

超高压淹没射流破岩规律实验研究^{*}

冯云春, 徐依吉, 赵付国

(中国石油大学石油工程学院射流研究中心, 山东东营 257061)

摘要:超高压水射流在石油工业中的应用主要是超高压射流联合机械破岩。对超高压淹没射流破岩规律的研究,其目的在于为超高压PDC钻头的研制提供依据。研究发现:影响超高压射流破岩的主要因素有压力、喷距、喷嘴移动速度和喷射角度等,射流压力越高破岩效果越好,最优喷距随着压力的升高而升高,200 MPa时最优喷距达到32.5倍喷嘴直径,150 MPa时破岩效率最高,喷射角度在12.5°时破岩效果最好。

关键词:超高压;水射流;喷距;喷射角度;破岩

中图分类号: O521.9; TD231.62

文献标识码: A

1 引言

超高压水射流以其独特的优势使其用途越来越广泛,尤其是在采矿、冶金、机械加工、石油钻井等方面得到了飞速发展^[1]。目前超高压射流联合机械破岩是提高钻井速度最具潜力和最具可行性的方法,Veenhuizen等用超高压井下泵所做的现场实验表明,对于页岩,超高压射流辅助破岩的速度约为常规破岩速度的1.45倍,花岗岩1.50倍,而砂岩则高达2.0倍^[2]。课题的目的在于通过实验,研究淹没条件下超高压水射流破碎岩石的主要规律,探寻压力、喷距、喷嘴移动速度和喷射角度等对破岩效果的影响规律。为超高压射流联合机械破岩及超高压PDC钻头的进一步研究奠定基础。

2 影响淹没射流冲蚀岩石的因素

超高压淹没射流冲蚀岩石等脆性材料,其破坏机理是十分复杂的,影响因素也很多。研究发现,射流压力、喷距、喷射角度、喷嘴移动速度等几方面的影响最大。

3 实验设备及方法

3.1 实验设备

实验是在石油大学(华东)射流研究中心的超高压射流切割机上完成的,该设备可切任意形状曲线,喷嘴最低移动速度为1.91 mm/s,最高压力可达300 MPa,额定排量为2.0 L/min,选用直径为0.2 mm的进口红宝石喷嘴。高压泵工作介质(水)增压,经过高压管汇输送给喷嘴。

3.2 岩石的选择

实验所选用的岩石应满足以下要求:(1)岩石质地均匀,所选岩石的机械性能尽可能一致,有良好的各向同性;(2)冲蚀坑较规则,便于测取体积;(3)当压力在100 MPa时,射流能够对岩石有一定的冲蚀体积,当压力上升到200 MPa时,岩石不会出现整体崩裂。

曾用多种天然岩石进行了试验,能满足以上要求的天然岩石比较少。经过比较,选择了质地比较坚

^{*} 收稿日期: 2004-02-17; 修回日期: 2004-05-17

基金项目: CNPC 重点实验室项目(03A20201)

作者简介: 冯云春(1979—),男,硕士研究生,主要研究方向为高压水射流在油气井工程中的应用。

E-mail: guzhihong2@sohu.com

硬且耐高压的花岗石板(品名为济南青,密度 2.784 g/cm^3 ,抗压强度 196.34 MPa)。将其割成约 $15 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 大小的石板,石板厚度约 2 cm 。

3.3 实验方法

将石板置于水槽内,使其处于被淹没状态,然后根据实验计划调节喷距、喷嘴移动速度、喷射角度和压力。

4 数据的测量及分析研究

4.1 实验数据测量

由于喷嘴直径为 0.2 mm ,因此冲蚀体积很小,对测量精度要求很高,采用填充法测量。先用质地均匀的优质橡皮泥填充冲蚀的坑道,然后压实,以保证橡皮泥能填满所有孔隙,再用刀片削掉多余部分,使之与岩石表面齐平,再用精度为 0.001 g 的电子天平测出其质量。根据橡皮泥密度便可以精确地计算出冲蚀体积。

每组实验最少重复 3 次,然后取平均值,以减小实验误差。

4.2 不同喷距对岩石冲蚀效果的影响

研究在一定的喷嘴移动速度、压力和喷射角度情况下,不同喷距下射流对岩石的冲蚀规律。喷嘴移动速度为 1.91 mm/s ,射流压力从 125 MPa 逐步上升到 200 MPa ,喷射角度为 0° 。详细数据见图 1 和图 2。

