

基于多因素试验的凿岩参数影响规律研究

王 权, 蒋文杰

(中交广州航道局有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 为掌握凿岩棒水下破岩特点, 明确深中通道沉管隧道基槽岩石处理凿岩参数, 采用多因素正交试验的方式, 研究提升高度、凿击次数、排距、位距分别对平均块度、不均匀系数、分形维数以及清礁厚度影响的规律。结果表明, 平均块度与提升高度、排距、位距呈正相关, 与凿击次数呈负相关; 不均匀系数与提升高度、排距、位距呈正相关, 与凿击次数呈负相关; 分形维数与凿击次数呈正相关, 与提升高度、排距、位距呈负相关; 清礁厚度与提升高度和凿击次数呈正相关, 与排距和位距呈负相关。基于多因素试验结果, 凿岩参数设置为凿岩棒提升高度 27 m、凿击次数 3 次、凿岩点排距 2.5 m、位距 1.7 m, 岩石破碎块度适当, 清礁难度小, 取得较好的施工效果。

关键词: 石方工程; 破岩特点; 多因素试验; 岩石处理; 凿岩参数

中图分类号: U 615.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0252-07

Influence law of rock drilling parameters based on multi-factor test

WANG Quan, JIANG Wen-jie

(CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: To master the underwater rock breaking characteristics of rock drill rod and clarify the rock drilling parameters of foundation trench rock treatment of deep and medium channel immersed tunnel, we apply the multi-factor orthogonal test to study the effects of lifting height, chiseling times, row spacing and bit spacing on average fragmentation, non-uniformity coefficient, fractal dimension and reef clearing thickness. The results show that the average block size is positively correlated with the lifting height, row spacing and bit spacing, and negatively correlated with the number of chisels; The non-uniformity coefficient is positively correlated with lifting height, row spacing and bit spacing, and negatively correlated with chiseling times; The fractal dimension is positively correlated with the number of chiseling, and negatively correlated with the lifting height, row spacing and bit spacing; Reef clearing thickness is positively correlated with lifting height and chiseling times, and negatively correlated with row spacing and bit spacing. Based on the results of multi-factor test and research, the on-site rock drilling parameters are set as follows. the lifting height of rock drilling rod is 27 m, the number of chisels is 3 times, the row spacing of rock drilling points is 2.5 m, the spacing is 1.7 m, thus the rock fragmentation is appropriate and reef cleaning is not difficult. Overall, good construction results are achieved.

Keywords: stonework; rock breaking characteristic; multi-factor test; rock treatment; drilling parameter

凿岩工艺是在施工中将凿岩棒提升一定高度后自由下落冲击礁石, 使其破碎崩裂, 然后进行清礁, 在无法应用爆破工艺的清礁工程中表现出广阔的发展前景和巨大的应用价值。近年来, 凿

岩工艺已被广泛应用于疏浚工程, 如厦门嵩屿港区二期工程除礁工程^[1]采用钻孔-布钢锭-凿岩-抓斗相结合的施工方法, 成功清除了抗压强度达 70 MPa 的礁石; 盐田国际三期扩建工程^[2]采用水

下重锤冲击凿岩法清除 17.4 m 水深的礁石; 安哥拉罗安达 SONILS 石油服务基地工程^[3]采用凿岩锤和海上打桩船钻孔的处理方案, 成功清除 17.5 m 水深的岩层。

深圳—中山跨江通道工程(以下简称“深中通道”)是世界级超大型“桥、岛、隧、水下互通”集群工程, 沉管隧道基槽开挖在设计高程范围内存在大量的全、强、中风化岩层, 且岩体呈现分布广、埋藏深、强度高等特点, 其中中风化花岗岩平均饱和单轴抗压强度达 55 MPa, 最大深度近 40 m。目前, 凿岩工艺一般适用于疏浚水深不超过 25 m 的岩石处理, 对于水深超过 25 m、强度大于 30 MPa 的硬岩, 该法尚无成熟的施工工艺。

