

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.04.020

鼓泡式流化床污泥焚烧炉耐火喷涂料施工质量控制

张 奇, 林莉峰, 刘 斌

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘 要: 以上海市白龙港污泥处理处置二期工程为例,介绍了鼓泡流化床焚烧炉内衬材料的设计情况,给出了喷涂料施工程序,总结了施工过程的质量控制技术要点,并对烘炉后焚烧炉耐材施工质量效果进行了验证。喷涂料施工前,通过试喷确定施工工艺参数,通过绘制喷涂区块排版图来指导现场施工,在控制每区块厚度和喷涂质量的同时使整体喷涂质量达到标准。在喷涂施工过程中,根据试喷工艺参数控制好加水量、气压、喷枪角度等确保喷涂质量。完成焚烧炉耐材施工全部工作后,在烘炉阶段,根据实际施工环境、材料加水量,理论烘炉温升曲线0~125℃温升阶段,由5 h调整控制在8 h,放缓温升速度,避免温升过快导致水分排除不畅,减少裂纹产生。该工程焚烧炉内衬耐火喷涂料施工质量达到了控制标准要求。

关键词: 鼓泡流化床焚烧炉; 喷涂料施工; 质量控制

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)04-0114-06

Construction Quality Control of Refractory Spray Coating for Bubbling Fluidized Bed Sludge Incinerator

ZHANG Qi, LIN Li-feng, LIU Bin

(Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Taking the phase II sludge treatment and disposal project in Shanghai Bailonggang as an example, the design of lining materials for bubbling fluidized bed incinerator is introduced, the spray coating construction procedure is provided, the quality control technical points in the construction process are summarized, and the construction quality effect of refractory materials for incinerator after drying is verified. Before spraying, the construction parameters are determined by trial spraying, and the layout of spraying blocks is drawn to guide the field construction, thus the overall spraying quality can reach the standard while controlling thickness and spraying quality of each block. During the spraying process, the spraying quality is guaranteed by controlling the amount of water, air pressure and spray gun angle according to the trial spraying process parameters. In the drying stage after completing all the refractory material construction work of incinerator, the 0~125℃ rise stage in the theoretical temperature rise curve is adjusted from 5 to 8 h, according to the actual construction environment and material water addition, so as to slow down the temperature rise speed, avoid poor water drainage and reduce cracks due to too fast temperature rise. The construction quality of fire-resistant spray coating for the incinerator lining of the project has reached the requirements of control standard.

基金项目: 上海市科委基金资助科研项目(20230730100)

Key words: bubbling fluidized bed incinerator; spray coating construction; quality control

对国内已建的几个污泥焚烧项目进行调查发现,基本在运行几年后需要对焚烧炉内衬耐火材料进行维修,很大程度上影响了焚烧炉的寿命和生产效率,因此焚烧炉的耐火材料施工质量对焚烧炉本体的寿命和稳定高效运行非常重要。上海市白龙港污水处理厂污泥处理处置二期工程采用脱水+干化+焚烧工艺对污泥进行处理。核心设备采用高效鼓泡式流化床焚烧炉^[1],在国内污泥处理项目中尚属首次。以该工程为例,对焚烧炉耐火材喷涂料施工程序和质量控制进行介绍和总结。

1 焚烧炉及耐火材料

1.1 焚烧炉

该工程新建鼓泡式流化床焚烧炉用于污泥焚烧,焚烧炉采用现场拼装方式,单台设计污泥处理能力 100 tDS/d。焚烧炉共分 4 个通道,分梯级实现热能的最大利用。第一通道为燃烧区,确保 850 ℃ 以上的燃烧温度及 2 s 以上的停留时间,实现污泥充分燃烧和有效控制污染物产生;第二通道安装有屏式换热器,作为主要的辐射受热和蒸发面之一;第三通道布置对流蒸发器和过热器,提高蒸汽产量和品质;第四通道布置空气预热器和省煤器,进一步回收烟气中的余热。而整个炉膛外墙由膜式水冷壁构成,隔热的同时可高效吸收和转化烟气中的热量,实现锅炉一体化的设计和布置。传统的绝热炉耐火材料厚度为 400~500 mm,使得启炉和停炉耗时耗能。该工程焚烧炉的结构形式允许内部耐材采

