

月球钻进中正面钻遇砾石地层的负载参数特征分析

刘 鹏, 李 谦*, 黄 科, 谢兰兰, 郑明明

(成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:人类对月球的探索逐渐深入,月壤中存在的砾石地层会在月球钻探中给钻探设备带来磨损与故障风险。本文以砾石含量、砾石尺寸与砾石层厚度为影响因素,以钻进功率、钻进扭矩与钻进阻力为目标参数,进行正交试验,得到以下结论:对钻进功率的影响从大到小排序为砾石尺寸、砾石含量、砾石层厚度,功率随砾石含量增加呈先降后升趋势,随砾石尺寸增加呈先升后降趋势,随砾石层厚度升高呈先升后降趋势。对钻进扭矩的影响从大到小排序为砾石层厚度、砾石含量、砾石尺寸,扭矩与砾石含量和砾石层厚度正相关,随砾石尺寸增加先升后降。对钻进阻力的影响程度由大到小为砾石层厚度、砾石含量、砾石尺寸。阻力与砾石层厚度和砾石含量正相关,随砾石尺寸增加呈先降后升趋势。

关键词:月球钻探;砾石地层;正面钻进;钻进功率;钻进扭矩;钻进阻力

中图分类号:P634;P184 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0091-06

Analysis of load parameters characteristics of frontal drilling into gravel strata in lunar drilling

LIU Peng, LI Qian*, HUANG Ke, XIE Lanlan, ZHENG Mingming

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: With the gradual deepening of human exploration of the Moon, the gravel strata in lunar soil undoubtedly bring risks of wear and failure to drilling equipment during lunar drilling. Aiming at this problem, this paper takes gravel content, gravel size and spatial position of the gravel layer as influencing factors, and takes drilling power, drilling torque and drilling resistance as target parameters to carry out orthogonal physical tests, and obtains the following conclusions: the influence on drilling power from large to small is gravel size, gravel content and spatial position of the gravel layer. Power initially decreases and then increases with rising gravel content, initially increases and then decreases with increasing gravel size, initially increases and then decreases with increased complexity of gravel distribution. The influence on drilling torque from large to small is spatial position of the gravel layer, gravel content and gravel size. Torque is proportional to gravel content and thickness of the gravel layer, and the relationship with gravel size is that torque first increases and then decreases with the increase of gravel size. The influence degree on drilling resistance from large to small is spatial position of the gravel layer, gravel content and gravel size. Resistance is proportional to thickness of the gravel layer and gravel content, and the relationship with gravel size is that resistance

收稿日期:2025-06-15; **修回日期:**2025-07-24 **DOI:**10.12143/j.ztgc.2025.S1.014

基金项目:国家自然科学基金面上项目“量化月壤扰动特征的模块化月球钻进力学模型研究”(编号:42072344);国家自然科学基金青年科学基金项目“月球钻进与月-地运输对月壤样品特征的扰动机理研究”(编号:42302356)、“模拟月球表层采样机土耦合力学模型研究”(编号:11502034)

第一作者:刘鹏,男,汉族,2002年生,硕士研究生,地质资源与地质工程专业,研究方向为月球钻进过程中机具和月壤耦合作用,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,2920497677@qq.com。

通信作者:李谦,男,汉族,1987年生,副教授,硕士生导师,地质资源与地质工程专业,博士,从事钻井智能化分析与应用研究工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,liqian2014@cdut.edu.cn。

引用格式:刘鹏,李谦,黄科,等.月球钻进中正面钻遇砾石地层的负载参数特征分析[J].钻探工程,2025,52(S1):91-96.

LIU Peng, LI Qian, HUANG Ke, et al. Analysis of load parameters characteristics of frontal drilling into gravel strata in lunar drilling [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 91-96.

first decreases and then increases with the increase of gravel size.

