

一种月球熔岩管钻进的超声波钻探器

邓乃文¹, 韩光超^{1,2}, 文国军¹, 肖龙^{3,4}, 柏伟^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉) 机械与电子信息学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学深圳研究院, 深圳 518057; 3. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院, 武汉 430074; 4. 中国地质大学(武汉) 行星科学研究所, 武汉 430074)

摘要: 提出一种采用多点驱动旋转的螺旋槽圆锥复合型变幅杆结构, 并研制了适用于熔岩管内壁钻进的高性能超声波钻探器; 为预测超声波钻探器响应特性, 利用等效阻抗网络模型对超声波钻探器进行了建模与分析。通过低重力多角度模拟钻进试验与数据分析, 验证了该钻探器在熔岩管复杂地况应用中的可能性。结果表明, 钻杆直径为3 mm、钻压力为10 N时, 钻进速度随开孔角度的增加而增加, 垂直钻进时钻探器最大空载回转速度为506 rad/min, 钻进速度为6.4 mm/min, 钻进时回转转速为259 rad/min。

关键词: 月球熔岩管; 超声波钻探; 回转冲击式超声波; 等效阻抗网络模型

中图分类号: V19

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)04-0374-11

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230180

引用格式: 邓乃文, 韩光超, 文国军, 等. 一种月球熔岩管钻进的超声波钻探器[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(4): 374-384.

Reference format: DENG N W, HAN G C, WEN G J, et al. An ultrasonic drill for lunar lava tube drilling[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(4): 374-384.

引言

月球熔岩管(Lunar Lava Tubes)正成为国际月球探测与未来基地建设的新领地和选择^[1-3]。这些天然形成的管道是月球表面火山活动的遗产, 洞穴和通道内部形态多样, 具有巨大的潜在科学和开发价值^[4-6]。熔岩管提供了一个独特的相对稳定温度和免受月球表面辐射和温度极端影响的地下环境^[7]。随着人类和机器人任务的不断扩展, 月球熔岩管的研究和勘探变得尤为重要。首先, 熔岩管可以提供宇航员和设备相对安全的居住和操作空间, 避免太空辐射和温度波动, 有望作为未来月球定居计划的理想位置^[8-10]。其次, 熔岩管还具有巨大的科学探索价值, 包含月球地质、历史和成分的重要信息^[11]。另外, 熔岩管的内部可能是未来月球资源重要的储存地, 如潜在的水冰和其它有用资源。

月球钻探和取样设备的发展历程可以追溯到20世纪初期, 随着人类对月球探索兴趣的增长, 各种设备和任务相继出现。苏联在20世纪70年代, 先后成功进行了Luna16^[12]、Luna20^[13-15]和Luna24共3次月球无人自动采样返回任务。其中Luna16与Luna20采用摆杆式

回转钻取采样机构, 采样目标为月表浅层月壤。Luna16实现钻进深度350 mm, 因负载过大, 钻进终止, 取样量为101 g。Luna20实现钻进深度250 mm, 也未完全实现预定目标深度, 钻机在钻进过程中遭遇月岩并数次出现过热现象, 最终取样量为55 g。Luna24首次采用塑料衬管完成取样^[16-17], 完成月面200 cm的侵入, 实际获取样品160 cm, 采样质量为170 g^[18], 钻进过程中, 钻机多次因负载过大而报警。美国于1970—1972年先后6次完成将人类送入月球同时开展人工钻探获取月壤的工作^[19]。“阿波罗”(Apollo)11/12/14采用了贯入取样法, 可通过螺纹连接扩展取样长度^[20-22]。“阿波罗”(Apollo)15/16/17采用了贯入取样器和回转钻进取样器两种取样器^[23], 获取最大3.05 m的连续月壤, 通过各种取样方法共获取了381.7 kg的月壤样品。中国于2020年向月球发射了“嫦娥五号”着陆器^[24], 利用一个2 m长的螺旋钻, 用一根软管收集地下风化层样本。目前, 月球钻探和取样设备主要集中于月球表面开展的探测, 研究月球地表的地质特征、化学成分、地貌等, 并寻找有关月球历史和地质演化的线索。然而, 针对月球熔岩管探测的研究还鲜有报道。美国探

收稿日期: 2023-11-27 修回日期: 2024-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(42241149); 深圳市基础研究项目(JCYJ20220818102601004); 武汉市知识创新专项项目(2022010801010203); 湖北省科技计划项目(2023BAB154)

索建筑公司 (Exploration Architecture Corporation, XArc) 的 Ximenes 等^[25]细化了月球熔岩管探测任务的技术重点, 包括数据采集与分析技术、移动系统技术、建模与仿真技术等。可见, 针对熔岩管地貌探测、机器人研发已开展部分研究, 但缺乏针对熔岩管复杂地形不同工况钻探与取样研究。熔岩管天窗是指空心的地下熔岩管, 由于小天体对上覆岩石的撞击或其它地质活动, 导致顶部坍塌形成洞穴, 洞穴底部与熔岩管相连, 其侧壁暴露出的不同地质层理为了解熔岩管及月球演化提供了绝佳取样窗口, 因此, 熔岩管天窗侧壁钻探与取样具有重要的科学与工程意义。

现有的钻进装置采用传统电机驱动, 系统重量大、能耗高, 增大了发射成本, 且钻进过程中需要钻压力高易造成探测器倾覆。在这一背景下, 超声波钻探器因其所需钻压小、功率低、可控性强、耐高温范围广 ($-273 \sim 430 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 等优点, 可作为一种潜在的解决方案, 用于熔岩管侧壁近水平钻进。1999 年, 美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 首次提出并研制了超声波钻探器 (UTCD)^[26], 相较于传统钻探器, 它具备较低的能源需求、更小的钻探压力, 以及耐受极端高低温环境的显著优势。然而, 传统的直削式超声波钻探器, 存在钻进效率低等诸多制约因素。为了克服这些限制, JPL、英国格拉斯哥大学的学者^[27-32]先后将自由质量块引入超声波钻探器, 提出新型冲击式超声波钻探器, 虽然超声波钻探器钻进速度得到提升, 但随着钻进深度的增加, 冲击式超声波钻探器在排屑方面仍然面临挑战。为应对这一问题, JPL 的研究人员先后提出了将电磁电机与冲击式超声波钻探器相结合^[33-34]及在变幅杆上设置螺旋槽结构^[35]的创新方案。但电磁电机的引入改善了钻探器的钻进速度, 同时增加了钻探器载质量和装置的复杂性。因此, 哈尔滨工业大学的研究团队为提高钻探器排屑效率, 提出了借助 V 型^[36-37]和 Z 型^[38-39]纵扭耦合振子, 将压电陶瓷叠堆的纵向振动转化为纵扭复合振动, 从而实现了钻具的连续回转运动。然而, 现有的超声波钻探器依靠纵扭振子单点驱动旋转, 面对深孔钻探时, 扭转性能差, 将有可能导致钻杆的“卡钻”。

本研究针对超声波钻探器仍然存在回转速度低、钻进速度低等问题, 提出了多点椭圆驱动旋转变幅杆, 建立了纵扭超声波钻探器的等效网络模型, 以预测、优化超声波钻探器响应特性, 利用有限元仿真确

定了钻探器的纵扭谐振频率, 并预测了 P_1 点与 P_2 点轴向和周向两个方向的位移幅值、速度幅值以及加速度幅值。本研究在完成超声波钻探器机械配置的同时, 研究了钻压和自由质量块对钻探器性能的影响。同时针对月球熔岩管复杂地貌钻进, 尽管机械臂可在一定程度上调整开孔角度, 但在恶劣的悬吊作业工况下面向复杂岩石形貌, 无法保证始终垂直钻进。因此本文开展了如图 1 所示的多角度回转冲击钻进, 以研究不同开孔角度对钻探器性能的影响, 为后期设计新型钻杆开展不同开孔角度高速钻进奠定基础。以期在未来熔岩管探测提供新的解决方案, 推动月球熔岩管的科学研究与未来应用。

