

# 高压钢粒子输送装置输送性能及密封结构分析

肖丙喜<sup>1</sup> 赵惠清<sup>1\*</sup> 温林荣<sup>2</sup>

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 中国石化胜利石油管理局钻井工艺研究院, 山东 东营 257061)

**摘 要:** 高压钢粒子输送是粒子冲击钻井中的关键技术之一。根据传统的螺旋输送装置, 设计了一种新型高压钢粒子输送装置, 将混合后的 2.5 mm 钢珠与泥浆定量输送至井下。该装置具有如下特点: 螺杆轴向力由减速器承担, 高压密封装置采用高压机械密封, 粒子在高压状态下且固液混合输送。以这种新型螺旋输送装置为研究对象, 重点分析了新型螺旋输送装置对粒子输送的运动, 以及粒子输送的输送角与螺杆和筒壁摩擦因数的关系, 通过分析研究可知螺旋输送机螺杆与粒子的摩擦因数比筒壁与粒子的摩擦因数对输送效率的影响显著, 制造加工螺旋输送机时应尽可能减小角螺杆与粒子的摩擦因数, 以提高该装置的输送效率。此外, 对装置中高压密封结构进行了分析。

**关键词:** 输送; 粒子; 输送角; 高压密封

**中图分类号:** TH224

## 引 言

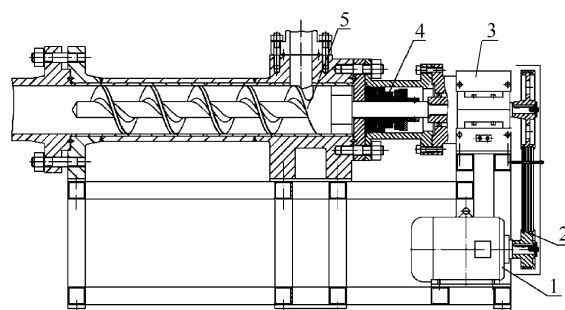
在钻井中, 虽然坚硬岩层只占整个钻井深度中很少的一部分, 但却花费了整个钻井时间的 70%, 钻井花费的时间越长, 费用越高。针对这种情况, 近年来发展起来一项新技术即粒子冲击钻井 (PID)<sup>[1]</sup>, 它是一套可以方便地与常规钻机配套的可移动系统。该系统将钢粒子加入到高压钻井液中, 通过钻柱到达底部钻头, 并利用钻头的特殊结构对粒子加速, 依赖钻井液的能量以及所携带的坚硬球形钢粒的联合作用快速冲击破碎岩层, 连续的撞击使岩石破碎成小颗粒, 并随钻井液返回地面装置<sup>[2]</sup>。这一过程特别适用于那些因抗压强度极高而导致机械钻速降低的岩层。

在这项技术中, 如何将钢粒子加入到高压钻井液中是关键技术之一。采用的方法之一利用压裂泵原理进行例子流的输送。但是此方法通过现场多次试验发现粒子输送不够稳定, 不能输送常数的粒子流, 来满足工艺要求<sup>[1]</sup>, 同时随着压力和深度的增加, 输送量递减, 进而会产生压力的突然波动。为此国外研究机构也在进行新型输送装置的研究, 国内并无此相关内容的研究和资料, 为此设计了新的装

置螺旋输送装置, 本文对该装置进行了输送角和摩擦因数的关系分析以及高压密封结构分析。

## 1 高压粒子螺旋输送装置概述

根据工艺要求, 粒子注入量为 57 L/min, 输送压力为 25 MPa, 设计出的新型螺旋输送装置如图 1 所示。



1—电机; 2—皮带轮; 3—减速器; 4—机械密封; 5—输送部分

图 1 高压粒子螺旋输送装置

Fig. 1 Illustration of the device for delivering of high-pressure steel particles

该输送装置主要有 5 部分组成, 包括电机、皮带轮、减速器、机械密封、输送部分, 输送部分和机械密封部分为自行设计, 对电机、皮带轮、减速器三部分进行了配套选型。电机通过皮带传输和减速器减速, 带动螺旋装置运行, 螺旋输送机的转速为 1 r/min, 高压状态下输送钢球粒子和钻井液的混合物, 密封采用机械密封。