Key words: lunar drilling; gravel stratum; face drilling; drilling power; drilling torque; drilling resistance

0 引言

随着嫦娥工程第四期任务的逐步推进,嫦娥七、八号计划探测月球南极资源以期对其利用,月球钻探便成为了其中的关键环节。但姜生元等^[1]发现在月壤中存在高浓度大颗粒砾石层,而砾石地层会带来钻具磨损、孔壁失稳等问题。因此对钻进负载参数的特征进行分析,识别砾石地层特征十分必要。

现有的月壤样本总量极少,很难满足系统性的研究需求,只能通过模拟月壤试验与数值仿真来实现。在模拟月壤方面,美国机构研发了许多种模拟月壤,如JSC-1A、MLS系列、LSS系列等。欧空局EAC-1、日本MKS-1等模拟月壤均基于真实月壤矿物研制^[2]。其中许多学者对JSC-1A有着深刻研究,Kuar等^[3]详细总结了JSC-1A各氧化物的质量分数,Goguen等^[4]总结了JSC-1A的多孔颗粒数量百分比。而欧阳自远^[5]、Papike等^[6]和Shuai等^[7]的研究解释了模拟和真实月壤有差异的原因。国内各机构也大都因为原有的模拟月壤不满足需求而开发了各种各样的模拟月壤,比如中科院CAS-1^[8]、吉林大学TY II系列^[9]、中国地质大学CUG-1A^[10]、同济大学TJ系列^[11]、CLRS^[12]等。其中CUG-1A以辉南火山渣为原料,与Apollo 14月壤相似,而同系列的CUG-2A和CUG-3A还在研制中^[13]。

在钻进砾石层方面,德国慕尼黑大学采用DEM方法模拟了砂砾的渗过过程,通过滚动阻力模型处理颗粒形状效应^[14],可为月壤砾石层构建提供参考。因在卵砾石层中经常出现孔壁坍塌、钻具卡滞的问题^[15],国内学者通过改进钻头设计(如热压金刚石-聚晶体复合型钻头^[16])与冲洗液技术(多糖类植物胶无固相冲洗液^[17])提升取心效率。在成都三绕(西段),吴志伟^[18]采用双管跟进钻探工艺和缅甸植物胶来提高取心效率。但新疆冲洪积卵砾石层中,所有钻探方法都做不到质量级别最低的IV级土样采取^[19]。

因而进行含砾月壤的钻进试验,确定钻进参数与砾石层之间的关系,进而实现对砾石层的识别是十分必要的。

1 正面钻进砾石地层的试验设计

1.1 试验目的

我国的月球探测工程正如火如荼地进行,依据现有的资料,月壤中存在着砾石,而卵砾石层是地质钻探中一种易失稳的复杂岩层范例,这种不稳定性常常给施工带来事故。本试验选用砾石含量、砾石尺寸和砾石层厚度3个影响因素,利用取心钻头进行正面钻进(即垂直向下钻进)砾石层试验。采集钻进功率、钻进扭矩与钻进阻力的数据,并将这些数据进行极差分析,得出单因素与目标参数之间关系。再通过钻进负载参数分析砾石地层的特征值,根据分析出的砾石地层设计更适合钻进的设备 and 参数。试验流程如图1所示。

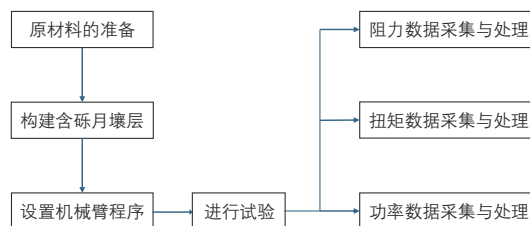


图1 试验流程

1.2 正交试验方案设计

本次试验研究的影响因素共计3个,分别是砾石含量、砾石尺寸与砾石层厚度,经过对实验室材料的调查,给每个影响因素设置3个试验水平,砾石含量水平1、2、3分别是20%、30%、40%,其含义是砾石体积占总体积的百分比,砾石含量太少则不符合本文的目的,砾石含量上限受含砾月壤层高度影响,也是需要尽可能覆盖真实范围,故选择这3个水平。砾石尺寸水平1、2、3分别为2~5、5~10、10~20 mm,其含义是砾石直径范围,其选择依据是实验室已有材料和设备的情况以及姜生元团队在1 m月壤钻进剖面中发现了粒径大于10 mm的砾石,选择稍大尺寸是易于筛选,可降低试验时间。砾石层厚度水平1、2、3分别为6、8、10 cm,其含义是含砾月壤层总高度,其水平选择与砾石含量选择相互影响,月壤总高至少16 cm时,砾石含量才能为40%,砾石层厚度必须大于6 cm才能满足试验设置指标,而不选择更高水平是因为砾石层厚度也影响着整个月

