

某高敏感区域老填埋场开挖天幕系统工程设计

李俊涛

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 为妥善解决存量垃圾开挖阶段的扬尘扩散、臭气逸散等邻避敏感问题,通过对我国南方某高敏感区域老垃圾填埋场的研究分析,研发设计单樑支撑结构(由填埋场短跨两端的钢结构塔架及连接塔架的钢缆构成)的天幕系统。该系统集成可开闭防尘网、除臭喷淋装置和信息化控制单元,在开挖作业中兼具防尘、除臭与视线阻隔功能,有效实现了“降尘+除臭”双重智能化管控。设计成果可为同类型填埋场的垃圾开挖工程提供技术参考,提升高敏感区域填埋场的环境修复效率。

关键词: 天幕系统;高敏感区域;老填埋场;垃圾开挖;智能化控制

中图分类号: X705

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0437-05

Engineering Design of Canopy System for Excavation of Old Landfill in a Highly Sensitive Area

LI Juntao

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: To properly address the NIMBY sensitive issues such as dust diffusion and odor escape during the excavation stage of existing garbage, a canopy system featuring a single-bay support structure (composed of steel structure towers at both ends of the short span of the landfill and the steel cables connecting the towers) is developed and designed through the research and analysis of an old municipal solid waste landfill in a highly sensitive area of southern China. This system integrates a dust-proof net able to be opened and closed, a deodorizing spray device and an information-based control unit, and simultaneously has the functions of dust prevention, deodorization and sight shielding during excavation operations, which effectively achieves the dual intelligent management and control of “dust suppression and deodorization”. The design results can provide the technical reference for garbage excavation projects of similar landfills and enhance the environmental remediation efficiency of landfills located in highly sensitive areas.

Keywords: canopy system; high-sensitivity area; old landfill; garbage excavation; intelligent management and control

0 引言

随着城市化进程的加快,老填埋场存量垃圾引发的环境污染和安全隐患日益凸显^[1-2],存量垃圾治理逐渐成为行业关注的热点和公众关注的焦点^[3-4]。因此,妥善解决历史遗留的填埋场污染问题,是当前环保工程领域的首要任务之一^[5]。对存量垃圾开展资源化治理和安全处置,不仅能从根本上消除填埋场的污染源,还可以规避火灾、垃圾堆体滑坡等安全隐患,对维护社会安全稳定具有重要的现实意义^[6]。

当前,存量垃圾根治方案主要是对垃圾进行开

挖、筛分处置,但该过程易引发二次环境问题,一旦处理不当,会进一步加剧环境污染^[7]。其中,开挖阶段的扬尘扩散、臭气逸散等邻避敏感问题尤为突出,长期缺乏高效、稳定的解决方案^[3]。传统的垃圾开挖全程遮挡措施主要包括3类^[8-10],但在实际应用中,均存在明显缺陷。一是有组织地敞开式分层开挖。这种措施会对周边的大气环境产生一定的影响,且开挖作业时间受大风、降雨等天气条件的限制显著,作业效率波动较大。二是采用气膜结构覆盖开挖。气膜内部密闭,易导致甲烷等填埋气聚集,当填埋气浓度过高时,可能导致作业人员窒息,且存在易燃易爆风险。同时,气膜容易被施工机械刮蹭破坏,可能引发气膜结构整体坍塌事故。三是采用轻钢骨架膜结构覆盖开挖。轻钢骨架跨度受限(通常难以满足大型填埋场需求),且工程造价较高,经济

收稿日期: 2025-11-28

基金项目: 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司资助课题项目(K2024J023A)

作者简介: 李俊涛(1991—),男,硕士,工程师,从事环境岩土工程及固废处置设计工作。

性欠佳。

我国南方某高敏感区域填埋场于1983年投用,1997年12月停止运营,总堆填垃圾量约为255万 m^3 。受当时经济、技术条件限制,垃圾仅采用简易填埋方式处置。为消除垃圾填埋场的环境与安全隐患,项目建设单位于2005年底完成封场工程。随着城市建设的快速推进,该填埋场所在区域于2022年被纳入城市产业用地规划范围。基于此,当地政府决定对该填埋场进行全量开挖和环境修复,并于2023年委托具备相关资质的单位,先后开展堆体及周边环境调查、全量开挖环境修复工程设计等工作。

