



矿渣和石灰固化疏浚淤泥效果的室内对比试验

沈 宇, 王瑞彩, 陶桂兰, 吴 腾
(河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 对矿渣和石灰掺量低于 20% 情况下固化疏浚淤泥的效果进行室内对比试验, 通过测试不同龄期试样的含水率、pH 值及力学强度, 结合成本和环保性, 综合评估矿渣和石灰的固化效果。结果表明, 矿渣消耗水分能力较石灰略强; 当矿渣掺量超过 12%, 淤泥 pH 值、抗剪强度不再增长, 且 7 d 后无侧限抗压强度增长占比大; 石灰掺量超过 2% 时, 淤泥 pH 值维持在 12, 无侧限抗压强度发生倒缩现象, 掺量超过 6% 时, 淤泥抗剪强度不再增长; 同掺量下, 石灰提升淤泥 pH 值、黏聚力、早强性效果优于矿渣, 提升内摩擦角效果差; 石灰掺量仅为矿渣量的一半即可达到填埋要求, 成本占优。

关键词: 疏浚淤泥; 矿渣; 石灰; 固化

中图分类号: TV 851; U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)03-0038-06

Laboratory comparative test of solidification effects of slag and lime on dredged sludge

SHEN Yu, WANG Rui-cai, TAO Gui-lan, WU Teng

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: We carry out a laboratory comparative test of the solidification effects on dredged sludge under slag and lime contents of less than 20%. We test the moisture contents, pH values, and mechanical strengths of samples of different ages, and investigate cost and environmental friendliness to comprehensively evaluate the solidification effects of slag and lime. The results show that the water consumption capacity of slag is slightly higher than that of lime. When the slag content exceeds 12%, the pH value and shear strength of the sludge do not increase anymore, and the increase in the unconfined compressive strength after 7 d accounts for a large proportion. When the lime content is above 2%, the pH value of the sludge remains at 12, and the unconfined compressive strength shrinks. When the lime content exceeds 6%, the shear strength of the sludge no longer increases. Under the same content, the effects of lime in improving the pH value, cohesion, and early strength of sludge are better than those of slag, although its effect in increasing the internal friction angle is poor. The content of lime needed to meet the landfill requirements is only half that of slag, so lime is more cost-effective.

Keywords: dredged sludge; slag; lime; solidification

我国每年进行大规模的水利工程建设、水运交通工程建设以及河流湖泊治理工程等, 会产生大量的疏浚淤泥。这些疏浚淤泥具有含水率高、力学性能差等特点。目前我国疏浚淤泥主要采用抛泥处置法, 该方法需要占用大量的土地, 侵占宝贵的耕地, 破坏当地的生态环境, 同时抛泥区

存在淤泥固化周期长、含水率高、力学强度低等问题^[1]。为了缩短淤泥固化周期、降低淤泥的含水率、提高淤泥的力学强度, 对淤泥采用固化处理是常用的有效手段。当前固化淤泥的研究主要是以水泥搭配粉煤灰^[2]、石膏^[3]、钢渣^[4-5]等材料混合固化。

收稿日期: 2021-05-26

作者简介: 沈宇(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为疏浚淤泥固化。

童琦^[6]将粉煤灰和矿粉混合, 以水玻璃为激发剂固化疏浚淤泥, 发现矿粉掺量越高, 淤泥无侧限抗压强度越高; 桂跃等^[7]进行石灰的单掺试验, 对比发现掺入石灰后, 淤泥的无侧限抗压强度呈线性增长; 章定文等^[8]发现石灰是有效碱性激发剂, 可提供火山灰反应的碱性环境; 杨爱武等^[9]的研究表明石灰掺量不宜超过 12%; 刘立新等^[10]认为水泥效果比石灰好, 但是水泥成本过高; 梁仕华等^[11]发现矿渣搭配水泥比纯水泥效果更好, 说明矿渣也是一种优良的固化剂。