壤箱的质量,太大的质量不利于试验的进行。试验所用的模拟月壤为 CUG-1A,平均粒径 60 μm,密度 1.502 g/cm³,内摩擦角为 18.22°~29.38°,内聚力为 0.21~1.71 kPa。试验因素与水平如表 1 所示。

表 1 试验因素与水平			
试验因素	水平 1	水平 2	水平 3
砾石含量/%	20	30	40
砾石尺寸/mm	2~5	5~10	10~20
砾石层厚度/cm	6	8	10

构建含砾月壤层的实物如图 2 所示,1 为表层模拟月壤层,7 为底层模拟月壤层,2~6 为砾石层厚度为 10 cm 的含砾月壤层,其中 2、4 和 6 为砾石层,3 和 5 都为模拟月壤层。



图 2 试验 5 含砾月壤层实物

目标参数分别为钻进扭矩、钻进阻力与钻进功率。钻进扭矩是驱动钻头旋转所需的力矩,可反映钻头与地层剪切作用强度。钻进阻力是钻头轴向推进所需克服的阻力,可反映地层抗压强度与钻压效率。钻进功率是钻进过程中的总能量消耗,体现系统综合能效。扭矩、阻力、功率可作为地层响应的直接输出参数,地层情况发生变化时通过这些参数变化而体现,且 3 种参数易于测量和监测,还能够信息互补,避免单一参数的解释过于片面。

经对试验设计的参考,采用 $L_9(3^4)$ 正交设计,如

表 2 所示。

表 2 $L_9(3^4)$ 正交设计表			
试验序号	砾石含量/%	砾石尺寸/mm	砾石层厚度/cm
1	20	2~5	6
2	20	5~10	8
3	20	10~20	10
4	30	2~5	8
5	30	5~10	10
6	30	10~20	6
7	40	2~5	10
8	40	5~10	6
9	40	10~20	8

对试验的钻探系统参数进行设定:试验中使用螺旋取心钻头,钻头长度为 234 mm,螺旋翼厚度为 2 mm,螺旋翼高度为 5.5 mm,螺距为 15 mm,内径 30 mm,外径 55 mm。固定转速设置为 120 r/min,固定给进速度设置为 10 mm/s。

2 数据处理与分析

2.1 钻进功率数据处理与分析

试验一共 9 组,每组进行 1 次正交试验和 3 次平行重复试验,其中第 5、7、8 组进行 5 次重复试验,共计 42 次试验,将平行重复试验取平均值后得统计数据,见表 3。

表 3 钻进功率试验数据记录				
试验序号	砾石含量/%	砾石尺寸/mm	砾石层厚度/cm	功率值/W
1	20	2~5	6	9.26
2	20	5~10	8	12.42
3	20	10~20	10	10.29
4	30	2~5	8	8.85
5	30	5~10	10	12.17
6	30	10~20	6	9.84
7	40	2~5	10	9.14
8	40	5~10	6	12.31
9	40	10~20	8	10.46

经过极差分析的 R 值(表 4),可以清楚地看出砾石尺寸对功率的影响最大,其次为砾石含量,最后为砾石层厚度。所以 3 个因素对试验的影响程度由大到小分别为:因子 2(砾石尺寸)>因子 1(砾石

含量) $>$ 因子3(砾石层厚度)。

表4 功率 K 值及 R 值分析表

水平	砾石含量	砾石尺寸	砾石层厚度
K_1	10.32	9.08	10.47
K_2	10.29	12.30	10.58
K_3	10.64	10.20	10.53
R	0.35	3.22	0.11

砾石含量对功率的影响:如图3所示,砾石含量与功率的关系为功率先随砾石含量的升高而下降,再随砾石含量的上升而上升。当砾石含量为20%时,功率为10.322 W,当砾石含量提高到30%时,功率降至最低10.287 W,但当砾石含量提高至40%时,功率提高至10.638 W。