在生活垃圾资源化处置成为行业主流的背景下,针对垃圾开挖过程中的扬尘扩散、臭气逸散等邻避敏感问题开展深入研究,具有重要的现实意义与工程价值。本文研发设计了一套适用于高敏感区域老填埋场开挖工程的天幕系统,旨在有效解决填埋场垃圾开挖过程中的扬尘扩散、臭气污染等问题。研究成果可为同类型填埋场垃圾开挖提供技术参考,助力实现垃圾开挖阶段扬尘与臭气的智能化控制。

1 场地的地形地貌及地质条件

1.1 地形地貌条件

该场地地形起伏较大,总体地势为北高南低,场地高程为33.5~168.4 m,高差约为134.9 m,坡度为 $15^\circ \sim 25^\circ$,沟谷区域垃圾回填基本平整。该场地原为高尔夫练习场,目前已废弃,场地用地红线及库区边界范围地形图如图1所示。

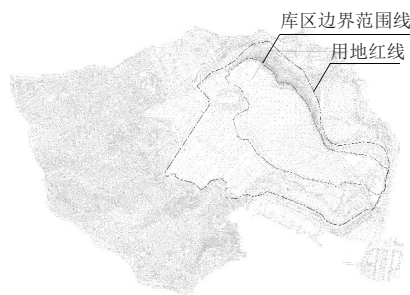


图1 场地用地红线及库区边界范围地形图

1.2 地质条件

根据项目2024年3月的岩土工程详细勘察报告,场地岩土层自上而下依次为人工填土层、第四系残积层和下伏侏罗系下统金鸡组砂岩。

2 天幕系统功能与设计方案

2.1 天幕系统的功能定位

结合填埋场开挖过程中对除臭、防尘、视觉污染

控制的核心需求,天幕系统需具有以下功能特性。

一是智慧化除臭。集成自动喷雾除臭系统,结合信息化技术,实现臭气精准控制,可根据臭气浓度动态调整喷雾参数。

二是安全防尘。天幕防尘网采用非密闭设计,避免甲烷等填埋气聚集风险。同时,防尘网具备良好的视觉遮挡效果,可降低对周边居民的视觉干扰。

三是灵活开合。遭遇台风、暴雨等恶劣天气时,天幕可快速收起;天气转好后,天幕能高效复位,保障施工的连续性。

四是广域覆盖。天幕跨度可灵活调整,最大跨度可达280 m,可实现垃圾开挖区域的全方位遮盖,无防护盲区。

2.2 天幕系统组成

天幕系统主要由核心支撑构件、功能组件和控制系统3个部分构成。其中,核心支撑构件包含天幕基础、横梁、天幕塔架、侧面天幕支撑系杆和天幕支撑钢管等;功能组件涵盖固定钢缆传动轮、天幕移动支架、边侧天幕系统悬挂钢缆、喷淋系统、天幕驱动钢缆和天幕网等;控制系统包括全自动摄像机与信息化控制系统等。天幕系统的三维设计模型如图2所示。

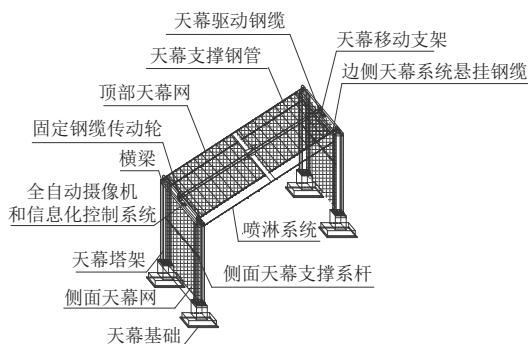


图2 天幕系统三维设计模型图

2.3 天幕系统深化设计

2.3.1 天幕基础选型

根据开挖作业区域的划分,天幕系统分为3个区域建设(编号与库区分区一致),自北向南依次为D区、AB区、C区(见图3)。各区域天幕均沿库区东西走向横跨布置。支撑天幕的塔架分别设置于库区东、西两侧的山体及现状道路旁。采用钢丝绳连接东、西两侧塔架,并作为防尘网、喷淋系统、臭气监控设备等的吊装载体。