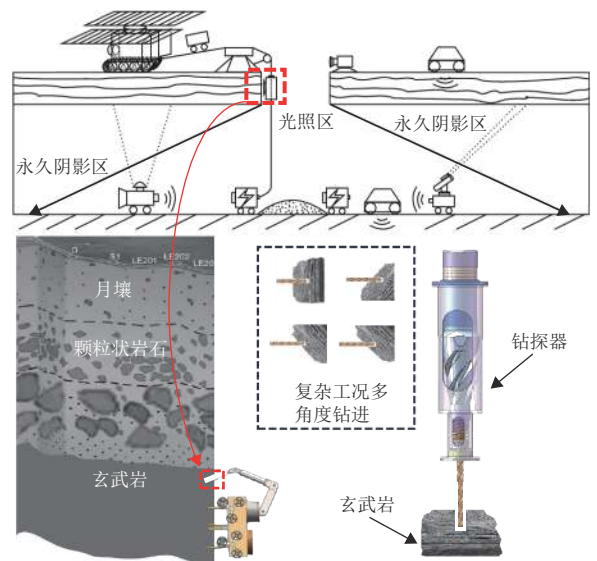


图 1 月球车与机器人联合探测^[7]与超声钻进示意图
Fig. 1 Schematic diagram of joint lunar rover and robot exploration^[7] and ultrasonic drilling

1 超声波钻探器结构及原理

适用于熔岩管的高性能超声波钻探器由半波长换能器和半波长纵扭变幅杆构成。换能器的结构如图 2 所示, 由后端盖、压电陶瓷叠堆、前端盖、连接螺栓和双头螺柱组成。具体的结构参数见表 1。压电陶瓷叠堆由 4 块“+”极和“-”极交替排列的压电陶瓷块以及 5 个铜片组成。压电陶瓷叠堆以轴向 (d_{33}) 模式运行, 通过在陶瓷环的厚度方向上施加电场来实现机械振动或变形。此外, 通过连接螺栓和双头螺柱, 将钻探器组装成一个整体结构。在适当位置, 部分材料被切除以确保连接的牢固性。此外, 通过在圆锥复合型变幅杆上设置多个螺旋槽, 将高频简谐振动有效地放大同时转化为 T 型冲击头两端的椭圆运动, 从而提高了系统的性能。

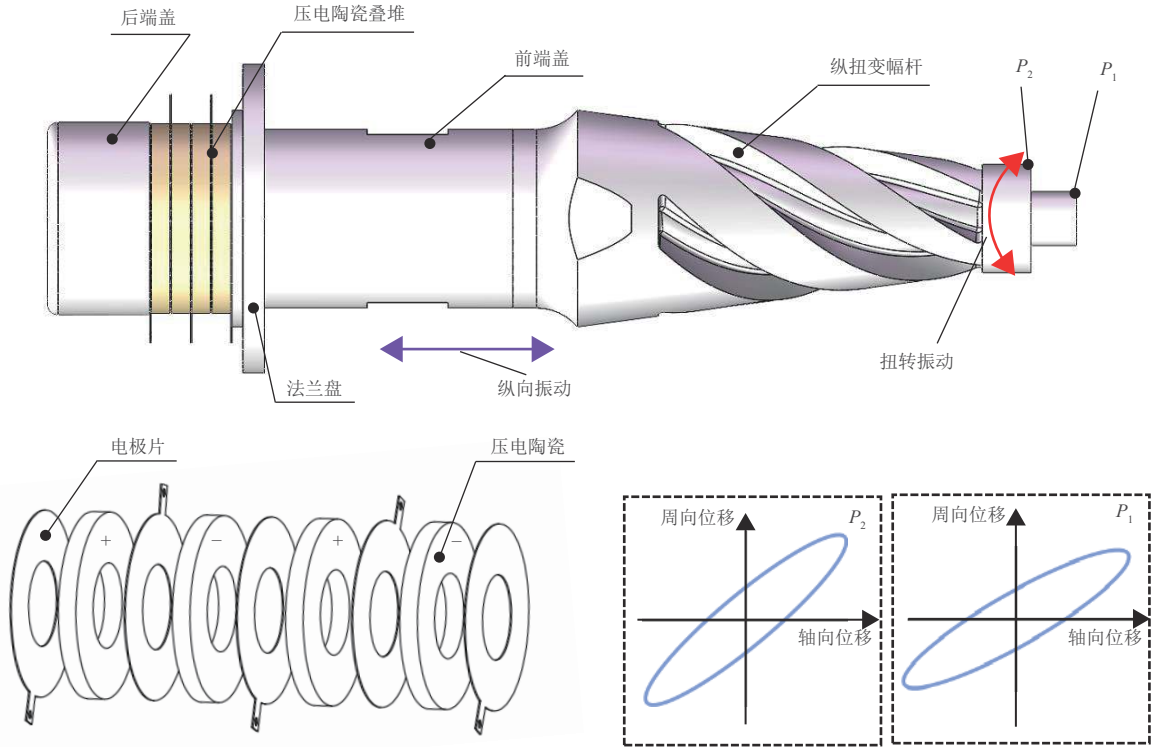


图2 纵扭换能器结构

Fig. 2 Longitudinal torsional transducer structure

表1 钻探器结构参数

Table 1 Driller structural parameters

参数	数值/mm
压电陶瓷片外径 OD_2	35.0
压电陶瓷片内径 ID_2	16.0
压电陶瓷片厚度 l_2	3.0
后端盖长度 l_1	19.0
前端盖长度 l_3	50.0
变幅杆第4段长度 L_1	12.0
变幅杆第5段大端直径 D_2	40.0
变幅杆第5、6段长度 L_2	75.0
变幅杆第7段直径 D_3	20.0
变幅杆第7段长度 L_3	9.0
变幅杆第8段直径 D_4	10.0
变幅杆第8段长度 L_4	8.5

熔岩管超声波钻探器装置结构如图3所示, 该装置包括以下组成部分: 超声波换能器、转子、预紧弹簧、自由质量块、恢复弹簧、铜套、轴承、钻具和外壳。预紧弹簧和恢复弹簧上端分别抵接于转子和钻具, 下端同时抵接在铜套上, 其中转子与钻具通过花键连接, 铜套和轴承过盈配合。其工作原理如图4所示: 压电陶瓷受到高频交流电的激励时, 前端盖产生高频机械轴向振动, 高频机械轴向振动传递至纵扭变幅杆时, 经圆锥阶梯复合式变幅杆作用下, 其轴向振幅得到放大, 并通过纵扭变幅杆上的螺旋槽结构, 将

部分轴向振动转化成周向振动。纵扭变幅杆既实现了多级变幅又实现了多点驱动回转, 较好地解决了现有钻探器振幅小、回转速度低的问题。预紧弹簧和恢复弹簧的抵接作用, 为转子和自由质量块与钻探器的接触提供转动所需的摩擦力, 从而实现自由质量块、转子、钻杆单独/同时连续回转运动。

钻探器后端盖采用304不锈钢, 前端盖采用铝合金, 变幅杆采用钛合金, 压电陶瓷为PZT-8。各个材料的物理特性如表2所示。

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 45 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 45 & 0 & 0 \\ -10 & -10 & 22.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-11} \text{ C/N}$$

$$[c^E] = \begin{bmatrix} 16.6 & 9.8 & 9.5 & 0 & 0 & 0 \\ 9.8 & 16.6 & 9.5 & 0 & 0 & 0 \\ 9.5 & 9.5 & 13.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.1 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$[\epsilon^T] = \begin{bmatrix} 14 & 0 & 0 \\ 0 & 14 & 0 \\ 0 & 0 & 10.25 \end{bmatrix} \times 10^{-9} \text{ F/m}$$

