https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.391



# 一种高精度台式旋转超声岩石取心装置

韩光超<sup>1</sup>,余 雍<sup>1</sup>,潘高峰<sup>1</sup>,李艳云<sup>1</sup>,刘初见<sup>2</sup>,章军锋<sup>2</sup>

1. 中国地质大学机械与电子信息学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院,地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北武汉 430074

摘 要:将野外采集或实验室合成的岩石样品制备成小尺寸柱状岩心样品,是进行地质学岩石高温高压物性实验的重要环节.岩石样本的脆硬性和成分不均匀性严重影响常规岩石磨削取心加工过程的稳定性和取心质量.将取样工具的旋转超声振动与岩石磨削加工过程相结合,并通过气动系统实现岩石样本在竖直方向上的柔性进给,所研制的台式旋转超声岩石取心装置可实现实验室小尺寸柱状岩心样品的高精度自动磨削取心加工过程.多种不同地质材料的取心测试结果表明,该装置能进行不同硬度岩石样品的高效率和高质量小直径取心加工,满足地质学高温高压实验的高标准制样需求. 关键词:岩石取心;旋转超声振动;磨削;柔性进给;高温高压实验.

**中图分类号:** TG663;P589 **文章编号:** 1000-2383(2020)02-367-07 **收稿日期:**2018-12-30

# A High-Precision Bench-Toprotary Ultrasonic Rock Coring Device

Han Guangchao<sup>1</sup>, Yu Yong<sup>1</sup>, Pan Gaofeng<sup>1</sup>, Li Yanyun<sup>1</sup>, Liu Chujian<sup>2</sup>, Zhang Junfeng<sup>2</sup>

1. Faculty of Mechanical & Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences, China University of

Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The preparation of small-size cylindrical rock samples from the rock samples collected in field or synthesized in the laboratory is an important procedure for high-pressure and high-temperature rock physics experiments in geosciences. The brittle hardness and in homogeneity of rock samples can affect significantly the stability and coring quality of conventional rock core grinding process. To overcome this technique difficulty, we combined the techniques of rotary ultrasonic vibration and rock grinding and developed a flexible high-pressure air-operated sample feeding system along the vertical direction in a bench-top rotary ultrasonic rock coring device. This device can realize high-precision automatic coring and grinding of small-size cylindrical rock specimen. The coring tests on rock specimens of various hardness show that the new device can conduct high-efficiency and high-quality small-diameter sample coring and satisfy the high-standard requirements of high-pressure and high-temperature geological experiments.

Key words: rock coring; rotary ultrasonic vibration; grinding; flexible feeding; high-pressure and high-temperature geological experiments

在地质学领域,高温高压实验是研究岩石物理 化学性质和地球深部作用过程的常用方法(Jin et al., 2001; Zhang et al., 2012; 许丽丽等, 2017; Huang et al., 2019). 野外采集的岩石样本多为形状 不规则、尺寸较大的岩块,需要将其制备成小尺寸 的柱状岩心样品,才能进行相关实验研究. 岩石是

作者简介:韩光超(1974-),男,副教授,主要从事超声辅助成形加工工艺与装备研究.ORCID:0000-0002-8389-9634. E-mail:hgc09@cug.edu.cn

引用格式:韩光超,余雍,潘高峰,等,2020.一种高精度台式旋转超声岩石取心装置.地球科学,45(2):367-373.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 41227001);中国地质大学(武汉)实验技术研发项目(No. SJ-201516);机械系统与振动国家重点实验 室开放课题(No. MSV-201910).

一种典型的硬脆材料,其取心过程是一种典型的硬 脆材料磨削加工过程.硬脆材料由于具有高硬度和 低断裂韧性的特性,使用传统的金属切削方法(譬 如金刚石钻头)加工时,一方面刀具磨损严重,加工 效率很低;另一方面容易出现材料断裂破坏、损伤 以及头尾直径偏差过大等问题,严重影响工作效率 和实验数据精度.超声磨削是一种特别适合于硬脆 材料加工的特种加工技术,它将加工工具的超声振 动与普通磨削加工过程相结合,通过工具的高频振 动驱动磨粒对工件表面形成高频局部锤击和自由 冲击,并在切削液中产生空化效应,从而显著提高 硬脆材料的去除效率、减小切削力,并提高加工精 度和表面完整性(张德远等,2016;冯平法等,2017).