基于塔架所处位置的差异,从安全性与经济性角度出发,在有基坑的区域,天幕塔架基础与基坑围护结构同步实施。在一般区域,塔架基础采用“筏板

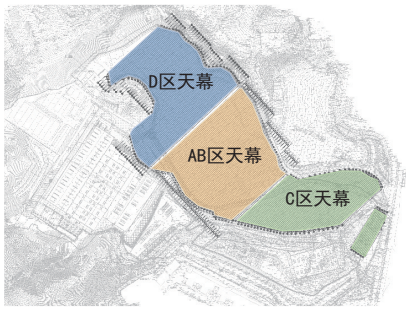


图3 天幕平面分区图

基础+桩基+锚杆”的组合形式,沿塔架平面轮廓布置。不同形式的塔架基础如图4所示。考虑到塔架基础对沉降的严格要求及钢丝绳的拉力作用,天幕系统在塔架钢柱下方设置钻孔灌注桩;同时,在基础后部设置锚杆,以抵消塔架上部钢丝绳的水平拉力,保障基础的稳定性。

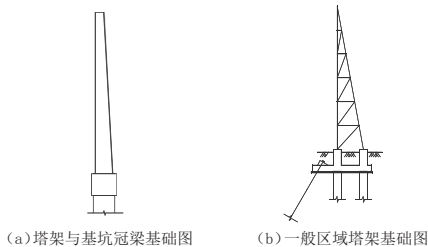


图4 塔架基础形式图

2.3.2 天幕塔架选型

综合考量开挖作业空间需求、除臭喷淋等降尘措施效果及钢丝绳悬垂特性,天幕系统竖向相对高度确定为9 m(即东、西两侧的塔架相对垃圾堆体高度为9 m)。结合场地的地形起伏特征和实际工况,塔架高度设定为9~12 m。同时,考虑到场区的交通组织需求及其他设施的避让要求,塔架横向间距设定为6~12 m。随着堆体开挖深度的增加,需通过两侧滑轮组同步下放天幕钢丝绳,以避免因喷淋高度设置过高导致防尘、除臭效果衰减。综合施工便捷性与经济性需求,塔架钢柱选用变截面H型钢,并针对不同跨度的工况,对应选用不同类型的桁架(见图5)。

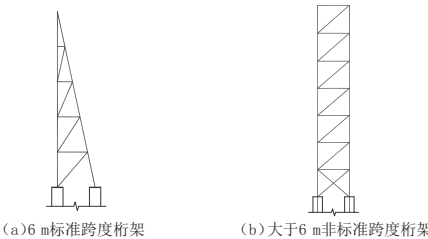


图5 塔架选型图

2.3.3 天幕钢丝绳选型

天幕钢丝绳可细分为悬挂天幕防尘网钢丝绳、喷淋钢丝绳和牵引钢丝绳3类,所有钢丝绳均固定于库区两侧的天幕塔架上。其中,悬挂天幕防尘网

钢丝绳的核心作用是悬挂并张紧天幕防尘网;喷淋钢丝绳专门用于架设和支撑除臭喷淋系统;牵引钢丝绳则与天幕塔架上的动力装置相配合,为天幕防尘网的开启与闭合提供驱动力。钢丝绳选型以计算最大承受拉力为依据,结合不同跨度选取对应的直径规格。当 $\frac{f}{l} \leq \frac{1}{10}$ 时,在工程实际应用中,水平拉力采用抛物线模型计算^[11]。计算公式如下:

$$F_H = \frac{ql^2}{8f} \tag{1}$$

式中: F_H 为钢丝绳最大拉力,kN; q 为均布荷载,kN/m; l 为钢丝绳跨度,m; f 为跨中垂度,m。

钢丝绳安全系数取值3.0,设计活荷载组合系数为1.5。通过计算钢丝绳最大拉力,并对比不同规格钢丝绳的额定承载力,设计人员最终确定适配的钢丝绳型号。

2.3.4 天幕防尘网选型

结合天幕综合降尘系统的特性,天幕防尘网采用悬挂式安装方式,固定于天幕钢丝绳上,并精准布设于填埋堆体正上方。当进行垃圾开挖作业时,库区垃圾受机械扰动易产生扬尘,同时恶臭气体易聚集。为解决以上问题,系统选用优于普通产品的8针高密度防尘网,凭借更高的孔隙拦截精度,既能削弱扬尘的扩散动力,又可保障恶臭气体顺畅扩散。其具体规格参数如表1所示。从适配性与实用性的角度考量,防尘网宽度按垃圾开挖天幕单跨宽度定制为6 m,长度依据填埋库区的实际跨度选取,并依托智能化控制系统,实现开挖区域的防尘网开启与闭合的动态管控。

表1 天幕防尘网规格参数

规格类别	材质	单位面积质量/(g·m ⁻²)	针数/针	使用寿命/年	适配宽度/(m/联)
参数值	聚酯纤维	120	8	3~5	6

2.3.5 天幕除臭系统设计

(1)顶部喷淋除臭

喷淋系统布设在天幕系统钢丝绳上,在开挖过程中实现“降尘+除臭”的双重效果。其工作原理如下:利用设备内置的空气压缩机与调节器,将植物除臭剂汽化,并通过气动喷嘴喷射至喷雾管道内;植物除臭剂经管道上的喷头雾化后扩散至空气中,与臭气分子充分反应以抑制异味。

喷淋管线沿钢丝绳平行布置,采用 $\phi 10 \times 1$ mm 高压不锈钢管和高压雾化喷头(喷头流量为0.135 L/min,雾径为10~15 μm);雾化后的植物除臭剂可在空气

中长时间悬浮,以保障与臭气分子的充分接触。喷头采用梅花形布置,纵向间距设置为6 m,水平间距与单幅天幕宽度(6 m)一致。系统分区域由固定控制机组管控,根据开挖作业规划,单次开启4组机组,设置为每分钟喷洒30 s,全天作业10 h时,累计喷洒时长为300 min。

(2)周边喷淋除臭

利用天幕系统塔架搭建周边除臭系统,通过控制机组,将植物除臭剂汽化后由雾化喷头喷射,形成“气墙”,以隔离作业区与周边环境,确保臭气达标排放。

在塔架距离地面5 m和6 m高度处,分别布设上、下2层除臭管线(均采用 $\phi 10\times 1$ mm 高压不锈钢管),管线上每隔2 m设置1个高压雾化喷头(参数与顶部喷头一致),且上、下2层喷头错开布置,以避免喷淋盲区。周边气相除臭系统采用独立控制系统,单次开启1组机组,运行参数与顶部喷淋一致。

2.3.6 天幕系统BIM应用设计

借助BIM三维模型,开展天幕系统与周边设施的碰撞冲突分析,可直观地识别天幕系统与其他工程设施的空间干涉问题,以及自身高度的协调矛盾。可据此优化天幕平面布置、竖向高度、跨度间距,以及塔架基础和选型等细部节点,有效解决传统平面图纸中易被忽视的临建位置碰撞问题。天幕系统局部BIM模型如图6所示。

3 运行效果分析

为满足填埋场开挖过程中防尘、除臭、视觉污染

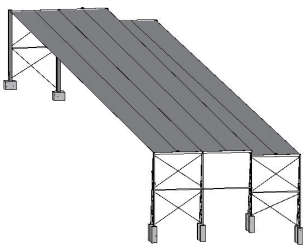


图6 天幕系统局部BIM图

控制的要求,本研究采用全过程管控系统,对填埋场开挖过程中产生的臭气、扬尘等污染物进行联动控制。当 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、TSP、臭气等污染物超过预警值时,系统自动启动除臭喷淋装置,远程控制天幕系统的开启与关闭,同时,通过项目现场管理系统平台,实时监测环境数据,最终实现防尘、除臭的智能化控制。