其中, $[d]$ 、 $[c^E]$ 以及 $[\epsilon^T]$ 分别为压电常数矩阵、刚度矩阵和相对介电常数矩阵。

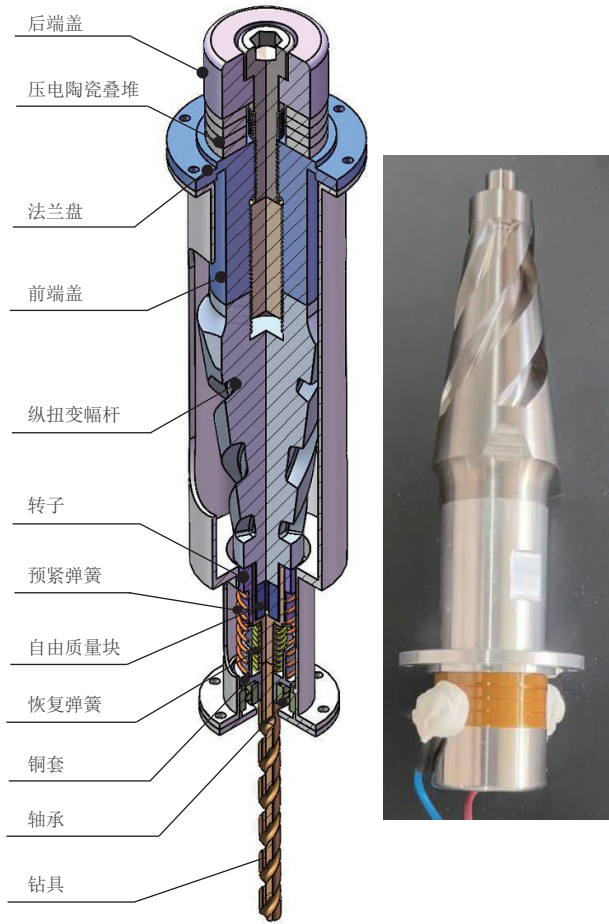


图 3 钻探器和纵扭换能器
Fig. 3 Drill and longitudinal torsion transducers

2 纵扭压电换能器的理论设计

声阻抗特性是钻探器钻进月岩输出特性的关键性能之一, 反映了声波振动频率下换能器的电声转换效率。其中, 最小声阻抗对应着谐振频率, 换能器在特定频率下的电声转换效率达到最高点的频率。在谐振频率下, 换能器表现出卓越的电声转换性能。为深入理解和确定关键特性采用了力-电-声类比方法, 通过构建声阻抗网络模型, 揭示了声阻抗与频率之间的紧密联系。如图5所示, 该模型将换能器的声阻抗划分为8个不同的部分, 每个部分被等效成一个“T型”电学网络, 计算“T型”电学网络的等效阻抗, 最后将其串联, 从而得到换能器的总声阻抗。通过该方法能够更深入地了解换能器的性能, 包括谐振频率和最小声阻抗, 从而设计和优化换能器。前盖板、压电陶瓷叠堆和后盖板均为等截面杆, 变幅杆采用圆锥复合型结构, 由圆锥型杆和阶梯型圆柱叠加而成, 等截面体与变截面体的示意图如图6所示, 其中: F_i , V_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$) 为外力和速度; S_i 为横轴 x 上的截面面积; ρ_i 为换能器第 i 部分的平均密度; c_i 为换能器第 i 部分的平均波速; k_i 为换能器第 i 部分的平均波数; L_i 为换能器第 i 部分的特征长度。在理论设计阶段由于第3段中的薄法兰盘、第4段的倒圆角涉及的材料质量较小, 可暂时忽略其影响。

根据边界条件, 力-电-声类比的等截面体与变截面体等效阻抗如下

$$\begin{cases} Z_{i1} = Z_{i2} = j\rho_i c_i S_i \tan(k_i L_i) \\ Z_{i3} = \frac{\rho_i c_i S_i}{j \sin k_i L_i} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Z_{i1} = \rho_i c_i S_2 \left(\frac{1}{j \tan k_i L_2} - \frac{a}{jk} \right) - \frac{\rho_i c_i \sqrt{S_2 S_3}}{j \sin k_i L_2} \\ Z_{i2} = \rho_i c_i S_3 \left(\frac{1}{j \tan k_i L_2} - \frac{a N}{jk} \right) - \frac{\rho_i c_i \sqrt{S_2 S_3}}{j \sin k_i L_2} \\ Z_{i3} = \frac{\rho_i c_i S_i}{j \sin k_i L_2} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\alpha = (N - 1) / N L_i$; $N = D_2 / D_3$ 。

纵扭变幅杆上螺旋槽结构设计如图7所示, 其螺旋槽不随圆锥直径的改变而改变, 其中绿色部分为变幅杆任意截面内部实心部分, 橙色为外螺旋部分。 φ 为切割部分对应的圆心角, h 为螺旋槽深度, $b + h = 10 \text{ mm}$, 根据几何特征, 两部分截面积表达式如下

$$\begin{cases} s_i = \pi r_1^2, & 0 \leq r_1 \leq r_c \\ s_e = \pi r_2^2 - n \frac{\varphi}{360} (\pi \cdot 10^2 - \pi b^2), & r_c \leq r_2 \leq r \end{cases} \quad (3)$$

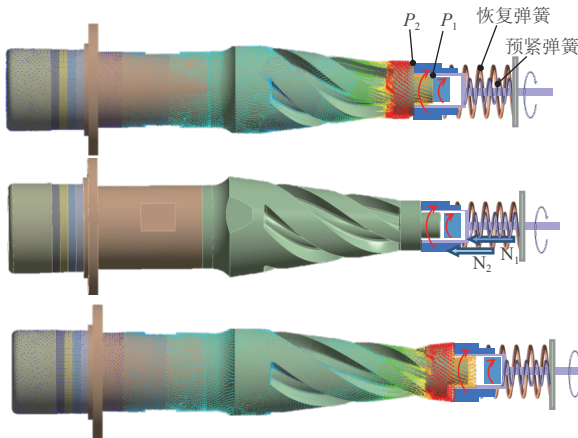


图 4 钻探器的工作原理
Fig. 4 Working principle of the driller

表 2 材料特性

Table 2 Material Properties

材料	密度 / (kg·m ⁻³)	杨氏模量 / (GPa)	声速 / (m·s ⁻¹)
304 不锈钢	7 930	209	5 130
铝合金	2 730	72	5 070
钛合金	4 430	115	4 977
PZT-8	7 500	—	3 170

