

月球钻探取心特种钻头研制与试验

李大佛, 雷 艳, 许少宁

(中国地质大学长江钻头有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要:对月壤形成过程和物质组成进行了介绍,并将实际月壤基本物理力学指标与 CUG-1 型模拟月壤和普通干砂进行对比,认为在月球钻探取心过程中可能遇到具有一定胶结强度的硬质团块。为保证钻探取心顺利进行,需要研制月球钻探用特种取心 PDC 钻头。基于 PDC 钻头的碎岩机理,对钻头的负前角、旁通角、出露高度、钻头保径和 PDC 切削齿的钎焊工艺分别进行了设计,并对钻杆和钻头装配体在钻进过程中的受力过程进行有限元分析。最后,采用所设计的特种取心 PDC 钻头进行岩石干钻试验,试验结果表明,该钻头能钻进可钻性级别小于或等于 6 级的岩石,能满足月球钻探需要。

关键词:特种钻头; 钻孔取样; 月壤; 硬质团块

中图分类号: P634.1⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2013)02-0001-06

Study on Particular Coring Bit for Lunar Soil Drilling/LI Da-fu, LEI Yan, XU Shao-ning (Changjiang Bits Co., Ltd., China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Forming process and composition of lunar soil were introduced in this paper, and the actual lunar soil physical and mechanical indexes were compared with and simulated CUG-1 lunar soil and normal dry sand, it was suggested that hard clods with certain cementing strength might be encountered in lunar coring drilling. To ensure the successful lunar coring drilling, a special polycrystalline diamond compact (PDC) coring bit should be developed. Based on the breaking rock mechanism of PDC bit, the negative rake angle, bypass angle, exposure height, gauge protection of PDC bit and brazing technologies of PDC cutters were designed respectively; and finite element analysis was made on the force of bit and drill stem assembly during drilling process. At last, the dry drilling test was made by special designed PDC bit, it indicated that the bit would be effective when rock drillability was less than or equal to VI, and it could stratify the requirements for lunar soil drilling.

Key words: particular bit; coring drilling; lunar soil; hard clod

我国探月工程三期的核心任务是实现月球钻探取心和返回,并明确要采用钻孔取样方式来获取能保持原始层理结构的较深层的月壤样品。月表处于无水、高真空、微重力、日夜温差悬殊的极端环境,因此月球钻探取心用特种钻头需要具有低能耗、耐高温、耐磨等特性,力求钻头结构简单以减少钻进故障几率和拓宽对所钻月壤层的适应性。特种钻头的研制对于安全可靠地完成取心任务,顺利实现月球探测有关科学目标具有重要意义。

1 月壤基本情况介绍

月壤成分、物理力学性质,以及月壤颗粒表面微观结构特征,是探讨月壤形成演化过程和推动月球科学研究的重要基础,对于实现月球资源开发利用目标具有重要意义。月壤特性是什么、可钻性如何,众说纷纭,没有具体描述,没有权威论证,这里介绍

3种描述月壤特性的资料。

(1)月球像地球以及其他固态天体一样,表面覆盖着一层由疏松的颗粒状岩石构成的物质,通常被称为月壤层(王世杰等,2010)。地球的表土层是岩石在风、水、热、生物等因素共同作用下形成的,而月球表面的月壤层则是由于陨石撞击形成,并受微陨石轰击、宇宙射线轰击以及由于较大昼夜温差导致的周期性热脉冲作用等后期空间风化作用的改造。其中陨石撞击所导致的挖掘、碾碎过程是月壤形成的主要作用过程,决定了月壤的基本组成与基岩保持一致。月壤与基岩一样,主要由橄榄石、斜长石、辉石、钛铁矿以及玻璃质组成,但月壤颗粒在经受后期的空间风化作用改造后会在成分和微观结构上产生变化,形成月壤的独特性质。由于月壤主要来源于陨石对下层基岩的挖掘和碾碎,因此可以判断月球的岩石类型主要包括斜长岩、玄武岩、克里普

