0254-6124/2021/41(6)-983–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

DU Yonggang, YAN Chunjie, WANG Chunyong, WANG Jin. Numerical investigation on collector of asteroid's particles with various sizes (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(6): 983-987. DOI:10.11728/cjss2021.06.983

小天体的多种尺寸颗粒样品收集容器流域的数值模拟*

杜永刚 闫春杰 王春勇 王 琎

(中国空间技术研究院 兰州空间技术物理研究所 兰州 730000)

摘 要 采集小天体表面的样品并返回是当前小天体探测的核心目标之一, 样品容器流域设计是氮气激励采样技术的关键. 为了保证样品容器具备高效的收集性能, 要求样品容器的流域设计能够对样品颗粒形成陷阱效应, 并对样品颗粒进行有效的分级. 旋风式样品收集容器方案利用旋风离心力和引导叶片的共同作用对样品颗粒进行收集和分级. 为了验证这种方案在微重力环境下的性能和可行性, 本文利用 Fluent 软件进行了流域的数值模拟. 模拟结果表明: 在确定容器的结构下, 样品容器的最优氮气入口速度为 $0.6\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 容器在该速度下的样品收集效率达到 99.7%. 样品容器的流域具备很好的颗粒分级功能, 对小于 2 mm 的样品颗粒的捕获率超过了 90%, 其压力损失也在合理的范围之内. 本文研究结果可为小天体采样任务提供借鉴.

关键词 小天体, 样品容器, 多种颗粒, 数值模拟

中图分类号 V 476

Numerical Investigation on Collector of Asteroid's Particles with Various Sizes

DU Yonggang YAN Chunjie WANG Chunyong WANG Jin

(*Lanzhou Institute of Physics, China Academy of Space Technology, Lanzhou* 730000)

Abstract Collecting and returning samples from the asteroid's surface is one of the significant targets of the current asteroid detection. The key issue of the nitrogen purge sampling technology is the flow field design of the sample container. In order to ensure that the sample container has an efficient collection performance, the flow field design of the sample container must solve two key problems, one problem is the flow field how to form a trap effect on the sample particles, and another problem is the flow field how to effectively classify the sample particles. Therefore, the researchers proposed a scheme of the sample container, which uses the combined effect of centrifugal force and guide blade to collect and classify the sample particles. For verifying the performance and feasibility of this scheme in a microgravity environment, the researchers carried out the numerical simulation with Fluent software. Under the boundary conditions of the container, the simulation program calculated the velocity of nitrogen at the inlet, and the optimal value is $0.6\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, the efficiency of

* 国家重大科技专项工程项目资助

2020-07-28 收到原稿, 2021-05-31 收到修定稿

E-mail: duygemail@163.com

the container at this velocity reaches 99.7%, the flow field of the sample container also has a good particle classification function, and its capture rate of particles that less than 2 mm exceeds 90%. Its pressure loss is also within a reasonable range, the research results of this paper can provide a reference for the upcoming asteroid's sampling task in China.

Key words Asteroid, Sample collector, Multiple particles, Numerical investigation

0 引言

小天体是太阳系形成后的残留群体, 保存了早期太阳系的原始物理化学信息, 所以小行星也是追溯太阳系演化历史的活化石, 对小行星开展科学探测意义重大. 近年来, 世界各国开展的小天体取样并返回的探测任务中, 取得显著成果的有日本的隼鸟系列小天体探测器和美国的奥西里斯号探测器 (Osiris). 日本隼鸟一号探测器于 2003 年发射, 在 2005 年对丝川小天体进行了探测. 该探测器采用了一种金属弹丸溅射的采样技术, 采样装置把一个金属弹丸高速射向小天体表面, 被弹丸溅射起的样品碎片通过一个喇叭形管道进入样品容器, 其样品收集容器是一个直径约 6 cm, 高约 7 cm 的圆柱形容器 [1]. 在 2014 年, 日本又发射了隼鸟二号探测器, 该探测器于 2018 年与龙宫小天体相遇并对其进行了探测, 同样采用了金属弹丸溅射的采样技术, 但研究人员改进了样品容器的设计, 改进的样品容器内部直径为 4.8 cm, 高度为 5.7 cm, 样品容器也可以收集微量的气体样品 [2]. 隼鸟二号预计采集 100 mg 的样品. 美国的奥西里斯号探测器于 2016 年发射, 在 2019 年开展了对贝努小天体的探测. 该探测器则采用了一种氮气激励采样技术, 这种技术通过喷射的氮气把小天体的样品带入样品容器内. 该项目预计获取不少于 60 g 的样品 [3].