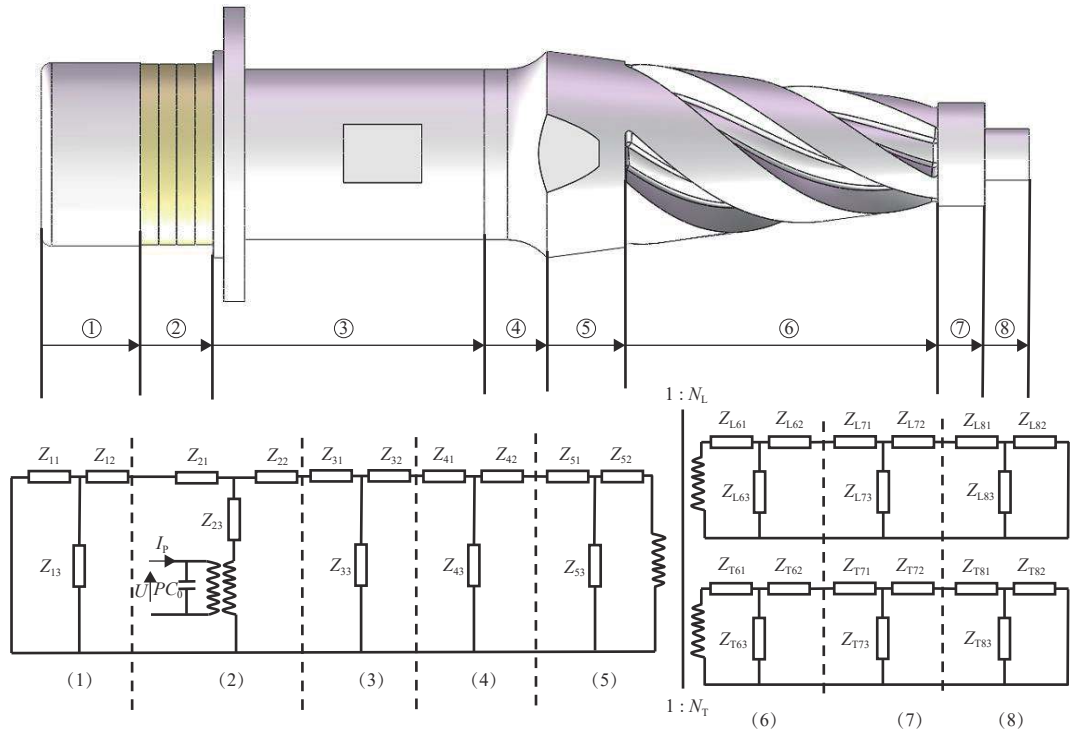


图5 纵扭换能器的等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of a longitudinal torsional transducer

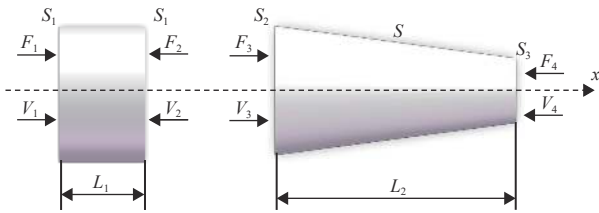


图6 等截面体与变截面体图解

Fig. 6 Illustration of isotropic and variable cross-section bodies

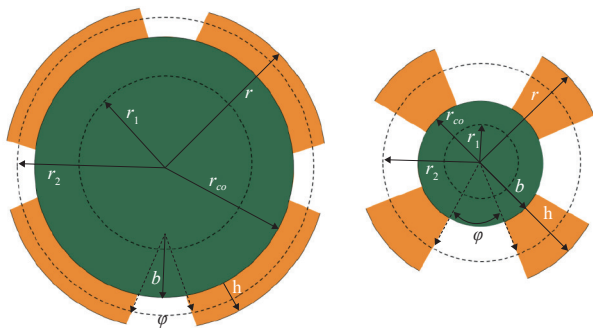


图7 螺旋槽的底部与顶部剖面

Fig. 7 Bottom and top sections of the helical groove

压电陶瓷在高频交流电激励作用下所产生的机械轴向振动力 F ，其传递至在螺旋槽的底部时，可将振动力分为内部实心圆锥部分的 F_2 和外螺旋部分所受的 F_2 。 F_1 和 F_2 在螺旋槽 θ 引导下，将其分解为纵向力 F_l 和切向力 F_t 以及螺旋槽上切向力作用下的扭矩 M

$$\begin{cases} F_l = F_1 + F_2 \cos \theta \\ F_t = F_2 \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

$$M = \int_0^{r_{co}} r_1 \frac{F_t}{\pi r_1^2} 2\pi r_1 dr_1 + \int_{r_{co}}^r r_2 \frac{F_t}{\pi r_2^2 - n \frac{\varphi}{360} (\pi 10^2 - \pi b^2)} 2\pi r_2 dr_2 \quad (5)$$

如图5右端所示，通过两个电路模型分别表示了螺旋槽结构在纵向和扭转方向上的电感和电容效应，以分析该结构在不同方向上的响应和特性。具体的电感和电容根据螺旋槽的几何参数和工作频率来计算， Z_l 和 Z_t 分别为第6、7、8段纵向总等效电阻值和扭转总等效电阻值， Z_{lt} 为纵向与扭转转换后的总等效电阻。其中采用转换系数 N_l 和 N_t 实现纵向振动等效电路和纵扭复合振动等效电路相互作用，其表达式如下

$$\begin{cases} N_l = \frac{F_l}{F_1 + F_2} \\ N_t = \frac{M}{F_1 + F_2} \end{cases} \quad (6)$$

$$Z_{lt} = \frac{Z_l Z_t}{(N_l)^2 Z_l + (N_t)^2 Z_t} \quad (7)$$

根据梅森等效原理的力-电-声类比中，振动换能器的节面振动幅值为零时，由于没有振动来改变电路中的电流或电压，振动换能器的电特性不会发生变化。因此，阻抗等效值为零，表明在平衡状态下，振

动换能器的电特性是非活跃的, 不会产生电流和电压响应。换能器的节面左右两边回路阻抗等效值为零, 因此可得到谐振频率方程

$$\frac{Z_{11}Z_{13}}{Z_{11} + Z_{13}} + Z_{12} + Z_{21} + Z_{23} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\left(\frac{(Z_{52} + Z_{4t})Z_{53}}{Z_{52} + Z_{4t} + Z_{53}} + Z_{51} + Z_{42}\right)Z_{43}}{\frac{(Z_{52} + Z_{4t})Z_{53}}{Z_{52} + Z_{4t} + Z_{53}} + Z_{51} + Z_{42} + Z_{43}} + Z_{41} + Z_{32} + Z_{33} = 0 \quad (9)$$

由式 (8) 和 (9) 可知, 压电换能器是一种能够将电能和机械能相互转换的装置, 其中机械阻抗与其组成部分的材料、长度和横截面积都密切相关。同时, 压电换能器中的压电元素的排列方式, 如串联或并联, 也会影响到机械阻抗。这些参数的调整可以用于优化压电换能器的性能, 以满足特定熔岩管高效钻进应用的需求。

3 纵扭压电换能器仿真分析

3.1 特征频率分析

为了初步验证理论设计的合理性和有效性, 并深

入了解和优化压电换能器的振动特性、结构强度和振动模态, 模态仿真在压电换能器的研究和设计中具有重要意义。该过程有助于确定钻探器固有频率、振动模式以及与实际应用相关的振动性能, 从而避免潜在的共振问题, 进行结构优化实现精确振动控制, 并提高可靠性。本研究采用 ANSYS 软件进行特征频率、频域分析。建立压电换能器三维模型并导入 ANSYS 软件, 定义使用的材料参数, 选择四面体自由划分方式进行网格划分, 最终使用 Block Lanczos 方法计算压电换能器的 1~40 阶模态, 频率搜索范围设置 0~40 kHz。仿真结果如图 8 所示, 图中显示了第 23、24、25、26 阶的模态振型图, 其中第 23 和第 26 阶为弯曲模态, 第 24 阶为扭转模态, 第 25 阶为本文所需的纵扭模态。同时第 24 与第 26 阶模态频率分别为 23 303 Hz 和 26 792 Hz, 与第 25 阶模态频率分别相差 1 080 Hz 和 2 409 Hz, 在换能器模态仿真中, 模态频率的差异以及相邻频率之间的差异是重要的因素, 用于判断是否会出现模态错乱。具体来说, 相邻模态频率之间的差异应该超过 700 Hz, 以确保模态在振动系统中不会相互干扰。因此, 本研究设计的结构模态分析方案是可行的。

