

# The Analysis of Cuttings Removal Ability in Air Drilling with Coiled Tubings

Guofeng Zhang

Engineering Technology Research Center of Jiangnan Petroleum Engineering Co. Ltd., SINOPEC, Wuhan Hubei  
Email: zhangguofeng.osjh@sinopec.com

Received: Dec. 20<sup>th</sup>, 2017; accepted: Mar. 20<sup>th</sup>, 2018; published: Jun. 15<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

In air drilling with coiled tubings, the key was to recycle broken rock particles out of the wellbore. According to the fractal theory of rock fragmentation, the shape of rock was self-similar, and the particle size conformed to the law of Weibull Distribution Law. The BWRS equation was used to calculate the air density and Lemmon method was used to calculate air viscosity and Weibull Distribution Law to fit the particle size distribution. The drag force relation of Bagheri non-spherical particles was used to calculate the air resistance of cuttings and the air velocity and pressure distribution in the wellbore, and the wellhead pressure of coiled tubing drilling. The minimum flow rate calculated with the algorithm presented in this paper is in good agreement with the flow rate in the literature. The feasibility of air drilling with coiled tubing is also proved.

## Keywords

Air Drilling, Coiled Tubing, Rock Fractal, Weibull Distribution, Drag Force

---

# 连续管空气钻井排屑能力分析

张国锋

中石化江汉石油工程有限公司工程技术研究中心, 湖北 武汉

作者简介: 张国锋(1970-), 男, 高级工程师, 长期从事试油测试和连续油管技术研究和推广应用工作。

Email: zhangguofeng.osjh@sinopec.com

收稿日期: 2017年12月20日; 录用日期: 2018年3月20日; 发布日期: 2018年6月15日

## 摘要

使用连续管进行空气钻井, 关键是要将破碎的岩石颗粒循环出井筒。岩石在井底破碎后, 形成大小不一的岩石颗粒, 根据岩石破碎的分形理论, 岩石破碎后的形状是自相似的, 粒径符合Weibull分布规律。应用BWRS方程计算空气密度, Lemmon方法计算空气黏度, Weibull分布规律拟合粒径分布, 用Bagheri非球形颗粒拖曳力关系式计算岩屑空气阻力和井筒中的空气速度、压力分布, 以及连续管钻井的井口压力。计算的携岩最小流量与文献值相符, 证明了连续管空气钻井的可行性。

## 关键词

空气钻井, 连续管钻井, 岩石分形, Weibull分布, 拖曳力

Copyright © 2018 by author, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

空气钻井可以大幅度提高钻井速度, 减少因使用钻井液而产生的污染。使用连续管进行空气钻井由于不需要接单根, 不需要为防止沉砂卡钻而进行附加空气循环, 则能进一步提高钻井速度。采用冲击器(空气锤)钻井所需钻压较小, 也特别适合连续管钻井[1] [2] [3]。

空气钻井与传统的钻井液钻井相比, 循环介质密度低, 环空中携岩能力是关键因素之一。在空气携岩方面, 一些学者进行了研究。胡小房[4]应用两相流的连续性方程和动量方程, 建立了环空颗粒的运动方程, 对于空气钻井中环空携岩进行了研究。刘绘新等[5]对空气雾化钻井的环空携岩流动进行了理论和实验研究。朱红钧等[6]基于CFD分析, 用气固两相流及湍流模型对携岩中固相体积分数的分布进行了模拟, 结果显示在环空横截面积有急剧变化的地方, 固相体积分数偏大, 容易发生颗粒沉降。但前人没有考虑岩石颗粒的形状和颗粒尺寸分布。黄小兵等[7]对普光103-4井和大邑3井的岩屑进行了筛分, 证实岩屑颗粒不是均匀的, 不同尺寸的颗粒重量具有概率分布的特征。

根据岩石的分形理论, 假设空气钻井破岩产生的岩屑的形状相似, 颗粒粒径服从Weibull分布, 应用岩屑的筛分数据, 通过拟合获得岩屑颗粒尺寸的分布。应用非球形颗粒拖曳力系数的经验式, 计算不同岩屑尺寸平衡重力所需拖曳力的相对速度, 确定各种尺寸岩屑的上返速度, 得到气固两相流体的密度、