中国继探月和火星探测工程之后, 规划了小行星探测任务 [4], 完成对图塔蒂斯小行星近距飞越探测 [5], 还将开展对 Kamo'oalewa 小行星取样并返回的探测任务. 由于氮气激励的采样技术非常适合获取用于科学分析的小样品, 因此该技术成为小行星采样的优选方案之一 [6]. 由于激励气体吹起的超细微样品颗粒可能会损害到探测器, 所以样品容器的流域能对样品颗粒形成陷阱效应, 并对样品颗粒进行分级收集, 从而防止超细微的样品颗粒逃逸出容器. 通过借鉴月球样品封装技术 [7,8], 本文提出了一种基于氮气激励法收集小天体样品的方案, 该方案利用旋风离心力和引导叶片的共同作用对样品颗粒进行收集和分级. 通过利用 Fluent 软件对样品容器的流域的数值模拟, 验证了该方案对多种直径颗粒样品的分级和收集的有效性. 本文详细叙述了这种样品容器的流域设计及其数值模拟的结果.

1 样品收集器的设计

小天体表面物质呈现高度的多样性, 主要包括巨石和风化层: 一种是巨石碎片, 一种是风化层的颗粒 [9]. 风化层的最小颗粒直径约为 10 μm, 而巨石碎片的直径可以达到 5 cm 以上. 根据科学目标, 探测器主要收集这两种样品, 预计获取不少于 60 g 的样品. 因为采样技术采用氮气激励的方式, 所以样品容器内部必然是一个氮气的流域. 收集的样品中存在着超微颗粒的样品, 金属滤网无法截获超微颗粒样品, 而且地外天体样品颗粒带电吸附特性 [10], 也容易导致筛网被微小颗粒堵塞, 这就要求样品容器的流域要能够巧妙地实现超微颗粒样品的气固分离和捕获.

样品容器设计为主要由大颗粒收集区域、中颗粒收集区域、小颗粒收集区域以及筛网和引导叶片四部分组成. 大颗粒收集区域是一个圆柱形的区域, 中颗粒和小颗粒收集区域是被三个引导叶片分隔形成的两个环形圆柱区域, 小颗粒收集区域处于外侧, 而中收集区域处于内侧, 样品容器的内部构造如图 1 所示. 样品颗粒随着吹扫氮气由容器底部的轴向进口进入大颗粒收集区, 直径在 5~50 mm 的样品颗粒会停留在大颗粒收集区域, 其他的颗粒沿切向入口进入中颗粒收集区内. 在气流和离心力的作用下, 这些颗粒贴着引导叶片进行螺旋轨迹的运动. 由于引导叶片叠加部分的间隙为 2 mm, 所以直径小于 2 mm 的微小颗粒样品会通过该间隙进入小颗粒收集区域. 这些微小颗粒被离心力推到容器的外壁部位, 当气流停止后, 颗粒从叠加叶片形成的间隙中弹射逃逸的概率是一个极小值, 从而形成了一个微颗粒的陷阱. 直径在 2~5 mm 之间的样品颗粒会继续随着气流到达筛网, 并被筛网阻拦和捕获在中颗粒收集区域内. 样

品容器内的流域尺寸见表 1.

