

月壤取芯钻具热特性有限元分析

赖小明¹, 杜志豪², 王国峰³, 王国欣¹, 莫桂冬¹

(1. 北京卫星制造厂, 北京 100094; 2. 南阳师范学院 机电工程学院, 南阳 473061; 3. 哈尔滨工业大学 材料学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 根据取芯钻具的特点、使用情况以及空间环境要求, 在简化模型的基础上, 利用有限元分析方法研究了月壤取芯钻具的热特性。首先计算了取芯钻具在飞行阶段高、低温存储环境影响下的变形和应力分布; 其次计算了取芯钻具在工作阶段不同钻进条件下的变形及应力分布情况, 提取了关键点的温度和位移参数; 最后研究了取芯软袋与取芯管之间的间隙变化情况。根据有限元分析得到的数据结果, 证明了各部位选择的材料以及配合间隙等满足要求, 可为未来工程应用提供理论依据。

关键词: 取芯钻具; 存储状态; 工作状态; 月壤; 有限元分析

中图分类号: V415.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2017)06-0544-08

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2017.06.007

引用格式: 赖小明, 杜志豪, 王国峰, 等. 月壤取芯钻具热特性有限元分析[J]. 深空探测学报, 2017, 4(6): 544-551.

Reference format: LAI X M, DU Z H, WANG G F, et al. The finite element analysis of thermal property for lunar soil-drilling sampler[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(6): 544-551.

0 引言

月壤钻取采样是我国探月三期工程^[1]的重要任务, 取样方式的设计及样品层理信息保持程度是影响任务质量的关键因素^[2]。深层采样的目标是获取月面以下2 m、纯净无污染并保持一定层理信息的原态月壤样品^[3], 由于月壤的复杂性, 目前多数的研究主要是通过仿真手段研究月壤性质对钻取过程的影响^[4-7], 且对月壤钻探采样装置中的钻杆结构优化和钻进过程进行了研究^[8-9]。哈工大邓宗全教授等对月球次表层钻取采样钻杆的输土原理进行了理论分析, 基于散体力学中连续介质假设, 建立了钻杆回转输土阻力矩模型; 北京卫星制造厂赖小明等^[10]根据月面真空条件下的月壤环境, 制备真空度低于10 Pa、钻进深度不少于2 m的模拟月壤, 并开展钻进过程热特性试验, 试验研究结果表明, 内外管联合取芯钻具能更好地满足我国月球钻探取样返回的要求。对于取芯钻具整体结构在存储状态和极端工作状态下的变形等研究极少。

取芯钻具结构为2 m左右细长杆类结构, 由于使用材料具有不同的热膨胀系数, 温度的变化可能导致内部结构干涉、容易产生扭转变形等问题。本文使用非线性有限元分析软件MSC.Marc对取芯钻具在飞行阶段

高、低温存储环境下的变形和应力分布, 以及在钻取工作状态下的变形及应力分布情况进行了研究, 对取芯钻具结构设计和校核具有重要意义。同时, 通过对月壤取芯钻具的有限元分析, 对取芯钻具材料选择以及不同部位间尺寸配合的校核进行了分析。

1 有限元分析模型的建立

取芯钻具装置所用的材料主要包括: 铝基碳化硅、2A12铝合金、TC4合金、40CrNiMoA和40Cr钢, 根据取芯钻具装置的尺寸, 建立如图1的取芯钻具热力耦合计算模型, 共有118 259个节点, 82 497个单元, 单元类型包括四面体单元和六面体单元, 仿真分析的约束条件如下。

1) 接触条件: 各部位间的连接采用Touch接触, 在热力耦合计算中, 各接触构件间的接触热传导系数假设均相同。

2) 边界条件: (1) 位移边界条件: 固定芯管上接头和钻杆接头的上部节点, 这些节点在X、Y、Z三个方向上的位移固定为0; (2) 力学边界条件: 工作状态中轴向力作用力以均匀面力施加在钻头的底部, 最大扭矩以力偶的形式作用在钻头的轴向节点上;

(3) 温度边界条件: ①存储状态: 初始温度为室温20℃, 在非工作阶段需要耐受极限高温环境温度75℃

和极限低温环境 $-105\text{ }^{\circ}\text{C}$; ②工作状态: 取芯钻具初始温度设定为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 钻头前端最高温度设定为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 假设存在两种情况: 当钻头前端按恒温时, 即在极端条件下, 钻头前端温度在 1 min 内由 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 均匀升高至

$600\text{ }^{\circ}\text{C}$; 当钻头前端按均匀生热, 恒定热流输入时, 设定输入的热流在 20 min 时使钻头前端温度达到 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