笔者通过设计“四因素三水平”的正交试验, 研究提升高度、凿击次数、排距、位距与岩石平均块度、不均匀系数、分形维数、清礁厚度的关系, 分析各因素对凿岩效果的影响规律, 优化深中通道沉管隧道基槽岩石处理的凿岩参数, 确保施工高质高效。

1 凿岩试验方案设计

1.1 多因素试验方案

多因素试验基于正交试验设计方法, 设计“四因素三水平”的正交试验, 研究提升高度、排距、位距、凿击次数对平均块度、分形维数、不均匀系数、清礁厚度影响的规律, 试验方案如表 1 所示。

表 1 多因素试验方案

| 方案 | 提升高度/m | 排距/m | 位距/m | 单点凿击次数 |
|----|--------|------|------|--------|
| 1 | 20 | 1.5 | 1.1 | 1 |
| 2 | 20 | 2.5 | 1.4 | 2 |
| 3 | 20 | 3.5 | 1.7 | 3 |
| 4 | 27 | 1.5 | 1.4 | 3 |
| 5 | 27 | 2.5 | 1.7 | 1 |
| 6 | 27 | 3.5 | 1.1 | 2 |
| 7 | 34 | 1.5 | 1.7 | 2 |
| 8 | 34 | 2.5 | 1.1 | 3 |
| 9 | 34 | 3.5 | 1.4 | 1 |

1.2 试验区域

试验选在岩石强度、厚度、埋深具有代表性的区域, 开挖底高程-35.86~-35.62 m(当地理论高程), 主要以中风化花岗岩为主。试验区域以 10 m×10 m 的矩形块为单位布置试验方案, 每个试验方案占据 1 个矩形块, 1~9 号为多因素试验, 其余为单因素试验。试验区划分及平面位置见图 1、2。

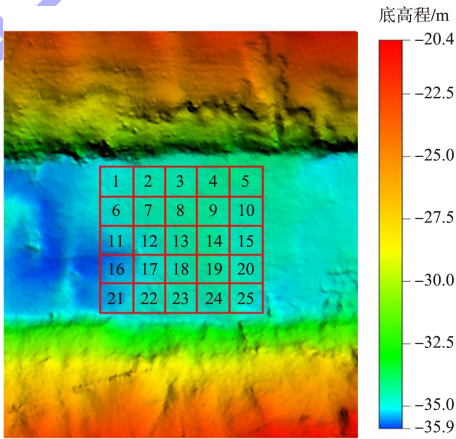


图 1 试验区划分

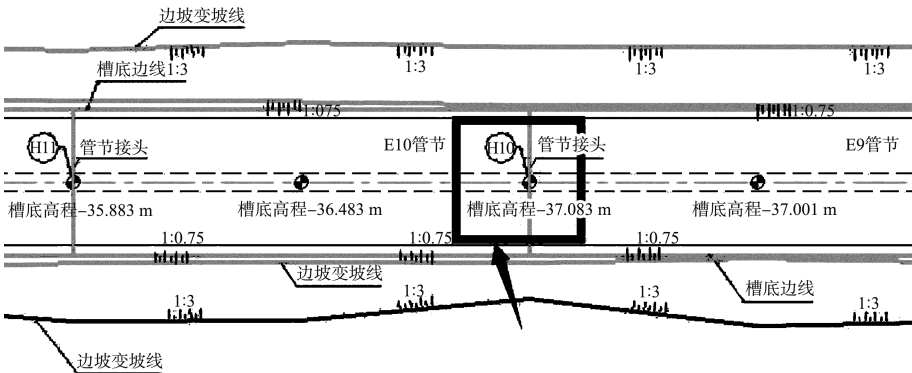


图 2 原位试验平面位置

1.3 试验测量和统计方法

凿岩试验使用平均块度、不均匀系数、分形

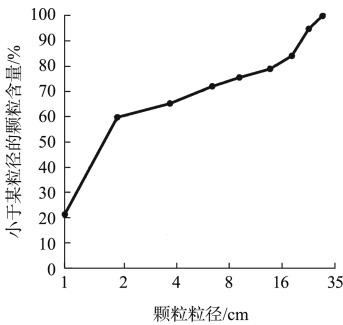
维数以及清礁厚度作为试验结果的评价指标, 各指标需要在试验结束后进行准确的测量和统计。