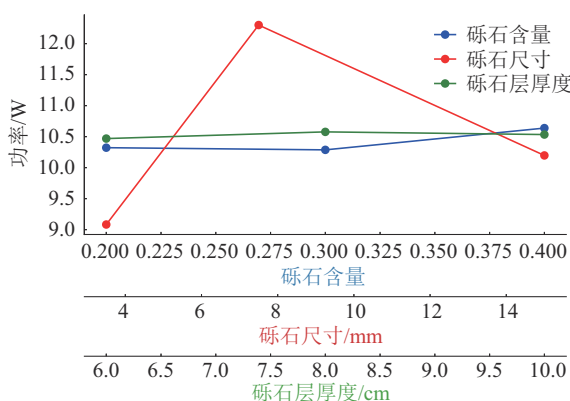


图3 不同水平各因子钻进功率

砾石尺寸对功率的影响:如图3所示,功率与砾石尺寸的关系为功率先随砾石尺寸的升高而升高,然后又随着砾石尺寸的升高而降低,当砾石尺寸为2~5 mm时,功率值为9.083 W,当砾石尺寸上升为5~10 mm时,功率值升至最高12.3 W,而当砾石尺寸再上升至10~20 mm时,功率值又降低为10.197 W。

砾石层厚度对功率的影响:如图3所示,砾石层厚度与功率的关系为功率先随砾石层厚度的增大而升高,然后又随着砾石层厚度的增大而降低。当砾石层厚度为6 cm时,功率为10.469 W,当砾石层厚度上升至8 cm时,功率升至最高10.577 W,而当砾石层厚度上升至10 cm时,功率却下降至10.534 W。

2.2 钻进扭矩数据处理与分析

扭矩试验进行了9组,每组3次重复试验及以上,试验次数总计为42次,将重复试验取平均值得出扭矩值,见表5。对表5中的数据进行极差分析,得到 K 值及 R 值,见表6。

表5 扭矩试验数据记录

试验序号	砾石含量/%	砾石尺寸/mm	砾石层厚度/cm	扭矩值/(N·m)
1	20	2~5	6	0.22
2	20	5~10	8	0.64
3	20	10~20	10	0.45
4	30	2~5	8	0.65
5	30	5~10	10	0.59
6	30	10~20	6	0.33
7	40	2~5	10	0.78
8	40	5~10	6	0.62
9	40	10~20	8	0.52

表6 扭矩 K 值及 R 值分析表

水平	砾石含量	砾石尺寸	砾石层厚度
K_1	0.44	0.55	0.39
K_2	0.52	0.61	0.60
K_3	0.64	0.43	0.61
R	0.21	0.18	0.22

通过极差分析 R 值可以看出,砾石层厚度对扭矩的影响最大,砾石含量其次,最小为砾石尺寸。故3个影响因素对扭矩的影响程度由大到小为因子3(砾石层厚度) $>$ 因子1(砾石含量) $>$ 因子2(砾石尺寸)。

砾石含量对扭矩的影响:如图4所示,砾石含量与扭矩的关系为正相关,砾石含量增大时,扭矩也随着增大。当砾石含量为20%时,扭矩为0.44 N·m,而砾石含量升高至30%,扭矩升高至0.52 N·m,而当砾石含量升高至40%,扭矩则达到0.64 N·m时,。

砾石尺寸对扭矩的影响:如图4所示,扭矩先随砾石尺寸的升高而升高,又随着砾石尺寸的升高而下降。当砾石尺寸为2~5 mm时,扭矩为0.55 N·m,而当砾石尺寸增大至5~10 mm时,扭矩提高到最高0.61 N·m,但当砾石尺寸增加到为10~20 mm时,扭矩却降低至0.43 N·m。