超声磨削加工在以光学晶体、先进陶瓷及其复 合材料为代表的硬脆材料磨削加工中已得到广泛 的研究和应用,近年来在岩石类材料特别是太空岩 石取样加工方面的研究也在逐渐增多. Sherrit et al. (1999)提出一种基于自由质量单元的超声波岩石 取样装置,超声变幅杆与取样工具之间通过自由质 量单元连接,即利用自由质量单元的往复碰撞来实 现超声波从变幅杆向取样工具的传递.随后,该装 置被美国喷气推进实验室应用于外星地表勘探,能 用相对较小的力和相对较轻的硬件完成坚硬岩石、 冰层的地表钻取任务(Bar-Cohen et al., 2001, 2003; Bao et al., 2003). Harkness et al. (2009, 2012)将超声纵扭复合振动用于超声波岩石钻探, 试验研究表明纵扭复合超声振动可以提高岩石取 样效率.中国地质大学(北京)和南京航空航天大学 对超声激励冲击太空超声岩石取样钻机的结构和 取样特性等进行了研究(杨康, 2012;梁彩红, 2015). 吉林大学则对超声辅助硬岩钻进工艺进行 了研究,研究超声频率和钻压等工艺参数对岩石破 碎难度和效率的影响规律(孙梓航, 2017)上述研究 表明,在岩石磨削和钻进过程中复合辅助超声振动 均有利于提升岩石的钻取加工效率.但已有研究主 要面向野外或外太空的厘米级以上尺寸较大岩石 样品的钻取过程,对于实验室所需的厘米级到毫米 级小尺寸岩心的高精度样品取样过程的研究较少.

目前岩石学实验所需的岩心样品主要采用端 部镀有金刚石的取样工具或钻头进行常规旋转磨 削取样加工或钻孔,且多由人工操作台钻完成工具 进给和岩石取心过程.由于岩石的硬脆特性和材质 的不均匀性,人工取心过程容易出现岩心样品局部



Fig.1 Schematic diagram of rotary ultrasonic grinding for





图 2 超声振动系统结构示意图 Fig.2 Schematic diagram of ultrasonic vibration systems

破碎和断裂现象,头尾直径偏差往往较大,取心效 率和质量难以保证.本文根据高温高压地质学实验 对小尺寸岩心样品(直径1~5 mm,长度5~10 mm) 制备的实际需求,自主开发研制了一种基于旋转超 声振动的小型台式超声岩石取心装置,实现实验室 内的小尺寸岩心样品高质量自动制备过程(韩光超 等,2016a,2016b).其取心加工原理示意图如图1 中所示.

# 1 旋转超声岩石取心装置设计

本装置主要针对实验室内的小尺寸岩心样品 取心加工,因此采用结构紧凑的台式结构,并用步 进电机驱动超声系统实现升降和旋转,额定转速 600 r/min,超声系统工作频率为40 kHz.主要由主 机、超声电源和控制箱3部分组成.其中主机由超声



Fig.3 Simulation diagram of vibration mode of ultrasonic system





振动系统、旋转系统和气动系统组成.

#### 1.1 超声振动系统设计

超声振动系统主要由超声换能器、一级超声变 幅杆、二级超声变幅杆和工具头组成.超声换能器 选用夹心式柱状超声换能器,将低频电信号转换成 高频的机械振动;一级变幅杆和二级变幅杆将超声 换能器输出的机械振幅放大,满足超声磨削加工需 求;同时为了满足超声系统的旋转加工需求,在二 级超声变幅杆上设计特殊的法兰结构用于满足旋 转轴承及同步带的安装需求.取心试验的工具头采 用40Cr材质制备,末端为中空结构且内外层均镀有 一定目数的金刚石颗粒.超声振动系统各部分间均 采用双头螺栓连接,其结构示意图如图2中所示.

采用ANSYS软件对超声振动系统的整体振动 模态进行分析,结果如图3中所示.仿真结果表明, 超声振动系统的整体谐振频率为39.779 kHz,与工 作频率40 kHz的偏差小于1%,满足超声电源工作 需求.同时,在超声变幅杆上外壳和轴承安装位置 的法兰结构超声振幅接近于零(图3中深蓝色部分 所示),对超声系统的振动状态无影响.且在工具头 末端可获得最大的的超声振幅(图3中红色部分所 示),可满足超声磨削加工需求.