2 取芯钻具有限元分析

2.1 存储状态有限元分析

计算取芯钻具在飞行过程中, 低温、高温存储环境影响下的变形及应力分布情况, 在非工作阶段需要耐受极限低温环境和极限高温环境分别为 $-105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, 初始温度设定为室温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。取芯钻具钻头部位构件在低温、高温存储状态下的Z向位移与应力分布如图2~3所示, 图4为取芯钻具钻头部位配合序号示意图, 表1为配合部位的配合尺寸。

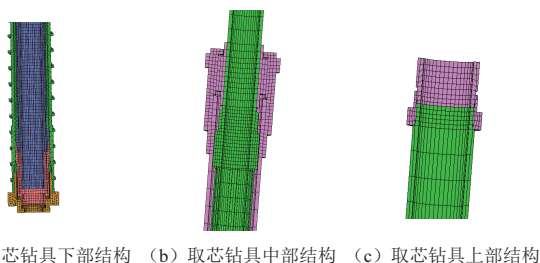


图1 取芯钻具热力耦合计算模型

Fig. 1 The thermal-mechanical coupled finite element model of soil-drilling tool

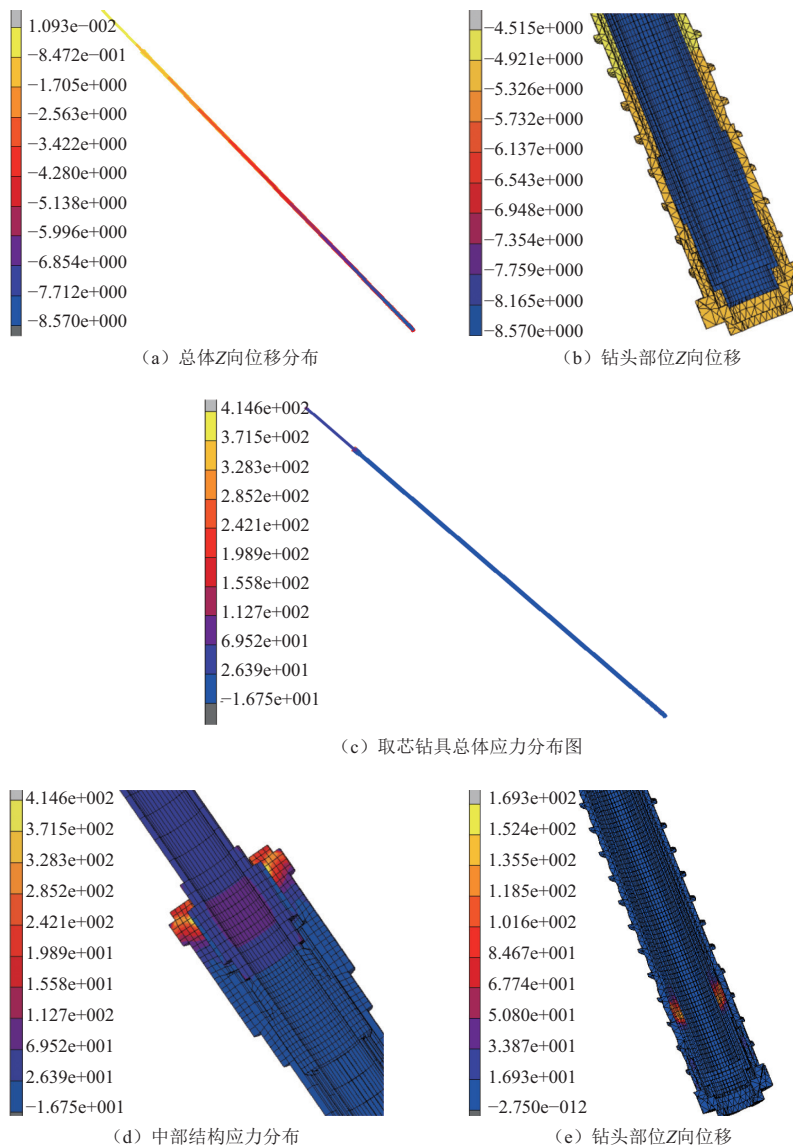


图2 低温存储条件下, 取芯钻具钻头部位构件的Z向位移与应力分布

Fig. 2 The stress distribution and displacement Z of drilling bit at low temperature

