

# 固液两相射流清洗油管涂料的实验研究

沈忠厚 汪志明 王开龙 徐依吉

(石油大学石油工程系,北京 102200)

**摘要** 对前混合式磨料射流清洗油管进行了实验研究. 研究表明,前混合式磨料射流清洗油管涂料的清洗速率随泵压和喷嘴直径的增大而增大,喷距、喷射角和颗粒直径的最佳值分别为150 mm、120°(或60°)和0.8 mm. 油管旋转速度与喷嘴平移速度的比值与清洗宽度成反比. 前混合式磨料射流清洗油管涂料的速率大大高于后混合式磨料射流.

**关键词** 射流;磨料喷嘴;清洗;油管;涂料

**中国图书资料分类法分类号** O 359

**第一作者简介** 沈忠厚,男,1928年出生,1951年毕业于重庆大学. 现为石油大学(北京)教授、博士生导师,主要从事水射流技术在石油工程中的应用方面的教学、科研工作.

## 0 引言

目前各油田大都是采用喷砂法清洗带有涂料的油管,但清洗面的麻点很多,清洗效率不高. 为了利用磨料射流技术清洗油管,对前混合式磨料射流清洗油管进行实验研究,旨在确定最佳的磨料射流混合方式和工作参数配合,从而提高清洗油管涂料的速率,降低作业成本.

## 1 清洗速率及比能的确定

影响前混合式磨料射流清洗效果的因素很多,这里主要研究了前混合式磨料射流的清洗效果与射流压力、靶距、喷射角度、横移速度、喷嘴直径、磨料的种类及粒度的关系.

实验所用的磨料为石英砂,分黄砂、白砂两种. 其中黄砂颗粒圆滑,含91%的石英、4%斜长石和4%钾长石;白砂颗粒尖锐,由99%的石英和其它一些成分组成. 实验中把白砂分为小于0.45 mm、0.45~0.6 mm、0.6~0.8 mm、0.8~0.9 mm四种粒径,黄砂可筛出0.8~0.9 mm的颗粒. 靶材是带有涂料的油管,油管外径为73 mm,涂料厚度约为40~60 μm. 涂料的化学组成为环氧酚醛,抗冲击性能50 N·cm,硬度(摆动比)不小于0.5,柔韧性不大于5 mm,附着力(画圈法)1~2级,耐混合酸55 h后无明显变化,耐沸油水(100℃)1 h后无明显变化,耐沸水(100℃)3 h后无明显变化.

清洗速率(单位时间内清洗油管的面积)的表达式为

$$f = [(60\pi du)^2 + (60v)^2]^{1/2} \times \frac{A}{1000} = 3.6 \times [(\pi du)^2 + v^2]^{1/2} \times A \times 10^{-2} \quad (1)$$

式中, $d$ 为被清洗油管的外径,m; $f$ 为清洗速率, $m^2/h$ ; $u$ 为油管旋转速度, $r/min$ ; $v$ 为喷嘴平移速度, $m/min$ ; $A$ 为清洗宽度,mm.

收稿日期:1995-08-20

• 30 •

清洗比能(单位清洗面积所消耗的能量)的表达式为  $B=W \times 3600/f$ . 式中,  $B$  为比能,  $J/m^2$ ;  $W$  为射流功率,  $J/s$ . 油管旋转速度与喷嘴平移速度的配合关系主要决定于清洗宽度. 在清洗宽度一定的情况下, 为使油管能被一次清洗干净, 亦即清洗条纹之间不留间隙, 油管旋转速度与喷嘴平移速度之间有一理论配合比值  $x$ . 在实际清洗中, 由于各种原因, 还需对其进行修正, 即:  $x=k\pi d/A$ , 式中  $k>1$  为配合系数.

