



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109632275 A

(43)申请公布日 2019.04.16

(21)申请号 201811533778.3

(22)申请日 2018.12.14

(71)申请人 北京卫星制造厂有限公司  
地址 100190 北京市海淀区知春路63号

(72)发明人 贾闽涛 赵曾 张涛 凌阿斌  
张梦梦 庞勇 赵丹妮

(74)专利代理机构 中国航天科技专利中心  
11009

代理人 高志瑞

(51) Int. Cl.

G01M 13/00(2019.01)

G01M 99/00(2011.01)

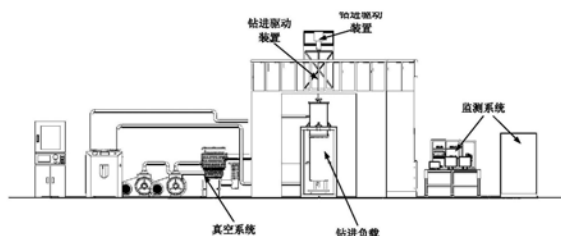
权利要求书1页 说明书5页 附图1页

(54)发明名称

一种钻具热特性等效方法

(57)摘要

本发明公开了一种钻具热特性等效方法,所述方法包括如下步骤:步骤一:建立钻进过程中钻头温升的理论模型;步骤二:搭建模拟月球表面真空环境的试验系统,并进行钻取试验,得到钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_1$ 、钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_2$ 和热功当量系数J;步骤三:将步骤二中的钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_1$ 、钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_2$ 和热功当量系数J代入步骤一中的钻头温升的理论模型。本发明在仅监测回转速度、钻具扭矩、钻压力参数的条件下,最终确定温升的等效模型公式,实现钻具温升的实时测算。



1. 一种钻具热特性等效方法,其特征在于,所述方法包括如下步骤:

步骤一:建立钻进过程中钻头温升的理论模型;

步骤二:搭建模拟月球表面真空环境的试验系统,并进行钻取试验,得到钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_1$ 、钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_2$ 和热功当量系数J;

步骤三:将步骤二中的钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_1$ 、钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_2$ 和热功当量系数J代入步骤一中的钻头温升的理论模型。

2. 根据权利要求1所述的钻具热特性等效方法,其特征在于:在步骤一中,建立钻进过程中钻头温升的理论模型包括:

根据钻头底面摩擦力、钻头的底面回转切向速度、钻头侧面摩擦力和钻头的侧面回转切向速度得到钻头摩擦所作的功;

根据钻头摩擦所作的功得到钻头的热量 $W_F$ ;

根据钻头的热量 $W_F$ 和钻头吸收的热量公式得到钻头温升的理论模型。

3. 根据权利要求2所述的钻具热特性等效方法,其特征在于:钻头摩擦所作的功的公式如下:

$$W_F = F_{\text{底}}v_1 + F_{\text{侧}}v_2;$$

其中, $F_{\text{底}}$ 为钻头底面摩擦力, $v_1$ 为钻头的底面回转切向速度, $F_{\text{侧}}$ 为钻头侧面摩擦力, $v_2$ 为钻头的底面回转切向速度。

4. 根据权利要求3所述的钻具热特性等效方法,其特征在于:钻头底面摩擦力 $F_{\text{底}}$ 的公式为: $F_{\text{底}} = \mu_1 F$ ;其中, $\mu_1$ 为钻头底面与月壤的摩擦系数; $F$ 为钻头底面压力,即轴向钻压力。

5. 根据权利要求4所述的钻具热特性等效方法,其特征在于:钻头的底面回转切向速度 $v_1$ 的公式为: $v_1 = 2\pi R_1 N$ ;其中, $R_1$ 为钻头底面摩擦当量直径; $N$ 为钻头的回转转速。

6. 根据权利要求5所述的钻具热特性等效方法,其特征在于:钻头侧面摩擦力 $F_{\text{侧}}$ 的公式为: $F_{\text{侧}} = \mu_2 M / 2R_2$ ;其中, $\mu_2$ 为钻头侧面与月壤的摩擦系数; $M$ 为钻头扭矩; $R_2$ 为钻头侧面摩擦当量直径。

7. 根据权利要求6所述的钻具热特性等效方法,其特征在于:钻头的底面回转切向速度 $v_2$ 的公式为: $v_2 = 2\pi R_2 N$ ;其中, $R_2$ 为钻头侧面摩擦当量直径; $N$ 为钻头的回转转速。