根据《城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质》^[12], 疏浚淤泥填埋须满足固化后 28 d 无侧限抗压强度达 50 kPa, 固化材料以低掺量掺入时, 既能满足填埋要求又可降低成本, 同时也可减小添加固化材料后淤泥的碱性。矿渣和石灰作为常用的固化材料, 来源广泛、价格较低, 本文对矿渣和石灰固化疏浚淤泥的效果进行对比研究, 结合成本和环保性, 确定矿渣和石灰的合适掺量, 从而降低固化成本、达到更好的固化效果。

1 试验设计

1.1 试验材料

淤泥为南京市江心洲所取的长江疏浚淤泥, 土质呈暗黑色, 有淡臭味, 初始 pH 值为 7.6, 初始含水率为 67.4%。根据《水运工程岩土勘察规范》^[13], 含水率 75.5%, 分类为淤泥。所用的疏浚淤泥基本物理特性见表 1, 粒径分布曲线如图 1 所示。

矿渣为 S95 级矿渣粉, 粒径 200 目, 主要成分为 SiO₂、CaO、Al₂O₃、MgO; 石灰为生石灰粉, 粒径 200 目, 主要成分为 CaO。疏浚淤泥使用前手工去除植物根茎、塑料袋等杂物。

表 1 疏浚淤泥基本物理特性

相对密度	塑限 w_p / %	液限 w_{L10} / %	塑性指数 I_{P10}	砂粒 含量 / %	粉粒 含量 / %	黏粒 含量 / %
2.71	28.3	42.7	14	0	81.3	18.7

注: w_{L10} 、 I_{P10} 为 10 mm 液限及其计算的塑性指数。

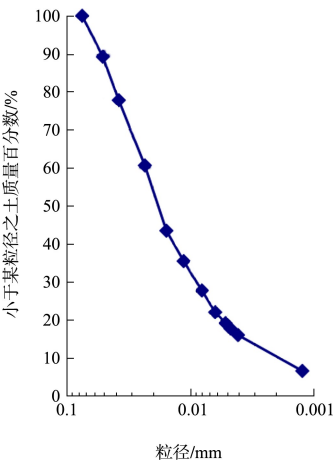


图 1 疏浚淤泥粒径分布曲线

1.2 试样制备及试验流程

为了更好地比较矿渣和石灰对固化疏浚淤泥的效果, 在试验前对纯淤泥试样进行测试, 测定其 28 d 龄期的含水率、pH 值、内摩擦角、黏聚力、无侧限抗压强度, 结果见表 2。

表 2 疏浚纯淤泥 28 d 龄期基本物理特性

含水率 / %	pH 值	内摩擦角 / (°)	黏聚力 / kPa	无侧限抗压强度 / kPa
60.54	7.49	9.95	15.3	16.61

试验中对土样进行无侧限抗压强度、快剪强度、含水率和 pH 值测定。采用无侧限压力仪测试无侧限抗压强度, 采用应变控制式直剪仪测试抗剪强度, 采用烘箱测定含水率, 用电子 pH 计测定 pH 值。

试验前进行土样制备, 将一定量的固化剂和疏浚淤泥充分搅拌混合后装入模具中制样。无侧限抗压强度土样模具为三瓣模, 内径 39.1 mm、高 80 mm。快剪试验制样模具为聚氯乙烯管, 内径 80 mm、高 30 mm, 有顶盖和底盖。快剪试验用内径 61.8 mm 的环刀切取土样, 切下的余土用以测量含水率。制备好的土样养护 2~3 d 后拆模, 用保鲜膜包裹置于密封塑料箱中养护。

1.3 试验方案

将矿渣和石灰分别按一定比例掺入淤泥中进行固化试验, 测试 3、7、14、28 d 试样的含水率、pH 值、内摩擦角、黏聚力、无侧限抗压强度, 对比研究不同掺量对固化淤泥强度的影响, 考虑成本和环保性, 确定合适掺量。矿渣和石灰的掺量均为淤泥的干基质量比。试验方案见表 3。