2 样品容器流域的数值模拟

2.1 计算模型的建立

由于地球的重力场会严重影响样品颗粒在样品容器中的运动轨迹, 而且在地面建造出一个长时间的微重力测试环境非常困难, 所以目前的研究者主要是采用数值模拟技术完成这类研究的验证.

入口处的氮气流速是影响颗粒样品收集效能的主要因素, 因此数值模拟需要解决两个问题, 一是阐明入口氮气流速与颗粒逃逸率之间的关系, 二是分析入口氮气流速对颗粒分级性能的影响和作用机理. 分析的入口氮气流速分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, $1\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 入口处的粒子释放速度为 $0.001\,\mathrm{kg\cdot s^{-1}}$, 粒子的释放时间为 0.2 s, 计算样品收集过程的时间为 4 s, 程序在计算结束后统计粒子的分布数据. Fluent 软件中自带的 DPM 算法模型可以模拟多种粒径颗粒在流域中的轨迹, 本文利用该软件完成流域的数值模拟计算.

在 Fluent 软件中建立的流域如图 2 所示. 流域的壁边界上无热传导, 流域的入口采用速度边界条件、流域的出口采用压力边界条件, 流域的近壁处采用 Fluent 的标准壁面函数. 研究者利用 Fluent 软件中的 $k\varepsilon$-2 湍流模型求解流域. 此外, 模拟中对样品颗粒对象模型做如下假设.

(1) 样品颗粒只具备质量特性, 并全部被简化为具有不同直径参数的质点. 模拟的样品颗粒的直径范围为: 20~5000 μm, 根据隼鸟号和奥西里斯的数据 [11,12], 样品颗粒的密度为 $1.19\sim1.95\,\mathrm{g\cdot cm^{-3}}$.

(2) 由于小天体的引力场非常微弱 [13], 其对样品颗粒的影响可忽略不计, 设定流域内的引力加速度值为零.

模型的边界设定如下.

(1) 容器常规内壁: 设定为常规的 WALL 边界, 颗粒在边界上为反弹模式.

(2) 导引叶片间隙: 在模型的间隙部分建立一个面单元作为缝隙的边界, 在该边界上模拟出窄缝的筛选功能, 即窄缝边界只允许直径不大于 2 mm 的颗粒通过, 而反弹直径大于 2 mm 的颗粒. 通过 C 语言开发了 UDF 边界子程序来实现这一边界设定, 在计算过程中, Fluent 主程序自动调用该子程序.

(3) 容器出口: 在模型的出口位置建立一个面单元作为筛网的边界, 边界上设定为 Fluent 软件默认的 PRESSURE_OUTLET 出口, 同时也在该边界上模拟出孔目直径为 2 mm 的筛网, 即筛网边界允许直径不大于 2 mm 的颗粒通过, 而反弹直径大于 2 mm 的颗粒. 该子程序同窄缝的模拟子程序, 该子程序由 Fluent 主程序自动调用.

(4) 容器入口: 设定为 VELOCITY_INLET 边界.

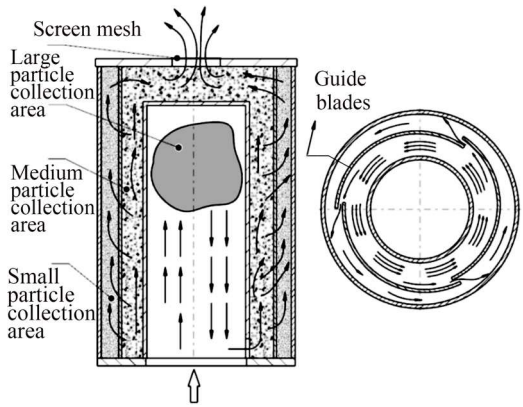


图 1 样品容器的内部构造

Fig. 1 Internal structure of the sample collector

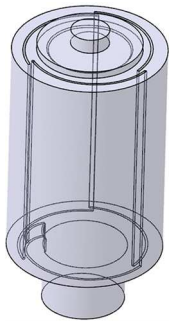


图 2 样品容器内流域的三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of the collector's flow field

