

固体废弃物路基填筑材料的重金属污染特性研究进展

杜倩卉¹, 付伟², 张军辉¹, 唐强³, 顾凡^{1*}

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 3.苏州大学 轨道交通学院, 江苏 苏州 215141)

摘要:路域固体废弃物用作路基填筑是绿色低碳公路建设的一种重要手段,然而多数固体废弃物均不同程度地含有重金属污染物,在降雨入渗、地下水浸泡等复杂环境作用下,重金属会被释放,若处理不当将对周边土壤和地下水造成污染。该文综述了固废材料在路基工程中的综合利用、固废中重金属的浸出行为、迁移研究以及固废重金属的防控处理4个方面的研究现状。发现固体废弃物在路基工程中有广泛应用,但对固废路基的重金属污染特性的研究鲜有报道,重金属在路基中的长期浸出行为和迁移机制尚不明确。为了对固废路基的污染性能进行评估和调控,需要进一步研究污染物在路基结构中的迁移规律。通过对固废中污染物的防控处理技术进行总结对比,发现地聚合物在处置固废中有害重金属方面具有广阔的应用前景。

关键词:路基工程;固体废弃物;综述;重金属浸出毒性;防控处置

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Pollution Characteristics of Heavy Metals in Solid Waste Subgrade Filling Materials

DU Qianhui¹, FU Wei², ZHANG Junhui¹, TANG Qiang³, GU Fan^{1*}

(1.School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2.CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China; 3.School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215141, China)

Abstract: Using solid waste in the road engineering field for subgrade filling is an important approach for building green and low-carbon emission roads. However, most solid waste contains heavy metal pollutants to varying degrees, and heavy metals will be released under complex environments including rainfall infiltration and groundwater immersion, thereby causing pollution to the surrounding soil and groundwater if not handled properly. This paper reviewed the current status of research on four aspects, including the comprehensive use of solid waste materials in subgrade engineering, the leaching and migration behaviors of heavy metals in solid waste, and the prevention and control treatment of heavy metals in solid waste. It is found that solid waste has a wide range of applications in subgrade engineering, but little research has been focused on the pollution characteristics of heavy metals in subgrade containing solid waste, and the long-term leaching behavior and migration mechanism of heavy metals in subgrade are still unclear. In order to assess and regulate the pollution performance of solid waste, the migration pattern of pollutants in the subgrade structure needs to be further investigated. By summarizing and comparing the prevention and control treatment technologies for pollutants in solid waste, it is found that geopolymers have broad application prospects in the disposal of hazardous heavy metals in solid waste.

Keywords: subgrade engineering; solid waste; review; leaching toxicity of heavy metals; prevention and control treatment

收稿日期:2022-11-30(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2021YFB2600900);中交建集团青年科技创新项目(编号:2021-ZJKJ-QNCX16);长沙理工大学研究生创新项目(编号:CX2021SS14)

作者简介:杜倩卉,女,硕士研究生.E-mail:dduqianhui@stu.csust.edu.cn

*通信作者:顾凡,男,博士,教授.E-mail:fan.gu@csust.edu.cn

0 引言

随着经济快速发展,中国固体废弃物(简称固废)的累积堆存量和年均产量与日俱增,当前各类固废累积堆存量约800亿t,年产生量近120亿t,固废的综合利用率虽然超过50%,但相对于发达国家,利用固废生产高附加值再生料等的资源化利用水平仍相对较低^[1-2]。《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》强调要以推动资源综合利用产业绿色发展为核心,促进大宗固废实现绿色、高效、高质、高值、规模化利用,提高大宗固废综合利用水平^[3]。生态环境部发布的《“十四五”时期“无废城市”建设工作方案》也明确提出要推动大宗固废在提取有价值组分、生产建材、筑路、土壤治理等领域的规模化利用^[4]。

长期以来,固废处置通常采用现场露天集中堆放或填埋贮存等传统方式,随着资源短缺问题的日益严重以及政府对环境保护管理工作的逐步重视,中国系统性地开展了固废资源化利用的相关研究。在道路工程领域,将固废材料用于路基填筑,既解决了高速公路的土石方紧缺难题,又减少了环境污染,降低了工程造价,具有良好的社会和经济效益。李行等^[5]对两类典型建筑垃圾细集料应用于路基回填时的路用性能进行了研究,发现路基压实度及回弹模量均满足规范要求。虽然按照目前的固废相关法规,焚烧炉渣、煤矸石等属于一般固体废物,可进行直接填埋处理,但是固废中不同程度地含有重金属等污染物,种类众多且形态复杂^[6-7],路基使用寿命较长,污染物在路基中具有潜在性、长期性与隐蔽性,对环境造成的破坏具有不可逆性。冯新军等^[8]通过浸出试验发现天然煤矸石中的Cr和Pb的浓度超过了标准值。固废中的污染物在雨雪等作用下产生渗滤液,可能对周边土壤和地下水造成污染^[9-10]。现有的相关研究主要集中在固废再生料用于路基工程中某些路用性能的评价方面,而忽略其使用过程中对环境造成二次污染的可能性,在施工和服役期间如何防止固废中有害物质的污染问题目前尚未形成统一认识。因此有必要综述分析固废作为路基填筑材料时的重金属污染特性。

为此,本文从固废在路基工程中的综合利用、污染浸出、迁移行为及防控处理4个方面进行归纳总

结,以期在固体废弃物在路基工程中的再生应用提供参考。

1 固废在路基工程中的综合利用

随着中国近年来经济快速发展,交通基础设施建设需求日益增加,在路基工程中常使用建筑垃圾、焚烧炉渣、煤矸石、尾矿等固废来替代部分天然骨料作为路基填料,并取得了良好的效果,在保障道路服役性能的同时缓解了固废处理厂的堆积填埋压力,实现了变废为宝。

1.1 建筑垃圾在路基工程中的综合利用

《建筑垃圾处理技术标准》(CJJ/T 134—2019)将建筑垃圾定义为在新建、改建、扩建、拆除、加固各类建筑物、构筑物、管网等以及居民装饰装修房屋过程中产生的废弃物^[11]。其中混凝土、砂浆、砖块等具有与天然集料类似的工程性质,将建筑垃圾加工后用于道路工程的建设,可以缓解天然集料资源不足和开山采石导致的环境破坏等问题。建筑垃圾再生料用于公路路基填筑的可行性问题,国内外学者已从基本性能、强度及变形特征等方面开展了大量的研究。