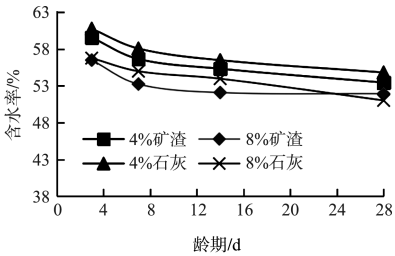
表 3 疏浚淤泥固化试验方案

试验编号	固化剂种类	固化剂掺量/%	测试龄期/d
1-1	矿渣	4	3、7、14、28
1-2		8	
1-3		12	
1-4		16	
1-5		20	
2-1	石灰	2	3、7、14、28
2-2		4	
2-3		6	
2-4		8	
2-5		10	

2 试验结果分析

2.1 不同掺量对固化后淤泥含水率的影响

将矿渣和石灰以不同掺量掺入淤泥后，淤泥含水率变化规律见图 2。由图 2a)、b) 可看出，掺入矿渣和石灰可降低疏浚淤泥的含水率，含水率随龄期降低，说明矿渣和石灰掺入淤泥可以吸收淤泥中的水分，同时矿渣和石灰的活性成分发生水化反应消耗水分；掺量低于 20% 时，28 d 龄期土样含水率均高于 40%，表明矿渣和石灰吸收水分能力一般；由图 2c) 可看出，同掺量下矿渣多消耗约 1% 的水分，表明矿渣中活性成分含量更高，水化反应消耗水分更多，吸收水分能力更强。

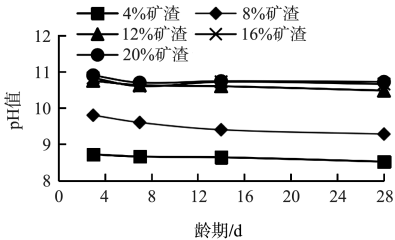


c) 同掺量对比

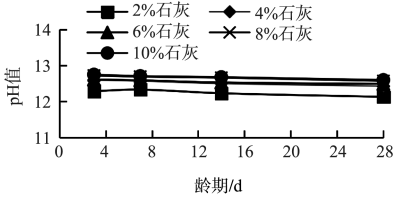
图 2 不同掺量矿渣和石灰固化淤泥后含水率

2.2 不同掺量对固化后淤泥 pH 值的影响

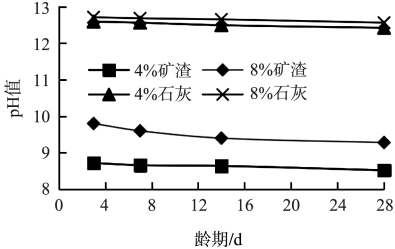
将矿渣和石灰以不同掺量掺入淤泥后，淤泥 pH 值变化规律如图 3 所示。由图 3a)、b) 可看出矿渣掺量低于 8% 时，pH 值随掺量增加而增大，大于 12% 时 pH 值维持在 11，而石灰掺量超过 2% 时 28 d 龄期内 pH 值大于 12。掺入矿渣和石灰后，CaO 水化产生 OH⁻，淤泥呈碱性，pH 值随龄期增长有降低，说明活性成分发生水化反应消耗部分 OH⁻。由图 3c) 可看出，同掺量时掺入石灰在 28 d 龄期内都大于掺入矿渣后的淤泥 pH 值。



a) 矿渣



b) 石灰



c) 同掺量对比

图 3 不同掺量矿渣和石灰固化淤泥后 pH 值

2.3 不同掺量对固化后淤泥强度的影响

不同掺量下矿渣和石灰固化后淤泥内摩擦角、黏聚力的变化规律见图 4、5。掺入矿渣后，淤泥的内摩擦角和黏聚力均随龄期的增长而增大，且 7 d 内增长占比超过 50%；掺量超过 12% 时，淤泥内摩擦角保持在 21°，黏聚力维持在 10 kPa。这是因为矿渣粉与疏浚淤泥颗粒的黏结性强，且 7 d 内水化速率快，生成的水化产物多，颗粒黏结速率快；掺量超过 12% 时，水化产物量增多，但没有足够的淤泥颗粒黏结。石灰掺量超过 4% 时，淤泥 28 d 龄期内摩擦角约为 15°，超过 6% 时，降为 14°；石灰掺量小于 6% 时，淤泥 28 d 龄期黏聚力约为 10 kPa，大于 6% 时，黏聚力维持在 14 kPa；掺量越大，倒缩现象越明显，内摩擦角和黏聚力下降越多。由图 4c) 和图 5c) 可看出，同掺量情况下，矿渣提升淤泥内摩擦角较石灰大 3°~4°，且无倒缩现象，石灰提升淤泥黏聚力较矿渣大 9~10 kPa，且石灰提升疏浚淤泥黏聚力效果均更优。