清礁厚度的确定方法是在原位试验前，使用多波束测量试验区域的水深，在原位试验结束后，再次使用多波束测量试验区的水深，两次水深的差值即为原位试验的清礁厚度。

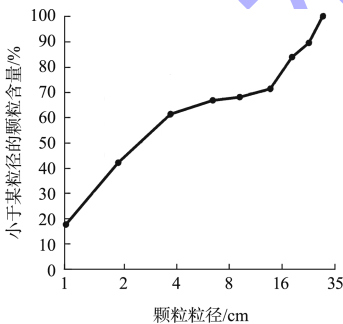
各试验方案的岩石平均块度^[4]、不均匀系数和分形维数^[5]的确定方法为：按照各试验方案进行凿岩施工后，在每个试验区域取约 1 m³ 的破碎岩石，采用 1、2、4、7、10、15、20、25、30 cm 标准筛，将岩石的破碎块度分为 10 个等级，绘制破碎岩石块度分布曲线，最后根据各方案的级配曲线计算对应的平均块度、分形维数和不均匀系数。

1.4 多因素试验结果

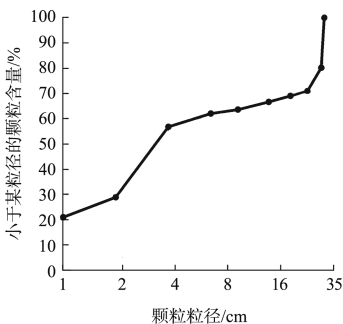
9 组多因素试验岩石块度级配曲线见图 3。



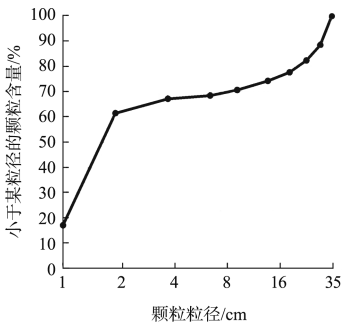
a) 方案1



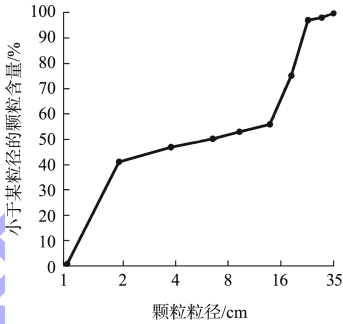
b) 方案2



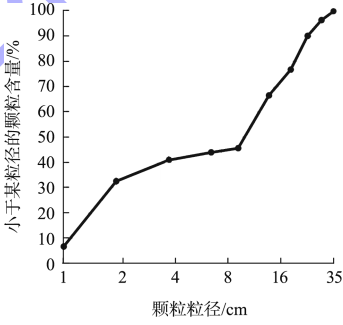
c) 方案3



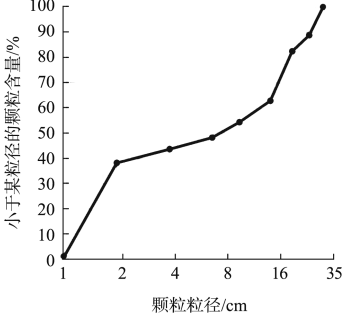
d) 方案4



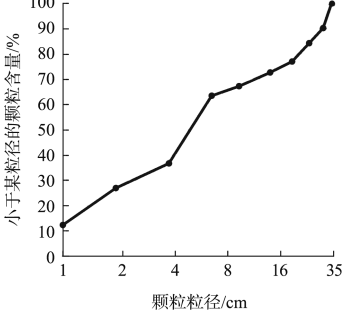
e) 方案5



f) 方案6



g) 方案7



h) 方案8

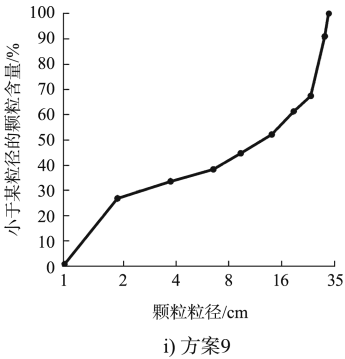


图 3 各试验方案的级配曲线

基于图 3 所示级配曲线, 计算各试验方案下岩石破碎的平均块度、不均匀系数以及分形维数, 结合多波束测量结果, 确定各试验方案的清礁厚度。试验结果见表 2。

表 2 多因素试验结果

| 方案 | 不均匀系数 | 平均块度/cm | 分形维数 | 清礁厚度/cm |
|----|--------|---------|-------|---------|
| 1 | 4. 44 | 7. 82 | 2. 66 | 26. 25 |
| 2 | 6. 81 | 9. 50 | 2. 59 | 31. 93 |
| 3 | 8. 88 | 12. 37 | 2. 63 | 30. 54 |
| 4 | 3. 36 | 9. 85 | 2. 66 | 50. 98 |
| 5 | 13. 06 | 12. 24 | 2. 07 | 39. 89 |
| 6 | 11. 89 | 13. 00 | 2. 38 | 42. 83 |