## 2 实验结果及分析

### 2.1 压力对清洗效果的影响

实验用磨料是直径为 0.8~0.9 mm 的白砂, 喷嘴直径为 4 mm, 喷距为 150 mm, 喷射方式为垂直喷射. 图 1 表明, 清洗宽度不随压力变化. 这主要是因为虽然压力升高了, 同一横截面内同一点的射流能量增强了, 但距喷嘴一定距离的射流束的横截面积并未改变, 而且射流的综合移动速度  $\sqrt{(60\pi du)^2 + (60v)^2}$  也相应地增加, 因此射流在油管的同一点的作用时间减少, 从而抵消了射流能量的增加, 使清洗宽度保持不变. 随着压力的增加, 射流清洗速率呈直线增加(如图 1 所示), 用最小二乘法拟合得  $f = -1.49 + 0.996p$ . 当  $f=0$  时,  $p=1.496$  MPa, 即当  $p$  小于 1.496 MPa 时清洗速率几乎为 0, 也就是说能够进行清洗的泵压必须大于 1.496 MPa, 称这一压力为门槛值. 只有当压力超过门槛值时, 磨料射流能量才足以使油管表面涂料被剥蚀掉. 随着压力的继续增加, 通过射流束同一横截面的射流速度增加, 流量和能量也增加. 因而只有提高喷嘴的综合移动速度, 才能减少油管表面的重复清洗时间, 使被清洗表面达到同一效果, 这样清洗速率也相应地提高了.

油管转速与喷嘴平移速度比值  $x$  随压力变化而保持不变(图 1), 也就是说, 当压力增加时, 为了使油管涂料被完全清洗掉而不留有未清洗的螺旋缝, 转速与平移速度将以相同的倍数增加. 清洗比能  $B$  随压力的增加而线性地增加, 这有多方面的原因. 一方面, 压力升高, 流速加大, 流动阻力也增加, 因而能量在管路中损失增大; 另一方面, 压力升高, 流速加大, 射到油管表面的射流被反弹回来的速度也增加, 使能量损失增加, 因此比能增加. 在实际的清洗工作中, 压力的确定既要考虑清洗速率, 又要考虑比能, 以取得最佳的经济效益.

### 2.2 喷嘴直径对清洗效果的影响

实验中采用的磨料直径为 0.45 mm 的白砂, 压力为 12 MPa, 喷距和喷射角同前. 射流清洗宽度随着喷嘴直径  $d$  的增加而增加(如图 2 所示). 随着喷嘴直径的增大, 射流的清洗速率呈非线性迅速增加, 曲线拟合得  $f = 3.03942 \times 1.29158^d$ . 由此可见, 清洗速率随喷嘴直径的增加呈指数形式上升, 喷嘴直径越大, 速率增加越快. 在压力不变的情况下, 射流流量与喷嘴直径的平方成正比, 因而泵的能量供给迅速增大, 这无疑使得清洗速率迅速增加. 随喷嘴直径的增大, 喷射到油管表面的射流横截面积增大, 清洗宽度增大. 为了减少重复清洗, 喷嘴的综合移动速度也需要增大, 因此清洗速率迅速地增加. 转速与平移速度比值  $x$  随

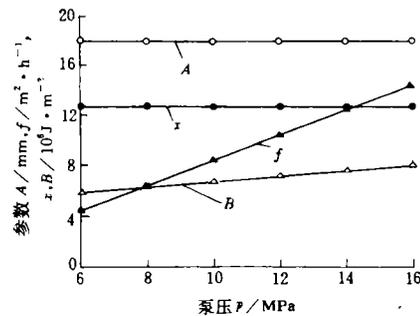


图 1 前混合磨料射流参数与泵压的关系

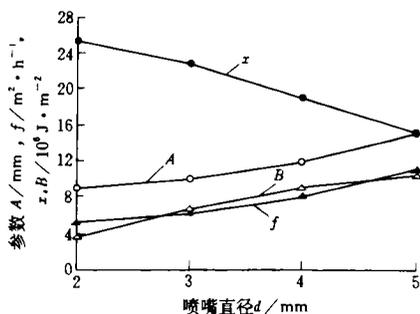


图 2 前混合磨料射流参数与喷嘴直径关系

喷嘴直径增加而减小(见图 2)。当喷嘴直径增大时,要一次完全清洗油管,虽然横移速度与旋转速度都需增加,但平移速度比旋转速度增加得应更多。

从图 2 看出,清洗比能随着喷嘴直径的增加而呈非线性增加,其增加趋势越来越平缓。对某一台泵来说,功率是额定的,假定射流的清洗速率曲线在其它条件变化时仍然与  $p$  和  $1.29158^d$  成正比,可以得到  $f$  与  $p, d$  的关系式为