刘喜^[12]和姚志雄^[13]通过击实与承载比试验发现建筑垃圾掺量为30%~45%时,再生路基填料的 R_{CBR} 值(加州承载比)最大达46%,作为路基填料再生利用时性能最佳;李丽华等^[14]研究了掺入40%的建筑垃圾填料与砂土混合作为路基填料,混合料经压实形成密实的骨架结构,峰值抗剪强度可达70 kPa,为天然砂的1.5倍;Zhang等^[15]通过三轴试验发现,与黏土路堤相比,再生建筑和拆除废物(C&D)填筑路堤具有更高的回弹模量,用C&D废弃物代替黏土能够提高结构承载力,同时有利于在南方湿热地区使用再生C&D废料,并100%利用再生C&D废料填筑路堤,建设了一条野外高速公路,通过轻型弯沉仪现场评估了再生C&D废料用于公路路堤的可行性,发现级配合理、施工严格的建筑垃圾再生骨料具有比淤泥和黏土路基更好的承载力;Zhang等^[16-18]通过生命周期评价,发现建筑垃圾的循环利用比直接填埋能获得更好的环境和经济效益,还总结分析了国内外路基土动态回弹模量的经典预估模型,通过三轴试验,揭示了路基C&D材料在不同含水量、压实度、偏应力和围压下的永久变形响应,提出了一种

具有合理预测精度的路基填料永久变形预测模型。

建筑垃圾再生料中的砂浆和砖块孔隙大、强度较低,在上覆压力或外界环境等因素作用下易发生颗粒破碎现象,Zhang等^[16,19]在首都环线高速公路的现场试验表明,碾压施工可能导致再生填料出现明显的颗粒破碎现象,使得其级配变化显著。

1.2 焚烧炉渣在路基工程中的综合利用

焚烧炉渣是城市固体垃圾经过焚烧处理后残留的固体废弃物,称为MSWI炉渣。国外对炉渣的资源化利用比较广泛,在德国、法国、荷兰等欧洲国家常用于路基填料^[20-21]。有研究表明:炉渣颗粒为级配良好的粗颗粒土,其摩擦角大于普通粗砂,有机质含量少,与道路建设中使用的天然骨料的矿物组成相似,经过适当的除杂、过滤、级配优化以及养护后可以很好地满足充当路基填料的需求^[22-23]。

Xie等^[23]通过三轴压缩试验研究MSWI炉渣作为路堤填料时的抗剪强度,其最大摩擦角和内聚力分别为 48° 和56 kPa,与粗砂和砾石相比具有更高的抗剪强度和稳定性,认为MSWI炉渣是一种力学性能良好的道路工程材料;Huang等^[24]、Tang等^[25]对MSWI炉渣进行击实、直剪和CBR试验,在最佳含水率16%和最大干密度 1.76 g/cm^3 下观察到MSWI炉渣的最大抗剪 σ 强度,建议将MSWI炉渣压实以用作路基填料,同时利用Abaqus建模分析发现MSWI炉渣可以减轻路基顶部的压应变,有利于大幅度延长沥青路面的使用寿命,减少车辙问题;陈德珍等^[26]发现焚烧炉渣的承载比以及7 d无侧限抗压强度均满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2019)要求,可将其作为浦东国际机场的路基及垫层材料。通过资源消耗对比和生命周期分析发现,铺设 1 m^3 区域的焚烧炉渣路段可以节约54%的天然石料,同时降低近一半大气污染排放量,但焚烧炉渣在使用时重金属浸出较高,需关注路面的排水和防渗问题。

目前中国对垃圾焚烧炉渣应用于高等级公路路基填筑的工程实例较少,可供参考的实际施工经验不多,对焚烧炉渣的工程特性和路用性能缺乏全面研究。

1.3 煤矸石在路基工程中的综合利用

煤矸石是采煤和洗煤过程中排放的固体废物,现存绝大多数煤矸石适用于岩土工程填料,近年来常用于高速公路路基填筑^[27-28]。煤矸石颗粒组成属于粗粒土范畴,其矿物组成一般以硅、铝为主要成

分,其中 SiO_2 和 Al_2O_3 的平均含量分别在50%和25%左右,有机物含量少,性能比较稳定^[29]。

王川等^[30]利用煤矸石协同矿粉制备路基充填材料,综合考虑其流变特性、凝结时间、抗压强度等性能,认为煤矸石掺量为30%~40%时,煤矸石-矿粉结合体性能最好,28 d抗压强度高于P·O 32.5水泥,吸水率小于30%,可作为性能良好的填筑材料;胡雪松等^[31]发现合山市煤矸石级配良好,易于压实,利用FLAC^{3D}软件对该地区煤矸石换填膨胀土对路基的影响进行了数值模拟研究,建议用3.5 m厚煤矸石换填膨胀土路基,可较好缓解路面沉降问题;Yang等^[32]利用有限元法Plaxis对煤矸石路堤模型进行了位移分析,其位移沉降从路基顶部向黏土底面逐渐减小,最大位移约7 mm,满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2019)的要求;耿琳等^[33]通过冻胀试验探究普通填料和掺煤矸石填料的冻胀特性,发现在控制初始含水量的同时进行路基排水处理的情况下,掺入煤矸石的混合填料能有效降低冻胀率,使路基具有较好的抗冻性。

山东省205国道张博段,京福国道曲张段等工程实例与现有研究成果表明:尽管煤矸石存在颗粒级配缺陷与水稳性差的特点,但只要添加适量的细集料,经过充分的压密与土质包边,煤矸石亦能作为长期性能良好的路基填料^[34]。