环空的压力分布、连续管内的气体压力分布。

## 2. 空气的物理性质

### 2.1. 空气的密度

空气是可压缩流体，其密度可用状态方程描述，压力  $p$ 、密度  $\rho$  和温度  $T$  之间具有以下关系式：

$$\frac{p}{\rho} = ZRT \quad (1)$$

式中： $Z$  为气体压缩因子，1； $p$  为气体压力，MPa； $R$  为气体常数， $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ； $\rho$  为气体密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $T$  为流体的温度，K。

气体压缩因子与压力和温度有关。对于空气， $Z$  值采用 BWRS 方程计算得到[8]。空气的成分(按体积分数)包括：氮约占 78%，氧约占 21%，其他气体和杂质约占 1%。在不影响计算精度的前提下，为了计算方便，假设氮占 78%，氧占 22%。用 BWRS 方程计算出空气的密度(表 1)。

**Table 1.** The comparison of air density calculated with BWRS

**表 1.** BWRS 空气密度计算对比

数据来源	不同压力下的空气密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )			
	10 atm	40 atm	70 atm	100 atm
BWRS 方程	11.8168	47.659	83.42	118.272
文献[9]	11.799	47.48	83.19	118.45

从表 1 可以看出，BWRS 方程计算的密度结果与文献的密度非常接近，最大相对误差小于 0.4%。所以，用 BWRS 方程计算空气的密度是切实可行的。

### 2.2. 空气黏度计算

空气的黏度与温度和压力都有关系，受温度影响更大些[9]。2003 年 Lemmon 和 Jacobsen 针对氮气和空气等气体，提出了气体黏度的计算方法[10]，将气体的黏度表示成稀薄气体黏度部分  $\mu^0(T)$  和其余黏度部分  $\mu^r(\tau, \delta)$  之和。

$$\mu = \mu^0(T) + \mu^r(\tau, \delta) \quad (2)$$

式中： $\mu$  为黏度， $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； $\tau = T_c/T$ ， $\delta = \rho/\rho_c$ ，其中  $T_c$  为临界温度，K； $\rho_c$  为临界密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

稀薄气体黏度：

$$\mu^0(T) = \frac{0.0266958\sqrt{MT}}{\sigma^2\Omega(T^*)} \quad (3)$$

$$\Omega(T^*) = \exp\left(\sum_{i=0}^4 b_i [\ln(T^*)]^i\right) \quad (4)$$

式中： $\sigma$  为 Lennard-Jones 尺寸参数； $\Omega(T^*)$  为碰撞积分，其中  $T^* = \frac{T}{\epsilon/k}$ ， $\epsilon/k$  为 Lennard-Jones 能量参数； $M$  为分子量， $\text{g}/\text{mol}$ ； $b_i$  为碰撞方程实验数据的拟合系数，1； $i$  为拟合多项式的指数次数。

其余黏度部分：

$$\mu^r(\tau, \delta) = \sum_{j=1}^n N_j \tau^{l_j} \delta^{d_j} \exp(-\gamma_j \delta^{l_j}) \quad (5)$$

式中： $N_j$ 为其余黏度部分的系数， $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； $t_j$ ， $d_j$ ， $l_j$ ， $\gamma_j$ 分别为其余黏度部分方程的指数或系数，由实验数据拟合得到，1； $j$ 为拟合函数的项数。计算时，当 $l_j \neq 0$ 时， $\gamma_j = 1$ ；当 $l_j = 0$ 时， $\gamma_j = 0$ 。

计算可得 $-50^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$ 空气的黏度与文献的值相对误差在5%以内，尤其在 $50^\circ\text{C}$ 的各种压力下，相对误差小于3%。

### 3. 岩屑颗粒形状与粒径分布

#### 3.1. 岩屑的颗粒形状

空气钻井主要采用冲击器(空气锤)进行冲击钻井,或者用空气螺杆进行旋转钻井。岩石在井底破碎后,岩屑形状和尺寸与钻头的类型和钻井方式相关,也与岩石的性质有关。根据岩石的分形理论,岩石破碎后的形状是自相似的,大小不同的颗粒具有大致相似的形状,颗粒的尺寸有一定的分布规律。例如普光103-4井使用空气锤冲击钻,岩石硬度从硬到极硬,钻后携出的岩石颗粒呈扁平椭球状,岩屑最大粒径约为9 mm;大邑3井采用牙轮钻头,岩性为砂岩与灰黑色页岩互层,形状多为纺锤形,岩屑最大粒径约为3.5 mm [7]。