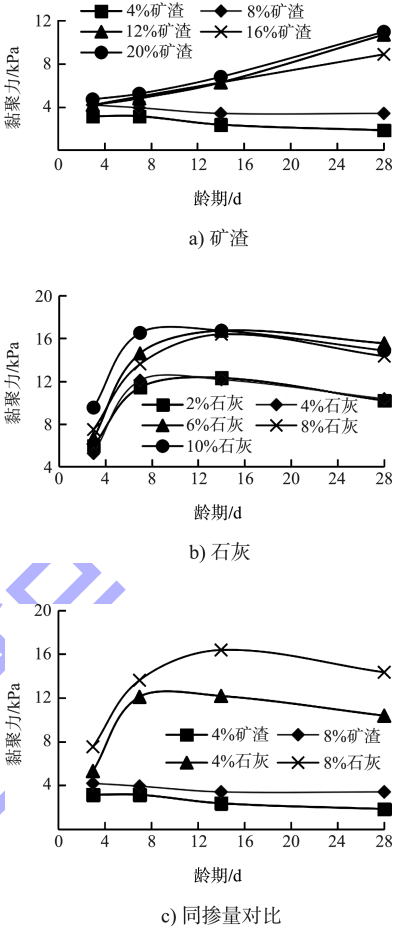
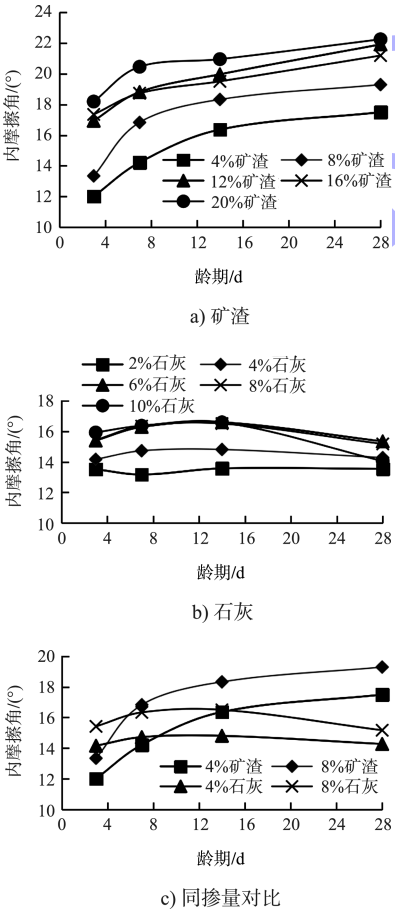


图 5 不同掺量矿渣和石灰固化后淤泥黏聚力

根据《城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质》，疏浚淤泥固化处理后无侧限抗压强度达到 50 kPa 可满足填埋要求。不同掺量下矿渣和石灰固化后淤泥无侧限抗压强度变化规律见图 6。由图 6 a)、b) 可以看出，掺入矿渣后，3 d 龄期淤泥无侧限抗压强度小于 30 kPa；掺量低于 12% 时，7 d 后强度增长占比超过 60%，掺量超过 12% 时，7 d 后强度增长占比仅 40%，且 28 d 无侧限抗压强度达到填埋要求；石灰掺量超过 2%，3 d 淤泥强度增长占比超过 60%，早强性好，14 d 时达到无侧限抗压强度峰值，掺量大于 2% 时，淤泥强度随龄期增长出现倒缩。由图 6c) 可看出，同掺量下，3 d 龄期石灰提升淤泥强度效果好于矿渣，28 d 龄期时 4% 石灰掺量的淤泥强度与 8% 矿渣掺量的淤泥强度接近；石灰固化疏浚淤泥会发生强度倒缩现象，矿渣则不会。

