模拟月壤研制及其空间土木工程应用进展

聂桂波[1]，文舜嵌[1]，王永志[1]，支旭东[2]，杜轲[1]，汤兆光[1]，王体强[1]

1(中国地震局工程力学研究所，中国地震局地震工程与工程地震重点实验室，结构工程研究室，黑龙江，哈尔滨，150080)

2(哈尔滨工业大学，土木工程学院，黑龙江，哈尔滨，150090)

摘 要 空间土木工程的热门研究方向之一，即关于地外天体驻站建设的探索，而这一征程将从月球起步。月壤作为月表广泛分布的松散状物质，是月球基地建设的核心材料。本文对模拟月壤的研制进展与岩土工程应用进行系统综述，阐述了月壤的定义、组成、力学特性及密度，指出其与地球土壤在成分、颗粒形态的显著差异；梳理了模拟月壤的三种主要研制方法，并分类叙述了国内外各类模拟月壤的特性，特别关注了针对嫦娥五号月壤的新型模拟物研发；最后，探讨了模拟月壤作为建筑材料在月球基地建造中的制备，同时，回顾了模拟月壤在岩土力学试验中的标准化测试方法及大型土工试验中的应用实践建立标准化评价体系，为未来模拟月壤研制与月球基地建设提供理论与技术支撑。

关键词 嫦娥工程，模拟月壤，月壤制备，空间建造，空间土木工程

中图法分类号 P184

Lunar soil simulant and its application in space civil engineering

Nie Guibo[1],Wen Shunqin[1],Wang Yongzhi[1],Zhi Xudong[2],Du Ke[1],Tang Zhaoguang[1],Wang Tiqiang[1]

1（*Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, Earthquake Administration, Harbin,*150080)

2（*School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin,*150090)

Abstract One of the hot research directions in space civil engineering is the exploration of constructing stations on celestial bodies beyond Earth, a journey that will commence from the Moon. Lunar regolith, a loose and widely distributed material on the lunar surface, is a core resource for the construction of lunar bases.This paper provides a systematic review of the research progress on lunar regolith simulants and their geotechnical engineering applications. It elaborates on the definition, composition, mechanical properties, and density of lunar regolith, highlighting its significant differences from terrestrial soil in terms of composition and particle morphology. Three main development methods for lunar regolith simulants are summarized, and the characteristics of various domestic and international simulants are described categorically, with particular attention paid to the development of new simulants based on the Chang'e-5 lunar samples. Finally, the application of simulants as construction materials for lunar base building is discussed. Concurrently, the paper reviews the standardized testing methods for simulants in geotechnical mechanics experiments and their application in large-scale geotechnical engineering experiments, aiming to establish a standardized evaluation system. This work provides crucial theoretical and technical support for the future development of lunar regolith simulants and the construction of lunar bases.

Keywords Chang’E project; Lunar regolith simulant; Lunar regolith preparation; Space construction; Space civil engineering

0 引言

月球作为地球唯一的天然卫星，因其稳固的结构和独特的位置，使其成为人类进行深空探测的理想前哨阵地与运转平台。深空探测时代的序幕于20世纪50年代拉开，肇始于此的月球探测活动，迅速成为当时美国与苏联空间竞赛的焦点，掀起首次对月探测的高潮[1][2]。时至今日，人类综合利用了地基天文望远镜、太空望远镜、环月卫星遥感、无人驾驶月球车以及Apollo宇航员实地巡视等多种手段，获取了详细的月球图像与数据。分析结果表明，月壤覆盖了几乎整个月球表面，其厚度分布不均，仅在少数异常陡峭的撞击坑、山脉和熔岩管通道的峭壁上缺失[3]。月壤处于月海区的平均厚度约4m～5m，位于高地区平均厚度约10m～20m[4]。当前探月工程的研究对月壤样品需求量巨大，然而，人类历史上通过Apollo阿波罗和Luna月球号任务所获取的样品总量仅约380公斤，存在巨大的供应缺口，严重制约了全面科研工作的推进，因此探月工程地面试验采用了基于地球矿物制备的模拟月壤Error: Reference source not found[5][6][6]。当前，人类探月的核心任务已转变为“认知与利用并重”的新阶段。这不仅是科学探索的深化，更是为建立未来的月球长期驻留、并最终迈向更远深空进行能力储备[7]Error: Reference source not found。空间土木工程作为新兴领域，是传统土木工程与航天工程的交汇点。这一领域跨过地球边界，关注在月球、火星等环境中设计、建造和维护

*基金项目：国家自然科学基金面上项目（52578616）；中国地震局工程力学研究所基本科研业务费面上项目（2024B02）；国家重点研发资助（2024YFC3016904）；

投稿日期：2025-10-23

最新录用

栖息地、交通网络、能源系统及生命支持结构，且目前将从月球起步，而模拟月壤作为一种地面替代品，为月球资源开发利用技术验证与月球科学前沿研究，提供了不可或缺的地面实验支撑[5]Error: Reference source not found，且模拟月壤的研发目标逐渐集中于工程建造研究[8]Error: Reference source not found。

目前，随着对不同月面着陆区样品研究的深入为满足多样的科研任务与应用目标，国内外研究机构开展了各类模拟月壤的研制工作。本文系统梳理了近年来模拟月壤的研究进展及工程应用成果，以期为未来研究提供发展脉络与参考，并提出了兼顾建筑材料与岩土工程试验的模拟月壤配置方案。

1 月壤概述

对月壤的准确认识，是开展模拟月壤研制的首要前提。月壤，即覆盖在原始月床基岩上的松散岩石、砾石与尘埃层[9][9]。月壤的定义有广义与狭义之分。广义月壤泛指覆盖在月球基岩之上的全部月表风化物质，甚至可包含直径数米的岩石。而狭义月壤则特指根据阿波罗（Apollo）计划的样品分类标准：将直径大于等于 1 厘米的团块定义为“月岩”，将直径小于 1 厘米的颗粒物质界定为“月壤”[10][1]。月壤基本覆盖整个月表，深度从数米至数十米不等，其间散布大型溅射块体与岩石。通常古老高地地区月壤较厚，月海区域相对较薄[9][9][11][11]。

1.1 月壤的组成

月壤是一种复杂的混合物，由多种不同的岩石类型与矿物颗粒共同构成，其基本物质颗粒包括：矿物碎屑（橄榄石、斜长石、单斜辉石、钛铁矿等）；原始结晶岩碎屑（玄武岩、斜长岩、橄榄岩、苏长岩等）；角砾岩碎屑、各种玻璃（撞击玻璃、黄色或黑色火成碎屑玻璃）；粘合集块岩；陨石碎片（陨硫铁、橄榄石、辉石、锥纹石、镍纹石、合纹石等）[12][1]。全月尺度上，月壤矿物组成呈现显著地域差异：月海区以暗色玄武岩为主，高地区则以浅色富长石岩类为主。月壤整体成分介于玄武质与斜长岩质之间，且逾 1/4 为熔凝颗粒，撞击玻璃与角砾岩所占比例较小。这些组分分布特征在阿波罗各探测点间存在差异，主要受当地地质过程与原始矿物组成制约[13]。相较于地球土壤，月壤在成分与矿物学上相对均一，即月床基岩矿物多样性远低于地球：月球已发现矿物不足百种，而地球矿物达数千种[14]。目前，来自阿波罗 17 号采集的月壤样本的粒度分级研究显示，其粒径小于 1 毫米的物质包含来自金牛座-利特罗谷的玄武岩质物质以及富含长石的高地岩石，仍可验证上述观点[15]。

1.2 月壤密度

月壤物质特性的描述，通常有如下两种指标：**1**、月壤密度（符号 ρ）指其自然结构状态下的质量与体积的比值；**2**、颗粒比重（符号 G）定义为颗粒质量与同体积 4℃纯水质量之比，为一无量纲参数，其数值与颗粒密度相等。月壤的平均比重取决于其中各类组分（如玄武岩、角砾岩、玻璃等）的相对含量。例如，玄武岩颗粒比重多高于 3.32，而角砾岩通常为 2.9～3.1。整体上，月壤颗粒比重普遍分布于 2.3～3.2 之间，且绝大部分高于 2.9，显著高于一般地球土壤的 2.6～2.75[3][17][16]Error: Reference source not foundError: Reference source not found。目前，关于嫦娥系列月球样品的干密度范围（包括最大与最小干密度）尚未有明确的测定值公布。因此，在本工作的相关评估中，暂时援引了 Apollo 与 Luna 样品的对应数据作为参考，月壤最大干密度 2.29g/cm^3，最小干密度 0.87 g/cm^3，其取值为密实与松散各状态所对应的密度[18]Error: Reference source not found。目前，已测得嫦娥五号样品颗粒比重为 3.1952[19]。