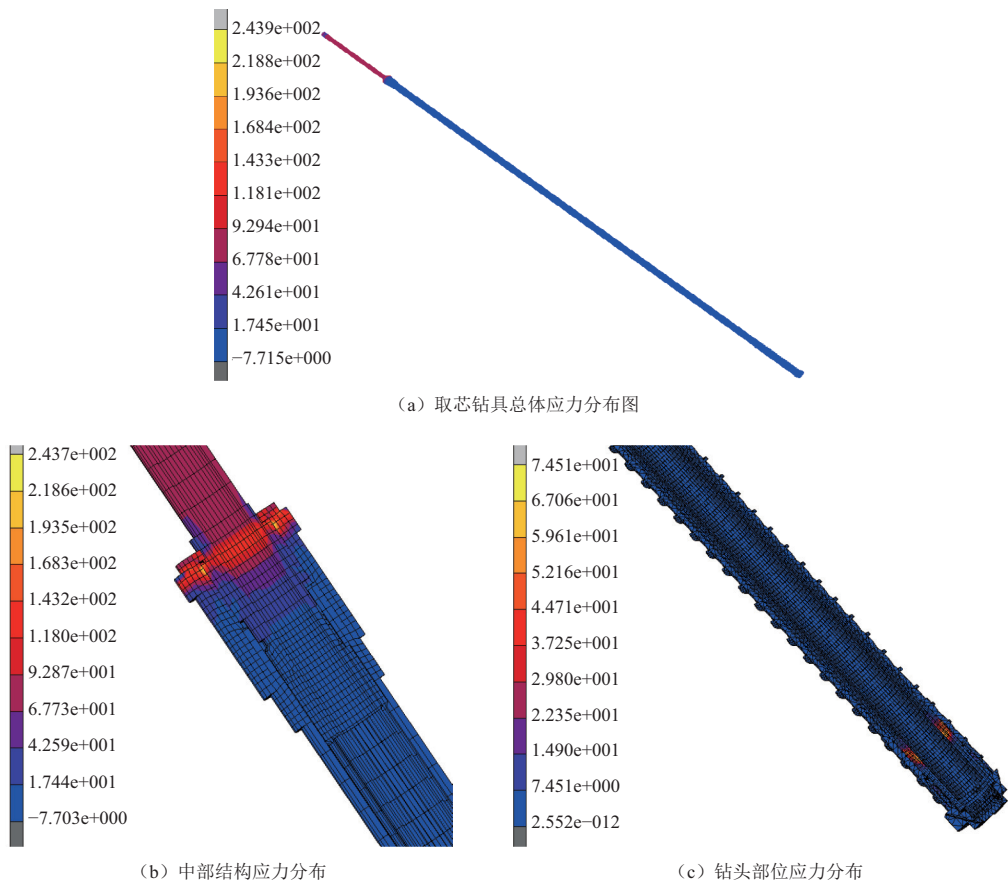


图3 高温存储条件下，取芯钻具钻头部位构件的Z向位移与应力分布
Fig. 3 The stress distribution and displacement Z of drilling bit at high temperature storing stage

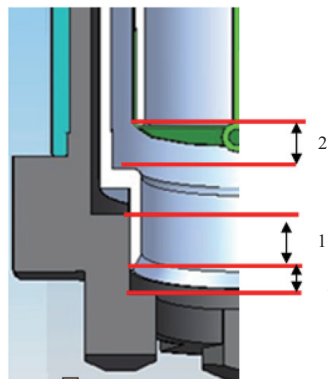


图4 低温、高温存储下钻头部位配合部位序号
Fig. 4 The assembly parts' serial number of drilling bit

从图2~3可以看出，在存储条件下钻头部位和护套部位的轴向位移因各自轴向材料线膨胀系数的不同出现了明显的差别。在低温条件下，钻头部位最大位移为5.1 mm，护套端部最大位移8.57 mm，钻头和护套产生了约为3.47 mm的相对移动；而在高温存储条件下，钻头部位约为2.2 mm，护套部位为3.5 mm，钻头和护套的配合部位的相对位移约为1.3 mm。

热胀冷缩造成的局部热应变，会引起接触部位间的应力变化。在存储条件下，最大应力部位出现在钻杆接头部位，低温存储415 MPa，高温存储244 MPa，这主要是由于有限元模型计算需要，在建立模型时必须对该部位节点固定，热胀冷缩引起内部较大的热应力，实际情况中不会出现。另一应力较大部位为护套和外管结合部位，建模按照连接在一起计算，由于材料热膨胀系数有差别，导致在低温存储时最大应力169 MPa，高温存储时最大应力75 MPa。而实际应为螺纹连接，存在间隙等原因，并不会出现太大的应力。

由表1中3个配合部位在低温、高温存储条件下的计算值可以看出，在存储状态下护套和钻头以及取芯管之间不会发生干涉或者配合失效的情况。从配合尺

表1 低温、高温存储下钻头部位配合尺寸有限元分析测量数据
Table 1 The assembly dimension of drilling bit in finite element analysis /mm

