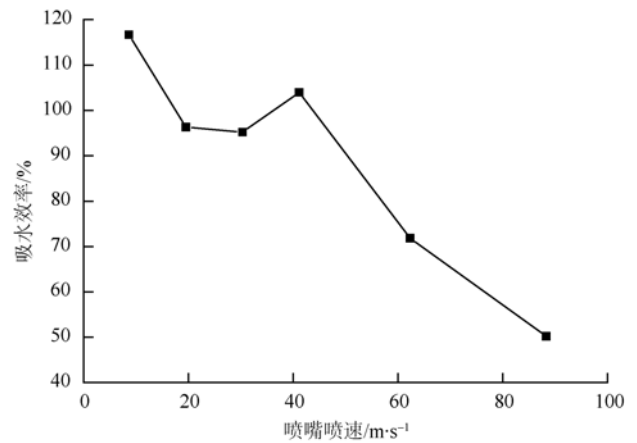


图 7 $\phi 7$ 喷嘴的喷速与吸水效率的关系曲线

Fig. 7 Relation between jetting speed of $\phi 7$ jet and water adsorption

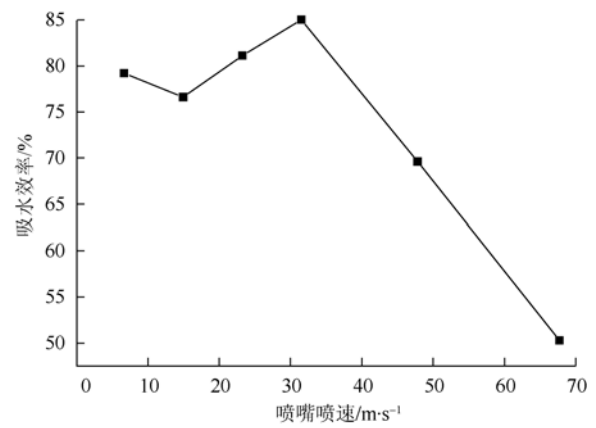


图 8 $\phi 8$ 喷嘴的喷速与吸水效率的关系曲线

Fig. 8 Relation between jetting speed of $\phi 8$ jet and Water adsorption

e. 对喷反效果的综合评价, 不能仅采用吸水效率这一单一因素, 应结合考虑泵压、泵量、功率转换效率、机具工况配套等多因素共同作用的结果。

参考文献

- [1] 武汉地质学院. 钻探工艺学[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- [2] 长春地质学校. 钻探工程[M]. 北京: 地质出版社, 1979.
- [3] 郑石仁. 喷射式孔底反循环钻进技术[M]. 北京: 地质出版社, 1984.

(上接第 70 页)

影响电磁波无线随钻测量仪器的使用。

d. 在钻井施工过程中, 实时获取地层的伽马数据, 真实地反映地层情况, 为准确判断岩性、识别油气层提供了可靠的依据。

e. 联通井设备不影响电磁波传播测量。

参考文献

- [1] 鲜保安, 蒋卫东. 欠平衡钻井技术在保护煤层气储层中的应用[J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 59-60.
- [2] 刘修善, 苏义脑. 钻井液脉冲信号的传输特性分析[J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(4): 8-10.