用较薄的厚度,根据焚烧炉内部位置的不同,耐材厚度为 80~150 mm,极大提升了焚烧炉内部的有效容积和燃烧效率。

1.2 耐火材料

焚烧炉不同部位根据不同要求采用了不同性质的喷涂料和浇注料,如图 1 所示。

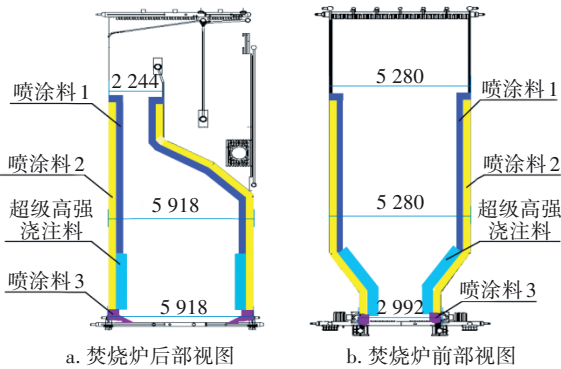


图 1 焚烧炉耐材示意

Fig.1 Schematic diagram of refractory materials for incinerator

其中绝热层全部采用喷涂料,炉膛下部砂床区耐火层采用浇注料,炉膛中部及上部耐火层采用喷涂料。

耐火材料从生产到施工安装时间不应超过 6 个月,若超过 6 个月,则须进行材料复检。进入现场施工材料应提供相应检测合格证。

该工程入场耐火喷涂材料性能检测结果如表 1 所示。

表 1 耐火材料性能检测结果

Tab.1 Refractory performance test results

项目	喷涂料 1		喷涂料 2		喷涂料 3	
体积密度/(kg·m ⁻³)	2 397 (干燥 110 ℃)		941(干燥 815 ℃)		2 164(干燥 110 ℃)	
化学分析/%	Al ₂ O ₃	64.6	Al ₂ O ₃	40.7	Al ₂ O ₃	49.8
	Fe ₂ O ₃	1.1	Fe ₂ O ₃	2.5	Fe ₂ O ₃	1.1
	CaO	3.0	CaO	11.3	CaO	6.8
	SiO ₂	27.3	SiO ₂	40.1	SiO ₂	36.4
冷态耐压强度/(N·mm ⁻²)	110 ℃, 24 h	60	110 ℃, 24 h	2.1	110 ℃, 24 h	57
	1 000 ℃, 3 h	44	815 ℃, 3 h	2.2	1 000 ℃, 3 h	17
	1 550 ℃, 3 h	61	1 200 ℃, 3 h	2.5	1 450 ℃, 3 h	43
线性变化/%	110 ℃, 24 h	微量	110 ℃, 24 h	微量	110 ℃, 24 h	微量
	1 000 ℃, 3 h	-0.4	815 ℃, 3 h	-0.5	1 000 ℃, 3 h	-0.3
	1 550 ℃, 3 h	+1.3	1 200 ℃, 3 h	-0.8	1 450 ℃, 3 h	+1.1
加水量/%	7.3		46.8		12	

2 喷涂施工及施工质量控制要点

2.1 喷涂施工工艺流程

喷涂施工工艺操作工序简单、施工速度快、可解决异型部位浇注不易施工的难题,目前喷涂料已经作为冶金、水泥、化工和石油等工业窑炉^[2]的内衬材料而广泛使用。

焚烧炉内衬耐火喷涂料施工步骤如图2所示。在喷涂作业前,现场应做好施工准备工作,主要包括喷涂机具的准备、焚烧炉内脚手架操作平台搭设、测量放线、锚固件的安装。本项目V型锚固件安装由设备制造厂完成。