序号	项目	低温 计算值	高温 计算值
1	钻头与取芯机构护套滑动摩擦副配合尺寸 (配合连接1)	1.40	6.10
2	取芯管底端与护套轴向间隙	3.76	3.67
3	取芯机构护套与钻头轴向间隙	5.60	0.90

寸和应力分布来看，在存储条件下，取芯钻具的材料选用和结构设计合理，满足强度和功能要求。

2.2 取芯软袋与取芯管的间隙变量

在存储状态和工作状态，取芯管和取芯软袋之间需要存在适当的间隙量，以保证软袋能够正常使用。在高温存储条件下，取芯管和取芯软袋在高温存储时的径向变形量如图 5（a）所示，两者之间存在一定的径向初始间隙，升温 55℃后，取芯管向外膨胀径向距离为 0.011 mm，取芯袋向内收缩了 0.001 mm，要远小于

初始间隙，余量充足。当低温存储时，取芯管内缩，取芯软袋和取芯管两者之间的径向间隙增大，余量更大。

在极限高温的条件下，假设取芯管和取芯袋温度均升高 400℃，此时取芯管和取芯软袋的径向变形量如下图 5（b）所示，取芯管由于受热向外膨胀量约为 0.082 mm，软袋向内收缩量为 0.008 mm，两者总量大约为 0.09 mm，仍小于两者预设的初始间隙，则说明即使取芯管和取芯袋温度升高 400℃，二者之间仍有适当的间隙量。

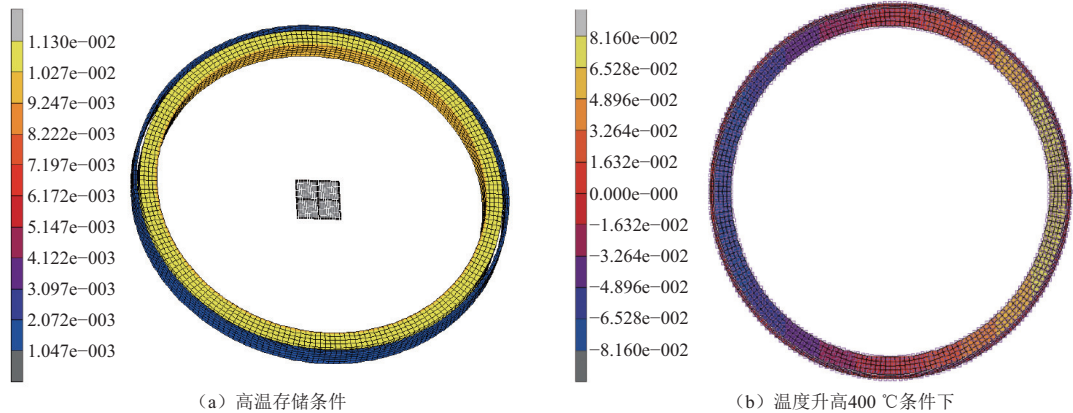


图 5 取芯管和取芯袋的径向变形量
Fig. 5 The variation of radial displacement for the core pipe and soft bag

2.3 工作状态有限元分析

2.3.1 钻头恒定温度

钻头前端的最高温度假定为 600℃，且在钻进过程中保持该温度不发生变化。整个钻具装置的初始温度设定为 25℃，钻头端部最高温度在 1 min 内升至 600℃。图 6 为在该种极限工作状态下的位移、应变和应力分布图。

由图 6 可知 X、Y 向的位移产生的主要原因是由于力矩的作用，钻头在力矩作用下使得钻头以及钻杆发生转动，从而在 X、Y 方向上出现比较大的位移，X 向位移为 -3.6~1.6 mm，Y 向位移为 -2.6~2.7 mm。由温度分布图 6（d）也可看出，越靠近钻头部位温度越高，远离钻头及未接触部位由于热传导困难，温度相对较低，升温使得材料受热膨胀，Z 向最大位移为 2.5 mm；