8. 根据权利要求7所述的钻具热特性等效方法,其特征在于:钻头的热量 $W_F$ 为: $W_F = W_{\text{钻}}$ 。

9. 根据权利要求8所述的钻具热特性等效方法,其特征在于:钻头温升的理论模型的公式为:

$$\Delta T = \frac{2\pi R_1 \mu_1 F N + \pi \mu_2 M N}{c_{\text{钻}} m J};$$

其中, $c_{\text{钻}}$ 为钻头的比热; $m$ 为钻头的质量; $\Delta T$ 为钻头的温升; $J$ 为热功当量系数。

10. 根据权利要求2所述的钻具热特性等效方法,其特征在于:在步骤二中,模拟月球表面真空环境的试验系统包括真空系统、钻进驱动装置、监测系统和钻进负载;其中,

所述真空系统与所述钻进负载相连接;

所述钻进驱动装置能够钻入所述钻进负载;

所述监测系统与所述钻进负载相连接。

## 一种钻具热特性等效方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于深空探测技术领域,尤其涉及一种钻具热特性等效方法。

### 背景技术

[0002] 探月三期钻取采样装置要求在月面真空无水环境下工作,月壤具有高密实度、低导热率的特点,容易导致钻具在钻进过程中温度快速上升,尤其是钻头部位,必须控制温度的升高以确保安全的钻进,这就对钻进过程中钻具温升情况的实时测算提出了要求。

[0003] 现有的钻具温升测试方法一般通过布置在钻具前端的温度传感器进行直接测量,但是孔底复杂的钻进力载常常导致温度传感器损坏直至失效,且长距离、回转钻进工况下的温度信号传输需使用保护套与滑环装置等复杂功能部件,这在月面等特殊工况下的钻进过程中难以实现。

### 发明内容

[0004] 本发明解决的技术问题是:克服现有技术的不足,提供了一种钻具热特性等效方法,在仅监测回转速度、钻具扭矩、钻压力参数的条件下,最终确定温升的等效模型公式,实现钻具温升的实时测算。

[0005] 本发明目的通过以下技术方案予以实现:一种钻具热特性等效方法,所述方法包括如下步骤:步骤一:建立钻进过程中钻头温升的理论模型;步骤二:搭建模拟月球表面真空环境的试验系统,并进行钻取试验,得到钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_1$ 、钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_2$ 和热功当量系数 $J$ ;步骤三:将步骤二中的钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_1$ 、钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_2$ 和热功当量系数 $J$ 代入步骤一中的钻头温升的理论模型。

[0006] 上述钻具热特性等效方法中,在步骤一中,建立钻进过程中钻头温升的理论模型包括:根据钻头底面摩擦力、钻头的底面回转切向速度、钻头侧面摩擦力和钻头的侧面回转切向速度得到钻头摩擦所作的功;根据钻头摩擦所作的功得到钻头的热量 $W_F$ ;根据钻头的热量 $W_F$ 和钻头吸收的热量公式得到钻头温升的理论模型。

[0007] 上述钻具热特性等效方法中,钻头摩擦所作的功的公式如下:

[0008]  $W_F = F_{底}v_1 + F_{侧}v_2$ ;其中, $F_{底}$ 为钻头底面摩擦力, $v_1$ 为钻头的底面回转切向速度, $F_{侧}$ 为钻头侧面摩擦力, $v_2$ 为钻头的底面回转切向速度。

[0009] 上述钻具热特性等效方法中,钻头底面摩擦力 $F_{底}$ 的公式为: $F_{底} = \mu_1 F$ ;其中, $\mu_1$ 为钻头底面与月壤的摩擦系数; $F$ 为钻头底面压力,即轴向钻压力。

[0010] 上述钻具热特性等效方法中,钻头的底面回转切向速度 $v_1$ 的公式为: $v_1 = 2\pi R_1 N$ ;其中, $R_1$ 为钻头底面摩擦当量直径; $N$ 为钻头的回转转速。

[0011] 上述钻具热特性等效方法中,钻头侧面摩擦力 $F_{侧}$ 的公式为: $F_{侧} = \mu_2 M / 2R_2$ ;其中, $\mu_2$ 为钻头侧面与月壤的摩擦系数; $M$ 为钻头扭矩; $R_2$ 为钻头侧面摩擦当量直径。

[0012] 上述钻具热特性等效方法中,钻头的底面回转切向速度 $v_2$ 的公式为: $v_2 = 2\pi R_2 N$ ;其中, $R_2$ 为钻头侧面摩擦当量直径; $N$ 为钻头的回转转速。

