

河道底泥制砖生命周期评价研究

纪莎莎¹, 黄瑾¹, 成铭钊²

[1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125; 2. 上海海顾新材料科技有限公司, 上海 200082]

摘要:河道底泥是水生态系统中物质交换和能流循环的中枢。由于大量的污(废)水排入水体,并携带污染物和营养物聚集在底泥中,所以已成为黑臭水体整治工程中内源治理的重点。底泥经水热固化处理后,形成相关材料在满足技术指标要求的基础上,可取代混凝土制品。建立河道底泥制砖全流程环节数据清单,选取7项关键环境影响指标,采用eBalance软件进行生命周期评价,并与黏土实心标准砖、混凝土标准砖的影响指标进行对比分析。结果表明:河道淤泥标准砖生命周期过程中,对各环境影响指标均有较大贡献的是配料搅拌过程的生石灰消耗,电力消耗对各环境影响指标均有一定影响;底泥制砖除RI指标外,其他指标均低于两类标准砖,具有降低环境影响的优势。

关键词:河道底泥;生命周期评价;环境影响

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1004-4655(2023)01-0020-04

我国水环境污染严重,全国大约有90%的河湖水体受到不同程度的严重污染。自2015年4月国务院发布《水污染防治行动计划》(简称“水十条”)以来,全国范围内展开了以改善水环境质量为核心的江河湖库污染整治行动。由于黑臭水体整治工程中不可避免地产生大量的清淤底泥,具有含水率较高、体量巨大,并携带有大量的污染物(重金属、难降解有机物等)和营养物(氮、磷等),不当的处理处置极易造成二次环境污染^[1-2]。

受到技术装备水平的限制,我国在疏浚底泥处理处置上大都采取较为简单的处理方式,以土地综合利用(还林还田、土方利用)和填埋堆放为主。简单的处理污染底泥很可能会导致污染扩散。如何通过高效绿色清洁的方式对巨量的河湖底泥进行减量化、无害化、资源化处理,已成为全社会亟待解决的问题^[3-4]。建材利用是目前底泥资源化处置的最佳方案之一。水热固化法是一种新型底泥资源化利用的新技术,主要利用河湖底泥中的硅、铝和钙的矿物质(石英、云母、长石等),平均掺量

50%~80%,在保证产品质量的同时降低资源化利用的原料成本,使固废资源化处理成本大幅度降低^[5-7]。相关产品在满足相应的技术指标要求的基础上,可取代混凝土制品,广泛应用于道路工程中。

生命周期评价(Life Cycle Assessment,简称LCA)是系统化、定量化评价各种产品从原材料开采、产品生产、运输、使用到废弃、循环再生等生命周期全过程中对资源环境影响的国际标准评价方法^[8-9]。目前,利用水热固化法将河道底泥制成标准砖在技术可行性、方案经济性等方面已开展一些研究和论证^[10];而对河道淤泥标准砖生命周期环境影响方面的研究较少。基于LCA可系统、量化、客观地分析产品生命周期对不同环境影响类型的贡献,在产品设计和生产方案选择中引入LCA可有效识别各环境影响类型的关键因素,有针对性改进以降低产品对环境的影响。

1 生命周期评价体系建立

1.1 目标与范围

按照ISO 14040:2006^[11]、ISO 14044:2006^[12]的要求,以河道淤泥标准砖为评价对象,收集该产品生产过程数据,建立其“从摇篮到大门”的生命周期模型,完成气候变化(Climate Change, GWP)、初级能源消耗(Primary Energy Demand,

收稿日期:2022-09-05

第一作者简介:纪莎莎(1985—),女,高级工程师,博士,主要从事废弃物处置及清洁能源利用相关研究及设计工作。

PED)、水资源消耗 (Resource Depletion–water, WU)、酸化 (Acidification, AP)、非生物资源消耗潜值 (Abiotic Depletion Potential, ADP)、富营养化 (Eutrophication, EP)、可吸入无机物 (Respiratory Inorganics, RI) 共 7 种计算指标和清单数据分析。

研究系统边界主要包括原材料与能源生产、河道淤泥砖生产阶段, 未包含原料采购 / 运输过程。其生命周期系统边界见图 1。对于河道淤泥砖生产阶段, 主要分为 3 个阶段。