图 4 不同掺量矿渣和石灰固化后淤泥内摩擦角

矿渣的水化产物，如水化硅酸钙凝胶和水化铝酸钙晶体等，有黏结疏浚淤泥颗粒的作用，增强土体的强度。石灰水化反应速率较快，在养护早期就生成大量的胶凝产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的黏结性强，早期抗剪强度和无侧限抗压强度增长迅速，随着 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进一步反应生成 CaCO_3 ，消耗大量水分，黏结结构发生破坏，发生干缩现象；掺量越多，水化产物越多，干缩越明显。

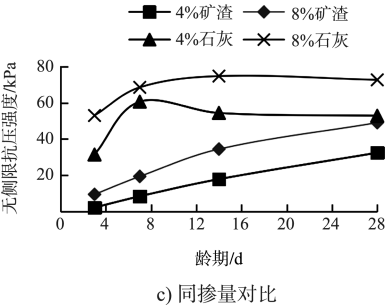
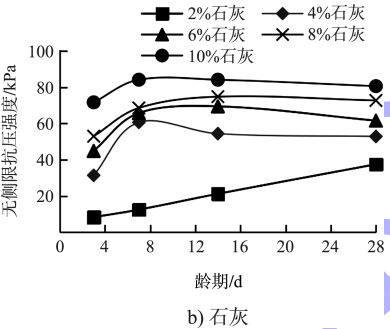
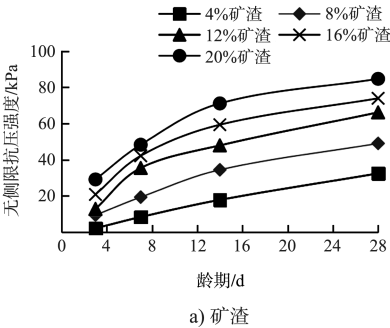


图 6 不同掺量矿渣和石灰固化后淤泥无侧限抗压强度

2.4 无侧限抗压强度预测

不同掺量矿渣和石灰固化后淤泥 28 d 无侧限抗压强度预测曲线如图 7 所示。为了预测不同掺量下 28 d 龄期疏浚淤泥的无侧限抗压强度，考虑二次多项式模型，设置掺量为自变量，28 d 无侧

限抗压强度为因变量，可得矿渣和石灰强度预测公式为：

$$q_{\text{矿}} = -0.093\ 89\alpha^2 + 5.489\ 5\alpha + 11.842 \tag{1}$$

$$q_{\text{石}} = -0.223\ 2\beta^2 + 7.976\ 5\beta + 22.954 \tag{2}$$

式中： $q_{\text{矿}}$ 、 $q_{\text{石}}$ 为矿渣、石灰固化后疏浚淤泥 28 d 无侧限抗压强度 (kPa)； α 为固化淤泥中矿渣掺量 (%)； β 为固化淤泥中石灰掺量 (%)。

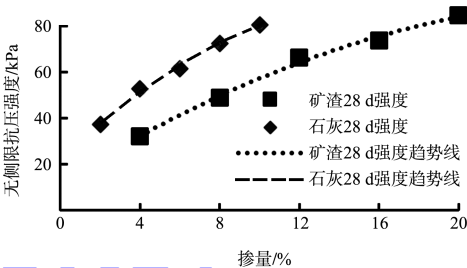


图 7 不同掺量矿渣和石灰固化后淤泥 28 d 无侧限抗压强度预测曲线

根据所得的预测公式，当矿渣掺量为 8.1% 时，28 d 固化淤泥的无侧限抗压强度可达到 50 kPa；当石灰掺量为 3.79% 时，28 d 固化淤泥的无侧限抗压强度可达到 50 kPa。对比可得 28 d 时达到填埋要求，所需的石灰掺量仅为矿渣量的一半。目前市场上 S95 级矿渣粉成本为 450~500 元/t，生石灰 450~550 元/t，欲达到填埋要求，固化每吨淤泥需要矿渣 21.79~24.20 元或石灰 10.19~12.46 元，价格方面石灰更占优势，但是石灰处理后的淤泥为强碱性，对环境污染大。