1.4 其他固废在路基工程中的综合利用

目前路基工程中研究较多且技术比较成熟的还有尾矿、粉煤灰等固废材料。

尾矿被视为选矿作业后无法被利用的低价值产品,是中国工业典型固体废弃物之一。国外对尾矿的应用已进行了大量研究,仅美国就有近20个州先后将尾矿应用于实际道路工程,其中最具代表性的是明尼苏达州^[35-36]。铁尾矿中硅和铝两种元素所占比例较大,矿物组成成分与天然砂石骨料成分相似,因此常利用铁尾矿及尾矿砂填筑路基^[37]。延崇高速公路(河北段)作为2022年冬奥会交通保障体系建设的重点工程,针对当地尾矿资源丰富的特点,利用尾矿解决了路基填筑问题和征地取土破坏环境的难题,是交通运输部第一批绿色公路建设示范工程。

粉煤灰是燃煤电厂排出的主要固体废物,具有高强度、低压缩性、良好的渗透性和水稳定性等工程特性,粉末形态存在有水的环境下可与氢氧化钙等碱性

物质形成水硬性胶凝材料,可作为一种良好的筑路填料^[38-39]。同时粉煤灰由于其自重轻的特点,广泛应用于软土路基填筑,双河公路、唐津高速公路共用粉煤灰400万m³填筑路堤,真正实现了资源化利用。

2 固废中的污染物浸出行为研究

现有的研究主要集中在固废再生骨料用于路基填筑的力学性能测试,而对于固废污染物的释放特性,现场施工及其服役期间是否会对环境造成污染的研究鲜有报道,且没有对污染物的释放进行长期监测,缺乏现场数据,固废利用的环境影响没有引起足够重视。

2.1 固废的毒性浸出方法

浸出毒性是固体废弃物的重要特性之一,也是判别固体废物是否属于危险废弃物的重要评价指标^[40]。目前国内外提出了多种固体废弃物的毒性浸出方法,根据浸提液和应用场景的不同选择合适的浸出方法,能够准确认识各种固废再生骨料中污染物的释放量、释放行为及释放机理,从而精准判断固

废再生利用时是否会对环境造成不良影响。

中国针对固废再生骨料受地表水或地下水浸滤、酸雨淋滤以及填埋场等不同应用场景提供了4种毒性浸出方法。美国环保署提出毒性特征浸出程序(TCLP)模拟城市固体垃圾填埋场降雨时固体废弃物的浸出特性,因其浸提液pH值最低,可用于模拟最不利环境的浸出特征^[41]。由于TCLP仅针对垃圾填埋条件,具有一定局限性^[42],在其基础上提出可用于填埋场以外其他场景的合成沉降浸出程序(SPLP),模拟废弃物在酸雨条件下的浸出风险^[43];荷兰标准协会制定标准NEN 7371(有效性浸出试验)用于确定固废中无机组分主要是重金属的最大浸出可能性,考察严苛条件下的重金属浸出行为^[44];NEN 7375(水槽浸出试验)用于评估由单体建筑和废料释放的污染物造成的长期环境影响^[45];为了得到固废的长期浸出毒性,美国提出多重提取程序(MEP),通过更换浸提剂的方式探究污染物浸出浓度随时间的变化情况^[46]。固废浸出毒性的测试方法见表1。

表1 国内外固废的毒性浸出方法

Table 1 Toxicity leaching methods of Chinese and foreign solid waste

浸出方法	浸提液	应用场景
固体废物 浸出毒性 浸出方法 醋酸缓冲溶液法(HJ/T 300—2007)	冰醋酸溶液	模拟工业废物在进入卫生填埋场后,其中的有害组分在填埋场渗滤液的影响下,从废物中浸出的过程
固体废物 浸出毒性 浸出方法 硫酸硝酸法(HJ/T 299—2007)	质量比为2:1的浓硫酸 与浓硝酸的混合液	固废及其再利用产物以及土壤样品中有机物和无机物的浸出毒性鉴别
水平振荡法 (HJ 557—2010)	去离子水	在受到地表水或地下水浸滤时,固体废物中无机污染物(氰化物、硫化物等不稳定污染物除外)的浸出风险
翻转法 (GB 5086.1—1997)	去离子水或同等 纯度的蒸馏水	固废中无机污染物的浸出毒性鉴别,亦可用于危险废弃物贮存、处置的环境影响评价
TCLP	醋酸缓冲溶液	模拟卫生填埋场在降水时废物的浸出,确定有机物和无机物的迁移性
SPLP	硝酸硫酸溶液	模拟受酸沉降污染下金属深入地下水或地表水的可能性,可用于填埋场以外的其他场景
ASTM-D3987	试剂水	快速得到固体废物的浸出液,特定试验条件下废物中无机组分的迁移性
NEN 7371	去离子水	测定粒状材料和固体废物中的无机组分在极端环境条件下的潜在浸出量
NEN 7375	去离子水	用以评价建筑材料和块状样品在应用场景下无机有害物质的浸出特性
MEP	第1级用醋酸溶液 2~9级用硝酸和硫酸溶液	模拟设计不当的卫生填埋场上固体废弃物在酸雨降水时的长期浸出特性

连续提取法可用于评价固废再生骨料中重金属对环境的长期影响并分析重金属的存在形态。重金属赋存形态是直接影响其溶出行为的重要因素之

一,对其在环境中的释放和迁移起着决定性的作用。常用的连续提取法主要有 Tessier 连续浸提法和 BCR 三级四步提取法。Tessier 法按照重金属元素的

稳定性,将其划分为5种存在形态^[47],但在提取过程中可能存在重吸附和再分配现象,导致提取试验结果不够理想^[48],在此基础上提出BCR法,将重金属形态定义为弱酸提取态、可还原态、可氧化态和残渣态,结果再现性优于 Tessier法^[49]。Tessier法中的可交换态、碳酸盐结合态及BCR法中的弱酸提取态在酸溶液环境中易释放出来,对环境存在较大的潜在危害,而残渣态中的重金属主要包含在固相矿物体内,其活性较低,对环境危害小^[50]。

柱淋滤试验可用于模拟地下水浸泡、酸雨渗透等条件对固废中重金属动态迁移行为的影响,它是在水-岩相互作用的研究中发展起来的固相污染动态分析方法,对试验设备的要求较高且试验持续时间长^[51]。常用的柱淋滤试验有NEN 7373^[52]、升流式动态淋溶法(CEN/TS 14405)^[53]以及欧洲标准土柱淋滤试验(pr EN 14405)^[54],用于评估固废释放污染物的风险。