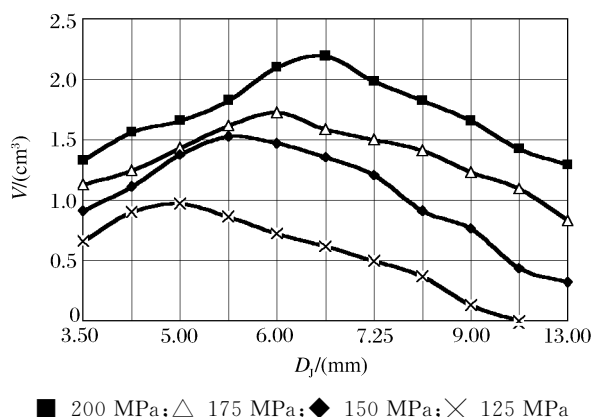


图 1 不同压力下冲蚀体积与喷距的关系图

Fig. 1 V - D_j relationship for break volume and jetting distance at different pressures

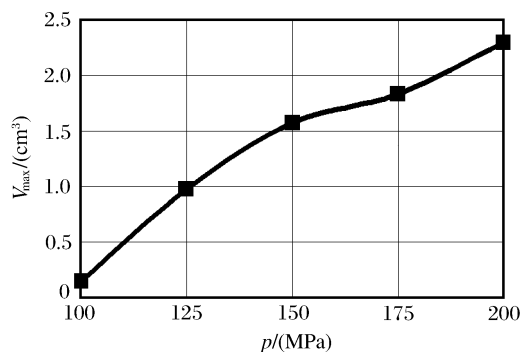


图 2 最大冲蚀体积与压力关系图

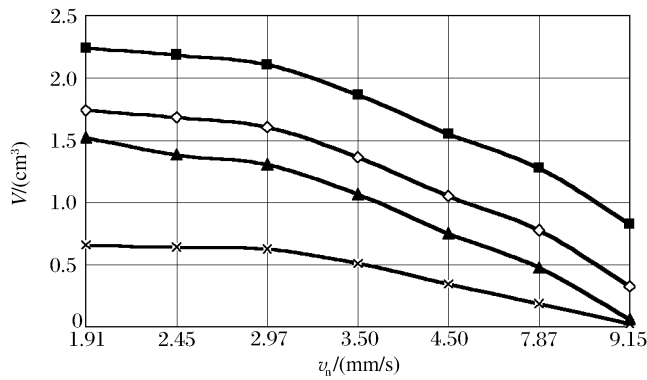
Fig. 2 $V_{\max}$ - p relationship for maximum break volume and pressure

根据对上述实验数据的分析可知:在喷嘴直径(d)、喷嘴移动速度、喷射角度等不变的情况下,随着射流压力的升高,最优喷距升高(见图 1),最大冲蚀体积也升高(见图 2)。压力在 125 MPa 、 150 MPa 、 175 MPa 和 200 MPa 时,最优喷射距离分别为 5.0 mm ($25d$)、 5.5 mm ($27.5d$)、 6.0 mm ($30d$) 和 6.5 mm ($32.5d$)。

喷距是破岩的一个至关重要的因素,如果没有合适的喷距,即使压力超过了岩石的门限压力,也无助于破岩效率的提高。在淹没状态下,由于能量衰减比较剧烈,等速核要比在空气中短得多^[3]。但绝非保证喷距在射流等速核以内,就可达到最优的破岩效率。实验证明,存在最优喷距的问题。

4.3 喷嘴移动速度对岩石冲蚀效果的影响

从图 3 中可以清楚地看到,在喷嘴直径、喷射压力、喷距、喷射角度等因素不变的情况下,喷嘴移动速度越快,冲蚀效果越差。喷嘴移动速度小于 2.9 mm/s 时,对冲蚀效果影响不大;当速度进一步增大以后,冲蚀效果明显降低。喷嘴移动速度的快慢,其实质反映的是射流作用与岩石表面时间的长短。