| 7 | 10. 74 | 12. 05 | 2. 00 | 56. 53 |
| 8 | 8. 13 | 11. 62 | 2. 47 | 59. 77 |
| 9 | 14. 22 | 16. 19 | 1. 95 | 45. 83 |

2 各因素对凿岩效果的影响规律

根据多因素试验的试验结果, 通过计算各因素在同一水平下的平均指标, 绘制各因素与相应指标的关系曲线, 进而确定各因素对凿岩效果的影响规律。各因素在不同水平下的平均指标如表 3 所示。根据表 3 绘制提升高度、凿击次数、排距、位距与岩石平均块度、不均匀系数、分形维数、清礁厚度的关系曲线(图 4~7)。

表 3 不同试验因素下的平均指标

| 试验因素 | 提升高度/m | 不均匀系数 | 平均块度/cm | 分形维数 | 清礁厚度/cm |
|------|--------|--------|---------|-------|---------|
| 提升高度 | 20 | 6. 71 | 9. 89 | 2. 63 | 29. 58 |
| | 27 | 9. 44 | 11. 70 | 2. 37 | 44. 57 |
| | 34 | 11. 03 | 13. 29 | 2. 14 | 54. 05 |
| | 凿击次数 | 不均匀系数 | 平均块度/cm | 分形维数 | 清礁厚度/cm |
| 凿击次数 | 1 | 10. 57 | 12. 08 | 2. 23 | 37. 33 |
| | 2 | 9. 81 | 11. 52 | 2. 32 | 43. 77 |
| | 3 | 6. 79 | 11. 28 | 2. 58 | 47. 10 |

续表 3

| | 排距/m | 不均匀系数 | 平均块度/cm | 分形维数 | 清礁厚度/cm |
|----|------|--------|---------|-------|---------|
| 排距 | 1. 5 | 6. 18 | 9. 90 | 2. 44 | 44. 59 |
| | 2. 5 | 9. 33 | 11. 12 | 2. 37 | 43. 87 |
| | 3. 5 | 11. 66 | 13. 85 | 2. 32 | 39. 74 |
| | 位距/m | 不均匀系数 | 平均块度/cm | 分形维数 | 清礁厚度/cm |
| 位距 | 1. 1 | 8. 15 | 10. 81 | 2. 50 | 42. 96 |
| | 1. 4 | 8. 13 | 11. 85 | 2. 40 | 42. 92 |
| | 1. 7 | 10. 89 | 12. 22 | 2. 23 | 42. 33 |