相关研究表明:采用不同的毒性浸出方法得到的浸出浓度和释放量有较大差异^[55-56]。目前中国浸出毒性研究普遍采用硫酸硝酸法,忽略了砷、六价铬等含氧阴离子的溶解度在中性至弱碱性条件下达到最大的情况^[57],因此在研究固体废物中砷和六价铬等重金属污染特性时,应增加以去离子水为主要浸出液类型的浸出试验。针对不同场景选择合理的浸出方法至关重要。

2.2 固废污染物的浸出行为

采用毒性浸出方法测定典型固废再生骨料中的重金属种类、含量及其形态,分析其在二次利用时对环境的潜在影响。

2.2.1 建筑垃圾中污染物浸出行为

王广西等^[58]和于丹凤^[59]指出建筑垃圾中重金属的污染特征很大程度上取决于建筑垃圾的来源;Butera等^[60]收集多个地区C&D废物样本,均发现重金属Al、As、Ca、Cd、Cr、Cu等的存在,在含砖石的样品中,铬的浸出率较高;赵晓红等^[61]采用野外调查取样的方式对陕西省高速公路西咸环线路基建设中所用的建筑垃圾进行取样,发现砖块、混凝土中重金属Cd、As含量有超标现象,但实际使用中可能只有少量可溶解态滤出,在公路工程中大规模应用是可行的;Del Rey等^[62]采用NEN浸出试验对来自C&D回收厂不同成分的回收骨料样品进行分析,砖和瓦主

要以Cr(Ⅲ)的形式释放Cr。

2.2.2 焚烧炉渣中污染物浸出行为

Sormunen等^[63]采用CEN/TS 14405法对MSWI底灰用于道路基层和底基层的浸出性能进行分析,发现Cr的浸出超过了芬兰的排放边界值;徐斌等^[64]采用水平振荡法对不同地区的焚烧炉渣进行毒性浸出特性分析,发现不同来源的炉渣毒性浸出特性差别较大,其中一种原生炉渣浸出液中Ni超出浸出毒性鉴别标准值;Xie等^[23]采用TCLP法对用作路堤填料的MSWI炉渣进行重金属浸出试验,Pb的浓度超过了Ⅴ类地表水的标准限制值,成为在道路建设中使用炉渣的最大影响因素;何绪文等^[65]分别采用硫酸硝酸法、水平振荡法和醋酸缓冲溶液法制取炉渣的浸出液,结合改进的BCR法分析浸出液中重金属的形态,发现Cd和Cr对环境具有较高的潜在危害,Cu次之。

2.2.3 煤矸石中污染物浸出行为

Li等^[66]指出如果煤矸石使用前未经煅烧和固化处理,在长期使用过程中,重金属成分可能会以各种方式浸出,如与周边环境接触、雨雪淋滤和地下水浸泡等,进而对土壤和地下水造成一定影响;张明亮等^[67]通过浸出试验发现煤矸石浸出液中Cu、Zn、Pb等重金属浓度均低于危险废物鉴别标准,BCR法分析发现重金属主要以残渣态存在,稳定性较好;Tang等^[68]研究了典型矿区煤矸石复垦土壤中重金属的污染性,连续提取结果表明,Mn主要以可还原态存在,对当地生态环境具有中等风险。并指出长期水岩作用可能导致重金属的迁移和转化,煤矸石的淋溶效应和风化迁移作用是重金属元素进入生态环境的两种主要途径。

2.3 固体废弃物中污染浸出的影响因素

固废中重金属的浸出特性受到多种因素的影响,本文主要分析了pH值、液固比和粒径大小因素的影响特性。

2.3.1 pH值

固废中重金属的释放浓度很大程度上取决于体系的pH值,pH值影响金属离子在固废表面的吸附性以及溶解平衡,进而影响其迁移活性。陈宇云等^[69]对拟用于公路工程的建筑垃圾重金属进行检测,通过浸泡振荡模拟试验测定不同pH值条件下Cd和As的含量,研究表明pH值越小,污染物的释放浓度越

大;Galvin等^[70-71]采用NEN 7371法研究了不同pH值时C&D中污染物的释放特性并评估了其对环境的影响,Zn、Cu、Ni、Pb和Cd等金属离子在pH=4时比pH=7时释放量更高,但建筑固废属于惰性材料,重金属的释放对环境的影响很小;于丹凤等^[72]发现相比于纯水淋滤,强酸性酸雨能够在较短时间内加快建筑垃圾中重金属的浸出及迁移,pH值变化对金属Cr的影响最大,浸出质量浓度如图1所示,且浸出总量随着时间的延长呈递增趋势;周新华等^[73]通过静态浸泡和动态淋滤试验,研究了不同pH值条件下煤矸石中重金属元素的释放规律,环境pH值由7降低至2时,Mn、Cu离子的释放率分别提升40%、38%,认为pH值越低重金属离子的释放量与释放率越高。

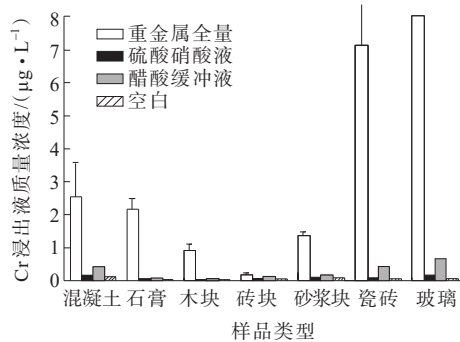


图1 不同建筑垃圾中重金属浸出质量浓度^[72]

Figure 1 Leaching pollutant concentration of heavy metals in different construction waste^[72]

2.3.2 液固比

液固比(L/S)是指在一段时间内浸提剂体积与固废再生骨料的质量之比。固废再生骨料用于路基填筑时,在路面损坏等特殊条件下,固体废弃物与雨水、地下水接触,污染物随之释放,对周围环境造成潜在危害,因此液固比对固废中污染物的释放有较大影响。Galvin等^[70]通过浸出试验发现建筑垃圾中重金属的浓度随L/S的增加而增加;张思思等^[74]发现随着液固比的增加,尾矿中Cd、Zn浸出率呈迅速增加的趋势,当液固比大于80 L/g后,受重金属残渣态存在形式的限制,此后浸出率基本维持不变(图2);Ecke等^[75]研究发现道路施工时使用的炉渣中金属质量浓度会随着L/S的增加而增加,然而当L/S超过60 L/g时,重金属的浸出达到平衡,质量浓度基本不变。