× 125 MPa; ▲ 150 MPa; ◇ 175 MPa; ■ 200 MPa

图 3 变喷嘴移动速度冲蚀效果图

Fig. 3 $V-v_n$ relationship for speed of nozzle and break volume

从图 5 中可以清楚地看到,在 3 组不同压力下,最佳喷射角度都集中在 12.5° 左右。

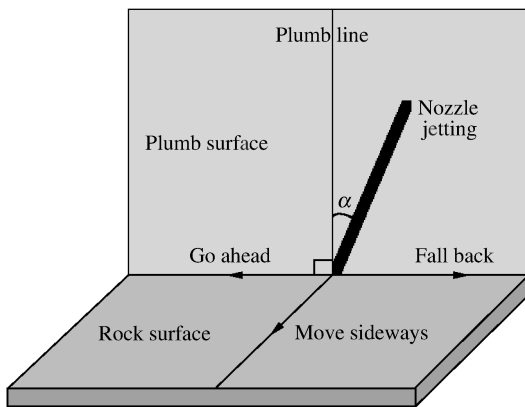


图 4 喷嘴移动方向与岩石面关系图

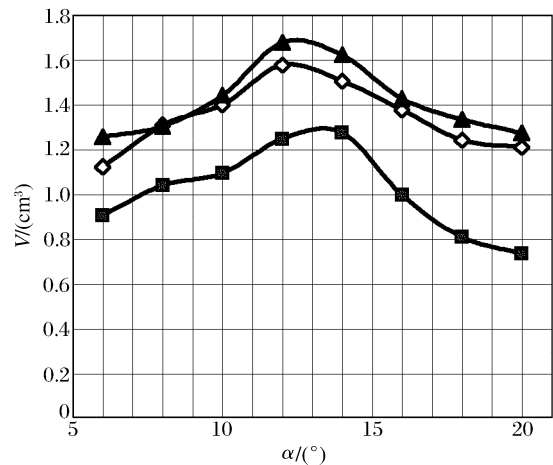
Fig. 4 Relationship for moving direction of nozzle and rock surface

5 喷射角对冲蚀效果的影响

喷射角度定义为岩石平面垂线与喷射方向线的夹角(锐角),即图 4 中的 α 角。由于喷嘴的倾斜方向与喷嘴的前进方向有几种不同搭配方式,一般分为 3 种(前进、后退和侧移)如图 4 所示。

当射流水平分速度与铅垂线分速度在同一铅垂面、且水平速度与喷嘴前进方向一致时(即前进方式),水射流与岩石接触的时间最长,理论分析破岩效果最佳,其余两种方法次之。通过实验验证:前进方式移动喷嘴超高压水射流破岩效果最佳。

因此就选择前进方式来研究改变喷射角度对冲蚀效果的影响。根据实验数据得到图 5。



▲ 200 MPa; ◇ 175 MPa; ■ 150 MPa

图 5 冲蚀效果与喷嘴角度关系

Fig. 5 $V-\alpha$ relationship for break volume and angle

6 不同压力下的破岩效率

研究不同压力下的破岩效率,旨在发现既经济又高效的破岩射流参数,对提高机械钻速和降低钻井成本都十分有意义。

在喷嘴出口截面内外两点间应用伯努利方程^[4],由于这两点间高度差很小,故可以忽略,得下式

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} \quad (1)$$

式中: p_1 、 p_2 分别为喷嘴的内外静压; v_1 、 v_2 分别为喷嘴内外流体的平均流速。根据两点间连续性方程可得

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (2)$$

由于所用喷嘴为圆形结构,故 $A = \pi d^2/4$,并假设水为不可压缩流体,即 $\rho_1 = \rho_2$,整理得

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho[1 - (d_2/d_1)^4]}} \quad (3)$$

由于实验所用压力高, p_1 是 p_2 的 1 000 倍以上, 且 $d_1 > 20d_2$, 因此 $p_1 \gg p_2$, $(d_2/d_1)^4 \ll 1$, 并将 $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ 代入上式得

$$v_t \approx 44.77\sqrt{p} \quad (4)$$

式中: v_t 为射流速度, m/s; p 为射流压力, MPa。

已知射流速度, 可由 $v_t = 10Q/A_0$ [5] 计算出射流流量, 即射流流量等于射流速度乘以喷嘴出口截面积

$$Q = v_t A_0 / 10 \quad (5)$$

式中: Q 为射流流量, L/s; A_0 为喷嘴横截面积, cm^2 。

当射流压力与流量确定以后, 将方程(4)和方程(5)代入 $P = 0.05\rho_d Q^3 / A_0^2$ [4], 即可得出喷嘴射流水功率为

$$P \approx 0.999pQ \quad (6)$$

式中: P 为喷嘴射流功率, kW; p 为射流压力, MPa; Q 为射流流量, L/s; ρ_d 为流体密度, g/cm^3 。

根据上述方程计算, 可得相应压力下的射流功率, 为了探索最经济的破岩压力, 这里定义一个比率 T_g

$$T_g = \frac{\text{岩石冲蚀体积}(\text{cm}^3)}{\text{喷嘴射流功率}(\text{kW})} \quad (7)$$

因此可以得到 T_g 与压力等射流参数的关系。

在喷嘴直径一定的条件下, 压力与功率呈线性关系(见方程(5)和方程(6)), 压力越高喷嘴射流功率就越高。由图 6 可知, 在压力低于 150 MPa 时, 随着射流压力的升高, 单位功率下的破岩体积迅速增大, 但是随着压力进一步升高, 单位功率下的破岩体积(T_g)增长就趋于平缓。这说明超高压淹没射流最经济的破岩压力并不是发生在实验的最高压力 200 MPa 下, 而是在 150 MPa 左右, 因为这时破碎单位体积的岩石所消耗的功率最少。