收稿日期:2012-12-11

基金项目:国家十二五重点攻关项目“月球三期工程”的一个分支项目

作者简介:李大佛(1937-),男(汉族),湖南南县人,中国地质大学长江钻头有限公司总经理、教授,我国低温电铸金刚石钻头领域的主要开拓者与带头人,机械专业,长期从事机械钻探与电镀技术的教学与科研工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,ztgs@cug.edu.cn。

岩。斜长岩和玄武岩主要分别分布于高地和月海地区,而克里普岩则分布于风暴洋地区。

(2)月球表面由月壤、月海玄武岩、高地斜长岩和克里普岩等组成(江磊,2010)。Apollo 15 钻取的 243 cm 的月壤岩心钻孔分析结果表明,月壤分为 42 层不同结构单元,每个单元从几毫米到 13 cm 不等,这是由于长期受陨石及微陨石冲击及其溅射物的堆积所造成的。月壤中的角砾、岩屑、细粉尘、玻璃等由于来源不同,矿物和化学成分也有很大的差异。角砾是由岩屑、玻璃和粉尘混合胶结而成。

可见,在月表钻探取样时,除了考虑月壤的松散性外,下伏月亮岩石岩性的多样性也给钻探工艺提出了要求。

(3)月壤力学性能指标。根据美国 Apollo 系列和前苏联 Luna 系列所取回的月壤样品,月壤的主要物理力学性能参数可以表述为以下 6 项(Heiken, 1991; Gromov, 1992):中值粒径 40~130 μm ,孔隙率 40%~173%,密度 870~1930 kg/m^3 ,相对密度 2.9~3.24,粘聚力 0.26~1.8 kPa,内摩擦角 25°~45°。将月壤性能参数与普通干砂,以及中国地质大学(武汉)肖龙教授(贺新星等,2011)研制的 CUG-1 型模拟月壤进行对比,其相关参数如表 1 所示,CUG-1 型模拟月壤的粒径分布如表 2 所示。

表 1 模拟月壤和普通干砂与实际月壤的主要物理力学参数比较

参数指标	密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	相对密度	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /kPa
实际月壤	1.6~1.8	2.9~3.2	25~50	0.2~1.8
模拟月壤	1.45~1.90	2.88	20~21	0.21~1.71
普通砂子	1.45~1.90	2.68	16.5~18.2	2.0~13.7

表 2 CUG-1 型模拟月壤粒度分布 /%

样品 编号	粒径/mm					
	>0.075	0.075~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.002	<0.002
A(25)	20.0	40.3	12.5	17.4	2.5	7.3
B(45)	6.6	53.6	15.6	9.6	7.7	6.9

上文所述 6 个参数是基于月面测试和返样测试,以及模拟月壤测试一般经验提出的。笔者从钻孔取心的角度分析,从安全可靠的观点出发,认为可提出以下假设:在月球表面之下某个层位,例如 1 或 2 m 深处等可能出现因某种原因使松散月壤颗粒胶结成团、成块,而且具有一定的胶结强度的现象,或出现还没有风化改造好的月球基岩,例如玄武岩等。