3 结论

- 1) 掺量低于 20% 时，矿渣和石灰降低疏浚淤泥含水率效果一般。同掺量下，矿渣比石灰消耗水分能力略强，可见矿渣对降低疏浚淤泥含水率有一定优势。
- 2) 当矿渣掺量超过 12% 或石灰掺量超过 2% 时，淤泥 pH 值不随掺量增加而增大，表明矿渣和石灰营造淤泥碱性环境有阈值。同掺量下，石灰提升淤泥 pH 值的能力更强。
- 3) 掺入矿渣后，淤泥在 7 d 内抗剪指标增长

占比超过 50%。矿渣掺量大于 12% 或石灰掺量超过 6% 时, 淤泥抗剪指标不再增长。同掺量下, 石灰提升淤泥黏聚力效果好, 但是提升内摩擦角效果较矿渣差。

4) 矿渣掺量超过 12% 时, 疏浚淤泥 7 d 后无侧限抗压强度增长占比超过 50%; 石灰掺量超过 2% 即发生倒缩现象, 14 d 龄期时无侧限抗压强度达到最大。同掺量时, 石灰早强性比矿渣好, 但是会发生强度倒缩现象。

5) 根据经验公式, 28 d 时达到 50 kPa 的填埋要求, 所需的石灰掺量仅为矿渣量的一半, 固化成本方面石灰占优, 但是存在污染大的问题。矿渣和石灰的混合比例对疏浚泥固化效果的影响还需要做进一步研究, 以达到固化的最佳效果。

参考文献:

[1] 张春雷. 基于水分转化模型的淤泥固化机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.

[2] 杨爱武, 肖敏, 周玉明. 石灰粉煤灰固化天津滨海软土试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(1): 60-67.

[3] 沈建生, 徐亦冬, 游伟国. 脱硫石膏钢渣无熟料水泥对软土固化效果的研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(12): 3888-3891.

[4] 吴燕开, 胡锐, 赵位莹, 等. 钢渣粉固化淤泥质水泥土强度特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(15): 306-311.

[5] 赵余. 废弃钢渣的硅系与复合系激发及其在固化软土中的应用[D]. 南京: 东南大学, 2017.

[6] 童琦. 粉煤灰-矿粉固化疏浚淤泥力学特性及机理研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2015.

[7] 桂跃, 王其合, 张庆. 工业废渣固化高含水率疏浚淤泥强度特性分析[J]. 武汉工程大学学报, 2012, 34(1): 36-42.

[8] 章定文, 曹智国. 工业废渣加固土强度特性[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 54-59.

[9] 杨爱武, 王韬, 许再良. 石灰及其外加剂固化天津滨海软土的试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 996-1004.

[10] 刘立新, 张聪, 邓仁健, 等. 水泥、石灰与粉煤灰对河道淤泥的固化效果研究[J]. 福建建筑, 2020(2): 94-98.

[11] 梁仕华, 牛九格, 王蒙, 等. 水泥矿渣固化锌污染淤泥的试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(8): 89-94.

[12] 北京市市政工程设计研究总院. 城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质: GB/T 23485—2009[S]. 北京: 中国质检出版社, 2009.

[13] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 长江航道规划设计研究院. 水运工程勘察规范: JTS 133—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.

(本文编辑 王璁)

(上接第 31 页)

参考文献:

[1] 大连海洋大学. 人工鱼礁建设技术规范: SC/T 9416—2014[S]. 北京: 中国农业出版社, 2014.

[2] 张云岭, 赵祺, 齐遵利, 等. 几种不同类型人工鱼礁的稳定性及集鱼效果比较[J]. 河北渔业, 2021(1): 4-10.

[3] 林军, 章守宇. 人工鱼礁物理稳定性及其生态效应的研究进展[J]. 海洋渔业, 2006(3): 257-262.

[4] 曹民雄, 申霞, 应翰海. 长江南京以下深水航道生态型整治建筑物结构研究[J]. 水运工程, 2018(1): 1-11.

[5] MA A X, CAO M X, XU Y, et al. Adjustment of the flexible mattress with ecological cavities to near-bottom flow patterns[J]. Hydraulic engineering V, 2017(12): 99-105.

(本文编辑 武亚庆)