#### 3.2. 岩屑的粒径分布

粒径大致符合 Weibull 概率分布规律[11], Weibull 分布函数为:

$$F(x) = 1 - e^{-(x/\eta)^m} \quad (6)$$

为了便于分析,对式(6)进行线性化处理,得

$$\ln \ln \frac{1}{1-F(x)} = m \ln x - m \ln \eta \quad (7)$$

式中： $m$ 为均匀性系数，无量纲； $\eta$ 为特征粒径，mm。

用文献[7]的筛分余量来拟合 Weibull 粒径分布,对于其中使用空气锤钻井的普光103-4井的岩屑数据,通过线性拟合得 Weibull 参数,  $m = 0.78837$ ,  $\eta = \exp(-0.19875/m)$ 。图1是拟合的 Weibull 分布与文献中筛分余量的对比,其中蓝色线为筛分余量,红色虚线为拟合的 Weibull 函数,可以看出, Weibull 分布能很好地描述空气钻井的岩屑粒度分布。

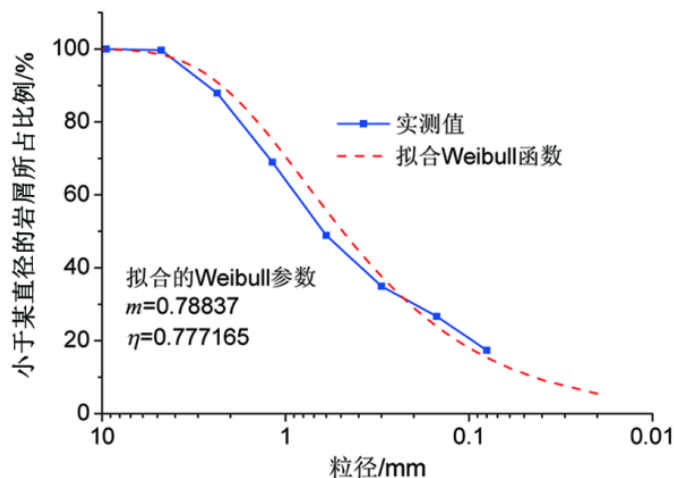


Figure 1. The comparison of fitting Weibull distribution and measured values  
图1. 拟合的 Weibull 分布与实测值的比较

粒径的 Weibull 概率密度如图 2 所示。可以看出，粒径越小，概率密度越大。这实际上是颗粒经空气流动筛分的结果，在钻井过程中，压缩空气流动使井底岩屑扬起，其中比较重的颗粒会再次落入井底遭受研磨变成细颗粒，较细的颗粒可以随空气流动带出井筒，越细的颗粒返出井筒越快。

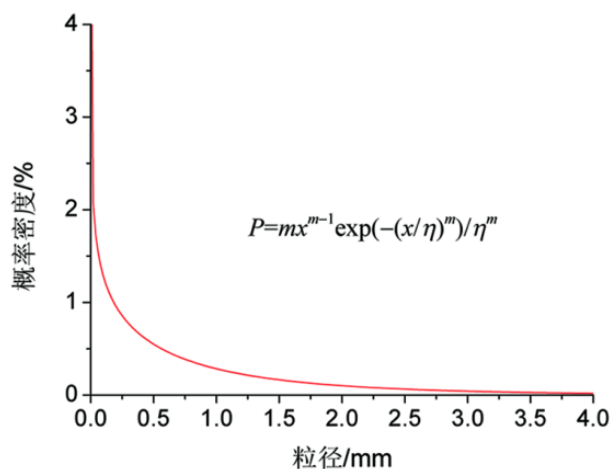


Figure 2. The Weibull distribution probability density of particle size in Well Puguang 103-4  
图 2. 普光 103-4 井颗粒粒径的 Weibull 分布概率密度