玄武岩属于火成岩,按压入硬度范围其可钻性级别为 8 级左右。因此,月壤取心钻头设计的指导思想是该钻头既能在松散的月壤中钻孔取心,又能

在含有硬质团块或月壤的月壤中钻孔取心,以求在任何月壤中钻孔取心安全可靠、万无一失。

2 月球钻进取心钻头设计

钻头对地层有选择,地层对钻头有要求,只有两相配合,互相适应,才会有好的效果。月球深层取样采用回转钻进的方式,常见的回转用取心钻头包括硬质合金钻头、PDC 钻头、牙轮钻头、金刚石钻头,以及钢粒钻进用硬质合金钻头。选择回转钻进用钻头的一般原则是:在软岩中采用硬质合金钻头;在中硬及部分中硬以上岩层中采用 PDC 钻头和牙轮钻头;在硬岩中采用金刚石钻头或钢粒钻头;在硬-脆岩层中采用镶齿牙轮钻头。其中牙轮钻头主要用于大口径石油钻探,金刚石钻头主要用于硬及坚硬地层钻进;硬质合金钻头主要用于第四系土层及部分风化岩层钻进,且其结构与 PDC 复合片钻头有较大的相似性,功能基本上都可以采用 PDC 复合片钻头进行代替。因此,本文选用 PDC(polycrystalline diamond compact)作为钻头的切削结构,并采用电镀金刚石层作为钻头的保径材料。

2.1 钻头碎岩机理

岩石的抗拉强度最低,剪切强度次之,而抗压强度最高,抗压强度往往比剪切强度高数倍乃至十多倍。因此,利用剪切或切削方式破碎岩石的工具,必然会是一种高效的工具。传统硬质合金镶齿型刮刀钻头虽然称为剪切或切削型钻头,但由于硬质合金不耐磨,致使钻头切削刃很快磨钝而不能有效破碎岩石。复合片钻头的切削块由于具有金刚石耐磨层,尽管厚度薄(只有 1.5 mm 左右),但硬度高,一般比碳化钨硬质合金的耐磨性高 100 倍以上。因而刃口锋利,且刃尖前面和后面的聚晶层能同步磨损或剥落,后面的硬质合金底层更超前磨损,因而复合片钻头在切削过程中其刃口能自锐(如图 1)。锐利的刃口切入岩石,在扭矩作用下向前移动剪切岩石(如图 2),这充分利用了岩石剪切强度低的弱点,发挥了复合片钻头具有高速切削岩石的优点。

2.2 钻头结构设计

2.2.1 负前角设计

在切削深度相同的条件下,切入岩土所需要的轴向力和水平力和切削弯矩跟切削角的倾向密切相关,以切削角前倾最大,垂直次之,后倾最小。然而其对排粉的影响则刚好相反,前倾方向最利于排粉,垂直次之,后倾方向最差。一般切削土壤时切削阻力小,切屑量大,常采用前倾角;复合片钻头应用于