$$f = a \times (b + c \times p) \times 1.29158^d$$

又  $w = p^{1.5} \pi d^2 \rho^{-0.5} / 2.83$ , 设  $w$  为常数, 则有

$$f = a \times (b + c \times p) \times 1.29158^{\sqrt{2.83w\rho^{0.5} p^{-1.5} \pi^{-1}}}$$

式中,  $a, b, c$  为系数。由式(3)就可以解出  $f$  为最大值时的  $p$  值, 从而由式(2)可以求出喷嘴直径  $d$  值。这时的  $p$  与  $d$  的配合将是最佳的。

### 2.3 喷距对清洗效果的影响

实验磨料同样是白砂, 颗粒直径为 0.6 ~ 0.8 mm, 泵压为 20 MPa, 喷嘴直径为 4 mm, 仍为垂直喷射。射流各参数与喷距的关系如图 3 所示。射流清洗宽度随喷距的增加而增加, 而且当喷距较小时, 速度增加较快; 喷距较大时, 速度增加平缓, 甚至将向某一极限宽度靠近。当喷距还比较小的时候, 射流横截面较小, 周边射流还足以清洗油管涂料; 而当喷距较大时, 射流横截面较大, 离中心较远的射流环的射流能量不足以清洗掉油管涂料; 喷距再增大, 射流横截面能清洗油管涂料的有效面积也增大得越来越少, 甚至在一定喷距以外时还有减小的可能。

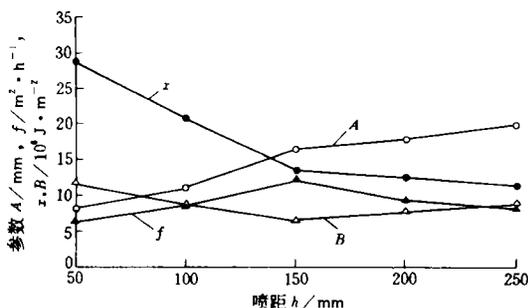


图 3 前混合磨料射流各参数与喷距的关系

射流清洗速率随着喷距的增加, 先呈上升趋势, 在 150 mm 处达到最大值, 尔后射流清洗速率将随着喷距的增大而呈下降趋势。随着喷距的增加, 清洗宽度增大, 而在喷距较小的时候, 喷距的增加有利于磨料的加速, 使磨料粒子的速度尽可能达到最大值, 这非常有利于磨削清洗。因此虽然清洗宽度增大了, 但综合平移速度并不因喷距的增大而减小许多, 且在喷距相当低的情况下, 综合平移速度还会有所增加, 这二者的综合结果使得射流清洗速率增大。当达到一定的喷距以后, 随着喷距的增大, 磨料粒子的速度降低, 射流的能量损失加大, 而喷射宽度又不再增大, 而且还有减小的可能, 因此射流清洗速率降低。

转速与平移速度比值  $x$  随喷距的增大先快速减小, 再缓慢减小至平稳。清洗比能随喷距的增加先呈下降趋势, 在 150 mm 处, 比能将达到最小。随着喷距的继续增大, 比能将逐渐增大。