## 1.2 旋转系统设计

根据台式旋转超声取心装置的设计要求,采用 步进电机和同步带轮来驱动超声系统实现旋转运动,并在超声系统的外壳和法兰处设置双轴承结构 满足超声系统的旋转运动需求.采用水银导电滑环 (最高转速1200 r/min)在超声振动系统旋转的同 时对超声换能器进行供电.超声旋转系统的结构如 图4中所示.

#### 1.3 气动系统设计

常规的旋转超声磨削加工工艺多采用电机驱



图 5 旋转超声岩石取心装置 Fig.5 Rotary ultrasonic rock coring device



图 6 取心加工材料(a)和取心工具头(b) Fig.6 Coring materials (a) and coring tool head (b)

动加工工具以恒速进给模式进行磨削加工(冯平法 等,2017).但由于岩石样本为天然材质,其组分的 均匀性较差,导致岩石材料的磨削去除速率存在明 显的不均匀性,因此采用电机恒速进给磨削容易在 磨削过程产生岩石压裂现象.为了保证岩石取心过 程的稳定性和完整性,本装置采用气动柔性进给方 式实现超声磨削进给过程,即设定和保持气缸具备 一定的恒定压力,并通过气动系统动态补偿加工过 程中岩石的磨削量,从而驱动岩石工件在竖直方向 上实现磨削过程中的柔性进给运动,从而在可有效 避免磨削进给速度过快造成的岩石破碎现象.气动 系统由空压机、气动三联件、换向阀和气缸组成.在 气缸下设置可调节的X-Y移动平台,实现对岩石样 品的高精度定位取心.所制备的旋转超声岩石取心 装置样机如图5中所示.

# 2 岩石取心加工试验

为了验证所研制旋转超声岩石取心装置的加 工效果,选用灰岩、片麻岩、橄榄岩、安山岩、石英矿 岩、榴辉岩等不同物理性质的岩石样本进行超声取 心加工试验,同时也对玻璃和陶瓷材料进行取心加 工,并进行对比验证,所加工材料的硬度值如表1中 所示.工具头取心内径2.7 mm,取心长度9~11 mm.试验材料以及取样工具头如图6中所示.

由于天然岩石材质的不均匀性,因此采用5 mm厚度的玻璃片进行超声取样加工性能单因素试验,研究气缸预压力、工具头转速、超声电源功率和 工具头壁厚等工艺参数对取样效率的影响规律,其 中,气缸预压力取值范围为1.6 bar、1.8 bar、2.0 bar、 2.2 bar;工具头转速取值范围为300 r/m、400 r/m、 500 r/m、600 r/m;超声电源功率取值范围为50%、

材料	玻璃	氧化铝陶瓷	灰岩	片麻岩	榴辉岩	橄榄岩	安山岩	石英岩
莫式硬度/普氏硬度	5.5/-	9/-	$3/2 \sim 4$	-/14~16	6~7/-	-/16~18	-/20~25	7.5/>25
14 (a)				3.4	(b)			
13 -				3.2				
<u>12</u> -	$\overline{\}$			· I 2.8 -				
山 山 山		•		□ □ 2.6-				
至 11-				業 2.4-				
10-			L	2.2			~	
9 -		_		1.8				
8	1.7			1.6	200 250	100 150		
1.6	1.7	1.8 1.9 2. 预压力(bar)	0 2.1	2.2	300 350	400 450 转速(r/min)	500 550 60	00
4.0				4.0	(b)			
3.8	$\backslash$			3.8	(u)			
$\sim$ 3.6				3.4 -				
iu 3.0		$\backslash$		<u>.</u> <u>.</u> <u>.</u> <u>.</u> <u>.</u> <u>.</u> <u>.</u> <u>.</u>				
≝ 3.4 -		<b>N</b>		□ 3.0		/	×	
₩ 3.2 -				至 2.6 -				
3.0				2.4 -		_		
2.0			_ <b>∎</b>	2.2		-		
2.8 50		60 70	80	L	0.4 0.6	0.8 1.0	1.2 1.4 1	.6
	电源功	D 率输出白分比(9 図 7 i	6) 海柱恝言工	廿 会 粉 √t 麻 bil B	向样动索的	上具头壁厚(m 影响	m)	
		El ( ). Ein 7 Effecte	ル イマ 旭 戸 上	乙参数/7宿用月	以1十次2平的月	5/ 비민 ar afficiency		