表 1 样品容器的流域尺寸 (单位: mm)

Table 1 Dimensions of the flow field in the sample collector (Unit: mm)

主体外形	大颗粒收集区域	中颗粒收集区域	小颗粒收集区域	氮气入口直径	氮气出口直径
100×200	55×100	68/ϕ57×100	90/ϕ70×100	55	60

2.2 颗粒的离散参数

样品颗粒的粒径具有多样性, DPM 模型采用 Rosin-Rammler 分布函数规定颗粒粒径的离散性, 因此需要确定颗粒中位径 d_{50} 和分布指数 m. 由于目前没有破碎小天体矿体的颗粒粒径分布的数据 [14], 而且煤碳的密度和小天体的表层矿体的密度接近, 所以本文就以地球煤炭矿体被破碎后的粉尘粒径作为分析数据, Zheng 等 [15] 统计和分析了某煤矿矿层的破碎颗粒的数据, 并得出了煤炭矿体的的粒径分布函数的表达式为 $F(d) = 1 - \exp[-(d/0.4335)^{1.1904}]$, $F(d)$ 为分布函数, d 为颗粒直径, 由粒径分布函数可知煤碳矿体被破碎后的颗粒中位径 $d_{50} = 0.4335\,\mathrm{mm}$, 分布指数 $m = 1.1904$, 本文就以这些颗粒数据作为 DPM 模型的参数.

2.3 计算结果及分析

研究者按照上述参数建立了基于 Fluent 的计算模型并完成了计算. 当流域达到稳态后, 不同直径的颗粒在流域内的分布如图 3 所示, 图 3 显示大部分的小颗粒分布在最外层的小颗粒收集区域, 而大颗粒分布在中间的大颗粒收集区域, 该计算结果表明所提出的方案能有效分离不同粒径的样品颗粒.

根据粒子分布的计算数据, 绘制出如图 4 所示的入口氮气流速和颗粒逃逸率关系曲线. 从图 4 可以看出, 当入口氮气的流速在逐步增加的过程中, 颗粒的逃逸率呈现出先逐步降低然后增大的变化趋势, 最低的样品逃逸率约为 0.3%, 即最高的样品收集效率约为 99.7%. 从图 4 中的趋势线也可以得出最优入口流速约为 $0.6\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 这也说明样品的收集效率和入口氮气的流速具有最优的匹配关系.

为了量化分析样品容器对微小颗粒的捕获能力, 提取引导叶片窄缝边界上的颗粒数据, 并绘出不同颗粒直径下的颗粒逃逸率与入口速度关系曲线, 如图 5 所示. 图 5 显示, 引导叶片以 2 mm 为界对不同粒径的颗粒具有良好分级作用, 大部分微小颗粒 (直径小于 2 mm) 被收集在了小颗粒收集区域, 大部分的大颗粒 (直径大于 2 mm) 则被窄缝反弹回中颗粒收集区域, 因此样品容器对微小的颗粒形成了陷阱效应.

压力损失是评估样品容器的一个重要指标, 过高的压力损失会降低采样系统的运行效率. 图 6 是压力损失值和入口氮气流速的关系曲线, 该图表明: 压力损失和入口氮气的流速值成正比关系. 随着入口氮气流速的增大, 压力损失也从 20 Pa 逐步增加到了 378 Pa, 因此样品容器不适宜选用过高的入口氮气流速, 当入口的氮气流速为 $0.6\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 时, 样品容器的压力损失不超过 150 Pa.