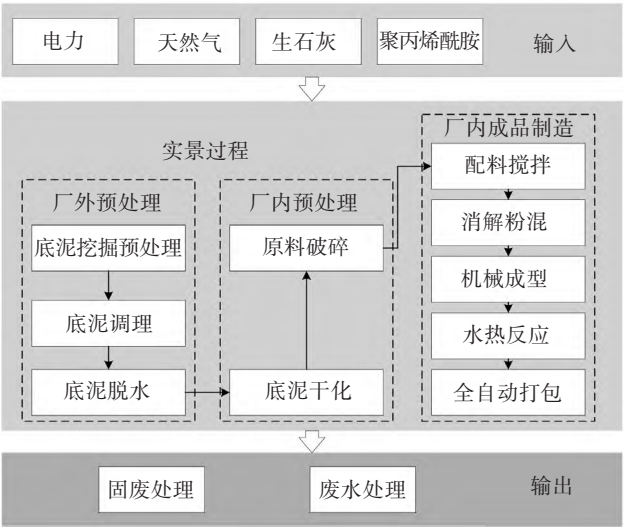


图 1 河道淤泥标准砖生命周期评价系统边界

1) 第一阶段为厂外预处理过程。对河道底泥进行挖掘、破碎及分选, 对其浓缩处理后输送至调

理罐中, 投加一定比例的固结剂进行调理, 随后将调理后的底泥泵入压榨机脱水至含水率 50% 以下, 以泥饼形式外运至厂内。

2) 第二阶段为厂内预处理过程。利用太阳能的大棚对底泥干化使其含水率降至 30% 左右, 大棚底部有辅助热源, 采用地暖和底部通风 2 种方式, 补充太阳能的不足; 干化后的底泥进行破碎, 送至原料仓中待用。

3) 第三阶段为厂内成品制造过程。将底泥、集料 (来源为建筑垃圾) 与其他添加剂, 通过计量称量后, 送入双卧轴强制式搅拌系统充分搅拌; 搅拌后的混合物料通过密封皮带送入水热消解系统, 合格原料用皮带机送入成品储料系统; 将成品原料喂入压机模具, 进行机械成型后, 将其送至水热反应釜进行反应, 出釜产品无需养护即为成品, 经过打包送至成品仓待售。

1.2 清单分析

本研究结合实际工程, 选取 1 块标准河道淤泥标准砖为功能单位, 产品重量为 2.8 kg。如表 1 所示, 通过调研 100 万方 /a 河道淤泥水热固化资源利用项目, 获得功能单位所涉及的 3 个不同生产阶段的 10 个过程环节的生产数据, 即: 底泥挖掘预处理、底泥调理、底泥脱水、底泥干化、原料破碎、配料搅拌、消解粉混、机械成型、水热反应、全自动打包 (含配套设备用电) 的数据。

表 1 1 块河道淤泥标准砖生命周期清单

项目	物质名称	数据来源	厂外预处理			厂内预处理		厂内成品制造				
			底泥挖掘预处理	底泥调理	底泥脱水	底泥干化	原料破碎	配料搅拌	消解粉混	机械成型	水热反应	全自动打包
输入	淤泥质固废 /kg	—	1.400 0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	电力 /kWh	CLCD–China–ECER 0.8	0.000 5	0.000 8	0.003	0.042 5	0.019 6	0.009 0	0.009 0	0.012 8	0.002 3	0.006 5
	天然气 /m ³	CLCD–China–ECER 0.8	—	—	—	—	—	—	—	—	0.000 8	—
	生石灰 /kg	CLCD–China–ECER 0.8	—	—	—	—	—	0.210 0	—	—	—	—
	聚丙烯酰胺 /kg	Ecoinvent 3.5	—	0.000 5	—	—	—	—	—	—	—	—
	二氧化硅 /kg	CLCD–China–ECER 0.8	—	—	—	—	—	0.002 1	—	—	—	—
输出	固废处理 /kg	Ecoinvent 3.1	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025 0	—
	废水处理 /kg	Ecoinvent 3.1	—	—	—	—	—	—	—	—	0.063 0	—

过程所用到的数据库包括中国生命周期基础数据库 (CLCD) 和 Ecoinvent 数据库, 其中 CLCD 由亿科开发, 是一个基于中国基础工业系统生命周期核心模型的行业平均数据库; Ecoinvent 数据库由瑞士生命周期研究中心开发, 数据主要来源于瑞士

