

# 施必牢螺纹在采样钻具防松连接中的应用研究

马超<sup>1</sup>, 林晨<sup>2</sup>, 赵曾<sup>3</sup>, 钱成<sup>1</sup>, 殷参<sup>3</sup>, 潘秋月<sup>1</sup>, 姜生元<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨理工大学, 哈尔滨 150080;  
3. 北京卫星制造厂, 北京 100190)

**摘要:** 在月面环境下实施钻取采样作业任务, 采样钻具将受到驱动部件的高频冲击作用以及月壤交变载荷的复合作用, 钻进过程中还可能需钻具反转。为了确保在各种复杂条件下钻具的螺纹连接不松脱、不错相, 对采样钻具螺纹连接失效模式进行了分析, 提出了一种应用施必牢螺纹实现防松的方案, 并与标准螺纹进行了对比性实验研究, 验证了施必牢螺纹在采样钻具中应用的可行性。

**关键词:** 月面采样; 钻具连接; 施必牢螺纹防松

**中图分类号:** V19

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-7777(2016)02-0175-06

**DOI:** 10.15982/j.issn.2095-7777.2016.02.013

**引用格式:** 马超, 林晨, 赵曾, 等. 施必牢螺纹在采样钻具防松连接中的应用研究[J]. 深空探测学报, 2016, 3(2): 175-180.

**Reference format:** Ma C, Lin C, Zhao Z, et al. Application research of DTFLOCK thread in anti-loosing connection of drilling tool[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(2): 175-180.

## 0 引言

月面钻取采样是我国探月三期工程拟实施的采样方式之一, 由于受到月球表面特殊环境以及月壤的特殊物理属性等因素限制<sup>[1]</sup>, 国际上均采用空心钻杆的取芯机构来采集深层样品, 以保持月壤的原始层序信息<sup>[2]</sup>。在实施月面钻取采样的过程中, 不但需要对钻具施加回转、驱动动力, 遇到岩石或高密度月壤时, 还需要对钻具施加一个轴向高频冲击动力。此外, 钻具在钻进月壤时, 由于月壤的颗粒物堆积物属性, 钻进负载始终处于交变状态。在这种工况下, 若钻具组件的螺纹连接防松的措施不当, 将会导致钻具组件松脱、关键组件相位错相等故障, 严重时会出现反向回转时钻头脱落的致命性故障。

针对探月三期钻取采样装置原理样机取芯钻具, 特点为多层细长薄壁空心管套层装配, 各零部件之间使用了多处螺纹连接。航天产品追求质量轻薄, 取芯钻具各零件壁厚均较薄, 无法采用地质钻具常用的锥螺纹结构。取芯钻具在空间飞行和月面工作阶段, 需要经历高温、低温、冲击和振动等复杂载荷环境, 所以零组件连接可靠性在全生命周期将面临严峻考验, 一旦发生螺纹松动, 将会影响排粉顺畅性和受力载荷的安全性, 甚至影响任务的成败。

## 1 取芯钻具连接螺纹失效分析

### 1.1 取芯钻具连接螺纹

取芯钻具由钻具和取芯机构两个部分组成。钻具中钻头、钻杆和钻杆接头三者之间使用了两处螺纹(M28×1.5和M30×1.5); 取芯机构中护套、外管之间, 芯管、顶端螺母和上接头之间使用了3处螺纹(M23×0.75LH、M16.8×0.75LH和M19×0.75LH)。取芯钻具装配结构如图1所示, 受整体构型布局 and 月面工作环境限制, 除了施加安装预紧扭矩外, 暂未采取其它防松措施。

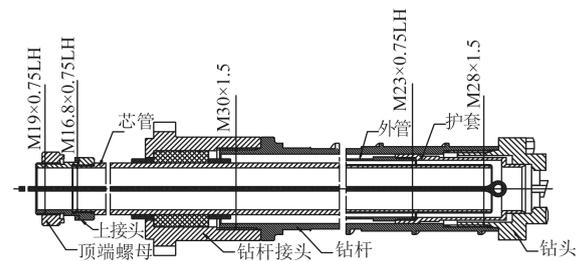


图1 取芯钻具装配结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coring drilling tool assembly