表1 取心加工材料的硬度值 Table 1 Hardness value of coring materials



Fig.8 Rotating ultrasonic coring samples

60%、70%、80%和工具头壁厚取值范围为0.4 mm、 0.8 mm、1.2 mm、1.6 mm.试验结果如图7中所示. 结果表明,随着气缸预压力、工具头转速和超声电 源功率转速的增大,玻璃的取样效率逐渐增加,而 随着工具头壁厚的增加,取样效率呈现逐渐下降的 趋势.分析原因如下:

硬脆材料由于同时具备高硬度、高脆性的特

点,在其磨削加工过程中,脆性断裂是主要的材料 去除方式.随着预压力的增大,金刚石磨粒在磨削 过程中嵌入到工件材料内部的深度加大,更容易产 生大尺寸的裂纹,从而有利于加快脆性断裂形式的 材料去除;随着工具头转速增大,金刚石磨粒的磨 削线速度增加,延长了单位时间磨粒的磨削加工长 度,从而有利于提高材料的磨削去除效率;随着超 声电源功率的增大,工具头末端的超声振幅也随之 增大,所带来的高频锤击作用显著增强,同时工具 头的振幅加大也增强了冷却液中的超声空化效应, 有利于增加材料的去除效率;而随着工具头壁厚的 增加,工具头末端与工件的接触面积也逐渐增大, 这使得需要去除的材料体积增大,导致取样效率有 所下降.

根据上述试验结果,当气缸预压力为2.2 bar, 工具头转速为600 r/min,超声电源输出功率为

Table 2 Ultrasonic coring properties of hard and brittle materials with different hardness										
材料	样品长度(mm)	取样时间(min)	样品直径 (mm)	样品头尾直径偏差(mm)	取样率					
玻璃	10.0	9.0	2.69	0.03	100%					
氧化铝陶瓷	10.0	16.3	2.70	0.02	100%					
灰岩	9.5	4.1	2.68	0.02	100%					
片麻岩	11.0	9.8	2.68	0.01	100%					
榴辉岩	10.6	10.3	2.69	0.01	100%					
橄榄岩	10.4	11.3	2.69	0.01	100%					
安山岩	10.5	12.6	2.69	0.02	100%					
石英岩	10.5	14.5	2.68	0.02	100%					

表2 不同硬度的硬脆材料超声磨削取心加工性能

80%,工具头壁厚为0.4 mm时,可获得最佳的磨削 取样加工效率.采用上述最优工艺参数对表1中的 不同材质硬脆材料进行磨削取心加工,所得到的样 品如图8中所示,取样过程参数及检测结果如表2 中所示.试验结果表明,采用所研制的旋转超声磨 削取样装置,能完整的获取目标长度和目标直径的 柱状岩心样品,头尾直径偏差为1%~3%,可满足 高温高压地学实验需求.

## 3 结论

本文针对地质学高温高压实验所需的小尺寸 高精度岩心样品的高质量取心加工,研制了一种新 型台式旋转超声岩石取心装置.将金刚石磨削工具 的轴向旋转超声振动与气动系统的竖直方向柔性 进给相结合,实现了不同硬度岩石样本的高效率和 高质量磨削取心加工过程,所加工的柱状岩心样品 取样率100%,尺寸偏差1%~3%,可满足高温高压 实验对岩石样品的需求.

## References

- Bao, X.Q., Bar-Cohen, Y., Chang, Z., et al., 2003. Modeling and Computer Simulation of Ultrasonic/Sonic.Driller/Corer (USDC). IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, & Frequency Control, 50(9):1147
- Bar-Cohen, Y., Sherrit, S., Dolgin, B.P., et al., 2001. Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC) as a Sampler for Planetary Exploration. Aerospace Conference, IEEE, 1/263-1/271.
- Feng, P.F., Wang, J.J., Zhang, J.F., et al., 2017. Research Status and Future Prospects of Rotary Ultrasonic Machining of Hard and Brittle Materials. *Journal of Mechanical Engineering*, 53(19): 3-21(in Chinese with

English abstract).