通过对以上实验数据的分析, 发现单位功率下的破岩量(T_g)与射流功率、压力、冲击力等之间并不呈线性关系, 这为喷射钻井以及钻进水功率的优化提供了一个有利的参考。因此要经济而且高效的破岩, 并非只提高射流功率就可以实现的, 在喷嘴直径一定的情况下, 一味地提高射流功率, 不仅不能更有效地提高破岩效率, 结果只能造成功率巨大浪费。

7 总 结

通过对实验数据的研究分析, 发现在淹没条件下, 喷距、射流压力、喷射角度等因素对破岩效果影响的基本规律:

- (1) 在喷嘴直径、喷射角度、喷距等一定的情况下, 射流压力越高破岩效果越好;
- (2) 在喷嘴直径、喷射角度、喷嘴移动速度一定的情况下, 最优喷距随着压力的升高而升高, 在 200 MPa 时达到了 32.5 倍喷嘴直径;
- (3) 喷嘴移动速度的实质是反映射流冲蚀岩石的作用时间, 当其小于 2.9 mm/s 时, 对岩石的冲蚀效果影响不大, 超过此值以后, 冲蚀效果明显降低;
- (4) 在压力低于 150 MPa 时, 射流压力升高, 单位功率下的破岩体积迅速增大, 但压力进一步升高,

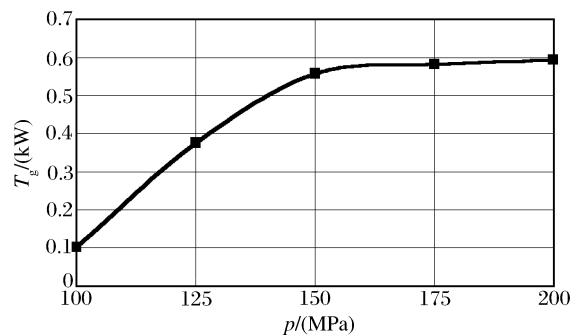


图 6 T_g 与压力关系图

Fig. 6 T_g - p relationship for T_g and pressure

单位功率下的破岩体积增长平缓,150 MPa 时破岩效率最高;

(5) 在压力、喷射角度、喷距、喷嘴直径等一定的情况下,喷嘴按前进的方式移动,破岩效果最佳,且最佳喷射角度 12.5° 。

References:

- [1] Shen Z H. Water Jet Theory and Technology [M]. Dongying of Shandong Province: Petroleum University Press, 1998. 1—4. (in Chinese)
沈忠厚. 水射流理论及技术 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1998. 1—4.
- [2] Veenhuizen S D, Kolle J J, Rice, C C, et al. Ultra-High Pressure Jet Assist of Mechanical Drilling [J]. Society of Petroleum Engineers, 1997, : 84—85.
- [3] Shen Z H, Li G S, Wang R H. Foreground Expectation of Water Jet Technology in Petroleum Industry [J]. Chinese Engineering Science, 2002, 4(12): 61—64. (in Chinese)
沈忠厚, 李根生, 王瑞和. 水射流技术在石油工程中的应用及前景展望 [J]. 中国工程科学, 2002, 4(12): 61—64.
- [4] Yuan E X. Engineering Hydrodynamics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986. 53—63. (in Chinese)
袁恩熙. 工程流体力学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1986. 53—63.
- [5] Chen T G, Guan Z C. Drilling Engineering Theory and Technology [M]. Dongying of Shandong Province: Petroleum University Press, 2000. 145—146. (in Chinese)
陈庭根, 管志川. 钻井工程理论与技术 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 2000. 145—146.

Experimental Study on the Breaking of Rock by Ultra-High Pressure Water Jetting

FENG Yun-Chun, XU Yi-Ji, ZHAO Fu-Guo

(*Oil & Gas Well Engineering Discipline, University of Petroleum, Dongying 257061, China*)

Abstract: Ultra-high pressure water jetting has a use for assisting mechanical breaking of rock in petroleum drilling. We found by experiment that the main factors affecting the breaking of rock are pressure, distance, speed and angle of jetting. With the pressure increasing, the breaking of rock is better and at 150 MPa, the efficiency of rock breaking is the highest. The most distance of jetting is 32.5 times diameter of nozzle when the pressure is 200 MPa, and the best jetting angle is 12.5° .

Key words: ultra-high pressure; water jetting; distance of jetting; angle of jetting; break of rock