收稿日期: 2009-12-15

第一作者: 男, 1984 年生, 硕士生

\* 通讯联系人

E-mail: zhaohq@mail.buct.edu.cn

## 2 输送性能分析

根据固体输送理论<sup>[3]</sup>, 高压粒子输送的运动分析依据以下基本假设:

(1) 高压固液混合的粒子, 由于液体含量仅存在于粒子间隙中, 所以输送过程中粒子可看成密实的固体塞;

(2) 固体塞与螺槽底面、两个侧面和机筒内表面同时紧密地接触;

(3) 粒子的压力在螺槽流道内等压;

(4) 螺槽为矩形, 螺纹圆角半径不计。

根据固体输送理论<sup>[4]</sup>, 当螺杆旋转机筒静止时, 其固体输送段的体积流率  $Q$  ( $\text{mm}^3/\text{min}$ ) 为:

$$Q = \pi^2 D_b n H_1 (D_b - H_1) \frac{\tan \theta \tan \phi_b}{\tan \theta + \tan \phi_b} \left( \frac{\bar{W}}{W + e} \right) \quad (1)$$

式中:  $D_b$  为螺杆直径, mm;  $n$  为螺杆转速, r/min;  $H_1$  为螺槽深度, mm;  $\theta$  为输送角, rad;  $\phi_b$  为螺旋升角, rad;  $\bar{W}$  为平均螺槽宽度, mm;  $e$  为螺棱宽度, mm。

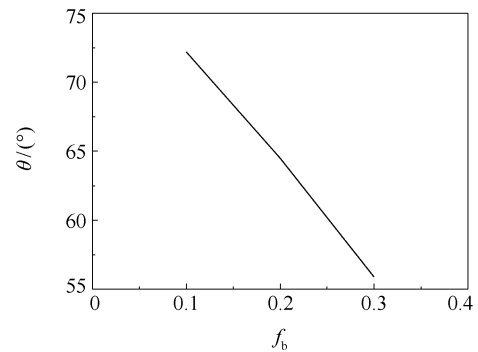
从式(1)看到, 当螺杆几何参数确定的情况下, 输送角是影响粒子输送的重要因素, 输送角越大, 粒子输送的产率越高。通常情况下, 它取决于螺杆几何参数、摩擦因数以及固体输送段压力的变化。本装置中粒子输送压力的变化可忽略不计, 粒子输送中输送角的表达式为:

$$\cos \theta = K \sin \theta + 2 \frac{H_1 f_s}{W_b f_b} \left( K + \frac{\bar{D}}{D_b} \text{ctg} \phi \right) \sin \phi_b + \frac{W_s f_s}{W_b f_b} \left( K + \frac{D_s}{D_b} \text{ctg} \phi_s \right) \sin \phi_b + \frac{\bar{W} H_1}{W Z_b f_b} \left( K + \frac{\bar{D}}{D_b} \text{ctg} \phi \right) \sin \phi \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (2)$$

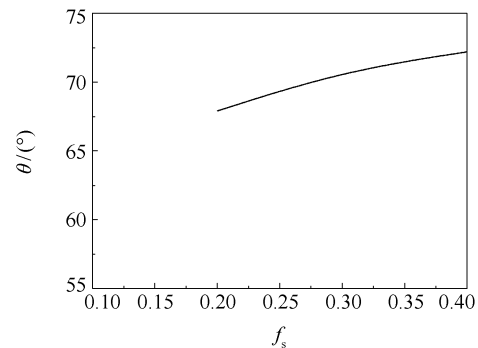
式中:  $K = \frac{D_s \sin \phi + f_s \cos \phi}{D_b \cos \phi - f_s \sin \phi}$ ;  $f_s$  为螺杆与物料的摩擦系数;  $f_b$  为机筒与物料的摩擦系数;  $W_s$  为机筒内表面的螺槽宽度, mm;  $W_b$  为螺杆底面的螺槽宽度, mm;  $\bar{D}$  为平均螺杆直径, mm;  $Z_b$  为沿机筒内表面流道距离, mm;  $p_1$  为固体输送段初始处压力, MPa;  $p_2$  为固体输送段结束处压力, MPa。