和西欧国家。

1.3 影响分析

根据生命周期清单分析, 在 eBalance 软件上建立河道淤泥标准砖的生命周期模型, 评价指标为 GWP、PED、WU、AP、ADP、EP、RI。通过

建模, 采用水热固化法得到 1 块河道底泥标准砖。其全过程中的 7 种环境影响评价指标值分别为: 4.00×10^{-1} (kg CO₂ eq)、 3.21×10^0 MJ、 4.72×10^{-1} kg、 1.07×10^{-3} (kg SO₂ eq)、 3.25×10^{-6} (kg antimony eq)、 7.32×10^{-5} (kg PO₄³⁻eq)、 1.69×10^{-3} (kg PM_{2.5}eq)。

2 研究成果和改进措施

2.1 过程贡献分析

河道淤泥砖生命周期各过程的 GWP、PED、WU、AP、ADP、EP、RI 指标贡献见表 2。为进一步研究不同过程对于 7 项指标的影响, 对其贡献比例进行分析。由图 2 可看出配料搅拌、底泥干化

等环节对于各项指标贡献最大。对于 GWP、PED、AP、ADP、EP、RI 指标, 配料搅拌环节贡献最大, 分别占总量的 73.0%、54.6%、47.0%、49.2%、44.8% 和 90.3%; 底泥干化环节贡献其次, 分别占总量的 11.3%、18.6%、22.1%、16.5%、21.3% 及 4.1%。对于 WU 指标, 底泥干化环节贡献最大, 占总量的 31.8%; 配料搅拌环节其次, 占总量的 24.0%。仅配料搅拌、底泥干化 2 个环节对 7 项环境指标的贡献度均超过 55%, 其中对于 RI 指标影响最大, 达到 94.4%, 其次是对 GWP 指标影响达到 84.3%。

表 2 河道底泥制砖过程对 LCA 贡献结果分析

过程名称	GWP/ (kg CO ₂ eq)	PED/ MJ	WU/ kg	AP/ (kg SO ₂ eq)	ADP/ (kg antimony eq)	EP/ (kg PO ₄ ³⁻ eq)	RI/ (kg PM _{2.5} eq)
底泥挖掘预处理	5.51×10^{-4}	7.30×10^{-3}	1.83×10^{-3}	2.90×10^{-6}	6.55×10^{-9}	1.91×10^{-7}	8.47×10^{-7}
底泥调理	2.15×10^{-3}	4.53×10^{-2}	6.30×10^{-3}	1.10×10^{-5}	2.82×10^{-7}	3.69×10^{-6}	1.95×10^{-6}
底泥脱水	3.17×10^{-3}	4.20×10^{-2}	1.05×10^{-2}	1.67×10^{-5}	3.77×10^{-8}	1.10×10^{-6}	4.87×10^{-6}
底泥干化	4.51×10^{-2}	5.96×10^{-1}	1.50×10^{-1}	2.37×10^{-4}	5.36×10^{-7}	1.56×10^{-5}	6.92×10^{-5}
原料破碎	1.98×10^{-2}	2.62×10^{-1}	6.58×10^{-2}	1.04×10^{-4}	2.35×10^{-7}	6.87×10^{-6}	3.04×10^{-5}
配料搅拌	2.92×10^{-1}	1.75×10^0	1.13×10^{-1}	5.03×10^{-4}	1.60×10^{-6}	3.28×10^{-5}	1.53×10^{-3}
消解粉泥	1.53×10^{-2}	2.03×10^{-1}	5.09×10^{-2}	8.05×10^{-5}	1.82×10^{-7}	5.31×10^{-6}	2.35×10^{-5}
机械成型	1.29×10^{-2}	1.71×10^{-1}	4.29×10^{-2}	6.79×10^{-5}	1.54×10^{-7}	4.49×10^{-6}	1.98×10^{-5}
水热反应	2.60×10^{-3}	4.41×10^{-2}	8.88×10^{-3}	1.32×10^{-5}	1.44×10^{-7}	9.07×10^{-7}	3.81×10^{-6}
全自动打包	6.52×10^{-3}	8.63×10^{-2}	2.17×10^{-2}	3.43×10^{-5}	7.76×10^{-8}	2.26×10^{-6}	1.00×10^{-5}
合计	4.00×10^{-1}	3.21×10^0	4.72×10^{-1}	1.07×10^{-3}	3.25×10^{-6}	7.32×10^{-5}	1.69×10^{-3}