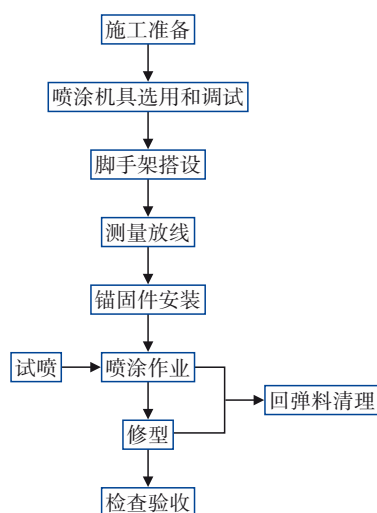


图2 喷涂料施工工艺流程

Fig.2 Spray coating construction process

2.2 喷涂设备

该工程采用的喷涂设备如图3所示。



图3 喷涂设备

Fig.3 Schematic diagram of spraying equipment

喷浆机主要由驱动装置、转子总成、风路系统、喷射系统、电气控制箱等部分组成,生产能力为5

m³/h,输料管内径为 $\varnothing 51$ mm,工作压力为0.4~0.6 MPa,耗风量为7~8 m³/min。

2.3 喷涂施工工艺参数确定

在喷涂作业正式开始前,现场应先进行试喷作业,确定施工现场的喷涂料施工工艺参数。喷涂作业有湿法、半干法和干法三种型式。该工程耐火喷涂料采用半干法。半干法喷涂是将喷涂料在喷涂机的搅拌仓内搅拌均匀后,用压缩空气将干粉状喷涂料通过管路送到喷枪;在喷涂料进入喷枪前,加入适量的水(以试喷效果确定),使喷涂料在管路雾化仓中进行迅速湿润雾化;喷涂料通过枪口时,按照设计配合比再加入剩下的水;最后将喷涂料喷涂在施工面上。根据材料使用说明,对加水量、水压、气压、物料流速、回弹率、喷涂距离进行现场试验。

喷涂料现场使用水为自来水,施工加水量工艺参数设计值和试喷确定情况见表2。物料喷涂回弹率:立面10%~20%,顶面30%~50%。

表2 喷涂料加水量配比

Tab.2 Water ratio of spray coating

喷涂料	对应颜色	材料设计加水量/%	实际试喷确定加水量/%	备注
1	天蓝色 171	6~8	7.5	室内温度 12~
2	绿色 060	46~52	50	21℃、湿度
3	浅紫色 191	11~13	11	73%~90%

2.4 喷涂施工质量控制要点

2.4.1 脚手架的搭设

炉体内脚手架搭设质量会影响喷涂作业的顺序和质量,因此需要重视并且提前设计好方案。搭设脚手架时应避免脚手架与施工面接触,使得局部喷涂不到位造成质量缺陷;脚手架每层操作空间应满足人员自由移动的要求;持喷枪作业时,喷枪距离施工面能够满足1.0~1.5 m的要求;且架体结构上需安全可靠。该工程根据炉内空间结构,脚手架8根主立杆立在炉膛下部风帽风管上,炉膛中部的横杆采用两端悬挑,并设置水平临时支撑杆撑在炉壁上,用于稳定架体水平方向移动,在喷涂料喷涂到临时支撑位置时,拆除临时支撑,加设到其他位置用于稳定架体。

2.4.2 喷涂作业区块排版

该工程喷涂作业以焚烧炉炉膛上部施工为例,炉膛上部绝热层耐火材料为绝热喷涂料(喷涂料2),设计厚度70 mm,向火面耐磨层采用高强度喷涂

料(喷涂料1),设计厚度70 mm。在喷涂料作业前按照设计要求对喷涂工作面做喷涂区块排版图,其中绝热层1 000 mm×1 000 mm、耐磨层800 mm×800 mm,根据排版图进行现场测量放线工作。

2.4.3 绝热层和耐磨层喷涂作业

喷涂前应检查锚固钉情况,对不合格的锚固钉进行整改。喷涂作业先喷最外层的绝热层,喷涂作业按先难后易、从下到上的顺序进行施工,喷枪枪口距离炉墙控制在1.0~1.5 m,喷枪要垂直于工作面,采用螺旋喷涂,旋转要平稳,应避免倾斜喷涂。当需要局部喷涂时,可将喷枪固定在一定的角度范围内来回摆动喷涂。喷涂作业时区块大小和厚度控制可以通过安装准确厚度和形状的模板来实现。

喷涂向火面耐磨层时,应在绝热层养护24 h后进行,喷涂前检查所有V型锚固件(正确打开),V型锚固件和初砌绝热层表面残留余料需清除并采用风吹方式清理干净。检查工作完成后,为防止新喷的耐磨层材料水分被绝热层吸去,喷涂前应在绝热层表面预先涂上一层防水涂层或喷洒少量的水来湿润绝热层表面。所涂的防水材料应能在低温烘烤时燃烧掉,喷洒水主要由喷涂人员观察工作面来实现,以表面湿润不滴水为度。耐磨层的厚度控制、喷涂方法同绝热层施工方法。