- Han, G.C., Liu, C.J., Wang, C., et al., 2016a. An Ultrasonic Assisted Rock Sampling Device and Method. Chinese Patent: 201410301083.8, 2016-03-23(in Chinese with English abstract).
- Han, G.C., Pan, G.F., Liu, C.J., et al., 2016b. An Improved Rotary Ultrasonic Rock sampling Device and Method. Chinese Patent: 201610430016.5, 2016-06-17(in Chinese with English abstract).
- Harkness, P., Cardoni, A., Lucas, M., 2009. Ultrasonic Rock Drilling Devices Using Longitudinal - Torsional Compound Vibration. Ultrasonics Symposium, IEEE, 2088-2091.
- Harkness, P., Lucas, M., Cardoni, A., 2012. Coupling and Degenerating Modes in Longitudinal - Torsional Step Horns. Ultrasonics, 52(8): 980-988. https://doi.org/ 10.1016/j.ultras.2012.05.002
- Huang, S.X., Qin, S., Wu, X., 2019. Elasticity and Anisotropy of the Pyrite-Type FeO<sub>2</sub>H-FeO<sub>2</sub> System in Earth's Lowermost Mantle. *Journal of Earth Science*, 30(6): 1293– 1301. https://doi.org/10.1007/s12583-018-0836-y
- Jin, Z.M., Zhang, J.F., Green, H. W., et al., 2001. Rheological Strength of Uhp Eclogite from Dabieshan: Evidences from High P-T Experiments. *Journal of Earth Science*, 26(6):574-580.
- Liang, C. H., 2015. Research on the Impact of Ultrasonic/ Sonic Driller/Corer(USDC)'s Connection Mode(Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Sherrit, S., Dolgin, B. P., Bar-Cohen, Y., et al., 1999. Modeling of Horns for Sonic/Ultrasonic Applications. Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium, Lake Tahoe, CA, 647-651..
- Sun, Z.H., 2017. Study on the Effect of Ultrasonic Vibration on Frequency on Granite Fracture Law(Dissertation). Jilin

 $University\,,\,Changchun\,(in\,Chinese\,with\,English\,abstract).$ 

- Xu, L. L., Jin, Z. M., Mei, S. H., 2017. Deformation DIA Coupled with Synchrotron X-Ray Diffraction and Its Applications to Deformation Experiments of Minerals at High Temperature and High Pressure. *Earth Science*, 42 (6): 974-989(in Chinese with English abstract).
- Yang, K., 2012. Research on Drilling Corer Based on Ultrasonic/acoustic Energy Coupling Mechanism(Dissertation). Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing(in Chinese with English abstract).
- Zhang, D.Y., Xin, W.L., Jiang, X.G., et al., 2016. Research Trends of Ultrasonic Machining Technology. *Electromachining & Mould*, (S1): 11-13(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. F., Wang, C., Wang, Y. F., 2012. Experimental Constraints on the Destruction Mechanism of the North China Craton. *Lithos*, 149: 91-99. https://doi.org/ 10.1016/j.lithos.2012.03.015

#### 附中文参考文献

- 冯平法,王健健,张建富,等,2017.硬脆材料旋转超声加工 技术的研究现状及展望.机械工程学报,53(19):3-21
- 韩光超,刘初见,王超,等,2016a.一种超声辅助岩石取样 装置及方法.中国专利:201410301083.8,2016-03-23.
- 韩光超,潘高峰,刘初见,等,2016b.一种改进型旋转超声岩石 取样装置及方法.中国专利:201610430016.5,2016-06-17.
- 梁彩红,2015.联接方式对太空超声取样钻性能影响的研究 (硕士毕业论文).北京:中国地质大学.
- 孙梓航,2017.超声波振动频率对花岗岩破碎规律影响的研究(博士毕业论文).长春:吉林大学.
- 许丽丽,金振民,Mei,S.H.,2017. D-DIA 装置与同步辐射 源结合技术及其在矿物高温高压变形实验中的应用. 地球科学,42(6):974-989.
- 杨康,2012.基于超声波声波能量耦合机理的钻探器研究(硕 士毕业论文).南京:南京航空航天大学.
- 张德远,辛文龙,姜兴刚,等,2016.超声加工技术研究趋势.电加工与模具,(增刊1):11-13