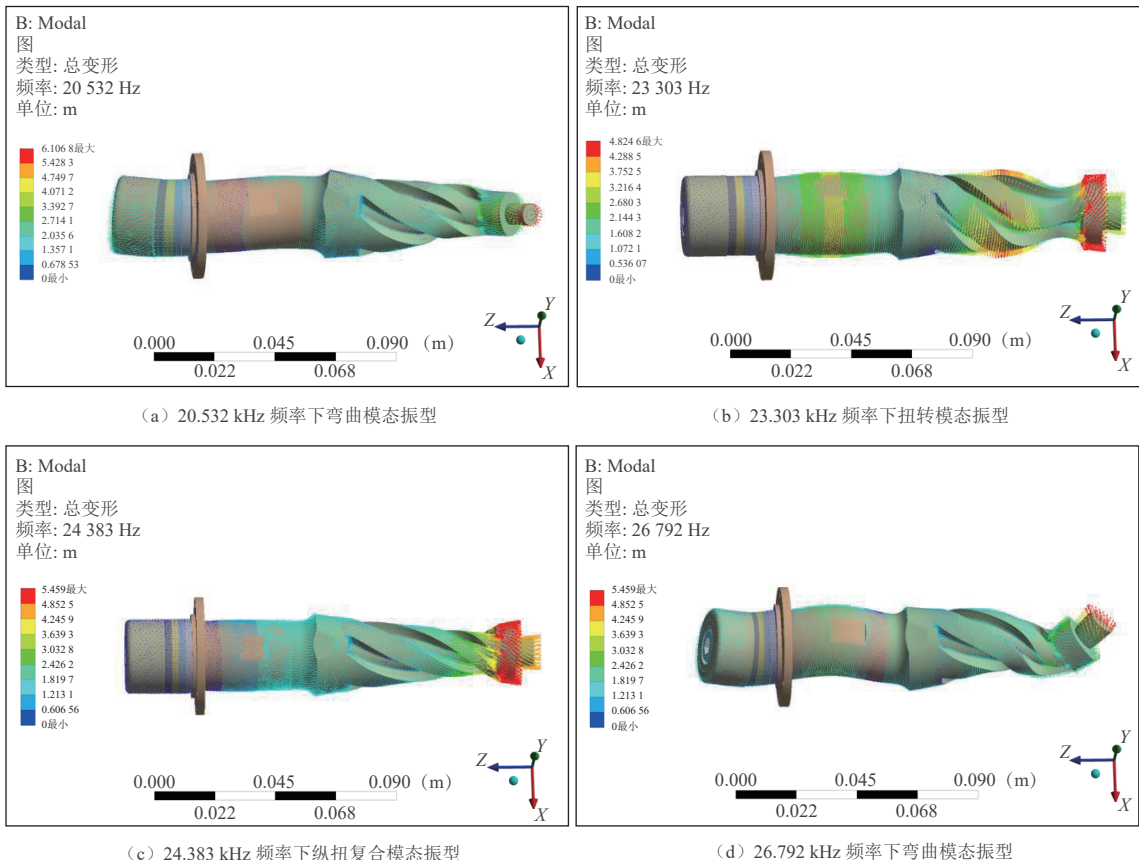


图 8 钻探器模态仿真振型

Fig. 8 Driller modal simulation vibration patterns

3.2 温度-模态频域分析

为研究超声波钻探器在不同工作条件下的频率变化,利用ANSYS有限元软件建立压电换能器频率-温度有限元模型。通过模拟分析,获取振动频率随温度变化,从而优化设计、提高效率,并确保设备在地外恶劣环境应用中的可靠性。其几何模型、网络划分、应用边界条件的定义方式均与3.1节特征频域分析相同。定义材料属性时,需在有限元模型中定义材料的压电系数、介电常数、密度、热膨胀系数等,其中304不锈钢的热膨胀系数为 $17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,压电陶瓷的热膨胀系数为 $3.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,铝合金的热膨胀系数为 $23.21 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,钛合金的热膨胀系数为 $10.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,同时在模型中引入随温度变化的弹性模量与泊松比,这些参数对于模拟压电效应和温度响应至关重要。

仿真结果如图9所示,压电换能器的固有频率随温度的升高而降低,近似呈线性下降趋势。当环境温度由 -175°C 上升至 100°C 时,其固有频率由 26.224 kHz 下降到 23.429 kHz ;其与扭转频率的差值平均为 3 kHz ,其与弯曲频率的差值平均为 1.2 kHz 。学者的试验结果^[40-41]已提供了有关压电陶瓷性能在极端温度条件下的性能表现。此外,本研究采用的压电陶瓷具有较高的居里温度,约为 300°C ,确保了该材料在地外天体环境中应用的可行性。通过对换能器的仿真分析,本文进一步验证了压电换能器在高低温环境中抗温度干扰能力。

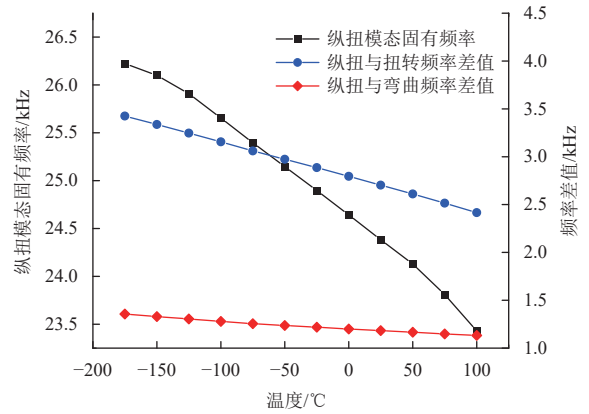


图9 压电换能器的频率-温度曲线

Fig. 9 Frequency-temperature curve of piezoelectric transducer

3.3 频域分析

特征频率分析是一种将信号频谱与换能器的特定频率响应相对比的方法,以确定换能器工作频率范围、谐振频率等参数。因此,为确定换能器的共振频率以及得到换能器的频率响应曲线,本节采用ANSYS有限元仿真,在法兰盘上施加固定约束,系统搜索频率为 $24\ 183 \sim 24\ 583 \text{ Hz}$,设定步数为40,并在压电陶瓷的极化方向设置 $150 V_{p-p}$ 电压峰值,阻尼比设置为0.0014,可得出 P_1 点与 P_2 点轴向以及周向两个方向的位移幅值、速度幅值以及加速度幅值曲线图。

