

## 一种钻屑颗粒沉降曳力系数的测试方法

### 技术领域

本发明涉及钻屑实验技术领域，特别是一种钻屑颗粒沉降曳力系数的测试方法。

### 背景技术

在钻井的过程中，井眼清洁是影响高效安全钻井的主要问题之一。井筒中的钻屑以颗粒的形式分布在钻井液中。钻井液是连续相而钻屑是非连续相，钻屑被钻井液携带出井筒。当钻井液不足以提供足够的能量来使钻屑运移时，就会在井底形成岩屑床，岩屑床的形成将增大环空压耗，易于造成钻柱高扭矩和高阻力，粘附卡钻，造成下套管和固井困难，钻具磨损大，测井仪器下井难等问题，并且影响钻井的安全。曾经在某区块就发生过因为钻具卡死，被迫重新钻井的问题。

研究岩屑运移规律的最关键因素是要获得沉降曳力系数，前人也对此做出很多研究，如张庆的论文《球形颗粒曳力系数的直接计算》，球形颗粒的沉降是研究沉降问题的基础，但是钻屑最常遇到的颗粒是非球形的，这就要求要提出一种沉降曳力系数的模型来同时适用于球形颗粒和非球形颗粒。描述非球形颗粒的方法有很多，比如球形度、当量球形体积半径、圆度、延伸率和扁平度等等。基于这些描述方法，有一些沉降曳力系数模型被提出。Ganser(1993)提出了一种方法来预测球形和非球形的沉降曳力系数，但是没有考虑沉降方向性的问题。Gholamhossein Bagheri (2016) 提出了一种考虑规则和不规则的非球形颗粒的沉降曳力系数预测模型，但是形状描述因子的计算存在着不能精细区分颗粒形状的问题。Xianzhi Song (2017)虽然考虑沉降方向性问题但是在投影面积的计算中和形状描述因子的使用中存在着过于简化的问题。因此，需要一个新的形状描述因子和准确的方向性计算方法，得到钻井中钻屑沉降的特性。

### 发明内容

针对上述问题，本发明提供一种钻屑颗粒沉降曳力系数的测试方法，能够对沉降过程进行测试，并且提供一种能够对沉降进行分析的方法，能对不同形状的岩屑颗粒的沉降曳力系数进行深度分析，提高预测精度。

本发明的技术方案如下：

一种钻屑颗粒沉降曳力系数的测试装置，包括模拟井筒、数据采集分析模块；

所述模拟井筒为透明的圆柱筒体结构，模拟井筒外侧壁面贴有刻度线，所述沿纵轴线与水平方向垂直的刻度线；模拟井筒底部固定有木制底座，在模拟井筒底部设有排液阀门；

## 说明书

所述数据采集分析模块，包括高速摄像机、数据收集器和电脑；高速摄像机正对模拟井筒设置，并通过自带的数据线连接到数据收集器，再通过数据收集器的数据线连接到电脑。

进一步的，一种钻屑颗粒沉降曳力系数的测试装置，所述高速摄像机帧速率为每秒 100 帧，设在距离模拟井筒 1 米远处。

进一步的，一种钻屑颗粒沉降曳力系数的测试装置，所述数据收集器还带有无线传输模块，通过 wifi 连接电脑并传输数据。

进一步的，一种钻屑颗粒沉降曳力系数的测试装置，所述电脑用于图像数据的分析与处理，并且用于对提出的模型进行模拟。

本发明还提供一种钻屑颗粒沉降曳力系数的测试装置及其方法，采用上述的钻屑颗粒沉降曳力系数的测试装置进行测试，步骤如下：

A、进行实验准备工作，将实验沉降钻屑用不同目数的筛网分选好；在模拟井筒中注入配好的液体，静置 12 小时，防止气泡的产生；

B、将摄影机调整至全部覆盖整个模拟井筒，并且将分选好的不同目数的钻屑颗粒单颗从液面轻轻放入，观察钻屑颗粒在液体中的沉降实验，采集物体沉降的图像，每一组实验用同类型颗粒重复 3 次；

C、对采集的图像进行处理，利用帧差法得到钻屑颗粒沉降的速度；

D、根据实验所得的沉降末速来计算沉降曳力系数；

E、构造新的形状描述因子，得到新的沉降曳力系数经验模型。

进一步的，所述步骤 C 的具体步骤是：利用在模拟井筒前的高速摄影机，连续地记录钻屑颗粒通过不同标尺位置，利用帧差法计算钻屑颗粒的沉降速度，以此分析整个试验过程中钻屑颗粒的运动规律。