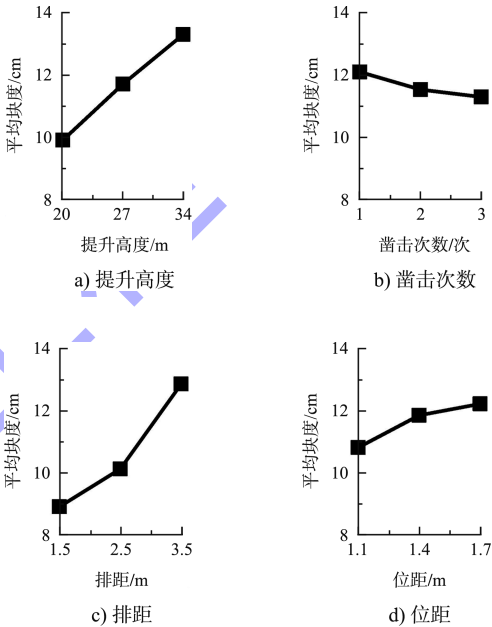


图 4 各因素与平均块度的关系曲线

从图 4 可以看出: 平均块度与提升高度、排距、位距呈正相关, 与凿击次数呈负相关。随着提升高度的增加, 凿岩棒凿击岩石时释放的能量随之增加, 凿击点的表层岩石破碎程度和破坏深度随之增加。由于抓斗抓取岩石的范围远大于凿击点的影响范围, 抓斗抓取岩石时, 凿击点之间的岩石从深部断裂, 但深部岩石破碎程度较差, 导致岩石的破碎情况随提升高度的增加而减小, 平均块度随提升高度的增加而增加。随着凿击次数的增加, 凿击点浅、中层岩石吸收的冲击能量随之增加, 凿击点浅、中层岩石的破碎程度随之增加, 凿击能量消耗在对浅、中层岩石的破碎中, 使破坏深度的增加量相对减少, 抓斗抓取岩石厚度的增加量逐渐减小, 抓取的岩石破碎程度随之

增加，导致平均块度随凿击次数的增加而减小。随着排距和位距的增加，凿岩区域内凿击点的个数随之减少，岩石的破坏效果逐渐变差，导致岩石的平均块度随之增加。

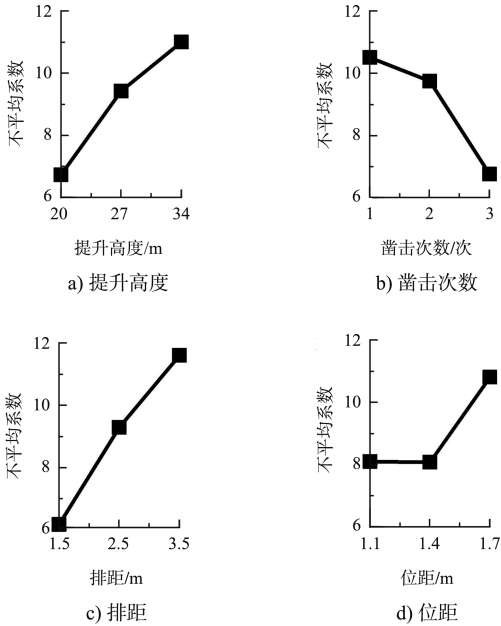


图 5 各因素与不均匀系数的关系曲线

从图 5 可以看出：不均匀系数与提升高度、排距、位距呈正相关，与凿击次数呈负相关。随着提升高度的增加，岩石整体的破碎程度逐渐减小，但浅层岩石的破碎程度逐渐增加，出现大块岩石尺寸越来越大，小块岩石尺寸越来越小的情况，导致不均匀系数随着提升高度的增加而增加。随着凿击次数的增加，岩石破碎的块度逐渐减小，浅、中层岩石块度趋于均匀，导致不均匀系数逐渐减小。随着排距的增加，岩石块度逐渐变大，且大块尺寸的增加量远大于小块尺寸的增加量，导致不均匀系数逐渐增加。随着位距的增加，岩石的块度逐渐增加，但由于位距的变化量小于棒尖长度，当位距在较小水平变化时，大块、小块岩石尺寸的变化幅度基本一致，不均匀系数变化不明显；当位距在较大水平变化时，大块岩石的尺寸增加量大于小块岩石，导致不均匀系数迅速增加。