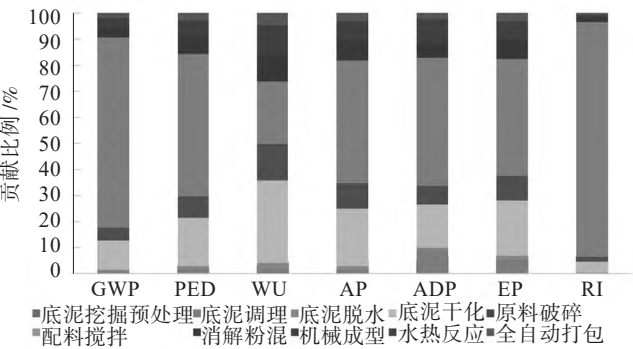


图 2 处理过程对于 7 项评价指标的贡献比例

2.2 敏感性分析与改进措施

通过分析、识别出配料搅拌、底泥干化 2 个环节是影响 7 项指标的关键环节。再进一步分析 2 个环节清单数据对各指标的敏感性, 从而辨识最有效的改进点。

在配料搅拌环节中, 影响 7 项指标的 3 项输入分别是电力、生石灰以及二氧化硅。3 项输入对于 GWP 指标的贡献率分别为 2.3%、70.7% 和 0%; 对于 PED 指标的贡献率分别为 3.7%、50.9% 和 0%;

对于 WU 指标的贡献率分别为 6.4%、14.0% 和 3.5%; 对于 AP 指标的贡献率分别为 4.5%、42.5% 和 0.1%; 对于 ADP 指标的贡献率分别为 3.3%、45.8% 和 0%; 对于 EP 指标的贡献率分别为 4.3%、40.4% 和 0.1%; 对于 RI 指标的贡献率分别为 0.83%、89.4% 和 0%。从以上数据可以看出, 生石灰对于 7 项指标的影响最大, 除对 WU 指标影响较小外, 其他贡献率均超过 40%, 对于 RI 指标贡献率接近 90%, 因此在保障成品质量的情况下, 可寻找其他对环境影响更小钙质添加剂作为替代品, 可将工业生产过程中的钙基废物作为其替代品。

在底泥干化环节中, 影响 7 项指标的输入只有电力, 且此环节使用电力占比达 22.3%, 为所有环节最高。此项输入对于 GWP、PED、WU、AP、ADP、EP、RI 指标的贡献率分别为 11.3%、18.6%、31.2%、22.1%、16.5%、21.4%、4.1%。从以上数据可以看出, 电力对于 7 项指标的影响较大, 其中对于 WU、AP、RI 的影响尤为明显。在本项目的底泥干化环节中主要采用阳光大棚进行晾

晒, 大棚底部有辅助热源, 采用地暖和底部通风 2 种方式, 用于补充太阳能的不足, 充分考虑节省电能。假设采用蒸汽、天然气热源通过干化设备进行干化, 将大大增加此环节对于 7 项指标的贡献率。

3 能源环境效益对比分析

河道淤泥砖是河道淤泥固废的一种资源化利用, 通过对河道淤泥的处理、干化、消解粉混、水热反应等一系列工艺过程, 将其转化为标准砖用于建筑领域。通过对比河道淤泥砖与亿科中国生命周期基础数据库 CLCD 中黏土实心砖、混凝土砖的环境影响类型指标结果, 从生命周期环境影响的角度为河道淤泥制砖工艺路线提供数据支撑。

在保证产品生命周期系统边界一致的基础上, 对比河道淤泥标准砖与黏土实心标准砖、混凝土标准砖 7 项环境影响类型指标, 见图 3。3 种标准砖受原料、制作工序的影响, 每个指标的贡献度均不相同。以黏土实心标准砖为例, 其 AP 指标值最高, 甚至是另外 2 种砖的 2 倍; 而对于混凝土标准砖, ADP 与 EP 指标远高于其他 2 种砖。将黏土实心标准砖和混凝土标准砖相比, 河道淤泥标准砖的 GWP、PED、WU、AP、ADP 和 EP 共 6 项指标都是 3 种标准砖中最小的, 即河道淤泥标准砖在这 6 项环境影响类型指标具有一定优势; 对于 RI 指标, 受制于石灰石的高贡献率, 河道淤泥标准砖的指标结果远高于黏土实心标准砖和混凝土标准砖的指标结果。