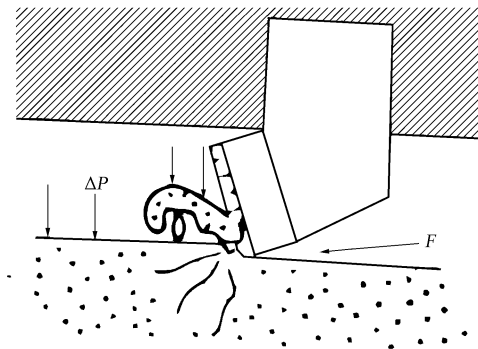


图1 复合片切削具的工作及自锐

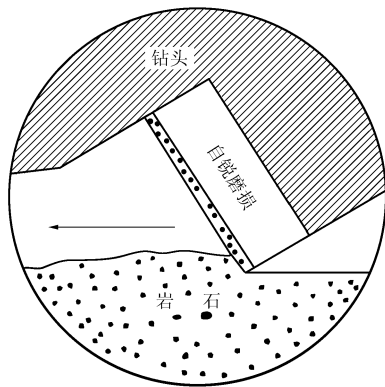


图2 PDC 钻头切削岩石

中硬岩层钻进时,阻力相对较大,岩屑也相对较少,因此多采用后倾角(即负前角)的方式,如图3所示。

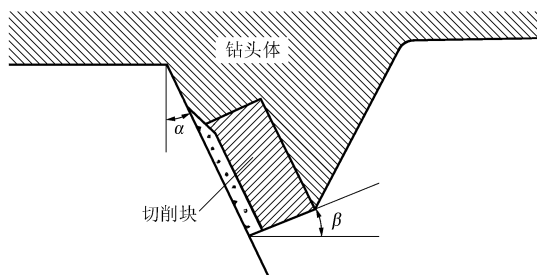


图3 复合片钻头的负前角

负前角设计使岩屑不致沿切削齿刃面生长过高,能在很大程度上避免或减少岩屑被挤压在钻头体与地层之间,有利于岩屑排除,从而增加钻进压力(李大佛等,2008)。同时,该设计能减少岩屑在复合片前刃面上的滞留时间,降低了复合片的工作温度以及岩屑沿其流动的阻力和摩擦系数,避免了塑性较大的岩石有可能发生粘结现象,即所谓泥包或糊钻。

负前角的大小依地层而定,对于可钻性好、钻头寿命和时效均佳的地层,复合片钻头切削块的负前角为 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$;对于大部分沉积岩,切削块的负前角

一般为 $-10^{\circ} \sim -20^{\circ}$ 时钻头性能最佳。考虑月壤中的极端情况,可能遇到玄武岩,它属于火成岩,硬度较大,为保证钻头有效破碎玄武岩,还需要一定寿命,选定 -15° 较好。

2.2.2 旁通角设计

复合片钻头在孔底接触面积小,比压高,加之复合片耐磨能自锐,其刃口锋利,具有时效高,岩屑(或岩粉)多的特点,因而及时清除孔底岩屑就显得十分重要。合理的设计应是复合片切削块在钻头上定位时逆旋转方向取一定角度(如图4所示),称为复合片切削块的旁通角。

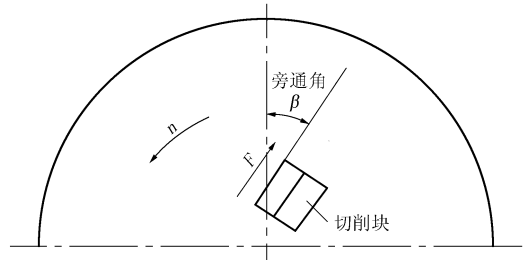


图4 复合片钻头的旁通角

当钻头旋转钻进时,岩屑在离心力 F 推动下向外侧移动,从而帮助离开前刃面,有利于及时清除。复合片钻头上旁通角的设计,虽然有利于排除岩屑,但也存在不利的方面。既减少了钻头的有效切削力,同时也增加了牢固镶焊复合片的难度,因为它增加了复合片沿其轴向转动(或松动)的外力或扭矩,所以旁通角不宜设计过大,通过试验本文选用旁通角为 5° 。

2.2.3 PDC 的出露高度和排列方式

从岩屑形成观点看,形成岩屑的空间(出露高度)希望尽可能大,以避免切削掉的岩屑沿前刃面流动时不致受阻截断挤压,从图5可以看出,复合片切削块出露如果不高将会造成岩屑被挤压于钻头体与地层之间,若为胶粘性地层,则岩屑会紧包切削块形成泥包,以致无法有效排除。鉴于上述利弊,本文采用高出露的设计方案,尽可能增大排除岩屑通道的空间,使其尽可能避免岩屑重复破碎,通过试验本文选用复合片出露高度为3 mm。

PDC 钻头切削具的分布影响着各个切削具的受力情况和钻进的效率,合理的布齿可以使每个部位的切削具的磨损速度一致,从而提高钻进效率和钻头的寿命。美国 Apollo ALSD 硬质合金钻头布齿数量为5(Allton,1989),欧空局 MroSA2 火星探测项目使用的钻头布齿数量为6(Blacic,2000; Anttila,2005),NASA和ESA合作的ExoMars火星探测项目