[0013] 上述钻具热特性等效方法中, 钻头的热量 $W_F$ 为: $W_F = W_{\text{钻}}$ 。

[0014] 上述钻具热特性等效方法中, 钻头温升的理论模型的公式为:

$$[0015] \quad \Delta T = \frac{2\pi R_1 \mu_1 F N + \pi \mu_2 M N}{c_{\text{钻}} m J} ;$$

[0016] 其中, $C_{\text{钻}}$ 为钻头的比热; $m$ 为钻头的质量; $\Delta T$ 为钻头的温升; $J$ 为热功当量系数。

[0017] 上述钻具热特性等效方法中, 在步骤二中, 模拟月球表面真空环境的试验系统包括真空系统、钻进驱动装置、监测系统和钻进负载; 其中, 所述真空系统与所述钻进负载相连接; 所述钻进驱动装置能够钻入所述钻进负载; 所述监测系统与所述钻进负载相连接。

[0018] 本发明与现有技术相比具有如下有益效果:

[0019] (1) 与现有依靠传感器测试钻具温升的方法相比, 本发明提供了钻具热特性等效方法, 能够实现钻具温升的测算, 简单方便, 解决了在无法使用传感器的特殊工况下钻具温升测算的难题;

[0020] (2) 本发明通过监测回转速度、钻具扭矩、钻压力参数, 能够实时获得该时刻下的钻具温度, 避免了传输延迟, 具有即时性的优点;

[0021] (3) 本发明模拟真空环境下钻进过程热特性测试获得的试验数据进行热模型的修正, 所得的温升数据与实际温升变化一直, 最大数值偏差不大于20%, 具有等效性。

## 附图说明

[0022] 通过阅读下文优选实施方式的详细描述, 各种其他的优点和益处对于本领域普通技术人员将变得清楚明了。附图仅用于示出优选实施方式的目的, 而并不认为是对本发明的限制。而且在整个附图中, 用相同的参考符号表示相同的部件。在附图中:

[0023] 图1是本发明实施例提供的模拟月球表面真空环境的试验系统的结构示意图;

[0024] 图2是本发明实施例提供的钻具测算温升曲线与实际温升曲线对比的示意图。

## 具体实施方式

[0025] 下面将参照附图更详细地描述本公开的示例性实施例。虽然附图中显示了本公开的示例性实施例, 然而应当理解, 可以以各种形式实现本公开而不应被这里阐述的实施例所限制。相反, 提供这些实施例是为了能够更透彻地理解本公开, 并且能够将本公开的范围完整的传达给本领域的技术人员。需要说明的是, 在不冲突的情况下, 本发明中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。下面将参考附图并结合实施例来详细说明本发明。

[0026] 本实施例提供了一种钻具热特性等效方法, 该方法包括如下步骤:

[0027] 步骤一: 建立钻进过程中钻头温升的理论模型;

[0028] 步骤二: 搭建模拟月球表面真空环境的试验系统, 并进行钻取试验, 得到钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_1$ 、钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_2$ 和热功当量系数 $J$ ;

[0029] 步骤三: 将步骤二中的钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_1$ 、钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_2$ 和热功当量系数 $J$ 代入步骤一中的钻头温升的理论模型。

[0030] 具体的, 步骤一: 建立钻进过程中钻具热模型

[0031] 钻具在钻进过程中, 在回转与进尺的驱动下, 孔底的土壤与钻头切削具摩擦产生大量的热能。因此, 可以从摩擦学角度出发, 以能量的转化和守恒定律为基础, 建立钻头温

升的理论模型。

[0032] 钻头底面摩擦力： $F_{底} = \mu_1 F$  (1)

[0033] 钻头侧面摩擦力： $F_{侧} = \mu_2 P_{侧} = \mu_2 M / 2R_2$  (2)

[0034] 其中， $\mu_1$ ——钻头底面与月壤的摩擦系数； $F$ ——钻头底面压力，即轴向钻压力； $\mu_2$ ——钻头侧面与月壤的摩擦系数； $P_{侧}$ ——钻头侧面压力； $M$ ——钻头扭矩； $R_2$ ——钻头侧面摩擦当量直径。

[0035] 钻头摩擦所作的功： $W_F = F_{底}v_1 + F_{侧}v_2 = 2\pi R_1 \mu_1 FN + \pi \mu_2 MN$  (3)

[0036] 其中钻头的回转切向速度： $v_1 = 2\pi R_1 N$ ， $v_2 = 2\pi R_2 N$ ； (4)

[0037] 根据能量守恒定律，钻头摩擦所作的功转化为了钻头与月壤的热量，得出以下关系：

[0038]  $W_F = W_{钻} + W_{月}$  (5)

[0039] 钻头吸收的热量： $W_{钻} = c_{钻} m \Delta T J$  (6)