喷涂达到要求的厚度后,即可结束喷涂。根据整平要求,结束喷涂后应尽快完成平面修整工作。工作面应是粗糙的、开放的(应避免将工作面抹光),在烘炉期有利于温度应力释放而不易产生表面裂纹。

2.4.4 喷涂作业水化控制

喷涂料施工环境温度冬季不宜低于15℃,低于15℃应采取保暖措施;夏季施工环境温度不应高于30℃,高于30℃应采取降温措施。喷涂料加水后喷涂施工时,要控制混合温度。混合温度会影响材料的理化特性,主要影响材料的水化反应,混合温度可通过加入水的温度进行调节。该工程所用喷涂料经现场试验,混合料温度控制在16~25℃,初凝时间3~5 min,终凝时间8~10 min,与现场施工条件相适宜。

2.4.5 烘炉

完成一次新建机组完整的耐火材料烘炉程序,一般分为低温烘炉和高温烘炉两个阶段。低温烘炉阶段由外部烘炉机提供热源,温度以25℃/h的速

度阶梯式上升最高至550℃,耐火材料中的游离和结晶水分基本烘干;高温烘炉阶段,由锅炉自身燃烧器完成,温度以50℃/h的速度达到运行温度850℃,进一步固化耐火材料晶格,实现最终强化。

烘炉工作应在焚烧炉耐材施工完成并验收合格,炉内通风自然干燥7 d后进行。第一阶段烘炉理论温升曲线、实际烘炉温升曲线分别如图4、5所示。第二阶段烘炉理论温升曲线、实际烘炉温升曲线分别如图6、7所示。测定分析结果表明,烘炉温度控制比较理想,这对保证耐材施工质量和耐久性至关重要。

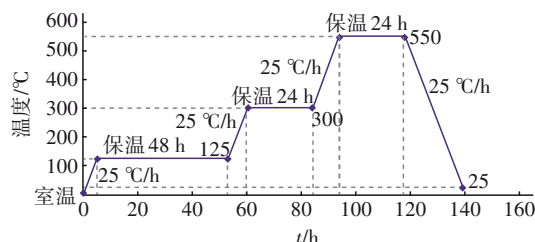


图4 第一阶段理论烘炉温升曲线

Fig.4 Temperature rise curve of theoretical oven in the first stage

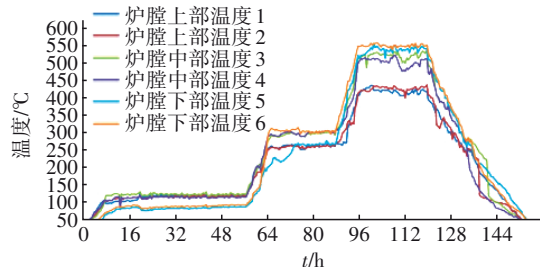


图5 第一阶段4#炉实际烘炉温升曲线

Fig.5 Temperature rise curve of 4# furnace in the first stage

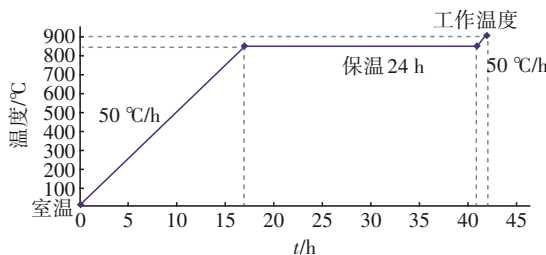


图6 第二阶段理论烘炉温升曲线

Fig.6 Temperature rise curve of theoretical oven in the second stage

该工程因喷涂料含水量相对较大、工程所处地理位置空气湿度较大,烘炉在0~125℃温升阶段,由理论烘炉5 h调整控制在8 h,避免温升过快导致水

分排除不畅通,使得工作面产生大量裂纹,降低强度,以及造成工作面剥落。烘炉完成后,对炉内耐材外观进行复查,表面收缩裂纹宽度 ≤ 2 mm,无网状裂纹、贯穿裂缝、无脱落现象,满足施工质量验收规范要求。