2.3.3 颗粒粒径

粒径越小的粒子比表面积越大,固体材料与浸出液的接触面积变大,导致浸出液与可浸出成分之

间的接触增加^[76]。Wang等^[77]利用静态和动态吸附试验说明建筑垃圾的颗粒大小对重金属的吸附量有很大影响,粒径越小,对重金属的吸附量越好;闫莎莎等^[78]发现煤矸石粒径大小对初始溶出浓度的影响规律基本一致,如图3所示,表现为粒径<8.0 cm时,Al、Fe、Mg等重金属的初始溶出质量浓度随着粒径的增大显著减小;粒径>8.0 cm时,各元素的初始溶出质量浓度随粒径的改变变化不大;魏芳等^[79]发现不同粒径的水泥在酸雨淋滤下重金属浸出量呈细粒径>粗粒径>块粒径的变化趋势。

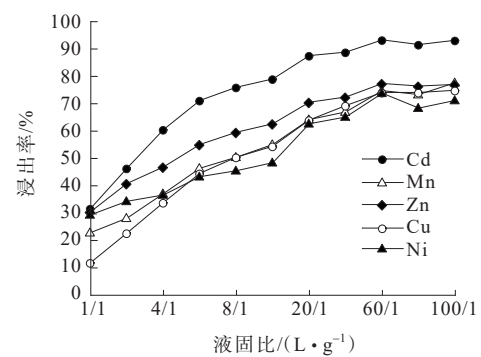


图2 液固比对重金属浸出率的影响^[74]

Figure 2 Effect of liquid-solid ratio on leaching of heavy metals^[74]

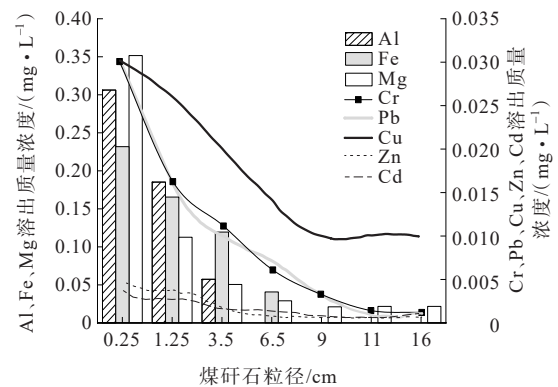


图3 重金属初始溶出质量浓度与粒径变化曲线^[78]

Figure 3 Variation of initial dissolved mass concentration of heavy metals and particle size^[78]

此外,固废中重金属的释放还与浸出时间、温度、冻融循环等环境因素息息相关。大多数重金属元素的浸出质量浓度随温度升高而增加,重金属释放属于吸热过程,温度升高会增加部分重金属元素的迁移活性,进而促进重金属的释放^[80]。冻融循环使介质空隙变大、损伤固废再生骨料结构使其变得松散,降低了对重金属的固持能力,故而增加了重金

属释放的环境风险^[81]。

3 固废污染物的迁移研究

固废污染物迁移特性的量化评价主要分为室内试验和数值模拟两种方式,目前大部分研究针对固废堆积以及填埋场重金属的释放迁移,场景较为单一,针对固体废弃物用于路基填筑时在降雨环境下污染物的迁移特性研究较少。

3.1 室内试验

室内模拟试验主要通过土柱淋滤试验探究污染物的运移情况。王念秦等^[82]进行煤矸石动态淋滤试验研究,发现Cr质量浓度随时间变化分为“快降—缓降(或趋稳波动)”两个阶段,可溶元素的释放呈指数衰减,可利用此规律预测煤矸石中污染物对土壤和地下水污染的强度;邓仁健等^[83]通过土柱试验发现随着淋溶量的增加,煤矸石路堤中污染物溶解释放的质量浓度越来越小,认为煤矸石作为路堤填料使用时会对公路沿线地下水和地表水带来一定的环境污染,并采用最小二乘法拟合得出污染因子在降水量为V时的释放总量W为:

$$W = \frac{C_0}{n} (1 - e^{-nV}) \quad (1)$$

式中:V为淋溶量(或降雨量)(mL); C_0 为淋溶系数; n 为指数。

3.2 数值模拟

3.2.1 多孔介质溶质迁移理论

固废污染物迁移规律对研究固废在实际工程应用过程中的环境影响极为关键。调研国内外文献发现对道路工程应用中固废污染物迁移机制的研究较少,目前主要借鉴多孔介质的溶质迁移理论开展研究。

污染物的释放和迁移涉及溶质在多孔介质中的传输,与应力场、浓度场、渗流场、化学场等多场之间的耦合作用密切相关^[84]。地下水受到污染的问题,其实质是污染物在含水介质中运移的结果,溶质的运移主要通过对流、分子扩散、机械弥散、吸附等过程实现^[85],迁移理论示意图如图4所示^[86]。对流弥散方程(CDE)用于描述稳态流条件下,考虑对流、弥散和吸附作用时溶质的迁移。所建方程能较好地描述物质在多孔介质中的迁移变化,是研究污染物迁移模型的经典方程^[87]。

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - u \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

式中: R 为阻滞因子; D 为水动力弥散系数; u 为孔隙水平平均流速; C 为溶质浓度; x 为垂向坐标; t 为时间。

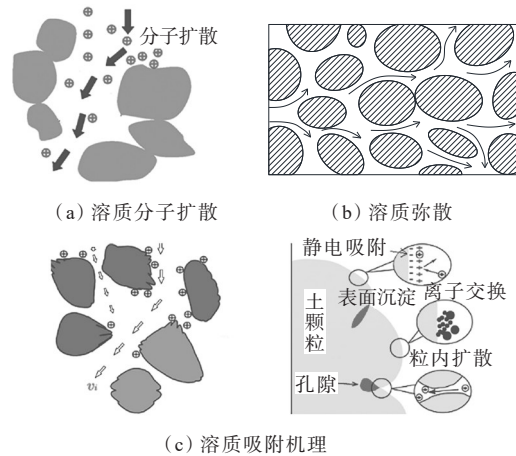


图4 溶质迁移理论示意图^[86]