1.3 月壤的力学性质

土壤作为天然颗粒材料，在岩土力学中级配与颗粒形态比化学成分更重要，而化学提取工艺则更关注组分准确性[9]。月壤的力学性质主要取决于其颗粒组成，参数主要包括粒度分布与颗粒形态[3]Error: Reference source not found。土的力学特性随颗粒尺寸与组分的变化而显著改变，因而呈现显著的尺度效应[20]。月壤粒度分布的描述与经典土力学完全不同，地质学家已建立真实月壤多种涉及高阶矩的统计参数，其中最重要的是中值、均值、分选系数、偏度和峰度。目前最广泛认可的是福克与沃德（1957）提出的定义式[18]，以此获得粒度累积曲线图解参数，并将其描述为“分选极差”[21]，结果表明月壤粒度与淤沙相似，但月壤颗粒的粒径分布范围很宽，以小于 1 毫米的为主，中值粒径介于 40-130 微米，平均约为 70 微米。这意味着近半数颗粒细于肉眼分辨极限，且有 10%-20%是直径小于 20 微米的超细颗粒。因此，月壤极易产生漂浮和附着现象，这导致其对宇航服、机械设备及光学镜头构成严重污染与磨损威胁[3][4]Error: Reference source not found。

此外，月壤的颗粒形态对于其力学性质至关重

最新录用

要。月壤的物理特性与地球土壤存在显著差异。由于月球缺乏大气和液态水，月壤颗粒不会像地球土壤那样经历风化和生物活动，因此其颗粒通常更加尖锐、棱角分明[9][22][22]。月壤颗粒的形状与其压缩性、填充性等力学性能有着密切的关系[23]。随着研究的深入，由于无粘结颗粒材料中的力传递仅通过颗粒间接触实现，Antony 等[24][24]重点探究了颗粒形状对三维颗粒体系内接触特征、组构与宏观强度三者相互作用的影响。时至今日，对于颗粒形态的特征表征，存在着多种参数体系与计算方法，尚未形成统一标准，常用的有基于投影面积、轮廓周长、颗粒凸包边界长度、最大费雷特直径（长度）、最小费雷特直径（宽度）等这类直接测量值的衍生参数，常用指标包括拟合椭圆的长短轴长度、长短轴长度比、圆形度等[25][25]。这些参数的核心应用意义在于衡量颗粒形状的不规则性，即其与理想圆形的差异，但在描述不同类别颗粒的棱角特征上有所不足，为此，Katagiri 等[26][26]提出新指标椭球体积比(VE)，有效区分不同类别颗粒的棱角特征。另外，传统基于整体轮廓的形状指标存在局限：一个接近圆形轮廓的颗粒可能拥有极不规则的形状，且颗粒表面的粗糙阻碍颗粒间的相对运动。为突破此局限，李佳[27]等人创新性地提出了“方向差异指数”，该指标不仅反应颗粒形状与规则圆形的接近程度，而且能从多角度有效反映颗粒表面的凹凸变化。

总体而言，月壤颗粒形态复杂多变，虽覆盖从球形到极端棱角状的各类形状，但以棱角状、次棱角状及长条状为主。这些带有锯齿的颗粒极易相互咬合、形成互锁结构，极大地阻碍了颗粒间的相对滑动。因此，月壤在宏观上表现出极高的抗剪切与抗压缩能力，使其在承受外部楔入时，能提供近乎固体岩石般的阻力[3]Error: Reference source not found[16]Error: Reference source not found。这种独特的颗粒形态，加上月球低重力环境，使得月壤的力学性质不同于地球砂土，例如其剪切强度参数不能直接套用地球砂土的经验公式[28][28]。尽管颗粒形状在许多工程应用中确实起着重要作用，但形状很少被表征，Kafka 等[29][29] 提出，可通过建立数据库的办法，用于对单个颗粒特性以及堆积颗粒几何形状和特性的建模研究。

2 模拟月壤

月壤与地球土壤差异显著（见表 1），而模拟月壤，即真实月壤的地球复制品，旨在复制月球风化层的特定特征，如整体化学成分、矿物成分、颗粒形态和粒径分布等。从而替代珍贵的月球样品，用于测试和开发月球探测仪器及相关技术。由于地球上获取月表物质的途径有限，月球风化层模拟物对于月球探测研究至关重要。故常被应用于原位资源利用（ISRU）研究（即从月球风化层中提取资源）和评估月壤采样设备与月球风化层的相互作用诸多方面的研究[22][22][30][31]。不同科学研究任务及目标，对模拟月壤的要求也不同：地面模拟月球低重力下覆土荷载时，使用密度为月壤密度 1/6 的轻质粉体作为模拟月壤[32]；对于月球基地建设，如果使用月壤材料制备地聚合物建筑材料，模拟月壤需要具备与真实月壤相近的化学活性和矿物组成，以便研究其在月球温度（如模拟月球高温区温度）下的力学发展规律[33]；对于月球车及着陆器设计与测试等工程应用，模拟月壤的主要要求是准确反映月壤的力学特性，例如密度、粒度分布、颗粒形状、内摩擦角以及在低重力环境下的行为[34]等。

表 1 月壤与地球土壤的对比

Table 1 Comparison between Lunar regolith and Earth soil

	形成机制	成分	颗粒形状	物理性质
月壤	月壤主要通过微陨石撞击破碎母岩形成，且撞击伴生的高温导致部分物质熔融并冷却形成玻璃颗粒[1]	硅酸盐矿物（如斜长石、橄榄石和辉石）、金属氧化物（如 FeO 和 TiO_2）以及玻璃质颗粒[1]	月壤颗粒普遍具有不规则形状，边缘尖锐[3]	月壤颗粒比重 2.9~3.2，几乎不含水分[3]
地球土壤	形成过程以物理风化、化学风化和生物风化为主[22][9]	有机质（如腐殖质）、黏土矿物（水铝硅酸盐）以及多种矿物质（石英、长石等）[17]	颗粒多为亚圆形或圆形[17]	地球土壤颗粒比重 2.6~2.75，具有胶结性和较高的含水量[17]

2.1 模拟月壤研制方法

通过对 Apollo 与 Luna 采集样品的分析结果表明，月壤样品的岩石种类主要有月海玄武岩、克里普岩、高地岩石（斜长岩）、角砾岩 4 种，并依据其物质来源，月壤可划分为月海玄武岩起源、月球高地起源，以及月海与高地混合起源三种基本类型

[3]；月壤中的矿物主要有长石、辉石、橄榄石、钛铁矿等，并且月壤中还含有大量角砾岩碎屑和各种玻璃（撞击玻璃、熔融岩、火成碎屑玻璃）[6][14]。如今，采自月球风暴洋东北部的嫦娥五号样本仍具有上述岩石与矿物特性，主要由形状相对规则的细粒玄武岩颗粒构成，矿物组成方面，辉石约占44.5%，斜长石30.4%，橄榄石3.6%，钛铁矿6.0%，玻璃质含量相对较低（约15.5%）[35]。综合现有结果表明，虽然组分的分布特征在各个探测点间存在差异，但月壤在成分与矿物学上相对单一。因此可根据月壤的成分占比特征，作为系列化模拟月壤研制的标准Error: Reference source not found[36][36]。并分为以下3种：

第一种，全岩样品法：基于前文叙述的月壤样品岩性分类将月壤分为低钛月海玄武岩、高钛月海玄武岩、高地斜长岩、克里普玄武岩4大类Error: Reference source not found；而后，根据目标月壤的岩石类型，核心任务是寻找在化学成分与矿物组成上与目标样品相匹配的地球类似物，经过研磨、筛分、烘干，最终按照目标月壤的级配曲线进行配置[36]Error: Reference source not found，并测定其物理力学性质。此外，由于月壤样品大多玻璃体积含量较高，可利用ISSP对与月壤类似的地球岩石样品瞬间加热熔融，冷却后形成大量的玻璃质成分Error: Reference source not found。因全岩法具有的成本优势与制备便利性，成为目前应用最普遍的制备方法Error: Reference source not found。