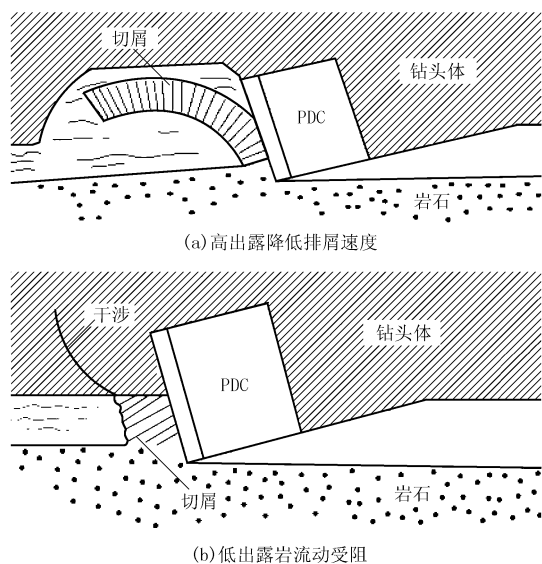


图5 PDC 出露高度示意图

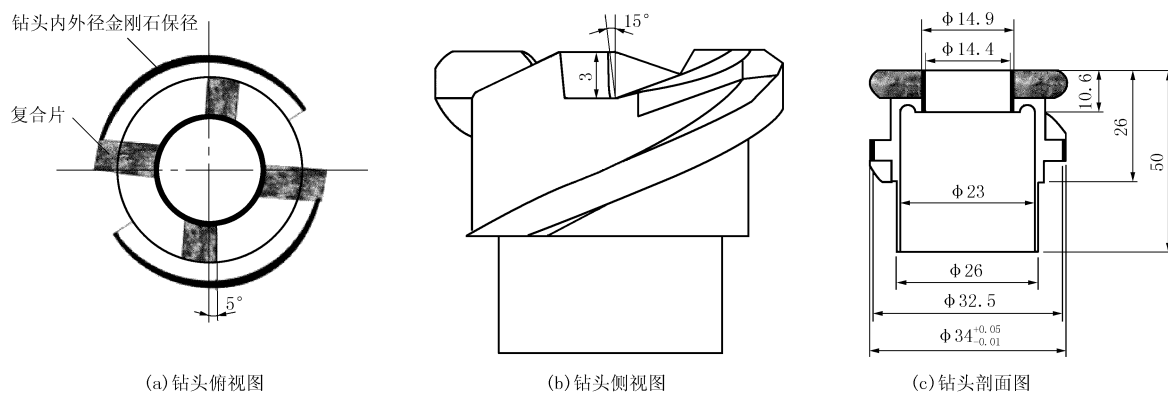


图6 钻头设计图

头内径的保径效果。月壤钻探特种取心钻头保径设计采用的是低温电镀孕镶金刚石工艺,其特点为:

(1)低温。电镀保径工艺的全过程在室温环境中进行,极大地保护了金刚石的原有强度,避免了金刚石的高温损伤。

(2)机械性能。电镀溶液中无有机添加剂,形成的金属胎体机械性能强度高、韧性好、经得起钻进生产中的冲击与碰撞。

(3)金刚石工作高度厚、孕镶层数多。金刚石电镀保径层的耐磨性强度高,所设计的PDC金刚石取心钻头其电镀保径层厚0.25 mm,如果在钻进使用中,其金刚石磨损殆尽,应该有较长的使用寿命或较多的进尺。

(4)恒定的机械钻速。特种钻头保径上的金刚石被孕镶在Ni-Co胎体金属里,只有当胎体金属磨损后,金刚石才会出露或更新,参与破碎岩石的工作。一般说来,胎体消耗快则机械钻速高,胎体消耗

使用的钻头布齿数量为4(Zacny,2005)。

综合各国太空钻探取心钻头的布齿经验,考虑制造工艺性、切削和排屑能力,本文采用周向单层4齿均匀布置方式。具体布置位置为,在钻头低端侧面两螺旋翼位置布置2个主切削齿,在与之相垂直的地方布置2个辅助切削齿,钻头结构设计和尺寸参数如图6所示。考虑到钻头外侧的螺旋翼与钻杆螺旋翼的连续性,钻头外侧也设计了双螺旋叶片,其具体结构参数与钻杆相同。