Figure 4 Solute transport theory^[86]

在此方程的基础上结合边界条件及初始值,求解污染物运移的结果,还可以准确地反映污染物的运移过程。式(2)中弥散系数是表征在一定的流速条件下,污染物在多孔介质中弥散能力的参数,在多孔介质的溶质运移过程中起决定性作用^[88]。有学者通过土柱试验研究发现弥散系数与介质的孔隙特征、渗流速度和溶质迁移距离有关,随渗流速度和迁移距离的增大而增大,在颗粒大的介质中增加更明显^[89-90]。同时引入数值方法来计算溶质迁移也是一种有效的手段,主要包括有限差分法、有限元法、运算矩阵法、无网格法、特征差分法等^[91]。

3.2.2 污染物迁移的数值模拟研究

现阶段,已有许多成熟的计算机软件应用于模拟地下水中溶质的运移,主要有COMSOL Multiphysics、HYDRUS-1D、MODFLOW、CXTFIT等。固废中污染物的扩散、迁移时间都相对较长,试验室的条件往往不足以模拟完整的污染物运移释放情况,借助计算机软件,根据室内试验得到的参数与实际边界条件相结合,可以很好地模拟污染物长期运移过程,有效弥补传统试验条件的不足。

Boddula等^[92]运用二阶动力学模型模拟了100年内C&D废物用作道路基层时 Cr^{6+} 的运移情况,指出其最远的迁移距离可至路基顶面2m的深度范围;Engelsen等^[93]研究道路底基层中使用的再生混凝土骨料(RCA)在暴露超过10年后出现的金属浸出情况,将长期浸出数据结合建模软件LeachXS构建热

力学模型,结果表明释放的微量元素数量没有超过预先规定的地下水及淡水的接受标准;Beyer等^[94]通过数值模型评估了城市固体废物焚烧灰、炉渣和建筑垃圾对地下水的污染浸出影响,发现污染物浸出行为存在较大差异,归因于材料本身对污染物的吸附强度不同,通过有限元模型分析发现渗流量表现出明显的空间变化,路堤以下的流速较低,重金属的渗透集中在流速高的外基底附近;Li等^[95]发现煤矸石中重金属离子随着浸出时间的增加,释放速率逐渐降低,并利用COMSOL Multiphysics软件模拟了 Cu^{2+} 在不同土壤中的浓度分布和迁移规律,结果表明 Cu^{2+} 的浓度随深度增加而降低,达西流速等值线呈放射状分布,不同土壤介质中 Cu^{2+} 的扩散距离和速度梯度依次为黏土>粉质黏土>黄土>砂土;冉德钦等^[96]依据溶质运移理论建立煤矸石路堤下土壤水分运移的数学模型,对煤矸石路基中Hg在大气降雨淋溶作用下的迁移、扩散进行了模拟计算,表明18年后Hg的质量浓度将超过生活饮用水卫生标准;Shi等^[97]以矿区土壤为研究对象,基于HYDRUS-1D软件结合空间插值法模拟预测重金属Mn通过雨水径流渗入土壤中的运移过程,发现从第200天开始,13 m深度的地下水中重金属含量超过了地下水环境质量标准。

4 固废污染物防控处理研究

固体废弃物不同程度地含有有毒、有害污染物,在上覆压力、降雨入渗、地下水浸泡以及其他作用下产生渗滤液,随着压力、对流、扩散、机械弥散、吸附等因素的影响,渗滤液容易渗漏到周边土体中,造成地下水和土壤的污染,制约自然环境的可持续发展,因此需要对固体废弃物进行污染防控处理,减少再生利用时对环境造成的破坏。下文对应用较广的固化/稳定化技术、屏障隔离技术、萃取技术以及生物技术进行叙述。

4.1 固化/稳定化技术

固化/稳定化(S/S)处理技术效率高、成本低,近年来在国内得到了大范围应用和研究。固化处理通过减小固废的孔隙率,降低渗透性并阻断重金属的浸出通道,将有害固体废物固定在惰性固化基材中,从而降低重金属迁移。稳定化处理通过改变重金属化合物结构形态和物理性质,将固废中富集的重金属转

变成低毒性、低迁移及难溶性物质^[98]。常见的固化材料有水泥、粉煤灰、地聚物、硫等。

4.1.1 水泥

采用普通硅酸盐水泥作为固化剂,是目前最常用的处理固废再生骨料的固化/稳定化技术。其机理表现为水泥水化过程中,重金属通过吸附、离子交换、价键配位等方式与水化产物发生反应,重金属最终以金属氢氧化物或络合物的形式包裹在水合硅酸盐胶体的表面^[99-100]。崔素萍等^[101]发现水泥熟料矿物可以固化危险工业废弃物中绝大部分重金属元素,并分析了各重金属元素在熟料中的大致分布。但单一水泥处理所需水泥添加量大,处理后固化体增容明显, CO_2 释放大,固化体的耐久性和长期稳定性存在诸多问题^[102]。

近年来,相关研究开始关注水泥与其他添加剂的联合使用。例如矿渣的使用有利于在水泥水化过程中产生不溶性凝胶,从而减少pH值的增加,同时增强处理后固化体的强度和稳定性^[103]。陈灿等^[104]对铅锌废渣进行固化/稳定化处理,添加4%的生石灰作为稳定剂,粉煤灰与水泥质量之比为1:9时处理效果最佳,Tessier连续提取法分析发现废渣中Pb、Zn都以残渣态和结合态为主,废渣经固化/稳定化处理后形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、水化硅酸钙凝胶及钙矾石等物质将重金属离子包裹起来,形成稳定的重金属固化体;Tang等^[105]通过TCLP发现加入9%螯合剂和40%的水泥,固化后飞灰中的Cd与Pb的质量浓度从16.40 mg/L、15.50 mg/L分别下降到0.02 mg/L、0.03 mg/L,由此说明水泥和螯合剂的联合使用对飞灰的固化稳定具有较好的效果,同时有限元分析表明,将处理后的飞灰层放置于基层与路基之间,有利于延长沥青路面的疲劳寿命,减少冻融引起的沥青路面车辙问题。