最大的应力达到 182 MPa，出现在钻头补体与钻杆接触部位，而钻头与钻杆件的应力为 126 MPa。

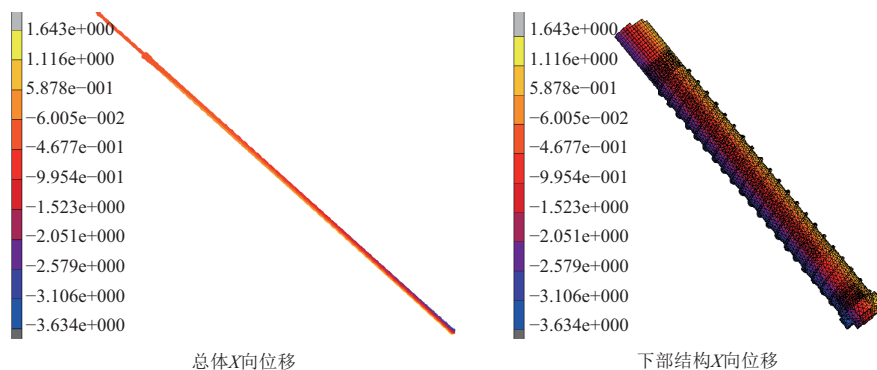
2.3.2 钻头恒定热流

将钻头的温度升高来源假定为外部热流的输入，在外部热流的作用下，钻进 20 min 时，钻头处温度达到 600℃左右，相应的热流大小施加于钻头部位。在钻头恒定热流条件下，钻头的钻进情况主要分为持续钻进 20 min 以及钻进 10 min 停钻 t_0 （ $t_0=1、2、3、4、5$ ）min 后再次钻进 10 min 的不同情况。

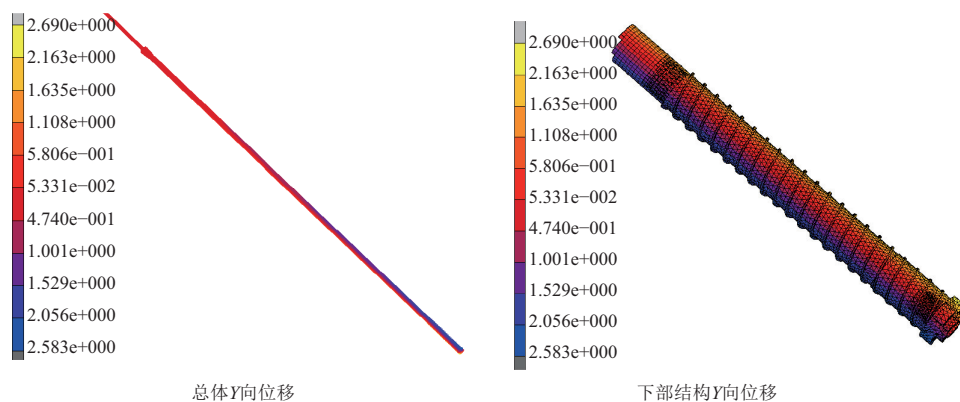
在热流作用下钻具取芯机构的位移、温度和应力分布情况同图 5 基本一致，在不同钻进情况下，三个方向的具体位移的汇总如表 2 所示。图 7 为钻具不同工作状态（最终状态）下的配合尺寸间隙变化曲线图 7（a）和最高温度、最大应力曲线图 7（b）。

表 2 钻具不同工作状态（最终状态）下的位移分布
Table 2 The displacement distribution of drilling bit at different stages

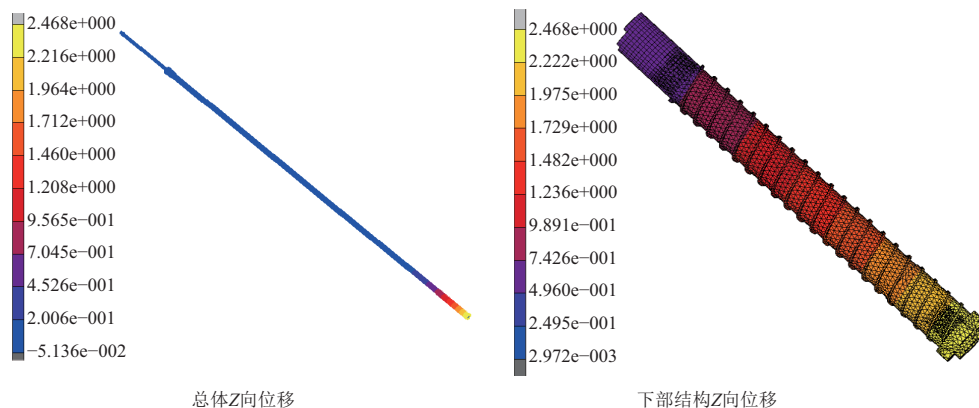
项目	恒温条件	恒流 20 min	t_0/min				
			1	2	3	4	5
X 向位移/mm	-3.600~1.600	-2.200~1.900	-2.200~1.900	-2.250~1.930	-2.250~1.930	-2.250~1.930	-2.200~1.900
Y 向位移/mm	-2.600~2.700	-2.200~2.000	-2.200~2.000	-2.170~2.000	-2.160~2.000	-2.160~2.000	-2.200~2.000
Z 向位移/mm	-0.050~2.500	0~0.700	-0.030~0.700	-0.060~0.707	0~0.704	0~0.707	-0.060~0.720