2.3 钻头保径设计

钻头保径是指钻头工作时,内外径应当保持不变或变化极小。钻头工作时由于不可避免的振动,岩心会变细0.1~0.2 mm。因此,钻头内径的磨损极限是0.05~0.10 mm。所以,月壤取心钻头的保径能力就成一个十分重要的质量指标,特别是钻

慢则机械钻速低。但胎体消耗过快,金刚石还没有充分发挥作用就会自动脱落,钻头表现为机械钻速高使用寿命低。相反,胎体消耗过慢,则金刚石不会及时出露或自锐,可能会导致钻头寿命高但机械钻速较低。在坚硬地层钻进,提高机械钻速是最主要的工作目的和指标,因此要尽可能保证较高的机械钻速,但同时钻头保径寿命也要达到要求。

由于钻头保径上的金刚石是一层层地出露或更新的,参与碎岩工作的始终是新的金刚石。在地层和钻进参数不变的条件下,由于金刚石硬度比所钻岩石大得多,金刚石不会被磨钝而只可能脱落或者碳化,因此钻头保径所表现的机械钻速是恒定的。

金刚石电镀保径层在月球钻探取心用PDC金刚石钻头上的镀覆位置如图6所示,钻头实物如图7所示。

2.4 PDC 切削齿的钎焊工艺

PDC工具在使用过程中出现脱焊是其最主要

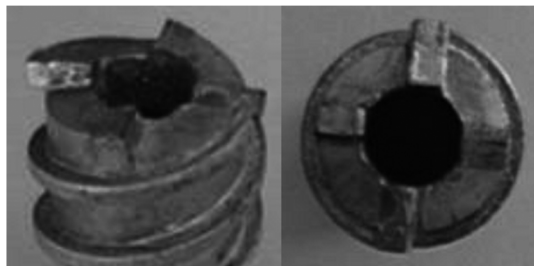


图7 月壤取心 PDC 金刚石钻头实物照片

的失效形式之一,因此选用高性能钎料和合理的工艺是提高 PDC 钎焊质量的关键。PDC 切削齿的钎焊主要依靠润湿其中的金属粉或硬质合金基体来实现。受 PDC 中金刚石允许的加热温度限制(一般不超过 $720\text{ }^{\circ}\text{C}$),钎焊料必须选用银基焊料。银基焊料的耐热温度较低,对金刚石和碳化物的润湿性较差,因而必须添加其他金属成分进行调整。

钎焊强度主要取决于被连接材料(即钻头钢体)的组织 and 状态、钎料和钎剂,以及钎焊过程等 3 个因素。钻头钢体结合面,即 PDC 切削具与钻头钢体钎焊的槽穴面要求吻合,其间隙为 $0.15\sim 0.2\text{ mm}$ 。钎焊前需要对钻头钢体和 PDC 切削齿进行打磨、喷砂和丙酮清洗,彻底清除被钎焊材料表面的油污和氧化层。所采用的钎焊料为 Ag45CuZnCd ,具体成分比例为 $\text{Ag45\%, Cu15\%, Zn16\%, Cd24\%}$ 。钎焊测试表明,该钎料加工的焊接件具有填缝性能好、抗疲劳强度(或抗剪强度) 360 MPa 、熔化温度 $595\sim 605\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等特征。

2.5 钻杆-钻头装配体钻进过程有限元分析

为检验钻头与钻杆装配体是否满足钻进时的受力要求,对钻进过程进行有限元分析。在 Solidworks 平台上建立了钻杆和钻头的三维模型,并应用 Simulation 进行钻杆-钻头装配体钻进过程有限元分析。