如图10所示,换能器在接近固有频率时的振动响应最大。变幅杆冲击头 P_1 点和 P_2 点的轴向和周向的振

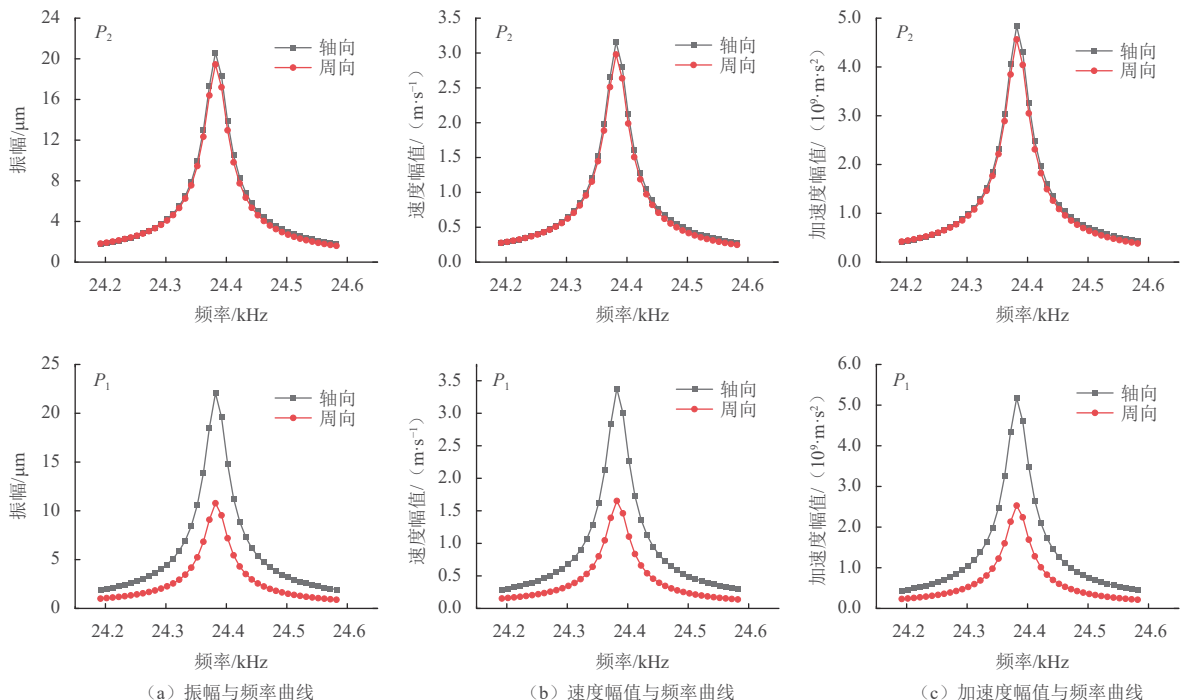


图10 P_1 点与 P_2 点频率关系曲线图

Fig. 10 Frequency relationship curve of point P_1 and point P_2

幅、速度幅值、加速度幅值在固有频率下, 均达到最大值。根据频域分析得出其最大值的频率为24 383 Hz, 与模态分析一致, 验证了纵扭型换能器设计的合理性, P_1 点和 P_2 点同时驱动回转的科学性。同时, 从图中可以看出, P_2 点周向的振幅、速度幅值、加速度幅值大于 P_1 点的周向幅值, 这是由于螺旋槽不随圆锥直径的改变而改变, 扭转振动能量主要作用于外螺旋槽部分。因此, T型冲击头后端 P_2 点的周向振动能量大于 P_1 点的周向幅值, 图8中也显示出这一现象。

4 回转冲击式钻探器性能测试

本文重点研究了一款用于熔岩管复杂工况钻进的超声波钻探器, 因此本节重点研究钻探器不同电压峰值下振幅的输出性能、不同自由质量块及不同钻压下的输出性能和不同开孔角度下的钻进速度。搭建了激光测振平台、模拟玄武岩钻进平台用于验证及测试钻探器输出性能。

4.1 换能器振幅输出性能

首先, 搭建了激光测振平台(如图11), 利用电脑连接超声波驱动器、超声波变压器为钻探器提供所需的激励电压峰值, 同时使用激光多普勒测振仪(基恩士LK-H020)对焦于 P_1 点和 P_2 点, 测量 P_1 点的轴向位移和 P_2 点的周向位移。设置100~225 V_{p-p} 电压峰值, 钻探器幅值输出结果如图12所示。当电压峰值在100 V_{p-p} ~225 V_{p-p} 范围内变化时, P_1 点的轴向位移由10.6 μm 增加至56.2 μm , P_2 点的周向位移由9.2 μm 增加至47.2 μm 。通过换能器振幅测试, 换能器具有较大的轴向和周向振幅, 可显著改善钻探器的钻进、排屑性能。

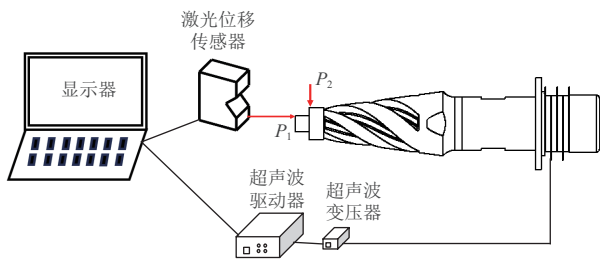


图 11 纵扭换能器激光测振原理图
Fig. 11 Schematic diagram of longitudinal torsional transducer laser vibration measurement

4.2 钻探器多工况钻进输出性能

为验证钻压力、自由质量块和开孔角度对钻探器钻进性能的影响, 搭建了钻探器性能测试平台, 如图13所示。钻探器通过导轨滑块安装于平台, 砝码为钻探器提供钻压力, 右侧为可倾斜导杆式钳夹用于固定玄武岩, 模拟月球熔岩管侧壁不同开孔角度玄武岩钻进。

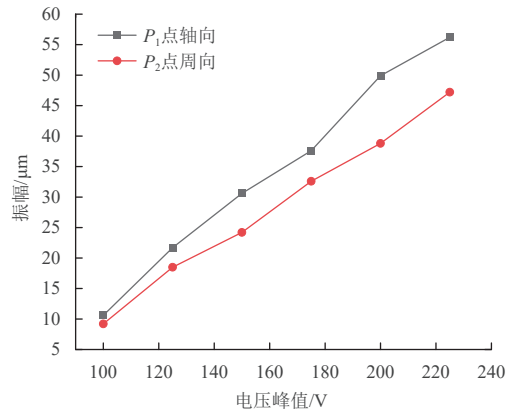


图 12 换能器纵扭幅值输出特性测试结果
Fig. 12 Test results of transducer longitudinal torsional amplitude output characteristics

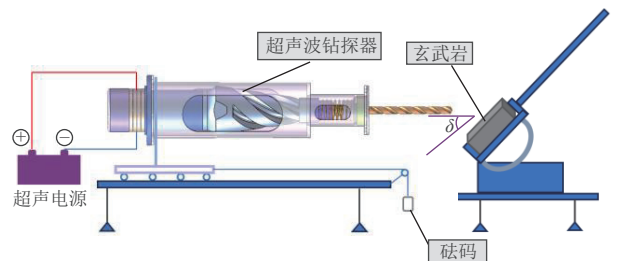


图 13 超声波钻探器钻进性能测试平台
Fig. 13 Ultrasonic driller drilling performance test platform

试验中制作了质量分别为4.1、4.4、4.7、5、5.3、5.6 g的自由质量块, 直径与冲击头前端一致。开展了空载回转速度测试试验以及密度为3.03 g/cm^3 , 抗压强度为140.3 MPa的天然玄武岩钻进试验。测试试验中激励电压峰值为225 V_{p-p} 、频率为23 598 Hz, 钻进压力为10 N。测试结果如图14所示, 随着自由质量块质量的增加, 钻进速度与空载转速先逐渐增加然后降低。当自由质量块质量为5 g时, 其空载回转速度为506 rad/min , 钻进时回转转速为259 rad/min , 钻进速度为6.4 mm/min 。

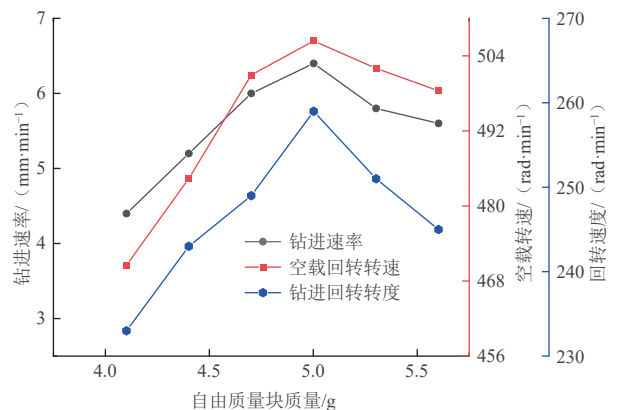


图 14 自由质量对钻探器性能测试结果
Fig. 14 Test results of free mass block on driller performance

同时使用5 g自由质量块, 展开了不同钻压下玄武岩的钻进实验, 实验结果如图15所示, 钻进速度随着钻压的增大先逐渐增大后减小, P_1 点与 P_2 点同时驱动的钻进速度为6.4 mm/min, 相较于单点驱动旋转显著的提升了其钻进速度。同时测量了钻探器钻进时的回转速度, 即排屑效率。10 N钻压下, P_1 点与 P_2 点同时驱动的回转速度为259 rad/min, 相较于 P_1 点单点驱动的回转速度提升了70%。因此, 验证了所提出的超声波钻探器, 具有出色的钻进、排屑效率。