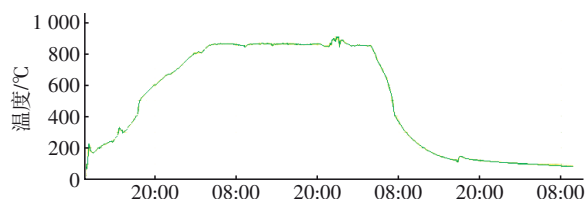


图7 第二阶段实际烘炉温升曲线

Fig.7 Temperature rise curve of actual oven drying in the second stage

2.4.6 喷涂作业注意要点

喷涂作业要控制面板尺寸和膨胀缝。喷涂作业最大工作面板尺寸要严格按照设计图纸进行施工,并按要求设置膨胀缝。因为工作面板分块尺寸越大,在烘炉期会大概率出现更多的收缩裂缝。另外,膨胀缝应错缝,避免出现通缝,以防止焚烧炉投泥运行过程中,炉内砂粒沿着缝隙不断对工作面进行侵蚀,造成缝隙变大以及工作面板损坏失效。

喷涂作业要控制好加水量。在喷涂过程中,喷涂料加水量的控制十分关键,加水量的多少会直接影响喷涂料质量和使用寿命。试喷参数确定后,现场实际施工过程中加水量要通过喷涂人员观察喷

涂工作面的外观来适度调整。

喷涂作业要控制喷枪角度和喷涂厚度。如喷枪角度不垂直于工作面,喷涂时工作面会出现明显的阴影面,厚薄不均。绝热层厚度不同会导致水冷壁受热的偏差,并且可能发生过高的热流密度,造成炉体受热不均,从而导致炉体膨胀位移不均而影响运行。耐磨层厚度不均会直接影响运行寿命,焚烧炉运行时较薄处面层在砂粒的不断侵蚀下,很快会磨损。

在绝热层、耐磨层喷涂过程中为保证喷涂质量,喷涂料试块应在焚烧炉内部喷涂作业时取得,并在低温烘炉期在同样位置进行烘烤,烘炉完成后送检。

3 喷涂质量检查

3.1 喷涂质量检查

绝热层和耐磨层喷涂工作完成后,根据《工业炉砌筑工程质量验收标准》(GB 50309—2017)和《电力建设施工质量验收规程 第2部分:锅炉机组》(DL/T 5210.2—2018)进行检查验收,喷涂厚度采用直尺或卷尺进行测量;喷涂料表面平整度采用靠尺或气泡水平仪进行检查;喷涂工作面采用工作锤敲击检查是否有空鼓。对于检查过程中喷涂不合格的需按要求完成整改。

该工程焚烧炉喷涂料施工质量检查结果如表3所示。

表3 喷涂料施工质量检查结果

Tab.3 Quality inspection results of spray coating construction

检验项目	性质	执行标准	施工检查	备注
喷涂施工混凝土外观	一般	无收缩裂纹、蜂窝、麻面、孔洞,喷涂表面自然成形	目测检查无不良情况	验收合格
喷涂厚度	主控	喷涂厚度偏差 ± 10 mm	最大处偏差4 mm	验收合格
表面平整度偏差	主控	表面平整度偏差不大于5 mm/m,全长不大于10 mm/m	平整度偏差最大2.5 mm	验收合格
表面垂直度偏差	主控	表面垂直度偏差不大于5 mm/m,全墙高度不大于15 mm/m	垂直度最大偏差3 mm	验收合格
混凝土养护	主控	符合设备技术文件要求,且不少于7 d	自然养护7 d	验收合格
全墙膨胀缝偏差	主控	2 mm	实测最大约1.8 mm	验收合格

3.2 试块检测

试块规格尺寸为160 mm \times 40 mm \times 40 mm,每组3块。喷涂料试块在低温烘炉阶段完成后,采用塑料薄膜进行密封,之后送交有检测资质的检测单位进行检测。检测项目包括体积密度、110℃冷态耐压强度、线性变化等。该工程要求喷涂料1在110℃条件下烘干体积密度 ≥ 2200 kg/m³、110℃条件下冷态耐压强度 ≥ 50 N/mm²;喷涂料2在815℃条件下烘