第二种，添加法：由于地球原料物质与月球样品存在差别，具体表现在：月球玄武岩TiO_2与玻璃含量较高，月海月壤TiO_2含量从0.5%~13%不等，玻璃含量从10%~80%不等[11]，嫦娥五号采集的月海玄武岩也印证了月球存在着高钛玄武岩（TiO_2含量为5.7%）[40]，因此可向中低钛地球玄武岩适当加入一些特定的颗粒（如钛铁矿、玻璃质等），提升混合物在化学成分和矿物组成上与高钛玄武岩类真实月壤的相似度；由于模拟月壤采用火山灰作为原料，其比重相对较小，可在原料里添加较大密度的赤铁矿、金刚砂与碳化硅等颗粒来提升模拟月壤的密度Error: Reference source not found,Error: Reference source not found；此外用于月球低重力模拟的磁敏感模拟月壤的制备也在进行，制备方法是通过均匀混合火山灰粉末和磁性增强组分（采用纳米级四氧化三铁（Fe_3O_4））来提升模拟物铁磁性[43]，将所得结果与月壤样本和其他模拟物的已知值进行比较，结果表明其在岩土工程和科学的应用中具有良好的特性，特别是考虑到月球重力的影响[44]。

第三种，单矿物复合配置法：尽管已发现的月球矿物多达数十种，但具有丰度优势的主要为长石、橄榄石、辉石及不透明矿物（如钛铁矿、尖晶石）四类。鉴于其主导地位，可选用从火成岩中分离或人工合成的对应单矿物，以其实际成分与级配曲线为基准，精确配置出相应的模拟月壤Error: Reference source not foundError: Reference source not found。近年来采用单矿物复合配置法模拟月壤越来越多，例如：通过将钙长石、钠长石、辉石、钛铁矿、矿渣和粉煤灰等多种矿物混合，配制出了一种名为“GCD - 1”的新型模拟月壤，经分析验证，GCD-1的主要矿物成分与阿波罗14号着陆点的月壤基本相同，其中主要化合物（即SiO_2和Al_2O_3）的偏差在0.5%以内[45]；新型高地月壤模拟物（NEU-2），采用天然斜长石、玄武岩和烧制玻璃复合材料配制而成，研究结果表明，NEU-2的粒度分布、比重和比表面积落在真正月壤的范围内，其矿物组成与阿波罗16号采集的高地月壤相似[46]；按照矿物成分质量占比：斜长石30.43%、辉石42.47%、橄榄石5.76%、钛铁矿4.55%、玻璃16.78%，配制的新型CE-5模拟月壤，测得其自然堆积密度、级配等多项物理力学指标较全岩样品法更接近真实月壤Error: Reference source not found。

2.2 模拟月壤研究现状

NASA在上个世纪70年代初即开始使用模拟月壤，随着阿波罗11号采样返回，首个严格的模拟月壤MLS-1于1971年发布，该模拟月壤采用1~2米深岩床的粉碎玄武岩作为原料，后续通过调整玻璃含量与粒径分布，使其专注于复现阿波罗11号采集的高钛月壤样本的物理特性，而非精确再现其矿物学与化学特征[47]。至此，各国以具体科研任务展开了各种研制工作，制备出通用型、岩土工程型、原位资源利用型和微波介电型等用途的模拟月壤，本节以通用型、岩土工程型与资源利用型为基础，分析现有的嫦娥5号模拟月壤（见表2）：

第一类，通用型：

NASA研制的JSC-1，含有高比例的玻璃质，以凝灰岩为原料，与月壤具有相似的粒度分布，被视作月海模拟物用于各种研究目标，包括岩土力学、矿物氢还原实验[47][48]。而后，NASA研制了与JSC-1性质相近的JSC-1A、 JSC-2A，二者均为通用型玄武质月海模拟月壤[49]。

日本清水株式会社Sueyoshi等[49]研制了多种模拟月壤： FJS-1型与Kohyama型分别采用日本富士山玄武岩和神山辉长岩制备，而Oshima型以含

玻璃的玄武岩为基料，添加 7%的镁橄榄石与 8%的钛铁矿模拟高钛月海月壤。各模拟物均具有与真实月壤相似的颗粒分布，且平均粒径分别为：FJS-1 约 67μm、Oshima 约 88μm、Kohyama 约 85μm。上述模拟月壤被广泛用于基于离散元的月壤力学建模与氢还原法的化学实验[50][51]。

阿联酋 Peng 等[52]以化学成分、矿物组成与阿波罗 14 号样品相似的玄武质火山灰为原料，进行破碎研磨，经混合配比与细颗粒含量的优化，制备了 NYUAD-1 模拟物，适用于轮壤相互作用、原位资源利用（ISRU）技术及月球栖息结构设计评估等研究工作 Error: Reference source not found。

中科院 Zheng 等[53]Error: Reference source not found 以阿波罗 14 号样本平均矿物化学组成为基准，取低钛玄武质火山渣，通过冲击研磨制备 CAS-1 模拟月壤，其中值粒径达 85.9μm，在堆积密度、抗剪强度、复合介电常数及反射光谱等方面上均表现出良好一致性。

中国地质大学 He 等[55]以中国东北辉南县玄武质火山渣为基材，经风晾、冲击破碎机粉碎，经多级筛分，按特定比例重组配制了 CUG-1A 模拟月壤，可用于月球土壤化学与工程研究。

第二类，岩土工程型：

德国 Linke 等[55]采用模块化方法，以变质辉长岩和碱性橄榄玄武岩分别制成了 TUBS-T 和 TUBS-M，以此为核心添加玻璃质，可适用于岩土工程研究；另一方面，添加钛铁矿、橄榄石或辉石等特殊矿物，则可具有特定地域特征。

加拿大 Battler 等[57]采用斜长岩，添加凝集角、纳米相等关键组分作基材。并通过引入橄榄石玻璃制备了 OB-1 模拟月壤，其粒度分布与阿波罗 16 号样品相似，用作月球高地风化层岩土工程模拟物。

韩国汉阳大学 Lee 等[58][58]以火山灰为原料，鉴于月壤中 200 目以下细颗粒占比约 50%，对原料充分破碎，按月球粒径分布进行混合，制备了 KOHLS-1 模拟月壤，以此研究月尘影响的月球着陆坪。

中国矿业大学 Li 等[43]以玄武质火山渣作为原料，将火山渣研磨，按 9:6:5 的质量比将火山渣粉、铁矿粉与碳酸氢铵混合，压实后烧结，后对烧结基质实施冲击破碎，经筛分按真实月壤级配重新混合，获得 CUMT-1 模拟月壤，适用于月球重力影响研究[43]。

同济大学 Jiang 等[59]选取元素组成与阿波罗 14 号样品相似的红色火山灰，经破碎、筛分获得七项粒径组分，控制级配达目标力学指标，配置成 TJ-1 模拟物。力学性能与月海区域深度在 0~30 厘米的月壤接近，当孔隙比 1.0 时内摩擦角达 45°。

中国北方车辆研究所江磊等 Error: Reference source not found，采用 1/6 密度轻质材料通过研磨筛分，并按照月壤粒径分布，配成 LBD 模拟月壤，适用月表低重力岩土工程承压特性试验。

第三类，原位资源利用型：

澳大利亚 A. Bonanno 等[61]通过除尘装置收集玄武岩粉尘，其 200 目以下颗粒占比与月壤实际粒度特征吻合。使用筛分机对未分级原料粒度分离，再按各粒径分组重量配比混合，制成 ALRS-1 模拟物，可用于月壤烧结实验研究。

美国 CLASS[62][63]以矿物作为行星物质的基本单元，精确配比矿物与岩屑，从而复现标准样本的矿物组合，制备了高精度矿物基的 LHS-1 高地模拟月壤与 LMS-1 月海模拟月壤，其光学特性、磁学响应、热物理性质及化学反应活性与真实月壤高度相似。

北京航空航天大学 Sun 等[64]以玄武质火山渣和斜长岩质斜长石混合作为原料，首先进行热处理，控制玻璃相含量，后采用一步式砂磨，研制出 BHLD20 模拟月尘，较大程度上复现月尘样本的物理化学特性。

东北大学 Li 等[65]采用火山渣与玄武岩，经自然风干、破碎、研磨及筛分等工序后，按六种粒径分级并干燥储存。按月壤样品的级配曲线进行配制，研制出低钛型 NEU-1a 基体，通过向基体中添加钛铁矿得到高钛型 NEU-1b，二者颗粒组分、物化特征均与真实月壤符合较好。