分析时采用的材料为 45 钢,其屈服强度为 530 MPa ,主要校验其屈服强度。应用其他材料如 TC4 进行分析时,应力分布与材料为 45 钢时基本一致,但其安全系数会有根据屈服强度不同而不同。施加的载荷为极限情况(在钻进过程中遇到坚硬岩石时)下的载荷:进给力 2000 N ,扭矩 $300\text{ N}\cdot\text{m}$,进给力载荷施加方向为钻头轴向方向。

装配体有限元分析结果如图 8 所示,反映的是装配体各部分应力分布云图。从结果云图中可以看出,其应力集中点主要是复合片与钻头胎体连接的部位。具体原因为:复合片与胎体连接部位为材料

的交界面,交界面由于有贴合紧密的需要而存在尖角,尖角部位易于产生应力集中。其最大应力值为 458.1 MPa ,未达到材料的屈服强度上限,安全系数约为 1.3,说明钻杆-钻头装配体满足钻进时的受力要求,设计可行。

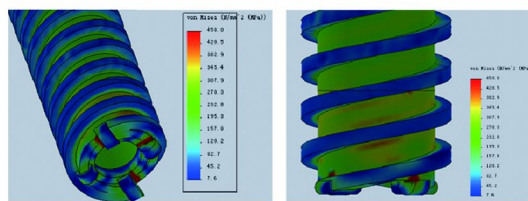


图8 装配体各部分应力分布云图

3 干钻岩石试验

为检验所设计的 PDC 金刚石钻头在无冲洗介质条件下,干钻过程产生的摩擦热是否会使钻头因温度过高而出现过度磨损和失效;同时,为 PDC 金刚石钻头钻进不同岩石的能力进行定量评价,对所设计的 PDC 金刚石钻头进行了干钻岩石试验。

采用摇臂钻机进行岩石干钻试验,并采用接触式温度计对钻进过程中钻头升温值进行测量(如图 9a 所示)。采用接触式温度计测量 PDC 金刚石钻头对岩石进行干钻试验后的温升值的步骤为:

- (1) 钻进试验之间先测定室温;
- (2) 测量钻头切削刃的温度;
- (3) 按给定钻进规程进行预定深度的干钻试验;
- (4) 停钻,并迅速起钻(如图 9b 所示),测量 PDC 切削齿的温度;



(a) 接触式温度测量仪

(b) 岩石干钻试验照片

图9 岩石干钻试验照片

- (5) 取测量值的最大值为在某种钻进参数条件

下,钻进一定深度后的切削齿温度值。

根据能量守恒原理,钻头辐射的热量等于钻头温度降低损失的能量,即:

$$\varepsilon_1 A_1 C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] s = c_g \Delta T m \quad (1)$$

式中; ε_1 ——黑度,实际物体的辐射能与相同温度下黑体的辐射能的比值; A_1 ——钻头的表面积, m^2 ; C_0 ——黑体辐射系数, $5.67 \text{ W}/(m^2 \cdot K^4)$; T_1 ——钻头取出前的温度, K ; T_2 ——空气温度, K ; s ——钻头取出时间, s ; c_g ——钢的比热, $J/(g \cdot K)$; Δ ——钻头温度降低值, K ; m ——钻头的质量, g 。

例:室温 $295 \text{ K}(22 \text{ }^\circ\text{C})$, 钻头取出 10 s 后测量温度为 $433 \text{ K}(160 \text{ }^\circ\text{C})$, 钻头质量 m 约 $50 \text{ g}(49.899 \text{ g})$, 表面积 A_1 约 $1.02 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, 钢铁黑度 ε_1 为 0.8 , 钢的比热 c_g 为 $0.46 \text{ J}/(g \cdot K)$, 计算钻头取出前温度 T_1 。

将数据代入式(1), 得 T_1 约为 438.8 K , 即 $165.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 。即钻头在这种条件下, 取出 10 s 后降温约为 $5.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因此, 试验所采用的接触式温度测量仪能满足试验测温需求, 所测得的温度具有较强的可靠性。