[0040] 根据式(3)、(5)、(6)，得出钻头的温升：

[0041]

$$\Delta T = \frac{2\pi R_1 \mu_1 FN + \pi \mu_2 MN - W_{月}}{c_{钻} m J} \quad (7)$$

[0042] 在真空无水的月球钻进环境下，月壤的热导率极低，因此月壤吸收的热量可以忽略， $W_{月} = 0$ ，则模型可以简化为：

[0043]

$$\Delta T = \frac{2\pi R_1 \mu_1 FN + \pi \mu_2 MN}{c_{钻} m J} \quad (8)$$

[0044] 其中， $W_F$ ——钻头摩擦所作的功； $W_{钻}$ ——月壤吸收的热量； $R_1$ ——钻头底面摩擦当量直径； $N$ ——回转转速； $C_{钻}$ ——钻头的比热； $\Delta T$ ——钻头的温升； $J$ ——热功当量系数； $m$ ——钻头的质量。

[0045] 从温升模型中可以看出，钻头底面摩擦当量直径 $R_1$ 、钻头的比热 $C_{钻}$ 、钻头的质量均为可测常量，回转转速 $N$ 、钻头扭矩 $M$ 、钻压力 $F$ 、钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_1$ 、钻头底面与月壤的摩擦系数 $\mu_2$ 、热功当量系数 $J$ 为影响钻头温升的主要因素，其中 $N$ 、 $M$ 、 $F$ 为钻进过程中监测量，与钻头的温升正相关， $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、 $J$ 为试验修正量，因此进一步进行模拟月壤环境下的钻进过程热特性测试，完善钻头温升的热模型。

[0046] 步骤二：进行钻进过程热特性测试

[0047] 为模拟一个接近月球表面真空环境和月面钻进负载，进行试验系统搭建，如图1所示，模拟月球表面真空环境的试验系统包括真空系统、钻进驱动装置、监测系统和钻进负载；其中，所述真空系统与所述钻进负载相连接；所述钻进驱动装置能够钻入所述钻进负载；所述监测系统与所述钻进负载相连接。其中真空系统对钻进负载——模拟月壤进行抽真空，以模拟月面真实的导热性质。

[0048] 经过测试得出，当气压低于10Pa (约为 $1.33 \times 10^{-1}$  torr) 时，随着气压的降低，月壤的热导率变化很小。因此装有模拟月壤的真空系统在小于10Pa的真空度下，对热传导的传热效率影响很小，使得测试结果可以等效真实的钻进过程的热特性数据。

[0049] 在该试验系统中进行钻取试验，在钻进过程中对钻进参数和规程进行控制，实现

对钻进参数和钻进温度进行实时监测、采集和分析,确定钻具的温度分布和最高极限温度,为修正钻具的热模型提供试验数据。

[0050] 步骤三:钻具温升的实时测算

[0051] 搭建模拟月球表面真空环境的试验系统,如图1所示,并进行钻取试验,在钻进过程中对钻进参数和规程进行控制,实现对钻进参数和钻进温度进行实时监测、采集和分析,确定钻具的温度分布和最高极限温度,为修正钻具的热模型提供试验数据。通过模拟真空环境下钻进过程热特性测试获得的试验数据,进一步修正钻具的热模型,确定影响钻头温升的主要因素,提取回转速度、钻具扭矩、钻压力作为钻进过程中监测量,提取钻头底面与月壤的摩擦系数、钻头侧面与月壤的摩擦系数、热功当量系数为试验修正量,最终确定温升的等效模型公式,实现钻具温升的实时测算。

[0052] 其中钻头底面摩擦当量直径 $R_1=0.014\text{m}$ ,回转转速 $N=120\text{rpm}$ ,钻头的比热 $C_{\text{钻}}=120\text{rpm}$ ,钻头的质量 $m=0.064\text{kg}$ ,钻头的比热 $C_{\text{钻}}=0.46 \times 10^3\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ,则式(8)简化为:

[0053]

$$\Delta T = \frac{0.359\mu_1 F}{J} + \frac{12.8\mu_2 M}{J} \quad (9)$$

[0054] 试验表明,钻头与月壤的摩擦系数以及热功当量系数 $J$ 均与钻压力存在很强的正相关性,因此设相关性系数 $k_1=0.359\mu_1/J$ , $k_2=12.8\mu_2/J$ ,则式(9)表示为

$$[0055] \quad \Delta T = k_1 F + k_2 M \quad (10)$$

[0056] 温升是稳态积累的过程, $i$ 时刻的温度为 $T_i$ ,并进行平均值滤波,即:

$$[0057] \quad T_i = \Delta T + T_{i-1} \quad (11)$$

[0058]

$$T_i = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} T_{i-j}}{N} \quad (12)$$