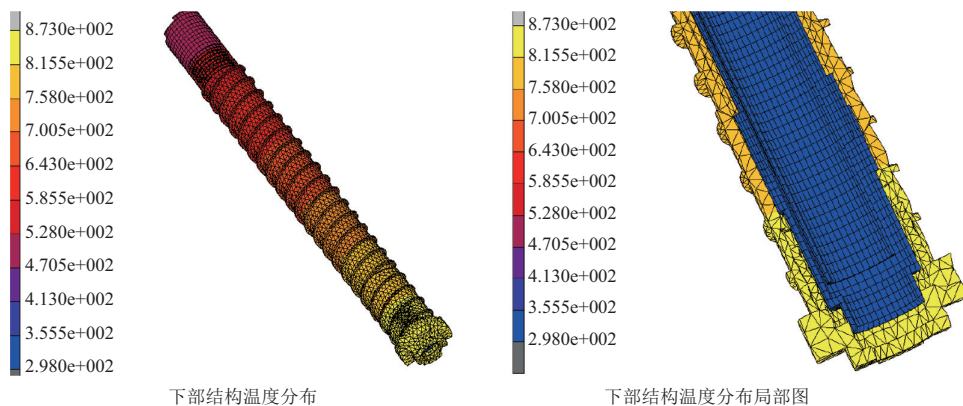
(a) X向位移



(b) Y向位移



(c) Z向位移



(d) 温度分布/K

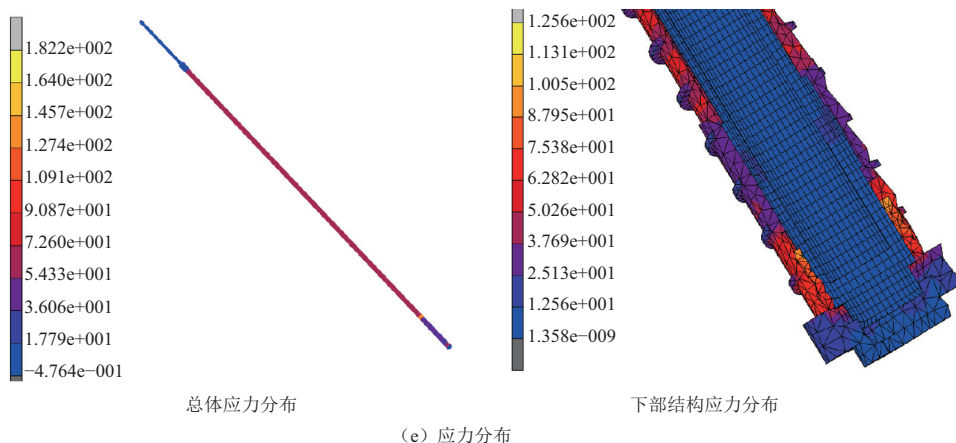
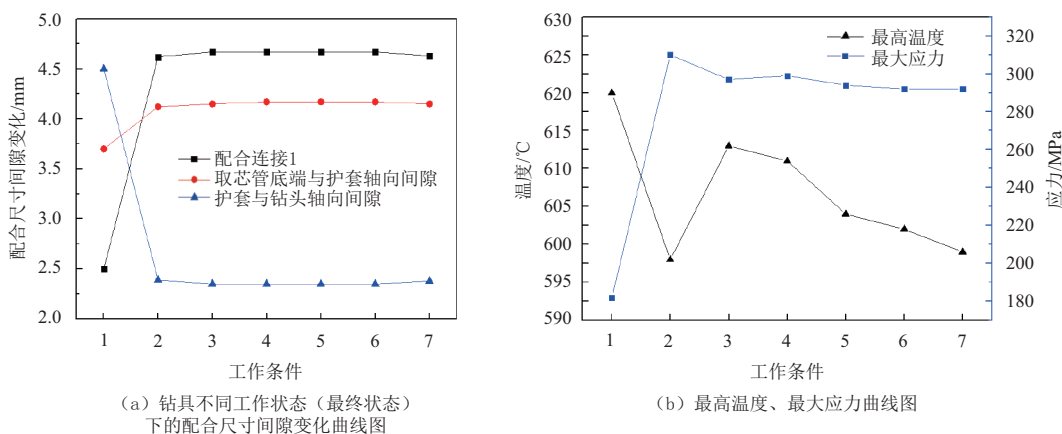