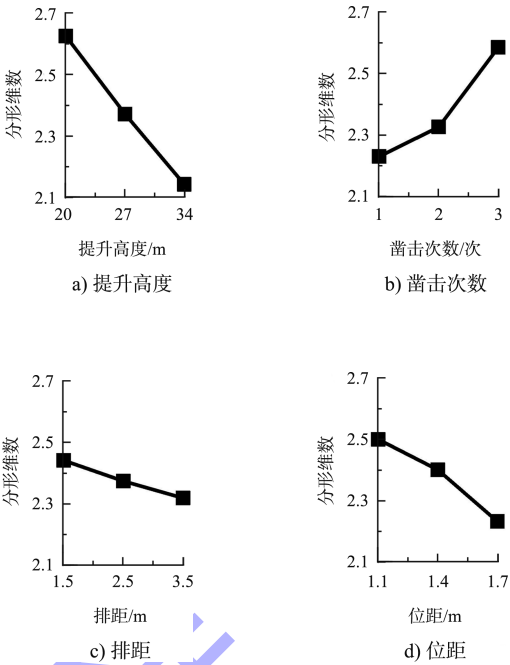
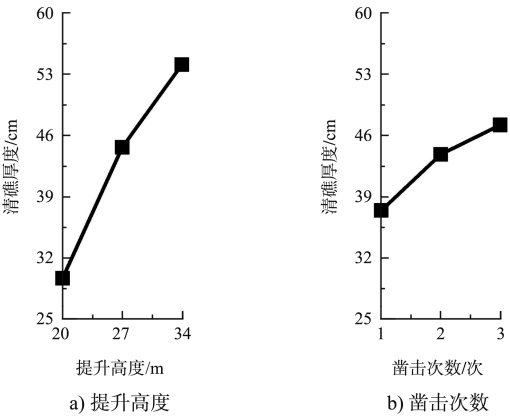


图 6 各因素与分形维数的关系曲线

从 6 可以看出：分形维数与凿击次数呈正相关，与提升高度、排距、位距呈负相关。随着提升高度的增加，岩石的破碎情况逐渐下降，大块岩石所占比例增加，导致分形维数随之下降。随着凿击次数的增加，岩石的破碎情况逐渐增加，岩石块度趋于均匀，小块岩石占比相对增加，导致分形维数随之增加。随着排距和位距的增加，岩石的破碎情况逐渐下降，大块岩石所占比例逐渐增加，导致分形维数随之下降。



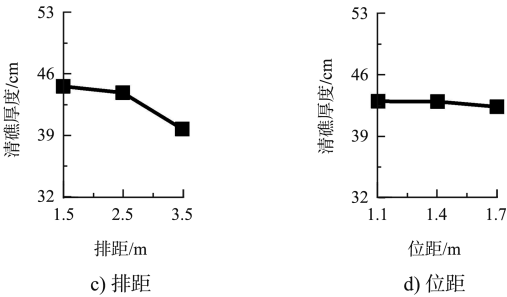


图 7 各因素与清礁厚度的关系曲线

从图 7 可以看出: 清礁厚度与提升高度和凿击次数呈正相关, 与排距和位距呈负相关。随着提升高度的增加, 凿岩棒冲击岩石时释放的能量增加, 岩石的破坏深度随之增加。随着凿击次数的增加, 岩石的破坏深度随之增加。随着排距的增加, 凿岩点之间的岩石经历由过度破碎→临界贯通→未贯通的状态, 由于冲击作用下裂隙从凿击点处开始以类似辐射状向周围萌生, 使得凿岩点之间的裂隙贯通深度逐渐减小, 导致清礁厚度逐渐减小。随着位距的增加, 岩石的破坏深度逐渐减小, 由于位距变化量相比凿岩棒的棒尖宽度较小, 导致位距对清礁厚度的影响不明显。