2020 年 12 月 17 日，嫦娥五号携 1731 克月壤成功返回。至此标志着中国首次拥有地外天体样品，并为人类提供了首批来自月球年轻火山岩区的样本。样本已通过先进的实验室设备进行了表征，例如利用 X 射线衍射（XRD）技术测定嫦娥 5 号月壤中各物相的含量，利用激光衍射分析测量了其粒径分布，并使用光学显微镜拍摄获得了其形貌[35]，这为开发高质量的月球风化层模拟物提供了准确的数据[31]。

清华大学包查润等 Error: Reference source not found 采用玄武岩粉末为原料，该玄武岩的主要矿物成分为辉石、钙长石，将原料进行研磨、筛分、混合配成 TC-1C 模拟月壤，并依次测试粒径分布、物相组成、颗粒形态和密度，与真实月壤对比，采用 FOM（Figure of Merit）算法计算二者相似度，其在 4 项指标方

面的相似度均超过0.94，适用于月面建造技术研究。

香港理工大学Zou等[31]以天然玄武岩为基材（含钙长石、普通辉石、橄榄石及少量石英、磁铁矿），辅以4种未风化矿物和玻璃相调控组分，通过粉磨机细化，并对每种材料进行筛分获得多级组分，依据嫦娥5号样品的颗粒级配与矿物组成进行混合，制成PolyU-1模拟物。适用于月球车的轮-壤相互作用研究、原位资源利用技术等研究领域。

同济大学Wang等[34]以火山渣为原料，通过烘干与研磨后，筛分为五个粒径组分，按照返回样品的粒度分布与容重混合各粒径组分配置TJ-CE5模拟月壤。其密度、颗粒形貌、粒度分布、内摩擦角及化学成分等方面经检验均与嫦娥五号月壤相似，适用于力学特性研究与原位建设研究。

同济大学胡家骏等Error: Reference source not found以玄武岩为原料，其主要物相为普通辉石、钙长石和镁橄榄石；使用球磨机将原料研磨至粒径分布与嫦娥5号月壤相近，直接制成TJC-1模拟月壤，其化学成分、物相组成、粒径分布和微观形貌与嫦娥5号样品高度相似，适用于月壤地聚合物的3D打印智能建造研究。

北京航空航天大学Zhou等[67]选取了天然与合成的高纯度单斜辉石、斜长石、钛铁矿和橄榄石为原料，按嫦娥五号样品平均化学成分确定模拟材料配方，将单矿原料分别研磨、筛分、混合制备成BH-3模拟月壤，经检验在化学成分方面，BH-3中硅、铁、铝、钙、钛、镁的氧化物质量分数与嫦娥5号样品平均值的偏差均在±5%以内，适用于原位资源利用方面的研究。

中国科学院Ruan等[68]采用向玄武岩基料中添加钙铁辉石、钛铁矿、普通辉石和长石进行混合的方法，首先将各类矿物分别粗碎，而后通过质量比混合后研磨，最后筛分调配使粒度分布与嫦娥5号样品高度一致，制备成IGG-01模拟月壤。其化学成分与矿物丰度方面与真实月壤高度相似，适用于月壤水泥制备、月堤构筑实验等方面研究。

武汉大学Teng等[69]以玄武岩为原料，将原料破碎筛分后获得七个粒径区段，依据样品的粒径分布数据调配WHU-1模拟月壤。经检验其粒径分布与原始月壤样本高度匹配，适用于力学特性测试。

表 2 嫦娥五号模拟月壤制备方法、原料及用途

Table 2 Preparation methods, raw materials, and applications of simulated lunar regolith for the CE-5 mission

研制单位	型号	制备方法	原料	用途
清华大学	TC-1C	全岩样品法	玄武岩	原位资源利用
香港理工大学	PolyU-1	添加法	玄武岩+未风化矿物+玻璃	通用
同济大学	TJ-CE5	全岩样品法	火山渣	通用
同济大学	TJC-1	全岩样品法	玄武岩	原位资源利用
北京航空航天大学	BH-3	单矿物复合法	斜辉石+斜长石+钛铁矿+橄榄石	原位资源利用
中国科学院	IGG-01	添加法	玄武岩+钙铁辉石+钛铁矿+辉石+长石	原位资源利用
武汉大学	WHU-1	全岩样品法	玄武岩	岩土工程

3 模拟月壤土木工程应用

当前的月球探测秉持“科学与应用并重”的理念，其最终目标是建设可持续利用的月球科研站或基地。为此，其不再由单次任务独立完成，而是在统一规划下，通过一系列前后衔接、互为支撑的任务协同实施Error: Reference source not found，而土木工程正在为在地外星球的建设做积极准备，月球将成为这个新时代的焦点。作为一门古老的工程学科，已在地球上有着四千年积累的经验与知识，如今即将在一个新环境中得到应用。与土木工程不同分支相关的基本考量总结如下：土力学与基础工程、结构的选择与设计、场地规划与场地选择、建筑材料、施工管理等[70]。本章将着重论述模拟月壤作为建筑材料方面的应用与模拟月壤土力学。

3.1 模拟月壤建筑材料

鉴于地月运输仍存在诸多限制，从地球运送建筑材料至月球不仅技术复杂，成本也极为高昂。因此，原位资源利用（ISRU）理念已成为各国航天机构与研究人员规划未来月球驻留任务的核心原则，利用这些资源可以生产生活必需品、建筑材料、火箭燃料等，从而大大降低对地球的依赖，实现长期驻月的自给自足[71][72]。目前确定用于月球建筑材料制备的主要当地资源，是由陨石撞击、热胀冷缩破裂形成的月壤构成的风化层[1]。按照制备原料与制备原理主要分为如下四类：

第一类，水泥水化反应类；其制造方式与地球类似。对比普通波特兰水泥（OPC）、地球粉煤灰及月尘的化学成分质量百分比，表明月尘的化学成分与地球粉煤灰高度相似，粉煤灰数十年来一直被用作水泥的替代品[73]。因此，理论上可通过“温差熔融筛分-高温煅烧”或“高温熔融/重复熔融-筛

分”工艺制备月球水泥。日本于上世纪 90 年代，研究采用北海道钙长石作为模拟月壤原料，通过高温烧结、快速淬冷及精细研磨工艺制成模拟月球水泥，但月球水泥生产的高能耗限制了其可行性[74]。为降低能耗，可通过太阳能板将月壤加热至 2000°C 可制得水泥[75]。将水泥与阿波罗 16 号月壤混合制备水泥水化月壤混凝土，通过包括 1 英寸立方体、0.5 英寸立方体试件及三组 0.12×0.58×3.15 英寸梁式试件，测得抗压与抗折强度分别为 75.64 MPa 和 8.32 MPa[76]。除作为水泥生产原料外，月壤的形态特征与元素组成适宜作为混凝土细骨料，且实测数据显示，特定粒径月壤的比重超过 2.6，完全满足混凝土骨料的技术要求[75][76]。针对微重力环境下的拌合与养护难题，可采用干拌蒸压注入技术（DMSI），通过干态混合水泥与骨料，再经过高压蒸汽养护[77]。采用 DMSI 技术养护模拟月壤水泥水化制备，1 天抗压强度达 20.1 MPa[74]。然而，月球独特的环境条件为水泥水化反应类制造带来诸多问题：首先，月球液态水资源的缺失使水化反应无法进行[78]；其次，若在月球的高真空环境中制造，会使拌合水在混凝土硬化前大量逸散，这将显著增加混凝土孔隙率。而孔隙率上升会引发密度降低、强度衰减及辐射防护性能减弱等问题[75]；最后，月球微重力环境中，对水泥的筛分工艺的有效性及其效率存在着严峻问题。

第二类，地质聚合反应类（碱激发）：地质聚合物是一种通过碱激活溶液与硅铝质材料反应形成的三维网络无机聚合物，且具有提高材料性能的潜力[79]。其制造方式为以模拟月壤为前驱体，配以碱性激发剂生成无机胶凝材料。采用火山灰为模拟月壤原料与氢氧化钠（NaOH）溶液作为激发剂，研制出一种潜在月面胶凝材料。经真空环境处理 24 小时及液氮中 30 次冻融循环后，火山灰地质聚合物试样的抗压强度分别达到 45.53 MPa 和 44.95 MPa。实验证实 98.61%的水可实现循环利用，与实验室模拟的月球水循环系统高度吻合，可研发近零水耗的月面胶凝材料[80]。采用一种新型火山渣（GVS）模拟月壤原料，以氢氧化钠作为碱激发剂，GVS 的地质聚合物 28 天抗压强度最高可达 75.6 MPa，抗折强度达 6.3 MPa[80]。地质聚合月壤混凝土的力学性能受诸多因素影响，包括化学成分、粒径分布、颗粒形态和养护条件。模拟月壤的化学成分与激发剂质量比决定地质聚合反应活性；颗粒比表面积随粒径减小而增加，增大激发剂与月壤颗粒的接触，从而提升反应活性与材料强度，此外，级配有助于填充内部孔隙，也可进一步增大强度；养护温度则对抗压强度起决定性作用[81][82][83]。此方法在近似月球环境（月球昼间平均温度与真空条件）下，固化实验发现真空加热养护样本未达到理想效果：最长养护周期的试件仍不能达到抗压强度标准[84]；养护条件苛刻，且与上述水化反应存在同样需要液态水进行拌合的问题。