4.1.2 地聚物

地聚物是一种新型绿色胶凝材料,可通过碱激发过程,生成三维网络状的类沸石笼形立体结构,对多种有毒重金属离子均可以物理固封、化学键合和吸附作用的形式固化,具有结构强度高、抗酸碱盐侵蚀、耐久性好、无污染等优点。按照组分的不同可以分为以偏高岭土和粉煤灰为代表的碱系地聚合物以及以矿渣为代表的碱土系地聚合物两种类型^[106-108]。

仇秀梅等^[109]采用粉煤灰地聚合物固化重金属

Pb²⁺,水平振荡法、硫酸硝酸法、醋酸缓冲溶液法分别模拟Pb固化体在不同场景下Pb²⁺的浸出毒性。试验结果表明:Pb²⁺浸出浓度在养护14 d后明显减小,固化率可达99%以上,效果优于水泥基材,且固化体具有一定的耐高温性能;Wang等^[108]利用粉煤灰制备地聚物,水平振荡法浸出后发现对Pb²⁺的固化效果最好,其次是Cd²⁺、Cr³⁺和Mn²⁺,固化率均达到了99%以上,并通过试点试验说明粉煤灰制备地聚物用于固化重金属在工业生产中的应用的可行性;王维等^[110]利用磷石膏和铜尾渣的耦合作用,以氢氧化钠为激发剂对混合固废进行固化/稳定化处理,硫酸硝酸法进行浸出后,发现重金属Zn、Pb等的浸出质量浓度均能满足污水综合排放标准要求,制得的固结体中迁移性有害物质通过生成沉淀物和胶凝包裹吸附作用被固定;郑娟荣等^[111]对碱激发胶凝材料与硅酸盐水泥体系固化Pb²⁺的效果进行了对比,结果显示与水泥相比,偏高岭土固化体能显著降低Pb²⁺浸出质量浓度,且在短时间内达到稳定。

4.2 屏障隔离技术

防污隔离屏障是用于防止水、空气及污染物扩散的土工结构,根据其布置形式及应用功能分为水平屏障、竖向屏障及覆盖屏障。水平和竖向屏障指采用具有良好防渗和抗污染性能的材料或特殊结构将污染物围封,达到防止污染物扩散的效果;覆盖屏障可控制表层渗滤和降雨入渗作用下的污染物迁移^[112]。英国等欧洲国家主要采用水泥-膨润土系竖向隔离墙,土-膨润土隔离体系在中国具有良好的应用前景。

刘睿等^[113]通过土柱渗透试验探究砂土-膨润土系竖向隔离屏障(S-B隔离屏障)对重金属Pb的阻滞规律,阻滞因子均随溶质浓度的增大呈减小趋势,并逐渐趋于稳定,表明S-B隔离屏障对典型重金属离子的运移具有一定的阻滞能力;Wu等^[114]提出采用MgO活化矿渣-膨润土混合物(MBS)在隔离屏障中的使用,掺入10%~25%的MBS可确保重金属铅-锌复合污染作用下固废的渗透系数小于 1×10^{-8} m/s;龚亚龙等^[115]采用屏障防渗技术防止雨水渗入尾矿,减少重金属的溶出,同时对表层尾砂进行稳定化处理,降低了尾砂和废渣的浸出毒性,并通过工程实例验证了该技术的可行性。

4.3 萃取技术

重金属萃取法是利用溶质在不同溶剂中溶解度

的不同,采用特定溶剂来萃取重金属的技术,可大幅降低固废再生骨料中的重金属浸出风险,同时回收重金属,为重金属的资源化利用提供了条件。萃取法经历了无机酸(HNO₃、HCl、H₂SO₄)、无机盐(FeCl₃、CaCl₂、NaNO₃)、有机酸(柠檬酸、草酸、乙酸)、螯合剂(EDTA、EDDS、PESA、GLDA等)、生物表面活性剂(胆酸钠、鼠李糖脂、茶皂素等)的发展历程^[116]。陆建平等^[117-118]研究证明30 mg/mL聚环氧琥珀酸(PESA)对污泥中Hg的萃取率达到63%,当萃取体系的pH值为2,PESA质量浓度在50 mg/mL以上时,废渣中Mn的萃取率可达80%以上,且PESA是一种环境友好型水溶性聚合物;Weibel等^[119]使用5%的盐酸和300 g/L的氯化钠溶液作为萃取剂,经过氧化还原反应和金属-氯化物的形成,飞灰中重金属Pb、Cd的萃取率超过90%,Cu、Zn的萃取率稍低(70%~80%)。

超临界流体萃取技术是在超临界状态下,随外界温度和压力的变化,使溶质溶解度增加,从而较轻易分离部分物质的新型萃取技术^[120]。Ghoreishi等^[121]采用超临界CO₂萃取法从固体废物基体中萃取重金属,指出萃取剂种类、时间及压力是影响有毒重金属离子萃取率的主要因素,锆、铀和镅的最大回收率分别达到100.0%、99.1%和100.0%;花莉等^[122]以去除铅锌尾矿中高迁移性重金属为目标,采用二乙基二硫代氨基甲酸钠(DDTC)为络合剂,利用超临界CO₂萃取技术处理铅锌尾矿,并获得不同重金属的最佳萃取条件,其中Pb的处理效果最佳,萃取效果主要与重金属在铅锌尾矿中的存在形态有关。

4.4 生物技术

微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)技术主要通过共沉淀或置换作用达到固定重金属的目的,重金属离子可进入MICP反应形成的方解石晶格中,有效降低重金属向周围环境迁移的可能性,对常见的重金属污染元素有较好的固定转化率^[123-125],如图5所示^[125]。邱钰峰等^[126]开展了MICP技术处理垃圾焚烧飞灰试验,发现经处理后重金属元素Cd、Cr、Pb、Zn、Cu的浸出浓度大幅度降低,满足地表水环境质量标准Ⅲ类要求。在此基础上,利用有限元软件Abaqus分析在路面碎石基层与路基之间设置固化飞灰层,判断是否可有效降低沥青路面底部拉应变,减轻车辙损伤,延长疲劳寿命;Achal等^[127]通过柱淋滤试验发现经