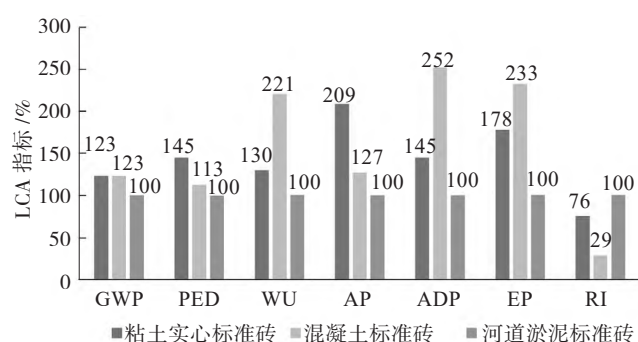


图 3 3 种标准砖的 LCA 指标结果

4 结语

1) 研制 1 块河道淤泥标准砖生命周期“从摇篮到大门”的气候变化 (GWP) 指标结果为 4.90×10^{-1} (kg CO₂ eq), 初级能源消耗 (PED) 指标结果为 4.64 MJ, 水资源消耗 (WU) 指标结果为 6.10×10^{-1} kg, 酸化 (AP) 指标结果为 $2.30 \times$

10^{-3} (kg SO₂ eq), 非生物资源消耗潜值 (ADP) 指标结果为 4.80×10^{-6} (kg Sb eq), 富营养化 (EP) 指标结果为 1.30×10^{-4} (kg PO₄³⁻ eq), 可吸入无机物 (RI) 指标结果为 1.30×10^{-3} (PM_{2.5} eq)。

2) 通过敏感性分析可知, 河道淤泥标准砖生命周期过程中, 对各环境影响指标均有较大贡献的是配料搅拌过程的原料消耗——钙质添加剂 (生石灰), 此外电力消耗对各环境影响指标均有一定影响, 后期可以通过选用其他添加剂、高效催化剂、优化生产控制条件等减少对环境的影响。

3) 通过对比 3 种标准砖 LCA 的结果, 对河道淤泥标准砖来说, 除 RI 指标外, 其他 6 项指标均低于黏土实心标准砖和混凝土标准砖, 即河道淤泥标准砖在这 6 项环境影响类型指标具有一定优势。表明通过河道淤泥制砖的方式, 不仅可以消纳河道淤泥这类废弃物, 减少其后续处置带来的负面影响, 其制作过程的环境影响也低于目前市面上的标准砖, 具有良好的环境效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 傅翔宇, 李亚峰, 王群. 城市黑臭河道治理方法的研究与应用现状 [J]. 建筑与预算, 2016(4):37-41.
- [2] 王莉君, 吴思麟. 南京黑臭河道底泥污染特征及评价 [J]. 科学技术与工程, 2018,18(3):117-122.
- [3] 徐振华. 污水厂污泥与河道底泥联合高温烧结制备陶粒的技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [4] 佟钰, 张君男, 田鑫, 等. 废弃混凝土回收制备轻质混凝土的实验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2015,34(4):1066-1070.
- [5] 冉献强, 景镇子, 潘晓辉, 等. 黄河淤积泥沙性质分析及水热固化泥沙初探 [J]. 材料导报, 2010,24(S1):442-445,449.
- [6] 裘鹏程, 景镇子, 刘子系, 等. 碳酸钙基建筑材料的水热法制备及硬化机理研究 [J]. 建筑材料学报, 2018,21(2):241-246,313.
- [7] 苗嘉俊, 景镇子, 阚文杰, 等. 水热固化煅烧造纸污泥建筑材料的研 究 [J]. 新型建筑材料, 2016,43(5):74-77,115.
- [8] 阴世超. 建筑全生命周期碳排放核算分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [9] 张伟倩, 杨天翔, 陈雅敏, 等. 基于生命周期评价的城市固体废弃物处理模式研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2013,36(1):69-73.
- [10] 肖昭文, 李翠梅, 孙志康, 等. 黑臭河道底泥烧结透水砖与性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2020,39(2):513-519.
- [11] Environmental management - life cycle assessment - principles and framework:ISO 14040:2006[S]. International Organization for Standardization, 2006.
- [12] Environmental management - life cycle assessment - requirements and guidelines:ISO 14044:2006[S]. International Organization for Standardization, 2006.

Abstract: According to the 2018 *Shaoxing Urban Expressway Network Plan*, the expressways open to traffic on Yuedong Road, North Road of Second Ring, Yuyue Road and West Road of Second Ring must be built in 2022, and the *six horizontal & eight vertical* expressway network will be built by 2035. In order to solve the problems of tight construction period, heavy tasks, high environmental sensitivity, and difficult information management, Shaoxing urban expressway adopts the construction mode of *standardized design, factory manufacturing, assembly construction, information management*. The *four modernizations* construction mode has been successfully explored & applied in the construction of Shaoxing Expressway. The construction mode can provide reference for similar projects.