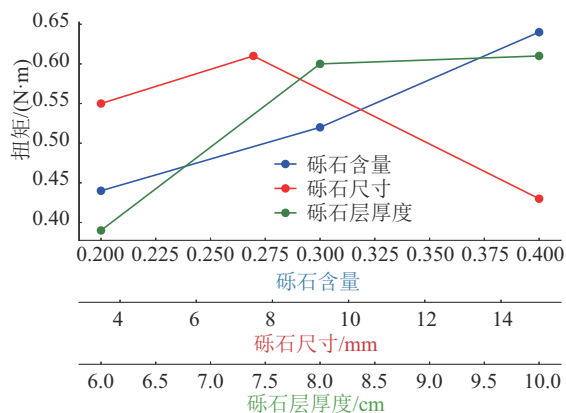


图4 不同水平各因子对扭矩的影响

砾石层厚度对扭矩的影响:如图4所示,砾石层厚度与扭矩成正相关关系,扭矩会随着砾石层厚度的增大而增大。当砾石层厚度为6 cm时,扭矩为0.39 N·m,当砾石层厚度提升至8 cm时,扭矩升至0.6 N·m。扭矩达到一定的峰值后将保持平稳,砾石层厚度的增加不会导致扭矩继续增长。

2.3 钻进阻力数据处理与分析

阻力试验进行了9组,每组3次重复试验及以上,试验次数总计为42次,将重复试验取平均值,见表7。对表7中的数据进行极差分析,分析结果见表8。

表7 钻进阻力数据记录

试验序号	砾石含量/%	砾石尺寸/mm	砾石层厚度/cm	阻力值/N
1	20	2~5	6	12.19
2	20	5~10	8	25.47
3	20	10~20	10	24.30
4	30	2~5	8	35.56
5	30	5~10	10	21.21
6	30	10~20	6	20.21
7	40	2~5	10	49.74
8	40	5~10	6	20.31
9	40	10~20	8	26.75

表8 阻力K值及R值分析表

水平	砾石含量	砾石尺寸	砾石层厚度
K_1	20.65	32.5	17.57
K_2	25.33	22.33	29.26
K_3	32.27	23.75	31.75
R	11.62	10.17	14.18

通过极差分析R值可以看出,砾石层厚度对阻力的影响最大,砾石含量其次,砾石尺寸最小。故3个影响因素对阻力的影响程度由大到小为因子3(砾石层厚度)>因子1(砾石含量)>因子2(砾石尺寸)。

砾石含量对阻力的影响:如图5所示,阻力与砾石含量成正相关。当砾石含量为20%时,阻力为20.65 N,当砾石含量提升至30%时,阻力提高至25.33 N,当砾石含量提高至40%时,阻力提高至32.27 N,阻力随砾石含量的上升而上升。

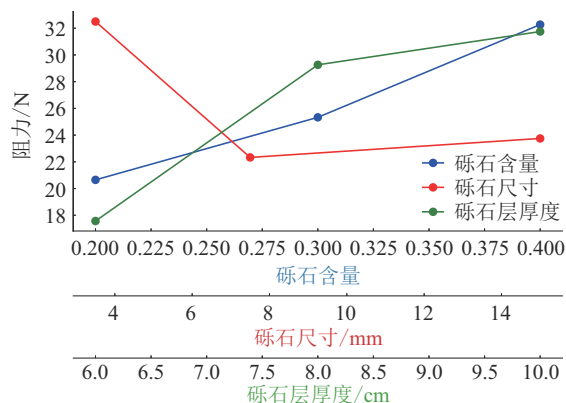


图5 不同水平各因子对阻力的影响

砾石尺寸对阻力的影响:如图5所示,砾石尺寸与阻力的关系为阻力先随砾石尺寸的增大而减小,再随其增大而增大。当砾石尺寸为2~5 mm时,阻力为32.5 N,而当砾石尺寸提高至5~10 mm时,阻力降至最低22.33 N,而当砾石尺寸提升至10~20 mm时,阻力提高至23.75 N。

砾石层厚度对阻力的影响:如图5所示,砾石层厚度与阻力成正相关。当砾石层厚度为6 cm时,阻力为17.57 N,当砾石层厚度提高2 cm时,阻力提高至29.26 N,而当砾石层厚度再提高2 cm时,阻力提高至31.75 N。

3 结论

本文以砾石含量、砾石尺寸与砾石层厚度为影响因素,以钻进功率、钻进扭矩与钻进阻力为目标参数,进行对含砾月壤层正面钻进的正交试验,得到以下结论:

(1)对钻进功率的影响从大到小排序为砾石尺寸、砾石含量、砾石层厚度。功率先随砾石含量的升高而下降,再随砾石含量的上升而上升,趋势上

成正相关。砾石含量增大使得月壤中的砾石增加,砾石坚硬程度大于月壤,使得功率提高。功率先随砾石尺寸的升高而升高,然后又随着砾石尺寸的升高而降低,砾石尺寸的适当增大会使得砾石与月壤的整体凝聚力增加使得功率增大,过大又会导致滚动效应使得功率降低。功率会随砾石层厚度的升高而升高,然后又随着砾石层厚度的升高而降低,在一定范围内呈正相关,砾石层厚度的增大会变导致含砾月壤中砾石增加,使得功率提高。

(2)对钻进扭矩的影响从大到小排序为砾石层厚度、砾石含量、砾石尺寸。扭矩与砾石含量和砾石层厚度成正比,砾石含量和砾石层厚度的增大都会使得含砾月壤中砾石增加,砾石强度大于月壤,在回转速度不变的情况下,扭矩必然增大。扭矩先随砾石尺寸的升高而升高,但又会随着砾石尺寸的升高而下降,砾石尺寸的增大导致砾石与月壤的整体凝聚力增加,使得扭矩增大,过大又会导致滚动效应,使得扭矩降低。

(3)对钻进阻力的影响程度由大到小为砾石层厚度、砾石含量、砾石尺寸。阻力与砾石层厚度和砾石含量成正比,砾石含量和砾石层厚度的增大都会使得砾石增多,砾石的强度大于月壤,使得钻进阻力的增大。阻力先随砾石尺寸的增大而减小,再随其增大而增大,在一定范围内呈负相关,大砾石条件下颗粒容易滑移,小粒度更容易为架桥提供反力。

参考文献:

- [1] 姜生元,梁杰能,赖小明,等.嫦娥五号月壤剖面钻进取芯状态分析与解译[J].机械工程学报,2022,58(10):348-360.
- [2] 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.
- [3] Kaur S , Aleksandrov B A , Ready J W , et al. Thermodynamic and experimental study on carbothermal reduction of JSC-1A lunar regolith simulant for metal and metalloid production[J]. Advances in Space Research, 2024, 73(8):4024-4039.
- [4] Goguen J , Sharits A , Chiamonti A , et al. Three-dimensional characterization of particle size, shape, and internal porosity for Apollo 11 and Apollo 14 lunar regolith and JSC-1A lunar regolith soil simulant [J]. Icarus, 2024, 420.
- [5] 欧阳自远.月球科学概论[M].北京:中国宇航出版社,2005:248-249.
- [6] Papike J J, Simon S B, Laul J C. The lunar regolith: Chemistry, mineralogy, and petrology[J]. Reviews Of Geophysics, 1982, 20(4):761-826.
- [7] Shuai L, Paul G L , Fraeman A A, et al. Widespread hematite at high latitudes of the Moon. [J]. Science advances, 2020, 6(36):eaba1940
- [8] 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(1):70-75.
- [9] 邹猛,李建桥,刘国敏,等.模拟月壤地面力学性质试验研究[J].岩土力学,2011,32(4):1057-1061.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 唐红,李雄耀,王世杰,等.月壤中纳米金属铁的太空风化成因及模拟方法分析[J].地球科学进展,2011,26(5):507-515.
- [13] 刘嘉麒.中国东北地区新生代火山岩[J].岩石学报,1988(1):1-10.
- [14] Cundall P. A., Strack O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique 1979, 29(1):47-65.
- [15] 朱璞,陈森.卵砾石地层钻探孔壁稳定性分析[J].安徽建筑,2011,18(4):92,136.
- [16] 罗武.卵砾石地层钻探施工方法[J].新疆有色金属,2003(3):20-21,23.
- [17] 周天盛,刘祖建.卵砾石地层金刚石钻头的试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(11):69-71.
- [18] 吴志伟.成都三绕(西段)卵砾石地层钻探工艺[J].工程技术,2022(11):148-151
- [19] 刘学军.新疆冲洪积卵砾石地层岩土工程勘察钻探技术发展回顾[J].钻探工程,2021,48(S1):137-142.

(编辑 王跃伟)