由于目标月壤力学特性的不确定性, 钻具与月壤相互作用的力载将具有随机性, 从而可以判断出取芯

钻具中钻头与钻杆之间的连接螺纹（当前基线暂定为M28×1.5）工况最为恶劣，本文针对该连接螺纹的防松特性进行对比研究。

### 1.2 连接螺纹过载错相位现象

在开展取芯钻具模拟月壤钻进实验过程中，由于模拟月壤的力学特性的不确定性，钻具在不同深度剖面力载将会有很大波动。当钻头与钻杆之间出现大于装配拧紧力矩的负载扭矩差值时，将会出现图2所示螺纹错相位现象，导致钻具外螺旋排粉故障、负载扭矩升高、孔底钻压升高，从而会引起卡滞等故障现象。如果在月面工作，出现某种故障需要钻具反转时，由于月壤或月岩的摩擦很有可能导致钻头或钻杆被旋掉，那么钻具就丧失了继续钻进的功能，导致任务失败。



图2 连接螺纹错位现象

Fig. 2 Dislocation from connecting thread

要经历交变冲击、振动、加速度等叠加载荷；在月面工作时，钻具执行回转、冲击和进尺运动与月壤相互作用，由于月壤力学特性的不确定性，使力载情况更为复杂。飞行过程所要经受的力学载荷，可以通过设计压紧、限幅等机构来保证可靠性，但是钻进过程中一旦发生螺纹松动，将会影响排粉顺畅性和力载的安全性，甚至影响任务的成败。

### 1.3 连接螺纹失效风险分析

在地面发射、地月轨道转移和近月制动过程中，

在表1中列举了取心钻具各组件连接形式及失效风险。

表1 取芯钻具各组件用螺纹汇总表

Table 1 Summary table for thread of coring drilling tool

序号	组件	连接部位	螺纹形式	工况	失效风险
1	钻具	钻头和钻杆	M28×1.5	1) 地月转移过程	1) 螺纹松动
2		钻杆和钻杆接头	M30×1.5	2) 钻进峰值扭矩 3) 反转	2) 螺旋翼不连续 3) 钻头/钻杆脱落
3	取芯机构	护管和外护管	M23×0.75 LH	1) 地月转移过程 2) 反转	1) 螺纹松动 2) 护管/芯管脱落
4		芯管和上接头	M16.8×0.75 LH		
5		上接头和顶端螺母	M19×0.75 LH		

## 2 螺纹连接防松方案对比分析

### 2.1 常规螺纹防松方法

目前常规的螺纹防松方式有摩擦防松、机械防松和破坏螺纹防松三大类，详细类型如图3所示。

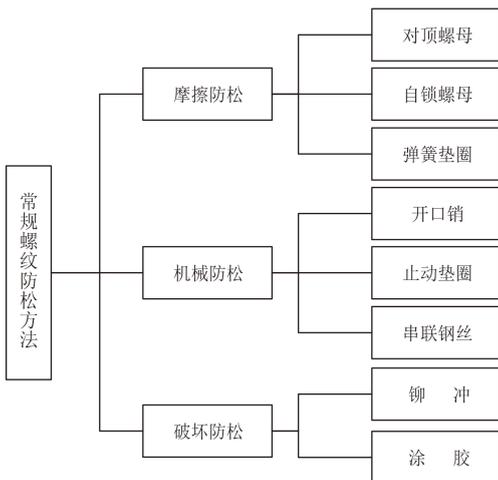


图3 常规螺纹防松方法

Fig. 3 Anti-loosening method of conventional thread

### 2.2 取芯钻具螺纹防松现状

由于取芯钻具结构的特殊性，以上防松方式均不适合。目前取芯钻具中仅有芯管和上接头之间M16.8×0.75LH螺纹采用了胶接的防松方式，其它连接螺纹仅规定了装配扭矩值，如表2所示。在真空环境钻进月岩时，钻头所能达到最高温度将介于500~700℃<sup>[9]</sup>，所以钻头与钻杆之间的连接螺纹不能采用涂胶防松的办法。

### 2.3 施必牢螺纹的防松原理

美国施必牢公司在研究普通螺纹联接机理和总结螺纹联接缺陷的基础上，通过改变螺母牙型，提高了螺纹联接牙间承载的均匀性，无需借助其它辅件，仅靠螺母就能锁紧。施必牢螺母主要改进是在普通螺母牙顶增加一个30°斜面，当螺栓与螺母上紧后，螺栓牙顶与30°斜面挤压靠紧，形成一条螺旋线接触，将普通螺纹联接的牙侧接触改为径向接触，消除了径向间隙，如图4所示。因径向尺寸易于保证，接触更加紧密，承受载荷时，30°斜面将大部分力转化成正压力，提高了摩擦力，增强了自锁能力。

另外，施必牢螺纹牙底30°斜面能使螺母锁紧力均

表 2 取芯钻具螺纹装配扭矩及防松方式

Table 2 Assembly torque and anti-loosening method for thread of coring drilling tool