第三类，烧结类；烧结是一种能实现高度原位资源利用的高强度模拟月壤建筑材料的制造方法[85]。富含玻璃质的月壤在低于其熔点的温度就会开始出现烧结现象，即颗粒之间通过黏性弛豫使颗粒相互熔接，形成致密固体材料的过程。月壤烧结技术利用月壤模拟物（LRS）作为原材料，在特定温度和环境下进行烧结，可以制备出具有一定物理机械性能的月壤混凝土[86]。目前，已探索了多种月壤烧结方法，以适应月球严苛的环境并优化烧结产品的性能：1、高温烧结：月壤中的玻璃相在 900°C 或更低温度下就会开始烧结，月壤材料的烧结特性可用于制备高强度建筑材料[87]。并在不同煅烧温度下，月壤模拟物样品的表观状态和物理机械性能会发生显著变化[86]。2、微波烧结：利用微波能量对月壤进行加热。此方法具有快速烧结的优点，可以在几分钟内将月壤加热到熔融温度。这种方法对含有纳米级 FeO 颗粒和硅酸盐玻璃的月壤特别有效[88]。3、太阳能烧结：利用菲涅尔透镜集光的能力采用太阳能作为能源使模具内的月壤模拟物烧结成型，并以此研发无人太阳能烧结系统，用于制造月壤模拟砖[89]。4、激光选择性烧结：作为一种增材制造技术，无需粘结剂的同时，具有高精度、严格过程控制及高强度等优势，利用激光按照设计的路径扫描粉末表面，使被扫描区域的粉末颗粒烧结在一起，逐层构建三维物体[90]。 此方法较之地球重力场，月球微重力环境易使颗粒材料更疏松，导致堆积密度降低。这可能改变材料熔融过程中的密度与流动性，进而削弱强度。此外，试件尺寸是关键影响因素：随着圆柱体直径或高径比增大，材料强度呈下降趋势[85]。

第四类，粘结类；使用粘结剂将松散的月壤颗粒结合在一起，形成具有一定强度和稳定性的固体材料。按照粘结剂化学性质划分为：高分子聚合物、生物有机粘合剂及硫磺。1、高分子聚合物，采用聚乙烯、环氧树脂等热固性聚合物作粘结剂，按质量比 10%聚乙烯聚合物与 90%模拟月壤配制的混合物，在 50 毫米立方模具中浇筑后，于真空室内模拟赤道最高温环境，其结果表明：在 5 小时内可获

得 12.6~12.9 MPa 的强度[91]。采用 JSC-1A 月壤模拟物添加 4wt%的环氧树脂粘结剂，采用重锤冲击实现模拟建筑材料的制备，其抗弯强度达 12~16 MPa，与常规钢筋混凝土相当，且抗弯强度随冲击能量提升而增强[92]。2、生物有机粘合剂，采用生物或类生物有机物做粘合剂，JSC-1A 模拟月壤与聚乳酸-羟基乙酸共聚物粘合剂，通过 3D 打印技术制造月壤混凝土，循环拉伸测试表明所有样品均未观察到断裂或宏观撕裂[93]。基于人血清白蛋白的生物复合材料为粘合剂，其机理为黏结作用源于蛋白质二级结构在脱水作用下重组为致密氢键支撑的超分子 β-折叠网络，展现出高达 25.0 MPa 的抗压强度[94]。3、硫磺，以硫单独作为粘结剂，将骨料粘结形成建筑材料不发生化学反应。典型硫磺混凝土配比中，硫磺占 12~22wt%（其中可含 5%增塑剂）骨料占 78-88wt%（包含粗/细颗粒），并在 130~140°C 温度区间完成骨料加热与混合搅拌，形成硬化的硫基混凝土，其抗压强度达到了 31 MPa[95]。硫含量为 35%时，无添加硫磺混凝土的最大抗压强度为 33. 8MPa，此外添加纤维后，其抗压强度最大可达 45.5MPa[Error: Reference source not found]。

3.2 模拟月壤土力学

未来月球探测重点中的两大部分：原位资源利用与地面探测器探测[97]，均要求全面掌握月壤的岩土力学特性，并且需足量的等效土壤进行系统测试。月壤样本因数量稀少难以承担力学性能破坏性测试的消耗，因此须通过模拟月壤复现月表土壤特性。大型土工试验通常需要能容纳数百公斤土壤。特制的工程月壤模拟料成本高昂，且因产能有限往往无法足量，故亟需利用易获取材料研制能复现现有月壤力学特性的模拟物[98]。

一、土壤的力学参数：从土力学角度出发，选择颗粒级配、颗粒形态、比重、最大/最小干密度、剪切强度为主[98]，辅以压缩性、休止角、热导率、液限与塑限[99][100]。其中需指出土力学与真实月壤特性参数测定在如下两方面的区别：

1、理论方面：土力学描述级配曲线时采用中值粒径（D_{50}）、不均匀系数、曲率系数，而非第一章所用的指数[99]；

2、试验标定方面：1、颗粒级配方面，月壤样品分析方法不仅采用微量样本（仅 0.25 克），且对细粒组分的测定未采用密度计法，转而借助光学显微镜等特殊设备，与 ASTM 标准土壤颗粒分析试验方法相比，根据 ASTM D422 标准要求，土壤颗粒分析至少需要 500 克烘干试样：首先需通过 200 目筛进行水洗筛分，经烘干后对粗粒组分实施筛分分析，对细粒组分则需采用密度计法进行测定[98]，上述两种方法与 ISO 2018a 采用湿筛法测定粗粒组分，采用滴落法（Moum, 1965）测定黏粒与粉粒组分[100]均不相同。2、比重方面，月壤样品测试方法不仅采用微量样本，还使用特殊微型容积装置，与 ASTM 标准土壤比重瓶法（D854）相比，其要求土壤比重测定需至少 100 克烘干试样，并选用容量不低于 100 毫升的比重瓶或 50 毫升带塞瓶作为测量容器，且必须使用蒸馏水或去离子水作为土粒浸没液体[99][100]。3、最大/最小干密度方面，月壤样品测试仍采用微量样本，使用特殊微型模具，与 ASTM 标准土壤最密/最疏密度试验方法（D4253/D4254）相比，测定自由排水土壤最大密度时，需将烘干或湿润土样装入标准模具（公称容积 2830 cm^3 或 14200 cm^3），在土样表面施加 14 kPa 附加荷载后，通过电磁式、偏心式或凸轮驱动式振动台进行垂直振动。试样振动时间与频率取决于振动台垂直双振幅参数[98]，而另一标准则样品均在 110°C 下烘干至恒重，后将约为所需体积 150%的样品装入 1 立方分米容器中，使用料斗装填至溢出，以 0.1%的精度称量容器及内容物质量，最终结果取三次测量的平均值（容器内容物质量与其体积的比值）。压实堆积密度测试采用 50Hz 振动台和 1 立方分米容器，时间定为两分钟[99]。4、剪切强度，通过直剪实验或三轴实验标定。根据 ASTM 标准，土体剪切强度通常通过直剪试验（D3080）或三轴压缩试验（D2850）测定：直剪试验要求圆形试样最小直径（或方形试样宽度）为 50 毫米或最大粒径的 10 倍（取较大值），并满足 2:1 的宽厚比；三轴试验则规定圆柱形试样最小直径 33 毫米，高径比需控制在 2~2.5 之间[98]，而另一标准则为通过仪器测试剪切面为正方形截面的立方体试件，边长 60 毫米或 100 毫米[99]。

二、大型土工试验，针对特定科研或工程场景选择最适宜的模拟物至关重要，进行岩土实验时化学组分重要性下降，但材料的力学特性必须与真实月壤近似[47]，且需采用同一套岩土测试技术。曼切斯特大学 Just 等通过扫描电镜（SEM）对颗粒形态分析；X 射线荧光光谱（XRF）测定材料精确化学成分；采用激光粒度仪测定粒度分布并另考察不均匀系数（Cu）与曲率系数（Cc）两项级配指标；采用比重瓶法测定比重；基于 ASTM 标准测定最小