3 结论

对于氮气激励的采样技术, 样品容器的流域设计

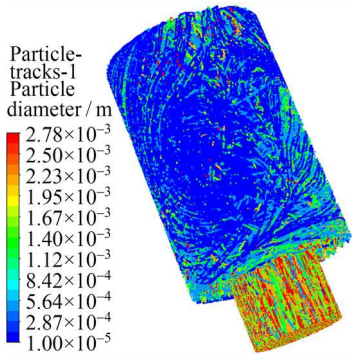


图 3 不同粒径的粒子在流域内的分布

Fig. 3 Particles distribution with various sizes in flow field

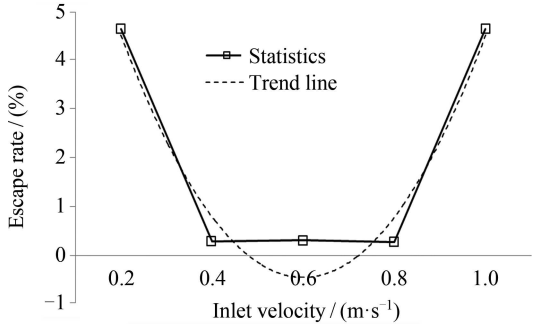


图 4 入口流速和样品颗粒逃逸率的关系

Fig. 4 Relative curve between particle's escape rate and velocity of inlet

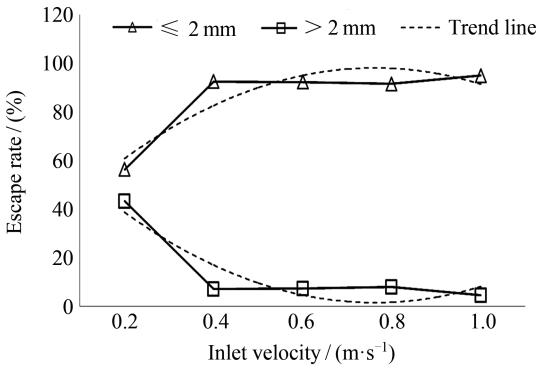


图 5 不同粒径下的逃逸率和入口速度的关系

Fig. 5 Relative curve between escape rate of particles with different sizes and the velocity of inlet

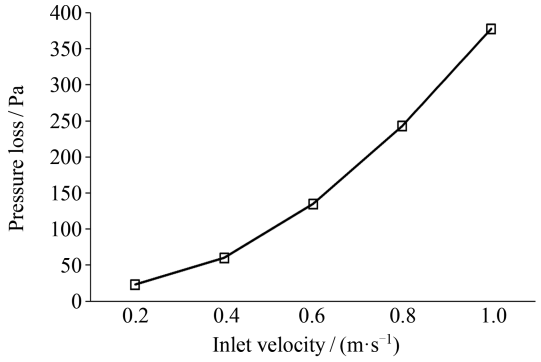


图 6 压力损失和入口流速的关系曲线

Fig. 6 Relative curve between pressure loss and the velocity of inlet

是其关键技术. 本文提出了一种小行星样品容器流域的设计方案, 研究者通过对其流域的数值模拟, 证明这种方案在理论上可以实现 99.7% 的样品收集效率, 也验证了这种方案的可行性.

阐明了入口氮气流速和颗粒逃逸率之间的规律. 当入口氮气的流速在逐步增加的过程中, 颗粒的逃逸率呈现出先逐步降低然后增大的趋势规律, 同时研究结果也指出样品容器的最优入口流速是 0.6 m·s^{-1}.

详细分析了入口氮气流速对颗粒分级性能的影响和作用机理. 旋风式引导叶片是对颗粒起分级作用的关键结构, 本文中的引导叶片的间隙值取为 2 mm, 数值计算的结果表明该参数值是实现颗粒分级的合理值, 采用该间隙参数的引导叶片可把大部分的微小颗粒样品收集在小颗粒收集区, 同时也反弹了中颗粒样品. 数值计算的结果也表明: 这种方案对小于 2 mm 的样品颗粒的捕获率超过了 90%, 可有效控制微小颗粒样品的危害.