#### 4. 岩屑颗粒在气体中的拖曳力

通过空气将岩屑携带出井筒，需要空气与岩屑之间存在相对流动，流动的气体在岩屑颗粒上产生拖曳力。在垂直井中，如果拖曳力大于颗粒的自重，颗粒就会向上运动。如果拖曳力与颗粒自重相平衡，颗粒就会匀速运动，不同的颗粒尺寸和形状，拖曳力的大小也不一样，平衡所需的相对速度也不一样。所以，颗粒小的上升的速度要快些，颗粒大的上升速度要慢些，当颗粒大到一定程度时，颗粒会沉降到井底，在钻头的冲击下继续破碎。通常球形颗粒拖曳力系数与固体颗粒的雷诺数有关，如图 3 所示。

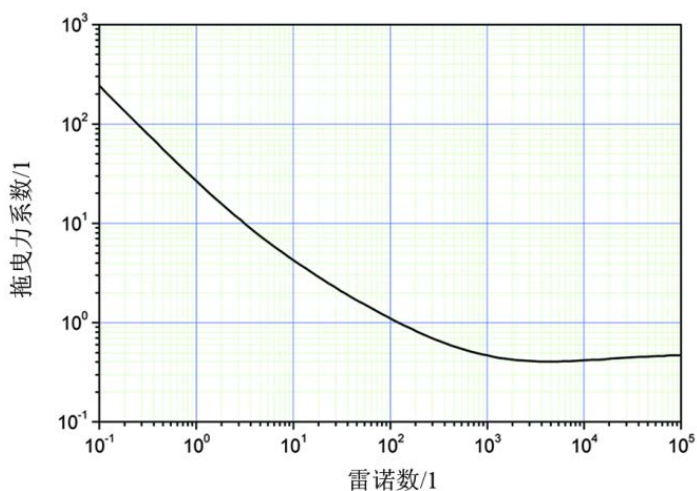


Figure 3. The relationship between drag coefficient of spherical particles and Reynolds number  
图 3. 球形颗粒拖曳力系数与雷诺数的关系

由于破碎的岩石颗粒并不是球形颗粒，而是类似椭球状或纺锤状(另一种椭球)的颗粒[7]，球形颗粒拖曳力系数不再适用。2016 年 Bagheri [12]提出了非球形颗粒的拖曳力系数的经验表达式：

$$C_D = \frac{24K_S}{\text{Re}} \left[ 1 + 0.125(\text{Re}K_N/K_S)^{2/3} \right] + \frac{0.46K_N}{1 + 5330/(\text{Re}K_N/K_S)} \quad (8)$$

其中:

$$K_S = (F_S^{1/3} + F_N^{-1/3})/2$$

$$K_N = 10^{\alpha_2[-\log(F_N)]^{\beta_2}}$$

$$\alpha_2 = 0.45 + 10/\exp(2.5 \lg \rho' + 30)$$

$$\beta_2 = 1 - 37/\exp(3 \lg \rho' + 100)$$

$$F_S = fe^{1.3} \left( \frac{d_{\text{eq}}^3}{LIS} \right)$$

$$F_N = f^2 e \left( \frac{d_{\text{eq}}^3}{LIS} \right)$$

$$d_{\text{eq}} = \sqrt[3]{LIS}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_f d_{\text{eq}} |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f|}{\mu_f}$$

$$\psi = \pi d_{\text{eq}}^2 / S A_p$$

式中:  $C_D$ 为拖曳力系数, 1;  $\rho'$ 为颗粒密度与空气密度之比, 1;  $L$ 为颗粒长轴长度, m;  $I$ 为颗粒中轴长度, m;  $S$ 为颗粒短轴长度, m;  $f$ 为短轴与中轴长度之比, 1;  $e$ 为中轴与长轴长度之比, 1;  $\rho_f$ 为空气密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\mu_f$ 为空气动力黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $u_p$ 为颗粒速度,  $\text{m/s}$ ;  $u_f$ 为空气速度,  $\text{m/s}$ ;  $A_p$ 为颗粒的迎风面积,  $\text{m}^2$ 。