序号	组件	连接部位	螺纹形式	装配矩/(N·m)	防松措施
1	钻具	钻头和钻杆	M28×1.5	18~20	
2		钻杆和钻杆接头	M30×1.5	18~20	
3	取芯机构	护管和外护管	M23×0.75 LH	5~6	
4		芯管和上接头	M16.8×0.75 LH	5~6	J133结构胶胶接
5		上接头和顶端螺母	M19×0.75 LH	5~6	

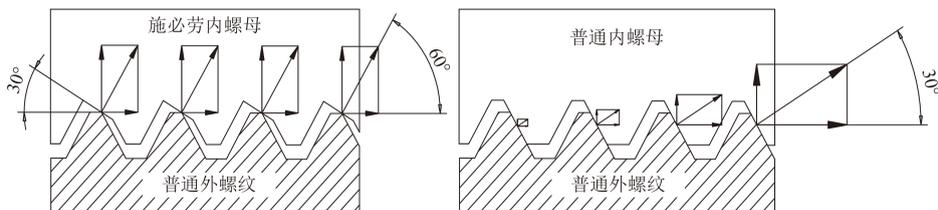


图 4 施必牢螺纹与普通螺纹受力图

Fig. 4 Force diagram of DTFLOCK thread and conventional thread

匀分布在各螺纹牙面的螺纹上，并且受力分配均匀，较好地解决了螺纹磨损和剪切变形问题。使用结果大量表明这种新型螺纹结构能经受各种载荷条件的考验，具有良好的防松性能，且无需其他附件，使用方便。经过反复多次紧固和拆卸，其自锁能力仍不改变，保持其原有的防松效果。

取芯钻具中的钻杆内螺纹若采用施必牢结构，实施简便不用增加辅件、复杂工况防松效果显著，并可

以起到均匀载荷的作用。

### 3 取芯钻具施必牢螺纹防松性能验证

为了验证多种工况下，螺纹的防松特性，针对钻头与钻杆之间M28×1连接螺纹开展实验。由于该螺纹为第三选型系列，市面不易获得现货，本实验采用了易于购买的M27×2螺纹开展比照实验。表3介绍了实验所采用的螺纹情况。

表 3 对比实验用螺纹规格汇总表

Table 3 Summary table for thread of contrast experiment

序号	类型	螺栓规格	螺母规格	螺距/mm	装配拧紧力矩/(N·m)
1	钻头和钻杆连接螺纹	M28	M28	1.5	18~20
2	施必牢螺纹	M27	DTF-CO M27	2	按实验矩阵
3	普通米制螺纹(对照组)	M27	M27	2	

#### 3.1 拧紧/拧松力矩测试

如图5所示，将2个相同批次的M27×2×65螺栓分别贯穿在夹具两侧的预留孔内，一个螺栓上安装施必牢DTF-CO M27×2螺母，另一个螺栓安装M27×2普

通米制螺母。用数显力矩扳手分别施加10~60 N·m（间隔5 N·m）拧紧力矩后，随后拧松并记录力矩数值，试验结果如图6所示。

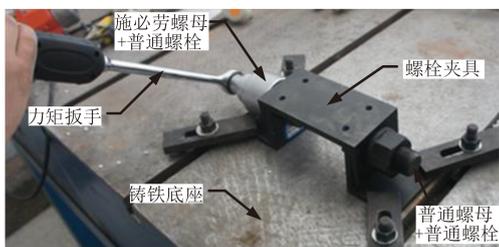
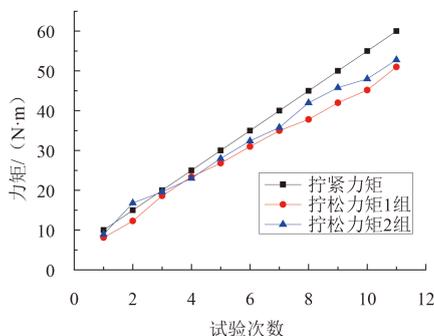


图 5 力矩测试实验台

Fig. 5 Experiment table for torque test



(a) 施必牢螺纹拧紧/拧松力矩

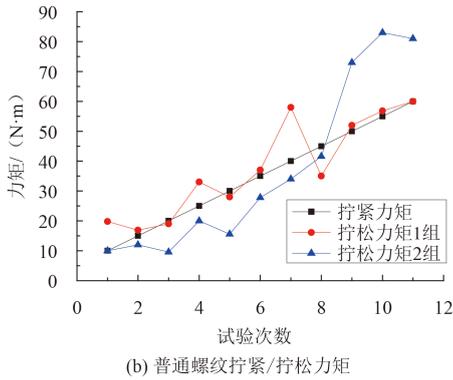


图6 施必牢与普通螺纹拧紧/拧松力矩对比

Fig. 6 Comparison for tightening/loosening torque of DTFLOCK thread and conventional thread