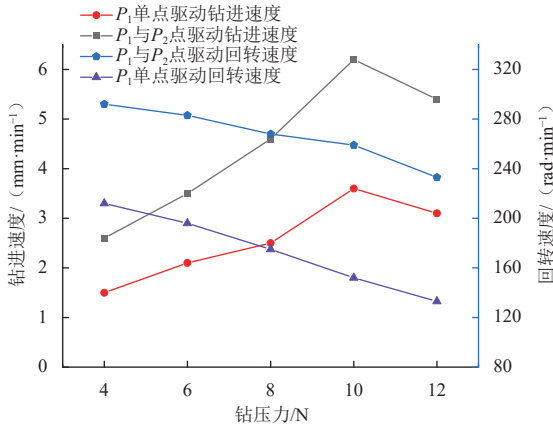


图 15 钻压力对钻探器性能测试结果

Fig. 15 Test results of drilling pressure on driller performance

为应对熔岩管复杂的地貌特点, 本文开展了不同开孔角度的旋转钻进, 以研究其对钻探器性能的影响。测试结果如图16所示, 钻进速度随开孔角度的增加而增加, 垂直钻进时钻进速度为6.4 mm/min。如图17所示, dl 为主切削刃微元的长度, 不同开孔角度下钻进的独特特性将引起进给切削力 dF_y 和主切削力 dF_z 分布和摩擦变化, 进而影响了钻进速度。因此, 导致这一现象的原因可能与前刃设计、钻头与岩石之间的摩擦以及不同角度钻进的安全性有关。未来的月

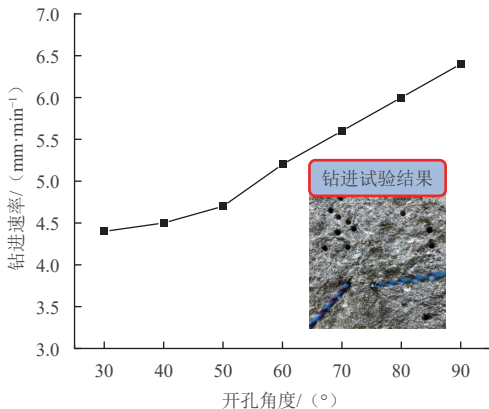


图 16 开孔角度对钻探器性能测试结果

Fig. 16 Test results of hole-opening angle on driller performance

球熔岩管钻探任务中, 可针对不同地形研制最适配的钻杆, 以提高钻探器工作效率, 同时避免“卡钻”等现象。

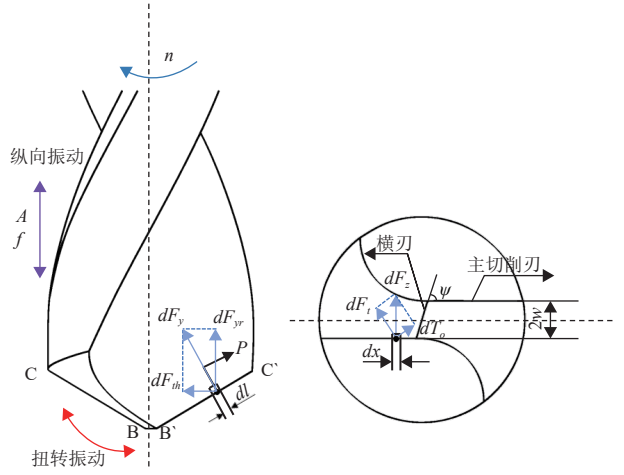


图 17 钻具结构与切削刃微元受力分析示意图

Fig. 17 Schematic diagram of drilling tool structure and cutting-edge microelement force analysis

5 结论

本文设计了一种用于熔岩管侧壁玄武岩钻进的超声波钻探器, 根据复杂的地貌特点的钻探需求, 对钻探器整体结构进行了设计、仿真和优化, 并针对玄武岩, 进行了钻探性能试验得到的结论如下:

- 1) 为提高旋转转速和钻进速度提出了一种同心圆螺旋槽圆锥复合型变幅杆结构, 并通过有限元分析及试验验证了钻探器驱动原理。
- 2) 建立了纵扭复合式换能器的声阻抗模型, 以预测超声波钻探器响应特性。
- 3) 利用有限元模态与频域分析确定了钻探器的纵扭谐振频率, 并预测了 P_1 点与 P_2 点轴向以及周向两个方向的位移幅值、速度幅值以及加速度幅值。
- 4) 验证了钻压、自由质量块、不同开孔角度对钻探器钻进性能的影响, 当自由质量块为5 g时, 其空载速度为506 rad/min, 同时钻进速度随开孔角度的增加而增加, 垂直钻进时, 钻探器钻进速度达到最大6.4 mm/min, 钻进时回转转速为259 rad/min。

未来将会进一步优化钻探器性能, 并验证钻探器在高低温下的钻探性能, 以提高熔岩管复杂地貌的钻进速度, 同时满足钻探器轻量化、低功耗、低轴向力需求, 并设计取样器, 以适应月球熔岩管的钻取需求。