干密度、最大干密度；依据 ASTM 标准进行直剪试验，测定摩擦角 φ 与粘聚力 c；最终将 UoM-B 和 UoM-W 其与真实月壤及现有月壤模拟物的数据进行对比，尽管化学成分存在差异，但在岩土力学参数上与真实月壤具有显著相似，故可用作大型土工试验[101]。印度 Venugopal 等为保障“月船”系列探测器计划在月球南极区域巡视的顺利进行，以总体化学组成与矿物学为特征，以颗粒级配、相对密度、内聚力、内摩擦角、密度、变形模量等关键地质力学特性为目标参数，研制 LSS-ISAC-1 型模拟月壤[102]。根据以上参数，通过对比既往研究的模拟月壤来评估月壤的工程特性，验证了 LSS-ISAC-1 测试的可靠性，而后，通过动三轴试验系统阐释其在模拟月震条件下的动力特性[103]。

结论与展望

本文系统地回顾了以往 Apollo、Luna 模拟月壤的研制，并阐述其原料与研制方法；总结了基于嫦娥 5 号样品的模拟月壤的研究成果与进展，并说明其核心特性；最后，结合土木工程中月壤混凝土与土工试验方面的应用做出如下结论与展望：

1、月壤与地球土壤存在显著差异

月壤在成分、颗粒形态、密度和力学性质等方面与地球土壤有本质区别。其颗粒棱角分明、粒度分布宽、密度较高，且缺乏地球土壤的风化与生物作用，导致其力学行为不能直接套用地球经验公式；此外，月壤颗粒的锯齿状形态增强了其颗粒间的摩擦，使其存在互锁效应，从而提升了月壤整体的力学刚度和稳定性。

2、模拟月壤研制方法多样化

目前主要有三种研制方法：全岩样品法：成本低、应用广；添加法：通过添加钛铁矿、玻璃等调整成分；单矿物复合配置法：精度高，适用于高保真模拟。随地外建造的需求逐渐增加，使用单矿物复合配置法可兼顾建筑材料与土工试验的需求。

3、模拟月壤在月球建造中具有广泛应用

模拟月壤被用于多种建筑材料制备方法，例如水泥水化反应类、地质聚合反应类、烧结类与粘结类，各类方法在强度、能耗、环境等方面各有优劣，需结合具体条件选择使用。

4、模拟月壤土力学测试需标准化

月壤的力学粒度分布与地球土壤级配描述存在差异，需开发适用于微量样本和月球环境的测试方法；并且在大型土工试验中，模拟月壤的力学一致性比化学成分更为关键。

5、未来模拟月壤的研制应更加注重多目标协同与标准化体系建设，结合嫦娥五号等最新月壤样本数据，开发既能满足岩土力学试验需求，又适用于原位资源利用和智能建造的高保真模拟材料。同时，应建立统一标准，推动模拟月壤在月球基地建设、载人登月等重大工程中的系统化、规模化应用，为人类在月球的长期驻留提供坚实的技术支撑。

参考文献

[1] OUYANG Ziyuan. Introduction to Lunar Science[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005: 5-11 (欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 5-11)

[2] HARVEY B. Soviet and Russian Lunar Exploration[M]. New York: Praxis, 2007.

[3] ZHENG Yongchun, OUYANG Ziyuan, WANG Shijie, *et al*. Physical and mechanical properties of lunar regolith[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2004, **24**(4): 14-19 (郑永春, 欧阳自远, 王世杰, 等. 月壤的物理和机械性质[J]. 矿物岩石, 2004, **24**(4): 14-19)

[4] Bart G D, Nickerson R D, Lawder M T, *et al*. Global survey of lunar regolith depths from LROC Images[J]. *Icarus*, 2011, **215**(2): 485–490

[5] ZHENG Yongchun, WANG Shijie, LIU Jianzhong, *et al*. A review and prospect for developing of lunar soil simulants[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2005, **25**(1): 70-75 (郑永春, 王世杰, 刘建忠, 等. 模拟月壤研制的初步设想[J]. 空间科学学报, 2005, **25**(1): 70-75)

[6] HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

[7] PEI Zhaoyu, WANG Qiong. Strategic concept of resource utilization development route of the international lunar research station[J]. *Journal of Astronautics*, 2024, **45**(4): 625-637 (裴照宇, 王琼. 国际月球科研站资源利用发展路线战略构想[J]. 宇航学报, 2024, **45**(4): 625-637)

[8] BAO Charun, ZHANG Daobo, ZHI Xiao, *et al*. Preparation of a lunar regolith simulant for in-situ construction research: TC-1C[J]. *Industrial Construction*, 2025, **55**(1): 176-181 (包查润, 张道博, 郅晓, 等. 用于月面工程建造研究的 TC-1C 模拟月壤研制[J]. 工业建筑, 2025, **55**(1): 176-181)

[9] COLWELL J E, BATISTE S, HORÁNYI M, *et al*. Lunar surface: dust dynamics and regolith mechanics[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, **45**(2): RG2006.

[10] HE Xiaoying, HE Bijiao, CAI Guobiao. Dust disturbance effects in lunar exploration[J]. *Manned Spaceflight*, 2012, **18**(6): 91-95 (何小英, 贺碧蛟, 蔡国飙. 探月过程中的粉尘干扰效应[J]. 载人航天, 2012, **18**(6): 91-95)

[11] MCKAY D S, HEIKEN G, BASU A, *et al*. The lunar regolith[M]//HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar Sourcebook, A User's Guide to the Moon. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 285-356.

[12] YAO Jie, Petrology and Mineralogy of Lunar Meteorite MIL 090070[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2014 (姚杰. 月球陨石 MIL 090070 的岩相学和矿物化学研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2014)

[13] VANIMAN D, DIETRICH J, TAYLOR G J, *et al*. Exploration, samples, and recent concepts of the Moon[M]//HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar Sourcebook. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 26

[14] MINERALS S, MINERALS O, MINERALS S, *et al*. Lunar minerals[M]//HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. *Lunar Sourcebook*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 121-181

[15] SIMON S B, CATO M J, SHEARER C K, *et al*. Modal petrology and mineral chemistry of the <1 mm size fraction of lunar regolith in Apollo 17 drive tube section 73002[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2024, **129**(1): e2023JE007991

[16] FAN Shichao, JIA Yang, XIANG Shuhong, *et al*. A preliminary study on simulation of lunar surface terrain[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2007, **24**(1): 15-20 (樊世超, 贾阳, 向树红, 等. 月面地形地貌环境模拟初步研究[J]. 航天器环境工程, 2007, **24**(1): 15-20)

[17] NUSIER O K, AL-MUFTY A A, JARADAT R A. Determination of saline soils specific gravity[J]. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 2008, **2**(1): 1-19

[18] CARRIER III W D, OLHOEFT G R, MENDELL W. Physical properties of the lunar surface[M]//HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar Sourcebook, A User's Guide to the Moon. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 475-594

[19] LI C L, HU H, YANG M F, *et al*. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission[J]. *National Science*