$A_p$ 与椭球形颗粒各轴和空气流动方向的夹角有关。如图4所示是椭圆柱绕流的流体压力图, 流体的流动方向是从左到右的水平方向。当椭圆柱最大迎风面积与风向呈某一角度, 如逆时针偏转  $30^\circ$ 时, 计算的流体压力图表明, 流体在椭圆柱表面将产生转矩, 转矩的方向为顺时针, 使椭圆柱转向到最大迎风面积正对着气流方向; 当椭圆柱顺时针偏转  $30^\circ$ 时, 计算的流体压力将使椭圆柱产生逆时针的转动。不论椭圆柱呈哪个角度, 转矩都会使它回到以最大迎风面迎着空气流动方向。

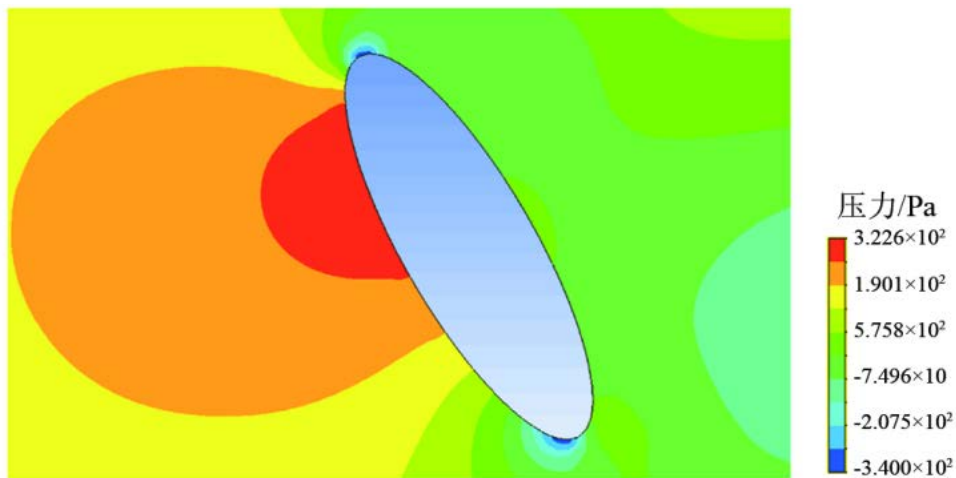


Figure 4. The diagram of pressure of flow around an elliptic cylinder

图4. 椭圆柱绕流的压力图

## 5. 流体压力计算流程

定义空气携带岩屑能力为在一定的井眼直径和连续管直径的组合下，钻速为一定值时，能将所钻下的具有一定形状和尺寸分布的钻屑全部携带上来，携带上来的岩屑包括小颗粒，也包括大颗粒。计算环空空气携带岩屑过程的算法：① 假设流量、环空井口压力等参数，将环空分成小段；② 根据压力计算空气密度；③ 根据密度、流量计算环空空气流速；④ 根据颗粒分布计算每个尺寸颗粒重量，计算风阻与重量相平衡的相对空气速度；⑤ 根据各尺寸颗粒的分布和相应的速度，计算气固两相在该段的等效密度；⑥ 计算摩擦阻力和气固混合物重力；⑦ 计算下一段压力；⑧ 如未到井底，从②开始重复计算下一段；⑨ 计算完毕。

## 6. 计算示例

以普光 103-4 井为例，其计算参数如下：井深 4200 m，环空井口气压 0.15 MPa，钻速 20 m/h，钻头直径 215.9 mm，连续管直径 60.3 mm，壁厚 4.78 mm；假设井眼直径与钻头直径相同，井下工具消耗 1.5 MPa，空气流量 60 m<sup>3</sup>/min，岩石颗粒呈扁平椭球状，扁平椭球的各轴比例为 1:0.6:0.3，密度为 2700 kg/m<sup>3</sup>，计算井筒压力分布结果如图 5 所示。可以看出，环空压力从井口到井底逐步增加，连续管内压力从井底到井口逐步增加。如果井眼直径以及连续管直径各不同，计算井口压力结果如表 2 所示。考虑到井眼直径要比钻头直径大，所以流量和压力均要大于表 2 中的值。如果井眼直径为钻头直径的 1.2 倍，直径 330.2 mm 的钻头以 20 m/h 的速度钻井，携带岩屑需要的最低流量为 135.7 m<sup>3</sup>/min，与文献[7]中 120~150 m<sup>3</sup>/min 的实际注气量相符。