图6 钻具工作状态(最终状态)下的位移、温度和应力分布

Fig. 6 The displacement, temperature and stress distribution of drilling tool at different stages



*注: 工作状态: 1-恒温条件; 2-恒流20 min; 3- $t_0=1$ min; 4- $t_0=2$ min; 5- $t_0=3$ min; 6- $t_0=4$ min; 7- $t_0=5$ min

图7 钻具不同工作状态(最终状态)下*: 配合尺寸间隙和温度、应力曲线图

Fig. 7 The tolerance of assembly sizes and the temperature and stress curves for drilling bit at different stages

表2对比了在不同温度设定输入方式和钻进情况下钻具机构在X、Y、Z向的最大位移量,图7曲线图显示了最高温度分布和最大应力以及3个配合部位的尺寸。X、Y两个方向上的位移基本呈现出对称的形式,Z向变形量主要是由于钻具前端受热膨胀轴向伸长引起的。在恒流条件下,随着停钻时间 t_0 由0增加到5 min,钻头前端最高温度分别为620℃、598℃、613℃、611℃、604℃、602℃、599℃。从图7(b)最高温度变化可以看出,随着停钻时间增加,最高温度仅有小幅度的下降,这也使得钻具前端部位最大Z向位移差别不大,均在0.7 mm左右。

最大应力出现在钻头补体与钻杆接触部位的局部节点处,在恒流条件下,最大应力在290~310 MPa,总体应力在160 MPa左右。最大应力主要是由于局部节点连接,两个接触体之间温度不等引起网格严重变形造成的。

2.3.3 封口器温度

在恒流输入的条件下,工作状态是取芯钻具持续

钻进20 min时,将封口器加入了模型之中,在模型中封口器与取芯管直接接触,由于模型中接触面积要远大于实际接触面积,假定接触传导系数为给定接触传导系数0.01。封口器沿取芯管轴向匀速运动,钻进结束封口器到达取芯管端部。在取芯管端部施加一定的热流,使端部在20 min时可达300℃,以较高温条件研究封口器在钻进过程中的温度变化。封口器和钻头前端部位温度如图8所示。

在接触热传导系数为0.01的条件下,当取芯管端部温度为308℃时,封口器运动至取芯管端部的最终温度为66.5℃,接触热传导系数选取是否适当对封口器的温度影响较大。当该系数选择为0.02或0.12时,封口器最终温度分别为104℃和185℃,均在封口器材料的允许使用温度范围之内,不影响封口器的正常工作。钻头与护套配合部位的最后径向双边间隙为0.06 mm,两者之间仍存在间隙,满足设计要求,可很好地实现钻进过程。