进一步的，所述步骤 D 的具体计算步骤是：利用力的平衡原理，沉降曳力系数的计算公式为：

$$C_d = \frac{4(\rho_p - \rho_f)d_e g}{3\rho_f V^2}$$

式中， $C_d$  为沉降曳力系数，无量纲； $\rho_p$  为颗粒密度， $\text{kg/m}^3$ ； $\rho_f$  为颗粒密度， $\text{kg/m}^3$ ； $d_e$  为颗粒当量直径， $\text{m}$ ； $g$  为重力加速度， $\text{m/s}^2$ ； $V$  为沉降末速， $\text{m/s}$ 。

进一步的，所述步骤 E 的具体步骤是：构造新的形状描述因子，提出新的沉降曳力系数经验模型，拟合得到考虑形状和方向的经验参数值；

拟合采用的公式如下：

## 说明书

$$C_d = \frac{24k_s}{Re} \left( 1 + a(Re/k_s)^b \right) + \frac{d}{1 + c/(Re/k_s)}$$

式中,  $Re$  为颗粒的雷诺数, 无量纲;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  和  $k_s$  是经验系数, 由拟合得到, 无量纲。

本发明的有益效果是:

1、引入新的颗粒描述方程, 能够描述多种非球形颗粒, 并且可以精确计算出不同沉降角度的投影面积。

2、提出新的形状描述因子, 能够有效区分不同颗粒的形状; 采用的沉降曳力系数模型同时考虑了形状和方向的影响, 可以提高沉降曳力系数预测精度。

### 附图说明

图 1 是本发明实施例的一种钻屑颗粒沉降曳力系数的测试装置的示意图;

图 2 是本发明一种钻屑颗粒沉降曳力系数的测试装置及其方法流程图;

图 3 是本发明实验实测的沉降曳力系数与雷诺数的关系图;

图 4 是本发明预测的沉降曳力系数与实验实测的沉降曳力系数对比分析图。

图中:

1 模拟井筒、2 高速摄影机、3 数据收集器、4 电脑、5 排液阀、6 底座、。

### 具体实施方式

下面将结合本发明实施例中的附图, 对于本发明实施例中的技术方案进行清楚地、完整地描述, 显然, 所描述的实施例仅仅是本发明一实施例, 而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例, 本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例, 都属于本发明保护范围。

如图 1 所示, 一种钻屑颗粒沉降曳力系数的测试装置, 包括模拟井筒 1、高速摄影机 2、数据收集器 3 和电脑 4。

所述模拟井筒 1 为底部封闭上部开口的筒状结构, 由透明材料 (如玻璃、塑料) 制成, 高 1 米, 直径 0.2 米。所述模拟井筒 1 还包括一个排液阀 5, 位于模拟井筒底部侧面。模拟井筒 1 上沿模拟井筒轴线方向贴有垂直于水平面的标尺 7 (标尺尺度为毫米级)。模拟井筒 1 安置于底座 6 上, 底座 6 为木质结构, 并与模拟井筒 1 底部保持水平, 确保模拟井筒 1 处于垂直。

所述高速摄影机 2 位于模拟井筒 1 侧面, 镜头垂直正对模拟井筒 1, 距离以 1m 为佳, 用于记录钻屑颗粒位置, 所述高速摄像机帧速率为每秒 100 帧。所述高速摄影机包括位于摄影机支架和打光板, 如有需要, 可在模拟井筒另一侧设置纯色或自发光的柔光背景板。

## 说明书

所述数据收集器 3 由高速数据传输线和采集器组成，并且可以通过自带的 wifi 模块（采用市售任意型号 wifi 模块均可）无线传输数据至电脑 4（需电脑也带有 wifi 模块并匹配连接）。所述电脑 4 用于进行图像分析与处理，并且用于对提出的模型进行模拟。

如图 2 所示，一种钻屑颗粒沉降曳力系数的测试装置及其方法，包括以下步骤：

在步骤 101 中，开展实验准备工作将实验沉降钻屑用不同目数的筛网分选好（筛网可采用多种规格，如 20 目，40 目，60 目，80 目等，并将筛选的钻屑按照尺寸规格分开保存）。在模拟井筒中注入配好的液体（可以是清水，或者不同油田区块的钻井泥浆），静置 12 小时，防止气泡的产生；

在步骤 102 中，将摄影机 2 的取景范围调整至刚好全部覆盖整个模拟井筒，并且分批次将分选好的不同目数的钻屑颗粒按照每一单颗，在液面轻轻放入，观察钻屑颗粒在液体中的沉降实验，采集物体沉降的图像。为了使测量误差小，每一组颗粒至少测试 3 次（至多测试 10 次）。