参 考 文 献

[1] GREEN J. The geology of the lunar base[J]. *Annals of the New York*

- Academy of Sciences, 1963, 105(9): 491-625.
- [2] HALLIDAY W R. Terrestrial pseudokarst and the lunar topography[J]. Bulletin of the National Speleological Society, 1966, 28(4): 167-170.
- [3] HURWITZ D M, HEAD J W, HIESINGER H. Lunar sinuous rilles: distribution, characteristics, and implications for their origin[J]. Planetary and Space Science, 2013, 79: 1-38.
- [4] HARUYAMA J, HIOKI K, SHIRAO M, et al. Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(21): 1-5.
- [5] HARUYAMA J, MOROTA T, KOBAYASHI S, et al. Lunar holes and lava tubes as resources for lunar science and exploration[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 139-163.
- [6] WAGNER R V, ROBINSON M S. Distribution, formation mechanisms, and significance of lunar pits[J]. *Icarus*, 2014, 237: 52-60.
- [7] 肖龙, 黄俊, 赵佳伟, 等. 月面熔岩管洞穴探测的意义与初步设想[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48(11): 119602.
- XIAO L, HUANG J, ZHAO J W, et al. Significance and preliminary proposal for exploring the lunar lava tubes[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2018, 48(11): 119602.
- [8] HORZ F. Lava tubes-potential shelters for habitats[C]//Proceedings of Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. [S. l.]: Lunar and Planetary Institute, 1985: 405-412.
- [9] COOMBS C R, HAWKE B. A search for intact lava tubes on the Moon: Possible lunar base habitats[C]//Proceedings of The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. [S. l.]: Johnson Space Center, 1992: 219-229.
- [10] OPALKO J. Maria mitchell's haunting legacy[J]. Sky and Telescope, 1992(83): 505-506.
- [11] LÉVEILLÉ R J, DATTA S. Lava tubes and basaltic caves as astrobiological targets on Earth and Mars: a review[J]. *Planetary and Space Science*, 2010, 58(4): 592-598.
- [12] CHERKASOV I I, SHVAREV V V. New Soviet investigations of lunar soil and its analogs[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1977, 14: 320-326.
- [13] CADOGAN P H, TURNER G. 40Ar—39Ar dating of luna 16 and luna 20 samples[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1977, 284(1319): 167-177.
- [14] CADOGAN P H, TURNER G. Luna 16 and Luna 20 revisited[J]. Meteoritics, 1975, 10: 375-376.
- [15] TARASOV L S, IVANOV A V, STAKHEEV Y I. Luna 16 and the lunar soil[J]. Zemlia I Vselennaia, 1970, 6: 2-3.
- [16] ALLTON J H. Lunar samples: Apollo collection tools, curation handling, Surveyor III and Soviet luna samples: NASA-JSC-17994[R]. Washington: NASA, March 2009.
- [17] ROEDDER E, WEIBLEN P W. High - silica glass inclusions in olivine of Luna-24 samples[J]. *Geophysical Research Letters*, 1977, 4(10): 485-488.
- [18] BARBER D J. Electron microscopy of radiation damage and microstructure in soils from the Luna 24 core[C]// Proceedings of Mare Crisium: the View From Luna 24. New York: Pergamon Press, 1978: 195-206.
- [19] JOHNSTON R S, HULL W E. Apollo missions[J]. Biomedical Results of Apollo, 1975(368): 9-40.
- [20] BERRY R. Launch window and translunar, lunar orbit, and transearth trajectory planning and control for the Apollo 11 lunar landing mission[C]//Proceedings of The 8th Aerospace Sciences Meeting. New York: [s. n.], 1970.
- [21] ALLTON J H. Catalog of Apollo lunar surface geological sampling tools and containers: NASA 9-17900[R]. Houston: Johnson Space Center, 1989.
- [22] LOFGREN G E, HORZ F. Multiple Approaches to down sizing of the lunar sample return collection[C]//Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference. Houston: [s. n.], 2010.
- [23] ZACNY K, DAVIS K, PAULSEN G, et al. Drill system development for the lunar subsurface exploration[J]. COSPAR Scientific Assembly, 2008, 37: 3580.
- [24] PANG Y, ZHANG T, WEI H Y, et al. Influence of lunar regolith compressibility on sampling performance of thick wall spiral drills[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(2): 350-362.
- [25] XIMENES S W, ELLIOTT J O, BANNOVA O. Defining a mission architecture and technologies for lunar lava tube reconnaissance[C]// Proceedings of 13th ASCE Aerospace Division conference on engineering, construction, and operations in challenging environments and 5th NASA/ASCE workshop on granular materials in space exploration. California, USA: NASA, 2012.
- [26] BAR-COHEN Y, CHANG Z S, SHERRIT S, et al. The Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC) as a subsurface drill, sampler, and lab-on-a-drill for planetary exploration applications[C]//Proceedings of Smart Structures and Materials 2005: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. [S. l.]: SPIE, 2005.
- [27] SHERRIT S, BAO X Q, CHANG Z S, et al. Modeling of the ultrasonic/sonic driller/corer: USDC[C]//Proceedings of 2000 IEEE Ultrasonics Symposium. [S. l.]: IEEE, 2000: 691-694.
- [28] BAR-COHEN Y, SHERRIT S, DOLGIN B P, et al. Ultrasonic/sonic driller/corer (USDC) as a sampler for planetary exploration[C]//Proceedings of 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings. [S. l.]: IEEE, 2001, 1: 263-271.
- [29] CHANG Z S, SHERRIT S, BAO X Q, et al. In situ rock probing using the ultrasonic/sonic driller/corer (USDC)[C]//Proceedings of Smart Structures and Materials 2003: Smart Structures and Integrated Systems. [S. l.]: SPIE, 2003, 5056: 567-573.
- [30] CHANG Z S, SHERRIT S, BAO X Q, et al. Design and analysis of ultrasonic horn for USDC (Ultrasonic/Sonic Driller/Corer)[C]//Proceedings of Smart Structures and Materials 2004: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. [S. l.]: SPIE, 2004, 5388: 320-326.
- [31] BAO X Q, BAR-COHEN Y, CHANG Z S, et al. Modeling and computer simulation of ultrasonic/sonic driller/corer (USDC)[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2003, 50(9): 1147-1160.
- [32] HARKNESS P, LUCAS M, CARDONI A. Architectures for ultrasonic planetary sample retrieval tools[J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(8): 1026-1035.
- [33] BADESCU M, KASSAB S, SHERRIT S, et al. Ultrasonic/Sonic Driller/Corer as a hammer-rotary drill[C]//Proceedings of Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2007. [S. l.]: SPIE, 2007, 6529: 289-295.
- [34] BADESCU M, SHERRIT S, BAO X Q, et al. Auto-Gopher: a wireline rotary-hammer ultrasonic drill[C]//Proceedings of Sensors and Smart

- Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2011. [S. 1.]: SPIE, 2011, 7981: 1098-1105.
- [35] SHERRIT S, DOMM L, BAO X Q, et al. Single Piezo-actuator Rotary-Hammering (SPaRH) drill[C]//Proceedings of Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012. [S. 1.]: SPIE, 2012, 8345: 598-608.
- [36] WANG Y C, QUAN Q Q, YU H Y, et al. Rotary-percussive ultrasonic drill: An effective subsurface penetrating tool for minor planet exploration[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 37796-37806.
- [37] WANG Y C, QUAN Q Q, YU H Y, et al. Impact dynamics of a percussive system based on rotary-percussive ultrasonic drill[J]. *Shock and Vibration*, 2017, 2017: 1-10.
- [38] BAI D E, LI Y T, QUAN Q Q, et al. Development of a rotary-percussive ultrasonic drill using a bolt-clamped type piezoelectric actuator[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(12): 5360-5368.
- [39] BAI D E, QUAN Q Q, WANG Y C, et al. A longitudinal & longitudinal-torsional vibration actuator for rotary-percussive ultrasonic planetary drills[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(2): 1065-1072.
- [40] WANG T Z, QUAN Q Q, TANG D W, et al. Effect of hyperthermal cryogenic environments on the performance of piezoelectric transducer[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 193: 116725.
- [41] QUAN Q Q, WANG T Z, YU H Y, et al. An Ultrasonic drilling system for fast drilling speed with uncertain load[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023, 28: 1477-1487.

作者简介:

邓乃文(2000-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 地外天体钻探采样。

通信地址: 武汉市洪山区鲁磨路 388 号中国地质大学工程楼 (430074)

电话: 19118221371

E-mail: nwdeng@cug.edu.cn

柏伟(1990-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 先进制造与智能装备、深空探测技术与装备、地外天体钻探与资源利用。**本文通信作者。**

通信地址: 武汉市洪山区鲁磨路 388 号中国地质大学机械与电子信息学院(教二楼)(430074)

电话: 13971664226

E-mail: wbai@cug.edu.cn

An Ultrasonic Drill for Lunar Lava Tube Drilling

DENG Naiwen¹, HAN Guangchao^{1,2}, WEN Guojun¹, XIAO Long^{3,4}, BAI Wei^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Shenzhen Research Institute, China University of Geosciences, Shenzhen 518057, China;

3. School of Earth Sciences, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China;

4. Planetary Science Institute, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, a helical groove conical composite horn structure with multi-point drive rotation was proposed. A high-performance ultrasonic driller suitable for drilling in the inner wall of lava tubes was developed. An equivalent impedance network model was used to model and analyze the ultrasonic driller to predict the response characteristics of ultrasonic driller. The possibility of this drilling probe in applying complex ground conditions of lava tubes was verified through low gravity multi-angle simulated drilling tests and data analysis. The results show that the drilling rate increases with the increase of the hole's opening angle for a drill rod diameter of 3 mm and a drilling pressure of 10 N. The maximum unloaded rotary speed of the driller is 506 rad/min, the drilling rate is 6.4 mm/min for vertical drilling, and the rotary speed while drilling is 259 rad/min.

Keywords: lunar lava tubes; ultrasonic drilling; rotary impact ultrasound; equivalent impedance network modeling

Highlights:

- A tapered horn structure was proposed with a concentric circle fan-shaped spiral groove.
- An acoustic impedance model of a longitudinal-torsional transducer was developed to predict the response characteristics of the ultrasonic driller.
- Rotary percussion drilling was carried out with multi-angle drilling conditions for the complex terrain of lunar lava tubes.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]