由图6可以看出，在相同拧紧力矩作用下，施必牢拧松力矩较普通螺纹更为均匀。从钻头和钻杆连接螺纹使用角度来说，当钻具钻进一定深度后，如果需要反转，那么当钻头与土壤摩擦阻力矩超过了螺纹装配扭矩下对应的拧松力矩时，钻头就会被拧松甚至与钻杆脱离，使钻具钻进功能丧失导致任务失败。

### 3.2 螺纹过扭矩错相位实验

本实验测试施必牢和普通螺纹在安装扭矩作用后，随后分别再施加两次扭矩，测量转角相对值实验数据如表4所示。实验过程如表5所示，试验结果详见表6。

为了避免钻进过程的摩擦阻力矩大于安装扭矩时，钻头与钻杆发生相位追加错动，可以提高钻头与钻杆安装扭矩，或者采用单位力矩下转角更小的特殊螺纹，从而可以有效保证钻头与钻杆角向关系，达到使排粉顺畅和提高力载安全性的目的。

### 3.3 振动环境力矩保持测试

振动冲击的环境是螺纹松动甚至失效的主要原因，为了模拟发射阶段的振动环境，设计简易振动测试台如下图7所示。

利用上述简易试验台开展了不同拧紧力矩下，振动5分钟后拧松力矩测试。从图8中的测试结果可以看出（图中数据为平均值），普通螺纹抗振松性能较差，而施必牢螺纹的拧松力矩较为稳定，表现出了较好的抗振松性能。

表4 定力矩下的拧松力矩测试表

Table 4 Loosen torque test in fixed torque

实验项目		实验数据											N·m	
拧紧力矩		10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60		
拧松力矩	施必牢	第一组	8.1	12.3	18.6	23.4	26.8	31.0	35.0	37.8	42.0	45.2	51.0	
		第二组	8.9	16.8	19.6	23.0	28.0	32.4	35.8	42.0	45.8	48.0	52.8	
	普通螺纹	第一组	19.8	16.9	19.0	33.0	28.0	37.0	58.0	35.0	52.0	56.8	60.0	
		第二组	10.0	12.0	9.6	20.0	15.6	27.8	34.0	41.6	73.0	83.0	81.0	

表5 过扭矩错相位实验步骤

Table 5 Experimental procedure of staggered phase of exceed torque



第一步：施加初始扭矩

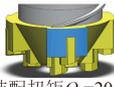
第二步：追加20N·m扭矩

第三步：测量转角相对值

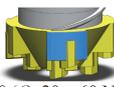
表6 追加扭矩下角相对值测试表

Table 6 Test table of angle relative value under additional torque

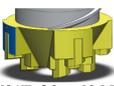
实验项目	变化量		
拧紧力矩(N·m)	20→4040→6020→60		
施必牢螺母拧紧角度(°)	4.5	2.5	7
普通螺母拧紧角度(°)	44.6	41.4	86



$\theta=0^\circ$ (装配扭矩 $\theta_0=20\text{ N}\cdot\text{m}$ )



$\theta=7^\circ$ ( $\theta=20\rightarrow60\text{ N}\cdot\text{m}$ )



$\theta=86^\circ$ ( $T=20\rightarrow60\text{ N}\cdot\text{m}$ )

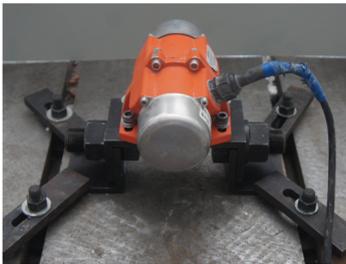
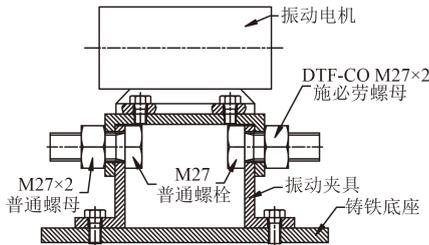