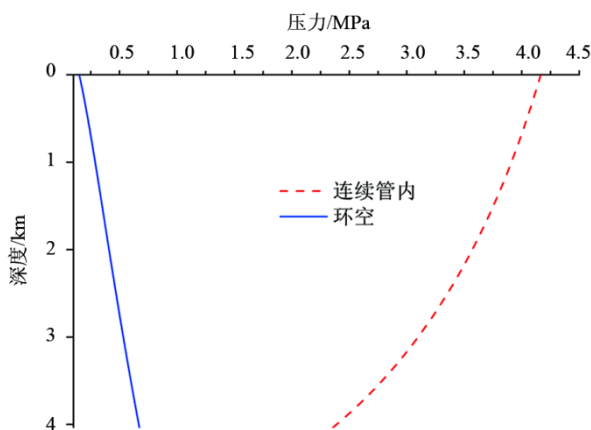


Figure 5. The distribution of calculated air pressure  
图 5. 计算空气压力分布图

Table 2. The calculated result of rock carrying of coiled tubing in different wellbores  
表 2. 不同井眼、连续管的携岩计算结果

井眼直径/mm	连续管直径/mm	流量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	井口压力/MPa
215.9	50.8	50	5.65
215.9	60.3	50	3.61
215.9	73	50	2.41
330.2	50.8	100	10.27
330.2	60.3	100	6.34
330.2	73	100	3.96

## 7. 结论

根据钻出岩屑的实际情况和岩石的分形理论以及岩石颗粒粒度的分布特点,提出了空气携岩过程的新计算方法。通过假定岩屑颗粒形状自相似,粒径服从 Weibull 分布,应用非球形颗粒的拖曳力经验式,可以计算出空气携带岩屑的最小流量。通过与实际生产中的井况以及数据进行比较,证实了该方法的有效性,计算方法可以用于空气钻井中空气携岩能力的预测。该计算方法用于连续管空气钻井可行性分析,其计算出的压力和注气量均在现有设备管材允许工况范围内,证明用连续管进行空气钻井是可行的。

## 基金项目

国家科技重大专项(2016ZX05038-006)。

## 参考文献

- [1] 王立超, 范光永, 张秋菊. 空气钻井技术在伊朗项目 TBK 油田的应用[J]. 西部探矿工程, 2004, 16(11): 83-84.
- [2] 项德贵, 余金海, 赖晓晴, 等. 空气钻井在玉门青西油田的应用[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(6): 178-180.
- [3] 张金成, 位华, 于文红. 空气钻井技术在普光气田的应用[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(6): 8-10.
- [4] 胡小房. 干空气钻井中环空携岩理论研究[J]. 石油钻井工程, 1996(2): 1-7.
- [5] 刘绘新, 孟英峰. 空气雾化钻井环空携岩流动试验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2001, 23(3): 34-36.
- [6] 朱红钧, 林元华, 明传中, 等. 空气携岩能力数值模拟分析[J]. 钻采工艺, 2010, 33(6): 29-30, 35.
- [7] 黄小兵, 陈次昌, 董耀文. 气体钻井的岩屑特征及粒度分布测试[J]. 天然气工业, 2008, 28(11): 83-84.
- [8] 刘毅, 周绍骑, 韩开进, 等. 基于 BWRS 方程的压缩空气压缩因子计算[J]. 后勤工程学院学报, 2014(4): 66-71.
- [9] 张家荣, 赵廷元. 工程常用物质的热物理性质手册[M]. 北京: 新时代出版社, 1987.
- [10] Lemmon, E.W. and Jacobsen, R.T. (2004) Viscosity and Thermal Conductivity Equations for Nitrogen, Oxygen, Argon, and Air. *International Journal of Thermophysics*, **25**, 21-69. <https://doi.org/10.1023/B:IJOT.0000022327.04529.f3>
- [11] 巫尚蔚, 杨春和, 张超, 等. 基于 Weibull 模型的细粒尾矿粒径分布[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(3): 1-12.
- [12] Bagheri, G.H. and Bonadonna C. (2016) On the Drag of Freely Falling Non-spherical Particles. *Powder Technology*, **301**, 526-544. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.06.015>

[编辑] 帅群

**Hans 汉斯**

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2471-7185, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [jogt@hanspub.org](mailto:jogt@hanspub.org)