干体积密度 ≤ 1041 kg/m³、110℃条件下冷态耐压强度 ≥ 2 N/mm²;喷涂料3在110℃条件下冷烘干体积密度 ≥ 2100 kg/m³、110℃条件下冷态耐压强度 ≥ 40 N/mm²。

该工程喷涂料施工对应的同条件试块的体积密度、冷态耐压强度及线性变化的检测结果见表4。由试块检测结果可知,喷涂料施工强度和线性变化符合本工程要求。

表 4 喷涂料试块检测结果
Tab.4 Test results of spray coating test block

项目	喷涂料 1 试块		喷涂料 2 试块		喷涂料 3 试块	
体积密度/(kg·m ⁻³)	2 286 (干燥 110 ℃)		978(干燥 815 ℃)		2 149(干燥 110 ℃)	
冷态耐压 强度/(N·mm ⁻²)	110 ℃, 24 h, ≥50 N/mm ²	55	110 ℃, 24 h, ≥2.0 N/mm ²	3.4	110 ℃, 24 h, ≥40 N/mm ²	46
	1 000 ℃, 3 h	45	815 ℃, 3 h	2.8	1 000 ℃, 3 h	25.5
	1 550 ℃, 3 h	60	1 200 ℃, 3 h	3.1	1 450 ℃, 3 h	44.5
线性变化/%	1 000 ℃, 3 h, 线变化 -0.5Max	-0.32	815 ℃, 3 h, 线变化 -0.7Max	-0.46	1 000 ℃, 3 h, 线变化 -0.6Max	-0.31
	1 550 ℃, 3 h, 线变化 -2.0/+2.5	+1.5	1 200 ℃, 3 h, 线变化 -0.8Max	-0.8	1 450 ℃, 3 h, 线变化 -2.0/+2.0	+1.2
加水量/%	7.5		50		11	

4 结 语

- ① 为确保喷涂质量,喷涂作业前脚手架搭设要有详细方案,喷涂过程中要注意控制面板尺寸、加水量、喷枪角度等。
- ② 喷涂要严格按照试喷确定的工艺参数进行施工,喷涂人员要有丰富的施工经验,以确保施工质量和及时处理遇到的喷涂施工问题。
- ③ 烘炉时,升温至 125 ℃阶段,现场可根据实际情况适当延长升温时间,有利于材料内部水分转化成蒸汽时排除通畅,可有效避免升温过快、水蒸气排除不通畅而使得工作面产生大量裂纹,降低强度,以及造成工作面剥落。
- ④ 根据喷涂料施工质量检查结果可知,喷涂料施工外观、厚度、表面平整度、膨胀缝设置均符合质量验收规范要求;另根据喷涂料试块检测结果可知,低温烘炉阶段同条件设置的喷涂料试块检测质量符合设计要求。通过质量检查和检测结果可知,喷涂料施工质量控制措施有效,运行后的实际效果将通过后续的生产实践来验证。
- ⑤ 根据烘炉温升曲线,低温烘炉阶段炉膛上部温度最高为 425 ℃,没有达到烘炉曲线理想的 550 ℃,其理论上低温烘炉阶段浇注料烘炉质量有

一定缺陷,但根据施工质量检查和同条件试块检测结果,喷涂料施工满足质量验收相关指标要求。其 4#炉烘炉温升曲线偏差对浇注料耐久性质量的影响程度,后续结合生产实践运行工况和其他炉体可进一步总结验证。

参考文献:

[1] 胡维杰,邱凤翔,卢骏营. 上海市白龙港污泥干化焚烧工程工艺设计与思考[J]. 中国给水排水, 2019, 35 (4): 54-58.
HU Weijie, QIU Fengxiang, LU Junying. Process design and consideration of Shanghai Bailonggang sludge drying and incineration project[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 54-58(in Chinese).

[2] 葛霖. 筑炉手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 1994.
GE Lin. Furnace Building Manual [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994(in Chinese).

作者简介:张奇(1992-),男,安徽宿州人,本科,工程师,从事市政工程施工及管理工作。
E-mail:zhangqi@smedi.com
收稿日期:2020-07-11
修回日期:2021-03-19

(编辑:衣春敏)