Review, 2022, **9**(2): nwab188
[20] GU R G, FANG Y G, JIANG Q, *et al*. Effect of particle size on direct shear deformation of soil[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2022, **28**(2): 135-143
[21] CARRIER III W D. Particle size distribution of lunar soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, **129**(10): 956-959
[22] CHEN Z H, XU Z D, LU H F, *et al*. The contact force between lunar-based equipment and lunar soil[J]. *iScience*, 2024, **27**(4): 109322
[23] CHEN Haiyang, WANG Ren, LI Jianguo, *et al*. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(9): 1389-1392 (陈海洋, 汪稔, 李建国, 等. 钙质砂颗粒的形状分析[J]. 岩土力学, 2005, **26**(9): 1389-1392)
[24] ANTONY S J, KUHN M R. Influence of particle shape on granular contact signatures and shear strength: new insights from simulations[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, **41**(21): 5863-5870
[25] WILKERSON R P, RICKMAN D L, MCELDERRY J R, *et al*. On the measurement of shape: with applications to lunar regolith[J]. *Icarus*, 2024, **412**: 115963
[26] KATAGIRI J, MATSUSHIMA T, YAMADA Y, *et al*. Investigation of 3D grain shape characteristics of lunar soil retrieved in Apollo 16 using image-based discrete-element modeling[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2015, **28**(4)
[27] LI Jia, WANG Chao, LI Zhiyuan, *et al*. Morphological characteristics study of Chang'e-5 lunar regolith particles for in-situ resource utilization on moon[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2024, **52**(8): 1180-1187 (李佳, 王超, 李志远, 等. 面向月面原位资源利用的嫦娥五号月壤样品颗粒形态特征研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, **52**(8): 1180-1187)
[28] ZHAO X L, LIU Z X, LI Y, *et al*. Numerical study of cone penetration tests in lunar regolith for strength index[J]. *Applied Sciences*, 2024, **14**(22): 10645
[29] KAFKA O L, MOSER N H, CHIARAMONTI A N, *et al*. Measurement of the three-dimensional shape and size distribution of 17 lunar regolith simulants: simulant shape and size inter-comparison and simulant shape comparison with Apollo 11 and Apollo 14 lunar regolith[J]. *Icarus*, 2025, **434**: 116542
[30] SARGEANT H M, SCHULTZ J, MOSER-MANCEWICZ N, *et al*. Lunar simulant considerations for molten regolith electrolysis experiments[C]//53rd Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands: LPI, 2022
[31] ZOU Y, WU H Y, CHAI S P, *et al*. Development and characterization of the PolyU-1 lunar regolith simulant based on Chang'e-5 returned samples[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2024, **34**(9): 1317-1326
[32] SMITHERS G A, NEHLS M K, HOVATER M A, *et al*. A one-piece lunar regolith bag garage prototype[R]. NASA/STI Accession number: 20080000853, Hanover: NASA, 2007
[33] ZHOU S Q, LU C H, ZHU X Y, *et al*. Preparation and characterization of high-strength geopolymer based on BH-1 lunar soil simulant with low alkali content[J]. *Engineering*, 2021, **7**(11): 1631-1645
[34] WANG C, SANLANG S, TONG X H, *et al*. Developing a high-fidelity lunar regolith simulant based on Chang'E-5 samples and remote sensing images[J]. *Icarus*, 2025, **442**: 116764
[35] ZHANG H, ZHANG X, ZHANG G, *et al*. Size, morphology, and composition of lunar samples returned by Chang'E-5 mission[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, **65**(2): 229511
[36] BASU A, WENTWORTH S J, MCKAY D S. Submillimeter grain-size distribution of Apollo 11 soil 10084[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2001, **36**(1): 177-181
[37] LV Jinke. Development of CE-5 Lunar Regolith Simulant and Experimental Study on Its Mechanical Properties[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024 (吕金珂. CE-5 模拟月壤土的研制及其力学特性的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024)
[38] HE Xinxing, XIAO Long, HUANG Jun, *et al*. Lunar soil simulant development and lunar soil simulant CUG-1A[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2011, **30**(4): 137-142 (贺新星, 肖龙, 黄俊, 等. 模拟月壤研究进展及 CUG-1A 模拟月壤[J]. 地质科技情报, 2011, **30**(4): 137-142)
[39] JIA Yang, SHEN Zhenrong, DANG Zhaolong, *et al*. Lunar soil simulant and its engineering application in lunar exploration program[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2014, **31**(3): 241-247 (贾阳, 申振荣, 党兆龙, 等. 模拟月壤研究及其在月球探测工程中的应用[J]. 航天器环境工程, 2014, **31**(3): 241-247)
[40] TIAN H C, WANG H, CHEN Y, *et al*. Non-KREEP origin for Chang'e-5 basalts in the Procellarum KREEP Terrane[J]. *Nature*, 2021, **600**(7887): 59-63
[41] LI Jianqiao, ZOU Meng, JIA Yang, *et al*. Lunar soil simulant for vehicle-terramechanics research in labtory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(6): 1557-1561 (李建桥, 邹猛, 贾阳, 等. 用于月面车辆力学试验的模拟月壤研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(6): 1557-1561)
[42] JIANG Mingjing, LI Liqing. Development of TJ-1 lunar soil simulant[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(2): 209-214 (蒋明镜, 李立青. TJ-1 模拟月壤的研制[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(2): 209-214)
[43] LI R L, ZHOU G Q, YAN K, *et al*. Preparation and characterization of a specialized lunar regolith simulant for use in lunar low gravity simulation[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, **32**(1): 1-15
[44] LI R L, CHEN J, ZHANG J R, *et al*. Cone penetration resistance of CUMT-1 lunar regolith simulant under magnetic-similitude lunar gravity condition[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, **18**(12): 6725-6744
[45] LI S, ZHOU Z H, HU G, *et al*. Preparation and evaluation of GCD-1 lunar regolith simulant based geopolymer activated by solid sodium silicate[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, **20**: e03273
[46] ZHANG J, LI D T, XIE K Y, *et al*. Preparation and characterization of highland lunar regolith simulant NEU-2[J]. *Advances in Space Research*, 2025, **76**(3): 1782-1794
[47] TAYLOR L A, PIETERS C M, BRITT D. Evaluations of lunar regolith simulants[J]. *Planetary and Space Science*, 2016, **126**: 1-7
[48] TOKLU Y C, AKPINAR P. Lunar soils, simulants and lunar construction materials: an overview[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **70**(3): 762-779
[49] ZOCCA A, FATERI M, AL-SABBAGH D , *et al*. Investigation of the sintering and melting of JSC-2A lunar regolith simulant[J]. *Ceramics International*, 2020, **46**(9): 14097-14104
[50] SUEYOSHI K, WATANABE T, NAKANO Y, *et al*. Reaction mechanism of various types of lunar soil simulants by hydrogen reduction[C]//11th Biennial ASCE Aerospace Division International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Long Beach: American Society of Civil Engineers, 2008: 1-8
[51] MATSUSHIMA T, KATAGIRI J, UESUGI K, *et al*. 3D shape characterization and image-based DEM simulation of the lunar soil simulant FJS-1[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2009, **22**(1): 15-23
[52] PENG B, THANNASI P, EL-SEKELLY W, *et al*. Development and characterization of a regional lunar soil simulant for emirates lunar missions[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2024, **34**(9): 1305-1315
[53] ZHENG Y C, WANG S J, OUYANG Z Y, *et al*. CAS-1 lunar soil simulant[J]. *Advances in Space Research*, 2009, **43**(3): 448-454
[54] ZHENG Yongchun, WANG Shijie, FENG Junming, *et al*. CAS-1 lunar soil stimulant[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2007, **27**(3): 571-578 (郑永春, 王世杰, 冯俊明, 等. CAS-1 模拟月壤[J]. 矿物学报, 2007, **27**(3): 571-578)
[55] HE X X, XIAO L, HUANG J, *et al*. Lunar regolith simulant CUG-1A[C]//41st Annual Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands: LPI, 2010
[56] LINKE S, WINDISCH L, KUETER N, *et al*. TUBS-M and TUBS-T based modular regolith simulant system for the support of lunar ISRU activities[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, **180**: 104747
[57] BATTLER M M, SPRAY J G. The Shawmere anorthosite and OB-1 as lunar highland regolith simulants[J]. *Planetary and Space Science*, 2009, **57**(14/15): 2128-2131
[58] LEE J, CHANG B C, LEE S, *et al*. Feasibility study on lunar concrete landing pad[C]//Thirteenth ASCE Aerospace Division Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, and the 5th