根据输送量要求, 初步计算出螺杆外径 250 mm, 螺槽深 125 mm, 并在此基础上分析了螺旋升角、螺杆表面摩擦因数  $f_s$ 、机筒表面摩擦因数  $f_b$  对输送角的影响。螺杆和机筒表面摩擦因数对输送角的影响如图 2 所示。

粒子输送的输送角直接影响到输送产率, 增大



(a)  $f_b$  与  $\theta$  关系曲线



(b)  $f_s$  与  $\theta$  关系曲线

图 2 螺杆和机筒表面摩擦因数对输送角的影响

Fig. 2 The effects of screws and barrel's surface friction factor effects on the transmission angle

$\theta$  角, 均可提高输送产率, 从图 2 中可以看出, 当螺杆螺距等于螺杆直径时, 即螺旋升角为  $17.7^\circ$  时, 螺杆的表面结构对输送产率影响较大, 当机筒较为粗糙, 机筒与粒子的摩擦系数为 0.4 时, 螺杆表面越光滑, 输送角越大, 当螺杆与粒子的摩擦系数为 0.1, 其输送角达到  $72.2^\circ$ 。从图 2 还可以看出, 增大机筒与粒子的摩擦系数也会提高粒子的输送产率, 但影响不如减小螺杆与粒子的摩擦系数更明显。因此该高压粒子螺旋输送中螺杆的表面除了喷涂硬质合金外, 在加工研磨时应尽量提高其表面结构, 使螺杆表面越光滑越好。对于机筒内表面, 虽然其表面粗糙度的变化对粒子输送的影响不是很明显, 但降低机筒表面结构, 对提高粒子的输送效率还是有效的。因此在加工机筒内衬时在衬套内表面进行喷焊颗粒, 降低其表面结构。

图 3 是螺旋升角与输送角的关系, 由图 3 可以看出: 当螺杆与粒子的摩擦系数为 0.1 和机筒与粒子的摩擦系数为 0.4 时, 螺旋升角对输送角的影响并不明显, 即对物料的输送率影响较小, 当螺杆直径一定时, 随着螺距的增大, 螺旋升角随之增大, 所以

在设计时,考虑到加工因素,还是采用将螺距设计成等于螺杆直径。

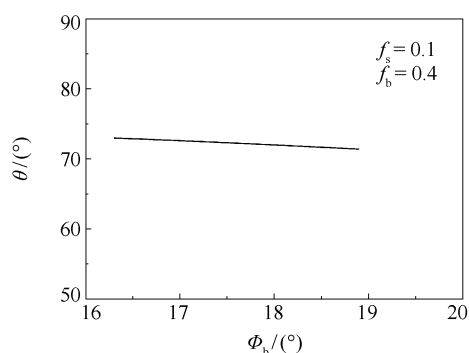


图3 螺旋升角与输送角的关系

Fig. 3 The relationship between helix angle and transmission angle

在螺旋输送中,输送角越大,输送效率越高。因此螺旋输送机的输送性能的主要影响因素是螺杆与钢球粒子的摩擦因数,应尽可能减小螺杆与钢球粒子的摩擦因数,来提高螺旋输送机的输送效率。

### 3 密封结构分析

密封结构是该螺旋输送机的关键结构之一,由于该设备属于高压设备,法兰连接部分根据钢制压力容器国家标准,法兰与法兰面之间的静密封采用八角垫密封结构,结构可靠。但对于传动轴段密封,由于压力较高,其密封元件的抗变形能力是决定机械密封能否正常使用的重要原因,由于所密封的介质含有颗粒,对密封元件的耐磨性要求较高,为此对螺旋输送装置的密封结构的设计主要从结构抗变形能力,动静环的耐磨能力,流体动压效应三个方面进行考虑<sup>[5]</sup>。

#### 3.1 结构抗变形能力

机械密封的密封环端面在加工时一般都达到很高的平面度,但在高压下使用时密封环端面会发生偏转,造成密封失效<sup>[6]</sup>。所以设计时从结构上考虑采用嵌套式带支撑圈结构,这种结构在高压下具有较好的抗压性能。另外从动静环的受力分析看,静环的轴向力基本平衡,在弹簧力的作用下,会形成发散型间隙,密封面间充满液膜,使密封稳定运转。