3 凿岩参数优化

从上述研究可知, 较大的清礁厚度以及较大的排、位距可以明显增加施工的效率, 但岩石破碎效果不佳, 从而降低施工质量。因此在对凿岩工艺进行优化时, 需要统筹施工效率和施工质量。以下从凿岩棒提升高度、凿击次数、排距、位距对凿岩效果的影响等方面展开凿岩参数优化的讨论。

1) 当提升高度从 20 m 增加到 27 m 时, 清礁厚度的增加量为 14.99 cm, 不均匀系数的增加量为 2.73, 平均块度的增加量为 1.81 cm, 分形维数的减小量为 0.26; 当提升高度从 27 m 增加到 34 m 时, 清礁厚度的增加量为 9.48 cm, 不均匀系数的增加量为 1.59, 平均块度的增加量为 1.59 cm, 分形维数的减小量为 0.23。由此得出, 随着提升高度的增加, 清礁厚度的增加量逐渐减小, 岩石破碎效果的减小量也相对逐渐减小。

2) 当凿击次数从 1 次增加到 2 次时, 清礁厚度的增加量为 6.44 cm, 不均匀系数的减小量为 0.76, 平均块度的减小量为 0.56 cm, 分形维数的增加量为 0.09; 当凿击次数从 2 次增加到 3 次时, 清礁厚度的增加量为 3.33 cm, 不均匀系数的减小量为 3.02, 平均块度的减小量为 0.24 cm, 分形维数的增加量为 0.26。由此得出, 随着凿击次数的增加, 清礁厚度的增加量逐渐减小, 岩石破碎效果的增加量逐渐增加。

3) 当排距从 1.5 m 增加到 2.5 m 时, 清礁厚度的减小量为 0.72 cm, 不均匀系数的增加量为 3.15, 平均块度的增加量为 1.22 cm, 分形维数的减小量为 0.07; 当排距从 2.5 m 增加到 3.5 m 时, 清礁厚度的减小量为 4.13 cm, 不均匀系数的增加量为 2.33, 平均块度的增加量为 2.73 cm, 分形维数的减小量为 0.05。由此得出, 随着排距的增加, 清礁厚度的减小量逐渐增加, 岩石破碎效果的减小量也逐渐增加。

4) 当位距从 1.1 m 增加到 1.4 m 时, 清礁厚度的减小量为 0.04 cm, 不均匀系数的减小量为 0.02, 平均块度的增加量为 1.04 cm, 分形维数的减小量为 0.10; 当位距从 1.4 m 增加到 1.7 m 时, 清礁厚度的减小量为 0.59 cm, 不均匀系数的增加量为 2.76, 平均块度的增加量为 0.37 cm, 分形维数的减小量为 0.17。由此得出, 随着位距的增加, 清礁厚度基本保持不变, 岩石破碎效果的减小量逐渐增加。

综合考虑施工效率和施工质量, 深中通道沉管隧道基槽岩石处理施工参数为凿岩棒提升高度在 27 m 上下, 凿击次数在 3 次以内, 排距在 2.5 m 左右, 位距在 1.7 m 左右。

4 结论

1) 平均块度与提升高度、排距、位距呈正相关, 与凿击次数呈负相关; 不均匀系数与提升高度、排距、位距呈正相关, 与凿击次数呈负相关; 分形维数与凿击次数呈正相关, 与提升高度、排距、位距呈负相关。清礁厚度与提升高度和凿击

次数呈正相关，与排距和位距呈负相关。

2) 综合考虑施工效率和施工质量，深中通道沉管隧道基槽岩石处理施工参数为凿岩棒提升高度在 27 m 上下，凿击次数在 3 次以内，排距在 2.5 m 左右，位距在 1.7 m 左右，岩石破碎程度适当，具有较好的施工成效。

参考文献：

[1] 张伯友. 超高硬度礁石水下凿岩除礁施工技术[J]. 水运工程, 2017(8): 53-56.