### 2.4 喷射角对清洗效果的影响

实验中采用直径为 0.45 ~ 0.6 mm 的白砂为磨料, 泵压为 12 MPa, 喷距为 150 mm, 宝石喷嘴直径为 4 mm。实验结果见图 4。图 4

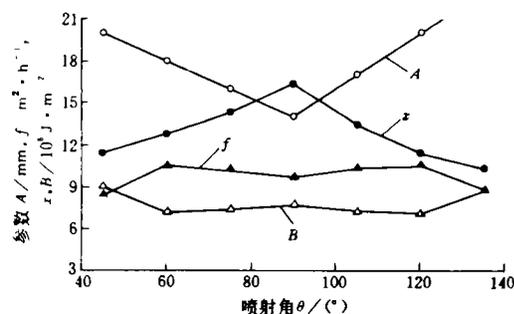


图 4 前混合磨料射流各参数与喷射角的关系

表明, 射流清洗宽度随喷射角的增加, 先是呈直线降低, 喷射嘴角为 90° 时达到最低; 喷射角大

于 90°时,清洗宽度又呈直线上升.但两条直线斜率不同,后者的斜率绝对值大于前者.清洗速率随喷射角与 90°差值的绝对值的增加,先增加后降低.喷射角大于 90°时,清洗速率稍高.在 0~180°的变化中,以 120°左右的喷射角为最佳.由于倾斜了一定的角度,入射到被清洗油管表面的射流反弹方向不朝向入射的方向,使能量利用率提高,清洗速率也随之提高.但当该差值过大时,由于实际喷距的增大和粒子的发散,能量利用率降低,清洗速率也随之降低.

转速与平移速度的比值  $x$  随喷射角增加先呈非线性上升,再呈非线性下降,在喷射角为 90°时达到最大.清洗比能随着喷射角的增加呈 W 形变化,刚好与清洗速率的变化曲线相反,即随喷射角与 90°差值的绝对值的增加,清洗比能先增加再降低.在小于 90°时,最小比能时的喷射角为 60°;而在大于 90°时,最小比能时的喷射角为 120°.

## 2.5 磨料颗粒直径对清洗效果的影响

实验磨料为白砂,只改变颗粒直径,其它的工作参数不变.由图 5 看出,射流清洗宽度随颗粒直径的增大而增大,但增大趋势越来越缓.当磨料粒径太小时,磨料颗粒携带的能量比较小,因而磨削清洗的能力较小.在同一射流截面内,远离射流中心的磨料颗粒甚至不足以磨削清洗油管涂料;而当磨料颗粒过大时,虽然单磨料颗粒携带的能量较大,但颗粒数变少且射流对磨料的加速度变小,使颗粒的速度变小,因此清洗宽度增加的趋势将减小.

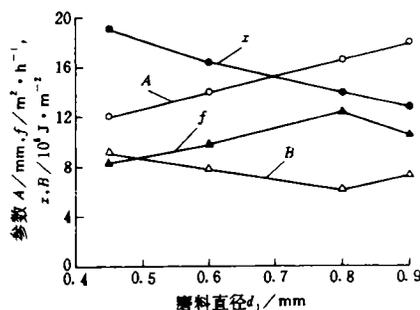


图 5 前混合磨料射流各参数与磨料直径的关系

颗粒直径增加到 0.8 mm 左右时射流清洗速率达到最大值,然后将随颗粒直径的增大而减小.磨料射流的清洗效率的增加或减少,将取决于大粒径磨料增加的动能与粒子数量减少所减少的动能之迭加,前者占优势,则磨料射流的清洗速率将增加,反之将减少.

转速与平移速度的比值  $x$  随颗粒直径的增加而减少;清洗比能随颗粒直径的增加先减小,然后再增加,在 0.8 mm 左右,比能达到最低.

## 2.6 磨料的形状、种类对清洗效果的影响

实验中采用白砂和黄砂两种磨料颗粒,喷射方式为垂直喷射,采用 4 mm 直径的宝石喷嘴,颗粒直径均为 0.8~0.9 mm,其它参数同前.实验结果白砂清洗效果比黄砂好.从经济效益上看,黄砂吨价大于白砂,故在选择磨料时,白砂优于黄砂.因此,比较合理的参数配合为:泵压为 20 MPa、喷嘴直径为 4 mm、喷距为 150 mm、喷射角为 120°、磨料为 0.6~0.8 mm 的白砂.

## 2.7 前混合式与后混合式磨料射流清洗效率的对比

实验磨料是颗粒直径为 0.8~0.9 mm 的白砂,喷距为 150 mm,垂直喷射.对前混合,采用 4 mm 直径的宝石喷嘴;对后混合,水喷嘴直径为 4 mm,混合喷嘴直径为 10 mm;前混合式磨料射流体积分数为 0.293,后混合式流量为 4.5 kg/min.