图 7 振动测试台

Fig. 7 Bed test for vibration

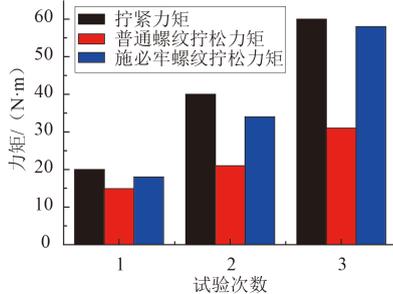


图 8 振动5分钟后拧紧力矩对比

Fig. 8 Comparison for loosening torque with vibration after 5 minutes

## 4 结 论

本文针对月面采样钻具的组件螺纹连接的防松和防错位需求，对取芯钻具在全寿命周期所承受的力学和高低温环境进行了分析，提出了一种施必牢螺纹结构的防松方案，并与标准螺纹开展了实验对比，实验结果表明：

- 1) 施必牢螺纹拧紧-拧松力矩更加稳定，可以保证钻进过程中反转不松脱；
- 2) 单位扭矩下的转角更小，有利于保证钻头和钻杆对应角向关系，从而使排粉顺畅，提高了力载的安全性；
- 3) 施必牢螺纹在一定拧紧力矩下，比普通螺纹具有更强的抗振防松效果。

## 参 考 文 献

[1] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京：中国宇航出版社，2005.  
Ouyang Z Y. Introduction to lunar science[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005.

[2] 彭兢, 黄昊, 向开恒, 等. 月球无人采样返回任务概念设想[J]. 航天器工程, 2010, 19 (5) : 100.  
Peng J, Huang H, Xiang K H, et al. Conception design of a lunar robotic sampling and return mission[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19 (5) : 100.

[3] 郭峰, 李瑰贤, 赵伟民. 螺旋钻具输土速度与阻力的实验[J]. 工程机械, 2006, 37 (009) : 23-26.  
Guo F, Li G X, Zhao W M. Test for soil delivering speed and resistance of auger drill[J]. Construction Machinery and Equipment, 2006, 37 (009) : 23-26.

[4] 侯佑松. 月面钻取采样过程钻具热特性测试系统研制与实验研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2013, 25.  
Hou Y S. Drill thermal characteristic test system development and experiment research of the lunar surface frilling sampling process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. 2013, 25.

作者简介：

马 超 (1985-)，男，工程硕士，主要研究方向：宇航空间机构及控制。

通信地址：哈尔滨市南岗区一匡街2号2F栋432室 (150080)

电话：(0451) 8641387

E-mail: mc0125@qq.com

## Application Research of DTFLOCK Thread in Anti-Loosing Connection of Drilling Tool

MA Chao<sup>1</sup>, LIN Chen<sup>2</sup>, ZHAO Zeng<sup>3</sup>, QIAN Cheng<sup>1</sup>, YIN Shen<sup>3</sup>, PAN Qiuyue<sup>1</sup>, JIANG Shengyuan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. Harbin Polytechnic University, Harbin 150080, China;

3. Beijing Spacecraft Manufacturing Factory, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In the sample drilling task of China's lunar exploration project, the reliability of drilling machines influences its function directly, and can even lead to a success or failure of the sampling task. By analyzing the mechanical properties and high and low temperature environment of drilling tools in the whole life cycle, this paper identifies the failure mode of the drill string, summarizes the anti-loosing method of conventional thread and proposes an anti-loosing scheme of DTFLOCK thread structure, which was compared with standard thread by experiment. The new anti-loosing method provides reference for the design of connection structure of the drilling tool for the engineering departments.

**Key words:** lunar surface sampling; drill connecting thread; DTFLOCK thread

[责任编辑: 宋宏]

(上接第149页)

## Lateral Predictive Guidance for Mars Atmospheric Entry

LONG Jiateng<sup>1,2,3</sup>, GAO Ai<sup>1,2,3</sup>, CUI Pingyuan<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Autonomous Navigation and Control for Deep Space Exploration, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory of Dynamics and Control of Flight Vehicle, Ministry of Education, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The state-of-the-art Mars atmospheric entry predictive guidance method focuses on dealing with the longitudinal motion, while the lateral motion is always regulated by the error threshold with bank angle reversal. Such lateral logic strictly limits the lateral motion. In view of this problem, a lateral predictive guidance method for Mars atmospheric entry is put forward, in which the guidance command is generated on board according to the constraints of lateral motion without planning the error threshold. Such a method can avoid the problem of reversing frequently in the method of planning relevant threshold. Numerical simulation illustrates that the lateral predictive guidance method can satisfy the position accuracy of parachute deployment. At the same time, it can also achieve the design flexibility of entry trajectory lateral motion.

**Key words:** Mars atmospheric entry; predictive guidance; lateral motion

[责任编辑: 杨晓燕]