(上接第 239 页)

2) 三维激光扫描机器视觉感知技术在福州华能罗源湾港区将军帽无人堆取料机自动控制系统中得到了应用。结果表明，通过三维激光实时建模分析的自动取料过程防塌垛技术具备可靠性高、误差小、实时性强等特点，并能降低取料过程中频繁换层次数提高作业效率，完全满足现场取料作业过程中的自动防塌垛安全保护需求。

参考文献：

[1] 陈明. 智能化系统在钢铁企业原料场中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2019, 4(1): 6-8.
[2] 剪欣, 周泉, 杨天龙. 封闭料场斗轮机智能控制系统关键

(上接第 251 页)

[3] 陈自强. 中美标准规范在公路桥梁桩基施工中的应用对比[J]. 人民长江, 2018, 49(S2): 226-229.
[4] 于杨龙, 张兴举. 关于桥梁桩基计算中美规范差异化对比分析[J]. 工程技术研究, 2018(7): 5-6.
[5] Unified Facilities Guide Specifications(UFGS) , Concrete Cylinder Piles [S] . Washington: UFGS, 2020.
[6] British Standards Institution. BS EN 13369: 2004. Common rules for precast concrete products[S] . London: BSI, 2004.
[7] British Standards Institution. BS EN 206: 2000. Concrete- Specification, performance, production and conformity [S] . London: BSI, 2000.
[8] PCI Plant Certification Committee. MNL-116: Manual for quality control for plants and production of structural precast concrete products [M] . Chicago: Precast/Prestressed Concrete

[2] 黄力衡, 李志豪. 水下重锤冲击凿岩法在港池加深清礁工程中的应用[J]. 港口科技, 2014(10): 1-4.
[3] 王艳锋, 刘建卫. 机械凿岩在疏浚工程中的应用[J]. 水运工程, 2019(6): 207-211.
[4] 董英健, 郭连军, 贾建军. 冲击加载作用下矿石试件的动态力学特性及块度分布特征[J]. 金属矿山, 2019, 48(8): 38-43.
[5] 涂新斌, 王思敬, 岳中琦. 风化岩石的破碎分形及其工程地质意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(4): 587-595.

(本文编辑 郭雪珍)

技术的研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(S2): 31-38.
[3] 王旭修, 蔡有高, 时培领, 等. 激光探测与测量视觉技术在堆取料机全自动控制中的应用[J]. 水运工程, 2020(6): 87-91, 105.
[4] 张浩旻, 管雪元. 航位推算法在导航定位中的仿真研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(6): 85-88.
[5] 王卉. 基于激光扫描方法的料堆体积测量技术的实现[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2020.
[6] 阮天宇. 机载 LIDAR 数据处理及堆料三维重建应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
[7] 剪欣, 周泉, 黄欢. 3D 激光扫描仪在散货料场三维建模中的应用[J]. 港口装卸, 2018(1): 32-35.

(本文编辑 王璁)

Institute, 1999.
[9] PCI Committee on Tolerances. Tolerance Manual for Precast and Prestressed Concrete Construction[M] . Chicago: Precast/ Prestressed Concrete Institute, 2000.
[10] 浙江省交通规划设计研究院有限公司. 港口工程后张法预应力混凝土长管节管桩设计与施工规程: JTS/T 167-17—2020 [S] . 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
[11] ACI Committee 117. Specifications for tolerances for concrete construction and materials (ACI 117-10) and commentary-Reapproved 2015 [M] . Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.

(本文编辑 王传瑜)