干钻试验的岩石种类包括灰岩、砂岩、泥灰岩以及玄武岩共 5 种。对岩样进行压入硬度试验, 并根据压入硬度值对其进行可钻性分级。岩石干钻试验参数及结果如表 4 所示。

表 4 岩石干钻试验参数及结果

岩石类别	岩石可钻性	给进速度 $/(mm \cdot \text{min}^{-1})$	回转速度 $/(r \cdot \text{min}^{-1})$	总进尺 $/mm$	钻进温升 $/^\circ\text{C}$
泥灰岩	5 级	3.2	80	78	56
砂岩	6 级	3.2	80	93	55
灰岩	6 级	3.2	80	95	71
玄武岩	8 级		320	1	86

注:玄武岩钻进时,由于钻进难度大,无法达到预定进尺速度,所以采用高转速和人工控制进尺速度的方式来试验,但因无进尺而终止试验。

试验结果表明,在无冲洗介质条件下,所设计的月壤钻探特种取心钻头能钻进岩石可钻性小于或等于 6 级的泥灰岩、砂岩和灰岩等岩石。钻头单次试验可达总进尺 $78 \sim 95 \text{ mm}$, 钻进试验结束后的钻头温度升高值为 $55 \sim 71 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

4 结论

(1) 对被钻对象——月壤进行了调研分析,总结了目前学术界认为的 3 种月壤的成分、状态和基本的力学性质。从钻孔取心安全可靠的角度,提出了被钻对象——月壤的可钻性范围,为钻具的设计提供了基础。

(2) 对月球特种取心钻头的碎岩机理、切削齿负前角和旁通角、切削具的钎焊工艺等方面分析研究,并针对月球地层复杂特点进行了设计。

(3) 在 Solidworks 平台上建立了钻杆和钻头的三维模型,并应用 Simulation 进行钻杆-钻头装配体钻进过程有限元分析,最大应力值为 458.1 MPa , 未达到材料的屈服强度上限,安全系数约为 1.3 ,说明钻杆-钻头装配体满足钻进时的受力要求。

(4) 目前设计研制的这种月壤特种取心钻头可以钻进 6 级岩石在内的任何月壤层,对顺利实现月球探测的有关科学目标具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] Allton J H. Catalog of Apollo Lunar Surface Geological Sampling Tools and Containers, JSC-23454[Z]. 1989.
- [2] Anttila M E. Concept Evaluation of Mars Drilling and Sampling Instrument[A]. Espoo: Helsinki University of Technology Laboratory of Space Technology[C]. 2005.
- [3] Blacic J, Dreesen D, Mockler T. The 3rd Dimension of Planetary Exploration Deep Subsurface Drilling[A]. AIAA Space 2000 Conference and Exposition[C]. 2000. 19-21.
- [4] Gromov V. Physical and Mechanical Properties of Lunar and Planetary Soils[J]. Earth, Moon and Planets, 1999, (80): 51-72.
- [5] 贺新星,肖龙,黄俊,等. 模拟月壤研究进展及 CUG-1A 型模拟月壤[J]. 地质科技情报, 2011, 30(4): 137-142.
- [6] Heiken, G., Vaniman D., French B. M. Lunar Sourcebook: A user's Guide to the Moon[M]. New York: Cambridge University Press, 1991. 155-182.
- [7] 江磊,苏波,王长科,等. LBD 模拟月壤研究[A]. 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第七届学术年会论文集[C]. 黑龙江哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010. 192-198.
- [8] 李大佛,屠厚泽,李天明. 金刚石、PDC 钻头与工艺学[M]. 北京:地质出版社, 2008. 302-306.
- [9] 王世杰,李雄耀,唐红,等. 月面环境与月壤特性研究的主要问题探讨[J]. 地球化学, 2010, 39(1): 77-79.
- [10] Zaeny K. A. Mars Drilling-An Investigation and Development of Techniques for Drilling Exploratory Boreholes on Mars[Z]. University of California, Berkeley. 2005.