[0059] 通过试验结果得出修正系数:

[0060]

$$k_1 = \begin{cases} 0.144(F < 100) \\ 0.126(100 \leq F < 200) \\ 0.24(200 \leq F < 300) \\ 0.3(300 \leq F < 400) \\ 0.336(400 \leq F < 500) \\ 0.36(500 \leq F) \end{cases} \quad (13)$$

[0061] 平均值个数取 $N=14$ ,系数 $k_2=0.5$ ,根据式(11)、(12)、(13),可以通过钻压力 $F$ 和扭矩 $M$ 实时拟合出钻头前端的温升曲线,如图2所示,即可通过监测回转速度、钻具扭矩、钻压力,实时测算的钻具温升。

[0062] 通过试验结果得出修正系数 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $N$ ,然后通过钻压力 $F$ 和扭矩 $M$ 实时拟合出钻头前端的温升曲线,如图2所示,即可通过监测回转速度、钻具扭矩、钻压力,实时测算的钻具温升。

[0063] 本实施例通过钻头切削具与孔底月壤切削与摩擦机理分析,建立钻头在钻进过程

中的温升模型,确定影响钻头温升的主要因素,提取回转速度、钻具扭矩、钻压力作为钻进过程中监测量,提取钻头底面与月壤的摩擦系数、钻头侧面与月壤的摩擦系数、热功当量系数为试验修正量,最终确定温升的等效模型公式,实现钻具温升的实时测算。

[0064] 以上所述的实施例只是本发明较优选的具体实施方式,本领域的技术人员在本发明技术方案范围内进行的通常变化和替换都应包含在本发明的保护范围内。

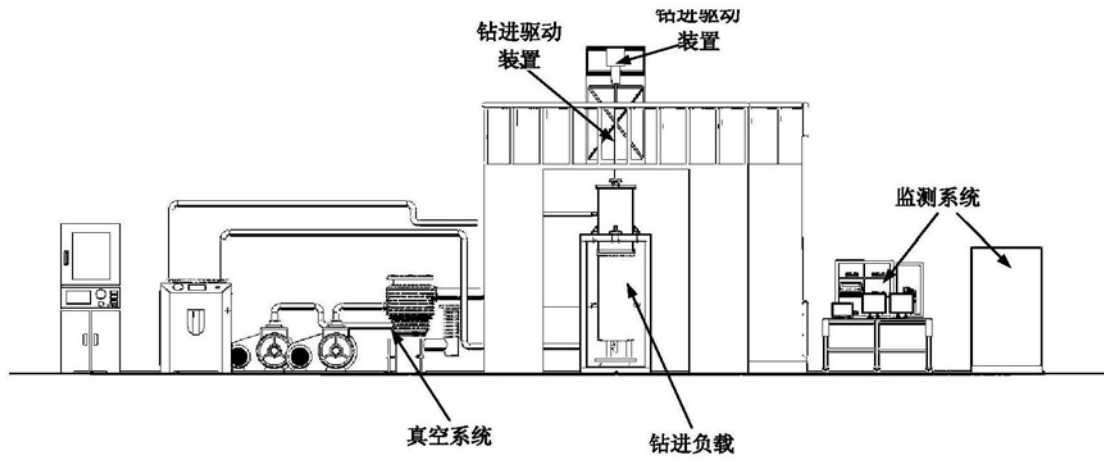


图1

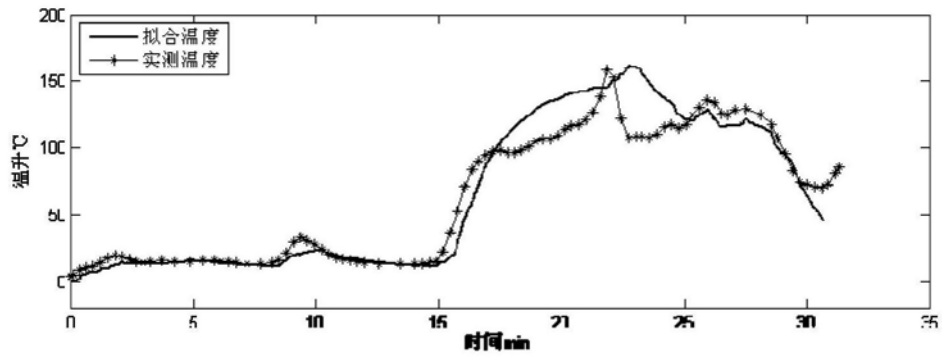


图2