通过研究入口流速和压力损失之间的关系和规律, 研究者也发现当入口流速为 0.6 m·s^{-1} 时, 样品容器的压力损失也在合理的范围内, 因此本文中提出的流域设计符合了工程要求.

本文利用数值模拟技术对提出的小行星样品容器流域方案进行了验证. 随着空间环境模拟技术的发展和对关键技术的突破, 可进一步测试这种小行星样品容器的实物样机, 并获取真实的实验数据.

参考文献

[1] KATSUHIKO Tsuno, EISUKE Okumura. Lidar on Board Asteroid Explorer Hayabusa [R]. Tokyo: Institute of Space and Astronautical Science, 2006

[2] HIROTAKA Sawada, RYUJI Okazaki, SHOGO Tachibana, *et al*. Hayabusa2 sampler: collection of asteroidal surface material [J]. *Space Sci. Rev.*, 2017, **208**: 81-106

[3] BIERHAUS E B, CLARK B C, HARRIS J W, *et al*. The OSIRIS-REx spacecraft and the Touch-and-Go Sample Acquisition Mechanism (TAGSAM) [J]. *Space Sci. Rev.*, 2018, **214**: 80-107

[4] LI Chunlai, LIU Jianjun, YAN Wei, *et al*. Overview of scientific objectives for minor planets exploration [J]. *J. Deep Space Explor.*, 2019, **6**(5): 24-36

[5] ZHAO YuHui, WANG Su, HU ShouCun, *et al*. A research on imaging strategy and imaging simulation of Toutatis in the Chang'E-2 Flyby mission [J]. *Acta Astron. Sin.*, 2013, **54**(5): 45-52

[6] YU Dengyun, ZHANG Xingwang, ZHANG Ming, *et al*. Development status and prospect of small celestial body sampling exploration techniques [J]. *Spacecraft Eng.*, 2020, **29**(2): 9-18

[7] DU Yonggang, YANG Zhenchun, FU Zhaohui. Technology of a sample vacuum encapsulation for deep space exploration [J]. *Spacecraft Eng.*, 2014, **23**(5): 47-53

[8] DU Yonggang, WANG Xuesong, YAN Chunjie, *et al*. The parameter calculation of the metal seal structure for the lunar sample encapsulation [J]. *Chin. J. Vacuum Sci. Technol.*, 2021, **41**(5): 32-34

[9] JI Jianghui, HU Shoucun. A review of the surface environment of small bodies in solar system [J]. *Spacecraft Eng.*, 2019, **36**(6): 529-531

[10] BORISOV N D, ZAKHAROV A V. Electrostatic charging and motion of dust near the surface of an asteroid [J]. *Sol. Syst. Res.*, 2014, **48**(1): 22-32

[11] SUGITA S, HONDA R, MOROTA T, *et al*. The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: implications for parent-body processes [J]. *Science*, 2019, **364**(6437): 398-422

[12] DELLAGIUSTINA D N, EMERY J P, GOLISH D R, *et al*. Properties of rubble-pile asteroid (101955) Bennu from OSIRIS-REx imaging and thermal analysis [J]. *Nat. Astron.*, 2019, **3**(4): 341-346

[13] CUI Pingyuan, YUAN Xu, ZHU Shengying, *et al*. Research progress of small body autonomous landing techniques [J]. *J. Astronaut.*, 2016, **37**(7): 5-13

[14] SAITO J, MIYAMOTO H, NAKAMURA R, *et al*. Detailed images of asteroid 25143 Itokawa from Hayabusa [J]. *Science*, 2006, **312**(5778): 1341-1344

[15] ZHENG Gangbiao, KANG Tianhe, CHAI Zhaoyun, *et al*. Applied the Rosin-Rammler distribution function to study on the law of coal dust particle-size distribution [J]. *J. Taiyuan Univ. Technol.*, 2006, **37**(5): 317-319