#### 3.2 动静环的耐磨性

高压机械密封零件材料对机械强度、刚度、导热性、摩擦性能和气密性要求更高<sup>[7]</sup>。由于工作介质为泥浆,含有颗粒,同时工作压力高达 25 MPa,因此本高压机械密封的动环和静环均采用硬质合金材

料,来提高其刚度和抗耐磨性,同时结构上采用套装方式,增加其性能。

#### 3.3 流体动压效应

将密封端面开有数个一定形状的流体动压槽,这种密封称为流体动压式密封。在高压和高摩擦的情况下可以使密封端面润滑膜稳定,当密封环旋转时,在密封环的表面形成与槽数相等的流体动力楔和高压区,因此随着密封面载荷的增加,摩擦系数反而减少。本高压机械密封在动环内侧端面开有 6 个润滑槽,深度为 1 mm。

### 4 结束语

通过本文的研究,高压钢粒子螺旋输送装置螺杆与粒子的摩擦因数比筒壁与粒子的摩擦因数对于输送效率的影响更加显著,加工制造时应尽可能减小螺杆与粒子的摩擦因数获得更高的输送效率;同时在设计高压密封装置时,采用嵌套式支撑圈结构,动静环采用硬质合金材料,在密封面上开润滑槽,实现更好的密封。

### 参考文献:

- [1] Hardisty T. Big oil is tuning into hard rock to get to petroleum resources[J]. Business Journal, 2007, 37(44): 16-22.
- [2] 伍开松, 荣明, 况雨春, 等. 粒子冲击钻井破岩仿真模拟研究[J]. 石油机械, 2008, 36(2): 9-11.  
Wu K S, Rong M, Kuang Y C, et al. Simulation study of PID[J]. Petroleum Machinery, 2008, 36(2): 9-11. (in Chinese)
- [3] 贾明印. 新型螺杆挤出机固体输送理论的研究[J]. 中国塑料, 2005, 19(12): 92-95.  
Jia M Y. A study of new screw extruder of solid conveying theory[J]. China Plastics, 2005, 19(12): 92-95. (in Chinese)
- [4] 朱复华. 挤出理论及应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.  
Zhu F H. Extrusion theory and application[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [5] 顾永泉. 机械密封实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.  
Gu Y Q. Mechanical seal practical technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2001. (in Chinese)
- [6] 贺宝海. 高压条件下密封环变形的控制[J]. 流体机械, 2006, 34(11): 43-45.  
He B H. Control of sealing ring deformation under high

- pressure[J]. Fluid Mechanics, 2006, 34(11): 43–45.  
(in Chinese)
- [7] 张有华. 高压机械密封的设计与应用[J]. 流体机械, 2005, 33(2): 5–8.
- Zhang Y H. Design and application of high pressure mechanical seal[J]. Fluid Mechanics, 2005, 33(2): 5–8. (in Chinese)

## A study of delivery performance and seal structure of a device for delivering high-pressure steel particles

XIAO BingXi<sup>1</sup> ZHAO HuiQing<sup>1</sup> WEN LinRong<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Sinopec Shengli Petroleum Administration Institute of Drilling Technology, Dongying Shandong 257061, China)

**Abstract:** Impact drilling is an innovation in drilling technology, which is mainly used in hard rock drilling. Delivery of steel particles under high pressure is one of the key technologies in particle impact drilling. In this paper, the design of a new conveyer device for delivery of steel particles under high pressure is described. The device can quantitatively convey a mixture of 2.5 mm steel balls and mud to the wells. The device has the following characteristics: the axial force of the screw is endured by the reducer, a high-pressure mechanical seal is employed, and the particles in a solid-liquid mixture are conveyed at high pressure. We have analyzed the kinetics of particle transportation, and the relationships between the traction angle of particle transportation and the friction factor between the screw and the cylinder wall. The high-pressure seal structure of the device has also been studied.

**Key words:** delivery; particle; angle of traction; high-pressure sealing