Key words: urban expressway;
construction mode;
prefabricated assembled bridge;
BIM platform

Design & Analysis of Curved Steel Tube Girder Cable-Stayed Bridge with Single Tower & Non-Backstays
CHENG Hong-bin
(Shanghai Survey Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: Compared with highway & railway bridges, urban pedestrian bridges pay more attention to the landscape effect, and the pedestrian bridges with novel shapes are often more competitive than the selected ones. The Xingfu River Pedestrian Bridge in Nanjing is designed as a new type of cable-stayed bridge with curved steel

tube girder without back cables. The main beam is made of large diameter round steel tubes, which are consolidated with the abutment to form an integral abutment. The steel-concrete composite section at the beam end & tower bottom uses PBL shear keys, and the cable tensioning device & construction method are designed. MIDAS CIVIL software is used to establish the finite element model of the whole bridge and conduct static & dynamic analysis. The results show that the bridge structure design is reasonable and the checking results meet the requirements of the specification.

Key words: pedestrian cable-stayed bridge;
inclined tower without back
cables;
integral abutment;
PBL shear key;
cable tensioning

ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Study on Life Cycle Assessment of River Bottom Mud Brick Production

JI Sha-sha¹, HUANG Jin¹, CHENG Ming-zhao²
(1. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute [Group]Co., Ltd., Shanghai 200125, China; 2. Shanghai Haigu New Material Technology Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: River sediment is the center of material exchange and energy flow circulation in water ecosystem. Because a large amount of sewage (waste) water is discharged into the water body and carries pollutants & nutrients to gather in the bottom mud, it has become the focus of endogenous treatment in the black & odorous water body treatment project. After the bottom mud

is treated by hydrothermal curing, the relevant materials can be formed to replace concrete products on the basis of meeting the requirements of technical indicators. Establish the data list of the whole process of making bricks from river bottom mud, select 7 key environmental impact indicators, use eBalance software for life cycle assessment, and compare & analyze the impact indicators with clay solid standard bricks & concrete standard bricks. The results show that during the life cycle of the standard brick of river sludge, the quicklime consumption in the mixing process has a great contribution to the environmental impact indicators, and the power consumption has a certain impact on the environmental impact indicators. Except RI index, other indexes of bottom mud brick are lower than those of two kinds of standard bricks, which has the advantage of reducing environmental impact.

Key words: river sediment;
life cycle assessment;
environmental effect

Mechanism Study on Gas Explosion in Deep Tunnel Drainage System

**WANG Bin, LV Wen-bin, SHEN Xu-zhou,
CHEN Ru-rong**

**(Pearl River Water Resource Research Institute,
Pearl River Water Resource Commission,
Guangzhou 510611, China)**

Abstract: By building a physical model of the hydraulic characteristics of gas explosion, the occurrence process of gas explosion in the shaft at the end of the tunnel and the ventilation shaft at the middle of the tunnel is simulated respectively, and the gas explosion is classified and the

mechanism of gas explosion is expounded. The research shows that the air-flow gas explosion is generated by the buoyancy of the air chamber and the external pressure. The pressurized gas explosion is generally generated with the air-flow gas explosion. After the trapped air chamber in the tunnel releases the air-flow gas explosion formed in the shaft, the pressurized gas explosion is more intense. The research conclusion can provide reference for the design & operation of deep tunnel drainage system.

Key words: deep tunnel;
gas explosion;
air-flow gas explosion;
pressurized gas explosion

Experimental Study on Simultaneous Removal of Nitrogen & Phosphorus from Initial Runoff by Composite Media

**CHEN Yue¹, XU Jian-feng¹, WEI Yuan-yuan²,
Shamuhar DURHANBAI³, WANG Yan-qiong³,
WANG Hong-wu³**

(1. Hangzhou Yuhang Water Holding Group Co., Ltd., Hangzhou 311100, China; 2. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute [Group] Co., Ltd., Shanghai 200125, China; 3. School of Environmental Science & Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A composite medium composed of zeolite & ceramsite is used to study the effect of composite medium on the simultaneous removal of nitrogen and phosphorus in the simulated urban initial runoff, taking ammonia nitrogen and phosphate in the simulated urban initial runoff