NASA/ASCE Workshop On Granular Materials in Space Exploration. Pasadena: American Society of Civil Engineers, 2012: 128-134
[59] JIANG M J, LI L Q, SUN Y G. Properties of TJ-1 lunar soil simulant[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2012, **25**(3): 463-469
[60] JIANG Lei, SU Bo, WANG Changke, *et al*. Study on LBD lunar soil simulant[C]//2010: 198-204 (江磊, 苏波, 王长科, 等. LBD 模拟月壤研究[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第七届学术年会论文集. 哈尔滨: 中国宇航学会深空探测技术专业委员会, 2010: 198-204)
[61] BONANNO A, BERNOLD L E. Exploratory review of sintered lunar soil based on the results of the thermal analysis of a lunar soil simulant[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2015, **28**(4): 04014114
[62] CANNON K M, BRITT D T. Mineralogically accurate simulants for lunar ISRU, and strategic regolith processing[C]//Lunar ISRU 2019 - Developing a New Space Economy Through Lunar Resources and Their Utilization. Columbia: LPI, 2019: 5002
[63] BRITT D T, CANNON K M. High fidelity lunar highlands and mare regolith simulants: enabling tools for lunar surface exploration and ISRU development[C]//Lunar Surface Science Workshop. LPI Contib, 2020
[64] SUN H, YI M, SHEN Z G, *et al*. Developing a new controllable lunar dust simulant: BHLD20[J]. *Planetary and Space Science*, 2017, **141**: 17-24
[65] LI C Y, XIE K Y, LIU A M, *et al*. The preparation and characterization of NEU-1 lunar soil simulants[J]. *JOM*, 2019, **71**(4): 1471-1476
[66] HU Jiajun, YU Kequan, GUO Xiaolu. Preparation of TJC-1 lunar regolith simulant based on Chang'E-5 lunar soil[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2024, **41**(4): 389-396 (胡家骏, 俞可权, 郭晓潞. 基于“嫦娥五号”月壤的 TJC-1 模拟月壤研制[J]. 航天器环境工程, 2024, **41**(4): 389-396)
[67] ZHOU S Q, LIN Z Q, TAO X Y, *et al*. Sintering of Chang'e-5 high-fidelity lunar soil simulant for providing high-strength materials for lunar base construction[J]. *Science China Technological Sciences*, 2025, **68**(8): 1820602
[68] RUAN R H, YANG W, ZHANG D, *et al*. A moderate-Ti lunar mare soil simulant: IGG-01[J]. *Acta Astronautica*, 2024, **224**: 148-160
[69] TENG Y, WANG S, CUI Y F, *et al*. Influence of loading conditions on mechanical behaviors of lunar regolith simulant WHU-1 based on Chang'e-5 returned samples[J]. *Acta Geotechnica*, 2025, **20**(5): 2327-2344
[70] TOKLU Y C. Civil engineering in the design and construction of a lunar base[C]//Seventh International Conference and Exposition on Engineering, Construction, Operations, and Business in Space. Albuquerque: American Society of Civil Engineers, 2000: 822-834
[71] ISACHENKOV M, CHUGUNOV S, AKHATOV I, *et al*. Regolith-based additive manufacturing for sustainable development of lunar infrastructure – An overview[J]. *Acta Astronautica*, 2021, **180**: 650-678
[72] WANG C, ZHANG G Q, WANG Y H, *et al*. A review of lunar environment and in-situ resource utilization for achieving long-term lunar habitation[J]. *Galaxies*, 2025, **13**(5): 103
[73] KHITAB A, ANWAR W, MEHMOOD I, *et al*. Lunar concrete: prospects and challenges[J]. *Astronomy Reports*, 2016, **60**(2): 306-312
[74] HORIGUCHI T, SAEKI N, YONEDA T, *et al*. Behavior of simulated lunar cement mortar in vacuum environment[C]//Sixth ASCE Specialty Conference and Exposition on Engineering, Construction, and Operations in Space. Albuquerque: American Society of Civil Engineers, 1998: 571-576
[75] PONNADA M R, SINGURU P. Advances in manufacture of Mooncrete – a review[J]. *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology*, 2014, **4**(5): 501-510
[76] LIN T D, LOVE H, STARK D. Physical properties of concrete made with Apollo 16 lunar soil sample[C]//The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. Houston: NASA, 1992
[77] LIN T D, TSENG L, CHOU S. Lunar concrete made with the dry-mix/steam-injection method[C]//Fifth International Conference on Space. Albuquerque: American Society of Civil Engineers, 1996: 592-599
[78] LIM S, PRABHU V L, ANAND M, *et al*. Extra-terrestrial construction processes – Advancements, opportunities and challenges[J]. *Advances in Space Research*, 2017, **60**(7): 1413-1429
[79] RATHEE M, SINGH N. Reviewing geopolymer concrete: a possible sustainable structural material of future[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2024
[80] WANG K T, LEMOUGNA P N, TANG Q, *et al*. Lunar regolith can allow the synthesis of cement materials with near-zero water consumption[J]. *Gondwana Research*, 2017, **44**: 1-6
[81] ZHOU S Q, ZHU X Y, LU C H, *et al*. Synthesis and characterization of geopolymer from lunar regolith simulant based on natural volcanic scoria[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, **35**(1): 144-159
[82] COLLINS P J, EDMUNSON J, FISKE M, *et al*. Materials characterization of various lunar regolith simulants for use in geopolymer lunar concrete[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **69**(11): 3941-3951
[83] ZHOU S Q, YANG Z N, ZHANG R R, *et al*. Preparation and evaluation of geopolymer based on BH-2 lunar regolith simulant under lunar surface temperature and vacuum condition[J]. *Acta Astronautica*, 2021, **189**: 90-98
[84] DAVIS G, MONTES C, EKLUND S. Preparation of lunar regolith based geopolymer cement under heat and vacuum[J]. *Advances in Space Research*, 2017, **59**(7): 1872-1885
[85] LIU B, SUN P, YAO W, *et al*. Research progress on the adaptability of lunar regolith simulant-based composites and lunar base construction methods[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2024, **34**(10): 1341-1363
[86] HAN W B, DING L Y, CAI L X, *et al*. Sintering of HUST-1 lunar regolith simulant[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, **324**: 126655
[87] COOPER B L. Sintering of lunar and simulant glass[J]. AIP Conference Proceedings, 2008, **969**(1): 186-194
[88] TAYLOR L A, MEEK T T. Microwave sintering of lunar soil: properties, theory, and practice[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2005, **18**(3): 188-196
[89] ZHOU C, LU Y N, GAO Y Y, *et al*. Earth-based unmanned solar sintering system for lunar bricks with regolith simulant[J]. *Automation in Construction*, 2025, **179**: 106486
[90] AGAPKIN I A, SLYUTA E N. A review of selective laser sintering/melting techniques for lunar construction[J]. *Acta Astronautica*, 2025, **237**: 315-325
[91] LEE T S, LEE J, YONG ANN K. Manufacture of polymeric concrete on the Moon[J]. *Acta Astronautica*, 2015, **114**: 60-64
[92] OH K, YI H Z, CHEN T, *et al*. Impact formation of ultralow-binder-content composite “lunar cement”[J]. *CEAS Space Journal*, 2021, **13**(2): 183-187
[93] JAKUS A E, KOUBE K D, GEISENDORFER N R, *et al*. Robust and elastic lunar and Martian structures from 3D-printed regolith inks[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 44931
[94] ROBERTS A D, WHITTALL D R, BREITLING R, *et al*. Blood, sweat, and tears: extraterrestrial regolith biocomposites with *in vivo* binders[J]. *Materials Today Bio*, 2021, **12**: 100136
[95] TOUTANJI H A, GRUGEL R N. Performance of “waterless concrete”[M]//GRANTHAM M, MAJORANA C, SALOMONI V. Concrete Solutions. London: CRC Press, 2009: 229-232
[96] OMAR H A.Production of lunar concrete using molten sulfur[J].*NASA/CR*,1993.
[97] PEI Zhaoyu, LIU Jizhong, WANG Qian, *et al*. Overview of lunar exploration and international lunar research station[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, **65**(24): 2577-2586 (裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站[J]. 科学通报, 2020, **65**(24): 2577-2586)
[98] HE C M. Geotechnical Characterization of Lunar Regolith Simulants[D]. Cleveland: Case Western Reserve University, 2010
[99] KOBAKA J, KATZER J, SEWERYN K, *et al*. A study of lunar soil simulants from construction and building materials perspective[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, **18**: e02082
[100] QUINTEROS V S, MIKESELL T D, GRIFFITHS L, *et al*. Geotechnical laboratory testing of lunar simulants and the importance of standardization[J]. *Icarus*, 2024, **408**: 115812
[101] JUST G H, JOY K H, ROY M J, *et al*. Geotechnical

characterisation of two new low-fidelity lunar regolith analogues (UoM-B and UoM-W) for use in large-scale engineering experiments[J]. *Acta Astronautica*, 2020, **173**: 414-424
[102] VENUGOPAL I, PRABU T, MUTHUKKUMARAN K, *et al*. Development of a novel lunar highland soil simulant (LSS-ISAC-1) and its geotechnical properties for Chandrayaan missions[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, **194**: 105116
[103] PRABU T, MUTHUKKUMARAN K, VENUGOPAL I. Assessment of dynamic properties of a new lunar highland soil simulant (LSS-ISAC-1) developed for Chandrayaan missions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, **155**: 107178

第一作者：聂桂波（1982—）男，现为中国地震局工程力学研究所研究员，博士生导师。主要研究方向为结构抗震理论研究，现任工程抗震研究中心副主任。



通讯作者：文舜嵌（1999—）男，现为中国地震局工程力学研究所博士研究生，主要研究方向为地外建造。



最新录用