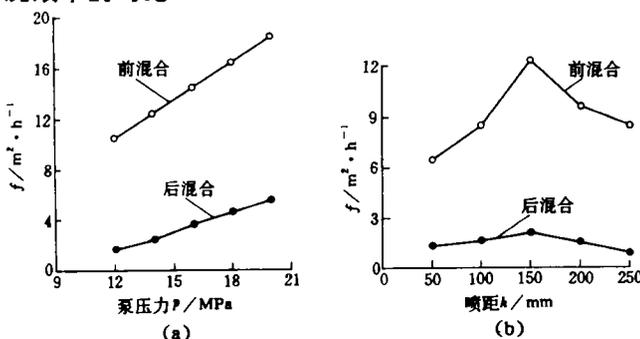


图 6 清洗速率与泵压和喷距的关系

图 6(a)是磨料射流清洗速率随压力变化的曲线.从图中可看出,在不同的压力下,前、后混合式磨料射流的清洗速率各不相同,当压力为 12 MPa 时,前混合式磨料

射流的清洗速率是后混合式磨料射流的 6.12 倍;14 MPa 时为 5.06 倍;16 MPa 时为 4.02 倍;18 MPa 时为 3.56 倍;20 MPa 时为 3.34 倍. 即压力越小相差越大,压力越大相差越小. 图 6(b) 给出清洗速率与喷距的关系. 从图中可知,在不同的喷距下,前、后混合式磨料射流的清洗速率的差别各不相同,即随着喷距的增加,相差越来越大. 由于后混合式磨料射流的水射流速度很高,磨料颗粒仅能被吸附在水射流的边界层,很难进入水射流的中心部位,因此,后混合式磨料射流的磨蚀能力的提高受到限制. 前混合式磨料射流在射流形成前,水和磨料几乎均匀混合,通过喷嘴时与水一起得到充分的加速,射流磨蚀能力大大提高,因此清洗速率大大高于后混合式磨料射流.

### 3 结 论

压力、喷嘴直径、喷距、喷射角、磨料颗粒直径和磨料种类均对固液两相射流的性能产生影响. 前混合式磨料射流清洗性能优于后混合式磨料射流.

### 参 考 文 献

- 1 孙家俊. 水射流切割技术. 徐州:中国矿业大学出版社. 1992
- 2 郑洽餘等. 流体力学. 北京:机械工业出版社. 1979
- 3 Hashish M. Aspects of Abrasive-water Jet Performance Optimization. 8th International Symposium on Jet Cutting Technology. 1986:297~308
- 4 Hunt D C. et al. Surface Finish Optimization for Abrasive Water Jet Cutting. 9th International Symposium on Jet Cutting Technology. 1988:99~112

## EXPERIMENTAL STUDY ON PROPERTY OF WATER-SOLID ABRASIVE JET FOR CLEANING COATING OF OIL TUBE

*Shen Zhonghou Wang Zhiming Wang Kailong Xu Yiji*  
(University of Petroleum, Beijing, China 102200)

**Abstract** The experimental results on cleaning oil tube coating by premixed abrasive jet showed that the efficiency of the premixed abrasive jet for cleaning oil tube coating increased with pump pressure and diameter of nozzle. There exists a preferred value that results in the highest efficiency of the premixed abrasive jet for cleaning oil tube with the preferred standoff distance of 150 mm, jet angle of 120° or 60° and diameter of abrasive grain of 0.8 mm. The ratio of rotary velocity of oil tube to shift velocity of nozzle is determined with cleaning width, and is inverse proportion to the cleaning width. Experiment shows that the efficiency of premixed abrasive jet for cleaning oil tube coating is much better than that of postmixed abrasive jet.

**Subject words** Fluidics; Abrasive jet; Flushing; Tubing; Coating

*About the first author* Shen Zhonghou, male, was born in 1928. He graduated from Chongqing University in 1951. Now he works on fluid jet technology at the Department of Petroleum Engineering in the University of Petroleum, China.

(责任编辑 陈淑娟)