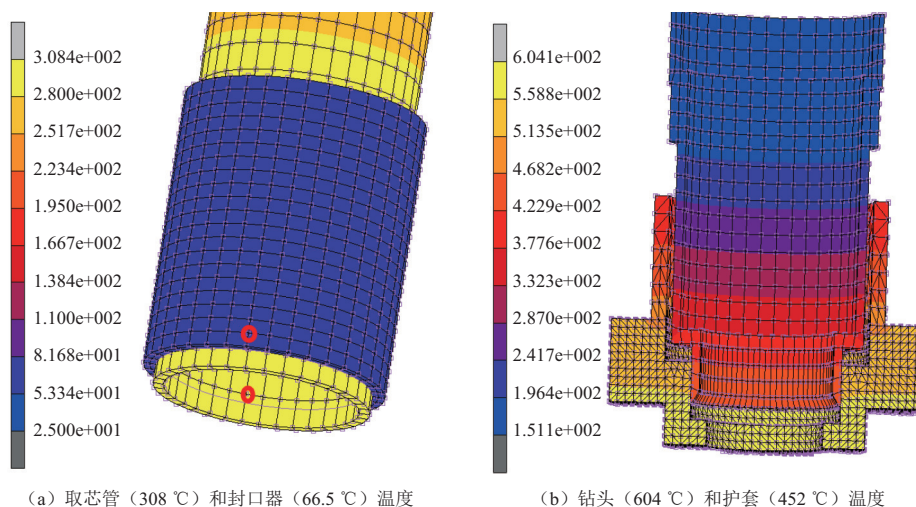


图8 带封口器的钻头前端温度分布

Fig. 8 The front part' temperature distribution of drilling bit

3 结 论

本文通过对取芯钻具进行模型简化的基础上,利用有限元分析的方法分析了取芯钻具的热特性。在飞行阶段不同高、低温存储环境下,研究了结构变形和应力分布,计算了不同钻进工况下的热力耦合特性,提取了关键点的温度和位移参数,并采用极限温升法研究了取芯软袋与取芯管的间隙变化,通过取芯钻具热特性有限元分析验证了各部位材料选择和间隙设计的合理性,为未来月球采样返回工程应用奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 351-358.
- [2] 刘天喜, 魏承, 马亮, 等. 月壤钻采取样方式对样品层理的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 355-361.
- [3] 欧阳自远, 张焱. 从人造卫星到月球探测器[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2007: 155-160.
- [4] 李因武, 李建桥, 邹猛, 等. 月壤力学性质对月球车牵引性能影响的模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 1-4.
- [5] JIANG M J, SHEN Z F, THORNTON C. Microscopic contact model of lunar regolith for high efficiency discrete element analyses[J]. Computers and Geotechnics, 2013(54): 104-116.
- [6] 蒋明镜, 郑敏, 王闯. 月壤双轴试验的剪切带离散元数值分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3801-3809.
- [7] ZHAO C B. Computational simulation of frictional drill-bit movement in cemented granular materials[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2011, 47(8): 877-885.
- [8] 田野, 邓宗全, 唐德威, 等. 月球次表层钻采取样钻杆结构设计及有限元分析[J]. 机械制造, 2013, 51(12): 2013, 7-10.
- [9] 田野, 邓宗全, 唐德威, 等. 月壤钻探采样装置中的钻杆结构参数优化设计及模拟试验[J]. 机械工程学, 2012, 48(23): 10-15.
- [10] 赖小明, 白书欣, 赵曾, 等. 模拟月面环境钻进过程热特性研究[J]. 深空探测学报, 2016, 3(2): 162-167.

作者简介:

赖小明(1969-), 男, 研究员, 主要研究方向: 地外天体采样操控作业系统设计、型号产品研制及其地面验证。

通信地址: 北京市海淀区友谊路104号院(100094)

电话: (010)68114400

E-mail: aml010@vip.sina.com

The Finite Element Analysis of Thermal Property for Lunar Soil-Drilling Sampler

LAI Xiaoming¹, DU Zhihao², WANG Guofeng³, WANG Guoxin¹, MO Guidong¹

(1. Beijing Spacecrafts, Beijing 100094, China;

2. Mechanical and Electric Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China;

3. Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: According to the characteristic and service conditions of the core-drilling device and the requirement of space environment, the deformation and stress distribution of the device were computed at low and high temperatures in store stage with the finite element analysis method based on the simplified model, then deformation and stress distribution of the device under different drilling conditions were also computed, and the temperature and displacement of key points were obtained. Finally, the temperature of sealer and the tolerance between the core pipe and soft bag were also simulated and the tolerance. And the results show that the material of each component and the designed fit clearance can meet the engineering requirements. It can provide theoretical basis for future engineering application.

Key words: soil-drilling sampler; store stage; service stage; lunar soil; finite element analysis

High lights:

- The finite element analysis was used to investigate the thermal property of the lunar soil-drilling sampler.
- The tolerance variations of three different assembly parts were proportional to the temperature variation at storage stage.
- The maximum temperature of drill decreased with the increase of the stop time when the it stopped drilling for 0 to 5 minutes, and no obvious variation of three different assembly tolerances took place.
- The limit temperature rise method was applied to investigate the tolerance variation between the core pipe and the soft bag.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]

(上接第543页)

Mars Entry Adaptive Estimation Method Based on Modified Multiple Models

DENG Jianfeng, GAO Ai, CUI Pingyuan

(1. Institute of Deep Space Exploration, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

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

Abstract: In this paper, aiming at the adverse effects of uncertain parameters, such as Mars atmospheric density uncertainty, on state estimation, a modified multiple model adaptive estimation (MMAE) method using mixture-of-experts framework is proposed. Normalization dimensional processing of different measurement information during entry phase is conducted by the proposed method to overcome the inherent defects such as poor stability and numerical underflow of traditional MMAE method, further improving the state estimation accuracy. The method is also applied to two different navigation scenarios under different Mars entry detection modes. The simulation results show that the proposed method can obtain precise state estimation when there is uncertain disturbance in dynamics system.

Key words: Mars entry; integrated navigation scheme; dynamic pressure observation; adaptive estimation

High lights:

- The multi-model method is used to solve the effect of uncertainty of atmospheric density on the state estimation accuracy in the dynamic pressure measurement aided integrated navigation scheme for Mars entry phase.
- The proposed method solved the problem of poor numerical stability of traditional multi-model adaptive estimation method, and improved the stability of the navigation system.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 任树芳]