在步骤 103 中，对采集的图像进行处理，利用帧差法得到钻屑颗粒沉降的速度。

在步骤 104 中，根据实验所得的沉降末速来计算沉降曳力系数。钻屑颗粒当量直径的计算公式如下：

$$d_e = \left( \frac{6V_p}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

式中， $d_e$  为钻屑颗粒当量球形直径，m； $V_p$  为钻屑颗粒的体积， $m^3$ 。

钻屑颗粒的颗粒雷诺数计算公式如下：

$$Re = \frac{\rho_f V d_e}{\mu}$$

式中， $Re$  为颗粒雷诺数，无量纲； $V$  为沉降速度，m/s； $\mu$  为液体粘度， $Pa \cdot s$ 。

$$C_d = \frac{4(\rho_p - \rho_f)d_e g}{3\rho_f V^2}$$

式中， $C_d$  为沉降曳力系数，无量纲； $\rho_p$  为颗粒密度， $kg/m^3$ ； $\rho_f$  为颗粒密度， $kg/m^3$ ； $d_e$  为颗粒当量直径，m； $g$  为重力加速度， $m/s^2$ ； $V$  为沉降末速，m/s。

在步骤 105 中，构造新的形状描述因子，得到新的沉降曳力系数经验模型。拟合得到考虑形状和方向的经验参数值。基于 Ganser (1993) 模型，拟合采用的公式如下：

$$C_d = \frac{24k_s}{Re} \left( 1 + a(Re/k_s)^b \right) + \frac{d}{1 + c/(Re/k_s)}$$

式中， $Re$  为颗粒的雷诺数，无量纲； $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  和  $k_s$  是曳力系数的经验系数，由拟合

## 说明书

得到，无量纲； $k_s$ 的计算公式为：

$$k_s = (F^\alpha + F^\beta) / 2$$

式中， $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为 $k_s$ 的经验系数，由拟合得到。 $F$ 为本发明构造的新的形状描述因子，计算公式如下：

$$F = \sqrt{\phi\psi}$$

式中，球形度 $\phi$ 表示与颗粒相同体积的球体的表面积和颗粒的表面积之比，计算公式为：

$$\phi = S_s / S_p$$

式中， $S_s$ 为与颗粒相同体积的球体的表面积， $m^2$ ； $S_p$ 为颗粒的表面积， $m^2$ 。

$\psi$ 为形状因子，具体表达式为：

$$\psi = S / \sqrt{LI}$$

式中， $S$ 、 $L$ 和 $I$ 分别是颗粒最小外接长方体的最短边、最长边和中间边， $m$ 。

图 3 为本发明实验实测的沉降曳力系数与雷诺数的关系图。由雷诺数与曳力系数的图可以拟合出曳力系数的经验关系式。

图 4 为本发明预测的沉降曳力系数与实验实测的沉降曳力系数对比分析图，预测结果与实测结果的取值范围非常吻合，相对误差不超过 5%。采用本发明的方法，极大地提高了预测精准度。

通过上述实施例可以看出，本发明提供一种钻屑颗粒沉降曳力系数的测试装置及其方法，引入超椭球几何模型，能够有效解决常规沉降曳力系数模型难以准确描述颗粒形状的弊端。构造了新的形状描述因子，相比较以往的形状描述因子，本发明提供的形状描述因子能够准确区分颗粒形状。以往的形状描述因子如球形度方法，如一个圆柱(高等于 20 倍直径  $h=20d$ )的球形度为 0.471，而一个圆盘(高等于 0.1 倍直径  $h=0.1d$ )的球形度也是 0.471。本发明计算简单，通过对颗粒形状和沉降方向的分析，阐明了钻屑在流体中沉降规律。但是，钻井领域的工作人员应当理解，对于本发明方法，还可以在不脱离本发明内容的基础上进行各种改进，使得本发明的沉降曳力系数预测结果更为精确。这项发明有望促进石油和天然气领域钻井技术的发展。

以上所述，仅是本发明的较佳实施例而已，并非对本发明作任何形式上的限制，虽然本发明已以较佳实施例揭露如上，然而并非用以限定本发明，任何熟悉本专业的技术人员，在不脱离本发明技术方案范围内，当可利用上述揭示的技术内容作出些许更动或修饰为等同变化的等效实施例，但凡是未脱离本发明技术方案的内容，依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰，均仍属于本发明技术方案的范围内。