本研究进一步采用“快速好氧预处理+天幕遮蔽开挖+多维复合除臭”工艺,对垃圾开挖过程中的扬尘与臭气等相关参数进行实时监测,选择一年中较炎热的7—9月,将填埋场厂界周边多个监测点的实测数据取平均值后,与国内同类项目实测结果^[12]进行对比分析。其中, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 与TSP的标准限值参照《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)中二级浓度值^[13],且以年平均时间作为统计依据;氨气、硫化氢及臭气标准限值参照《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993)中“新扩改建项目”的厂界二级标准限值^[14];甲烷的标准限值按照《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2024)中填埋场上方甲烷气体含量的限值要求^[15]。具体分析结果如表2所示。

表2 垃圾开挖环境监测指标表

监测场景	检测指标						
	$PM_{2.5}/$ ($\mu g\cdot m^{-3}$)	$PM_{10}/$ ($\mu g\cdot m^{-3}$)	TSP/ ($\mu g\cdot m^{-3}$)	氨气/ ($mg\cdot m^{-3}$)	硫化氢/ ($mg\cdot m^{-3}$)	臭气浓度	甲烷 体积百分比
安装天幕实测值	11.8	19.1	20.0	0.03	0.004	4.3	1.1
国内同类项目(无天幕)实测值	12~26	85~130	102~213	0.08~0.15	0.005	15~40	<3.0
标准限值	35	70	200	1.5	0.06	20	5

从项目现场管理系统平台监测结果可见,在应用了“快速好氧预处理+天幕遮蔽开挖+多维复合除臭”工艺后,在垃圾开挖过程中,填埋场厂界周边的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、TSP、氨气、硫化氢、甲烷及臭气等核心环境监测指标,均稳定控制在《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)、《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993)与《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2024)的对应限值以下。其中,天幕系统对扬尘扩散、臭气逸散的阻隔与控制效果尤为突

出,有效削弱了开挖作业对周边大气环境的干扰,切实降低了邻避敏感问题发生的风险。

4 存在的问题及展望

天幕系统在高敏感区域老填埋场开挖中的应用虽具备显著优势(如智能化控制、广域覆盖、安全可靠),但仍面临以下问题与挑战。

一是工艺复杂性。天幕系统的施工与运行易受当地气候条件(如台风、暴雨)及场地地形起伏的影

响,增加了工艺实施的难度。

二是可持续性使用。由于填埋场开挖工程涉及的地形往往变化较大,天幕系统塔架等循环利用率较低,投资和运行维护成本较高。

未来研究需重点围绕3个方面展开:一是优化系统结构设计,提升其对复杂气候与地形的适应性,降低工艺复杂性;二是探索构件的标准化、模块化生产,降低定制化成本,同时,建立构件回收复用机制,降低运行维护成本;三是融合更先进的传感技术与AI算法,提升系统的智能化水平,进一步扩大其实际应用范围。

5 结 语

在高敏感区域老填埋场开挖过程中,扬尘、臭气污染等邻避敏感问题尤为突出。本文以我国南方某高敏感区域老填埋场为工程案例,结合天幕系统的应用实践,提出适用于高敏感区域老填埋场开挖的天幕系统技术方案,可为高敏感区域老填埋场开挖工程提供科学支撑,助力我国生态文明建设与“双碳”目标的协同推进。工程实践证实,该天幕系统可显著降低施工过程中的扬尘、臭气污染,满足高敏感区域的环保要求。其技术路线与应用经验可为同类型填埋场开挖与环境修复工程提供借鉴,具有良好的推广价值。

参考文献:

- [1] Zhi Y H, Ma S J, Qin J, et al. Assessing the city-level material stocks in landfills and the landfill mining potential of China[J]. Environmental Research, 2023, 236(P1): 116737.
- [2] 陈芊, 张垒. 生活垃圾填埋场存量垃圾原位封场与异地转运环境影响分析[J]. 四川环境, 2020, 39(1): 87-93.
- [3] 张效刚, 齐添, 宋树祥, 等. 我国南方某生活垃圾填埋场存量垃圾开挖作业案例分析[J]. 环境工程, 2024, 42(5): 90-97.
- [4] 王英达, 李淘, 吴小雯, 等. 城镇生活垃圾填埋场开采的可行性评估体系[J]. 环境工程, 2022, 40(3): 181-187; 202.
- [5] 黄乃先, 陈晨, 孔斌. 用于陈腐垃圾处置的精细化筛分工艺: 以某垃圾填埋场为例[J]. 环境卫生工程, 2024, 32(1): 9-13.
- [6] 孟凡跃, 李砚, 王艳明. 存量垃圾理化特性及不同处置方式对碳排放的影响[J]. 环境卫生工程, 2024, 32(增刊1): 175-183.
- [7] 李鹤, 詹良通, 兰吉武, 等. 关于存量生活垃圾填埋场治理方式选择的分析[J]. 环境卫生工程, 2024, 32(增刊1): 59-66.
- [8] 葛恩燕, 胡超. 生活垃圾填埋场开采筛分处置技术研究: 以卧旗山垃圾填埋场为例[J]. 环境卫生工程, 2022, 30(5): 88-93.
- [9] 袁满昌. 充气膜结构密闭作业设施在垃圾卫生填埋场的应用[J]. 城市管理与科技, 2011, 13(4): 54-55.
- [10] 曹辉, 许涛, 申金刚, 等. 钢骨架索膜结构储煤棚工程设计研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(12): 24-27.
- [11] 郭常瑞. 悬链线与抛物线缆索计算理论对比分析[J]. 山西建筑, 2012, 38(3): 173-176.
- [12] 刘超然, 江文琛, 张海静, 等. 华东地区非正规垃圾填埋场开挖筛分治理工程案例分析[J]. 环境卫生工程, 2024, 32(1): 14-20.
- [13] GB 3095—2012 环境空气质量标准[S].
- [14] GB 14554—1993 恶臭污染物排放标准[S].
- [15] GB 16889—2024 生活垃圾填埋场污染控制标准[S].

(上接第427页)

动态管理机制的结合,实现了对施工全过程的有效溯源与纠偏,特别是第三方监控提出的针对性整改措施,有效遏制了质量缺陷的蔓延,能及时发现并消除影响因素,能够实现问题的早发现、早处置,利于持续改进和提高施工质量。

参考文献:

- [1] 曾丽霞, 石继峰. 浅谈机场跑道面层沥青混凝土病害分析[J]. 湖南交通科技, 2014, 40(3): 43-46; 157.
- [2] 匡光华. 民用机场跑道柔性道面病害原因分析及处理对策研究[J]. 施工技术, 2014, 43(增刊2): 694-698.
- [3] 裴磊洋, 冯莉, 刘国光, 等. 温度作用下复合道面力学性能试验[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3752-3759.
- [4] 谭悦, 王伟, 孙大权. 虹桥国际机场绕滑道改造沥青道面施工质量控制[J]. 上海公路, 2021(2): 20-23; 165.
- [5] 卢铸, 谢树志, 高明, 等. 机场复合式高模量沥青道面结构优化设计[J]. 公路交通科技, 2023, 40(增刊1): 89-98.
- [6] 李炜光, 国洋, 汤豆, 等. 机场道面沥青加铺结构分区差异设计

- 研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(5): 91-96.
- [7] 陈文来, 凌建明, 袁捷, 等. 机场道面病害维修对策选择优化模型研究[J]. 公路工程, 2012, 37(3): 79-84.
- [8] 冯冰天. 机场绕滑道工程高性能沥青混合料研究与应用[J]. 城市道桥与防洪, 2022(2): 218-221.
- [9] 汪日灯, 廖述清, 袁静波, 等. 南苏丹朱巴国际机场跑道道面不停航施工改造技术[J]. 水运工程, 2014(2): 164-167; 196.
- [10] 李永生, 曹大富. 机场跑道路面混凝土不停航施工技术研究[J]. 公路工程, 2018, 43(3): 184-189.
- [11] 喻鹏. 沥青路面施工质量动态控制研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013: 22-25.
- [12] 张好杰. 浅谈动态质量监控系统在沥青路面管理中的应用[J]. 甘肃科技, 2015(11): 72-73.
- [13] 杨博乐. 高速公路沥青路面施工质量控制技术[J]. 交通科技, 2010(6): 60-62.
- [14] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [15] 李伟杭, 刘晓文. 基于第三方监控的沥青路面施工质量全过程管理与控制[J]. 公路工程, 2008, 132(5): 104-108.
- [16] MH/T 5011—2019 民用机场沥青混凝土道面施工技术规范[S].