MICP处理后,铬渣中的 Cr^{6+} 浓度显著降低,168 h后几乎完全消失,生成的碳酸钙沉淀会堵塞铬渣周围的孔隙,形成不渗透性的屏障,从而能够抵抗降雨的侵蚀;许朝阳等^[128]发现污染土经MICP技术处理

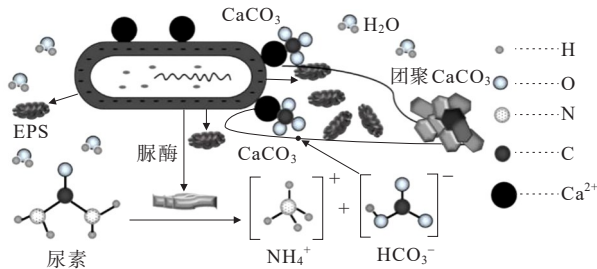


图5 微生物诱导碳酸盐成矿的过程^[125]

Figure 5 Process of microbial-induced carbonate mineralization^[125]

后,铜、铅可交换态含量降低了70%~90%,通过XRD分析,沉积物通过表面沉积和吸附作用共同实现对 Pb^{2+} 的固定。

综上所述固体废弃物中污染物防控处置技术的原理、优缺点见表2。对于重金属含量较高的固废再生骨料,单一水泥处理难以达到标准,且水泥处理碳排放量较大,不利于双碳目标的实现。现有研究大多集中在水泥与其他添加剂的联合使用或开发新型固化基材。屏障隔离技术大多应用于固废填埋场中污染地块的长期隔离。相比于萃取技术和生物技术对设备及技术要求高,工艺成本较大,地聚物作为新型绿色胶凝材料,具有强度高、抗酸碱盐侵蚀、耐久性好、无污染等优点,在有害金属固化方面具有良好的应用前景。

表2 国内外主要固体废弃物中污染物防控处理技术及优缺点

Table 2 Prevention and control treatment technologies for Chinese and foreign major solid waste and their advantages and disadvantages

处置方法	原理	优点	缺点
固定/稳定化技术	通过沉淀、吸附、有机络合和氧化还原等作用改变重金属形态	处理效率高,成本低,工艺成熟,固化产物强度高	单一水泥处理时所需添加量大,处理后固化体增容明显, CO_2 释放大;固化体易受酸性介质侵蚀
屏障隔离技术	防止表层渗滤和雨雪入渗造成的污染物浸出	工艺成熟简单,有利于污染物的长期隔离	对地形要求较高,丘陵地带应用较少;无法从源头解决污染问题
萃取技术	通过物理、化学反应,改变重金属的溶解性,将重金属转移至萃取液中	回收重金属,实现其资源化利用	成本较高;无机酸不可生物降解;难以实现多种重金属复合污染的同时萃取
生物技术	用微生物将游离态重金属转化为沉淀矿物	生产能耗低,对原位环境的影响很小	MICP多生成 CaCO_3 ,易受到酸雨的侵蚀,长期耐久性不足;细菌培养的经济成本和时间成本较高

5 结论与展望

总结梳理了固体废弃物在路基工程中的综合利用以及污染特性领域的相关研究成果,得出如下结论:

(1) 大量的室内试验与实际工程应用表明,建筑垃圾、焚烧炉渣、煤矸石等典型固体废弃物可以替代部分天然骨料作为路基填料,不仅能有效缓解开山采石导致的环境破坏问题,还可以促进交通基础设施建设向资源节约、环境友好和绿色可持续发展转型,助力“双碳”战略。但是建筑垃圾易产生颗粒破碎、煤矸石水稳定性较差等问题,在实际工程应用中仍须重点关注。

(2) 当前国内外都提出了多种固体废弃物的毒

性浸出方法,每种方法的适用场景不甚相同且不同方法得到的浸出结果有较大差异。重金属的释放与pH值、液固比、粒径大小等因素相关,如何选择合适的浸出方法,正确掌握实际应用场景下固废中重金属的释放过程以及酸雨、冻融等实际复杂多变环境影响下长期累积释放量均有待进一步深入研究。

(3) 固体废弃物在雨雪入渗、地下水浸泡等条件下产生的渗滤液在对流、弥散、吸附等作用下产生迁移,采用室内试验与数值模拟方法对污染物的迁移进行研究,可以预测固废渗滤液中的重金属对土壤和地下水的污染强度,从而判断是否会产生更深层次的污染。目前固废在路基中的迁移未引起广泛重视,迁移机理尚不明确。

(4) 对于污染物防控处理方面,将常用的处置方

法进行总结对比。传统水泥基处置技术存在碳排放量大、固化体的耐久性和长期稳定性较差等问题。以地聚合物为代表的新型处理技术在污染物处置方面取得了很大进展。固废中重金属离子种类较多、形态复杂,实际工程应综合考虑施工效率、成本等因素,选取恰当的技术对固废中的污染物进行有效处理,以推动固体废弃物在路基工程中更加安全有效再生应用。

参考文献:

References:

- [1] 姜玲玲,丁爽,刘丽丽,等.“无废城市”建设与碳减排协同推进研究[J].环境保护,2022,50(11):39-43.
JIANG Lingling,DING Shuang,LIU Lili,et al.Study on the cooperative promotion of “No waste cities” construction and carbon emission reduction[J].Environmental Protection, 2022,50(11):39-43.
- [2] 杜祥琬.固废资源化利用是高质量发展的要素[J].人民论坛,2022(9):6-8.
DU Xiangwan.Solid waste resource utilization is the key factor of high quality development[J].People's Tribune, 2022(9):6-8.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》[J].黄金科学技术,2021,29(2):286.
National Development and Reform Commission.Guiding opinions on comprehensive utilization of bulk solid wastes in “the 14th five-year” plan[J].Gold Science and Technology,2021,29(2):286.
- [4] 王兆龙,姚沛帆,张西华,等.典型大宗工业固体废物产生现状分析及产生量预测[J].环境工程学报,2022,16(3):746-751.
WANG Zhaolong, YAO Peifan, ZHANG Xihua, et al. Current situation analysis and production forecast of typical bulk industrial solid wastes in China[J].Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(3): 746-751.
- [5] 李行,吴超凡,万暑,等.建筑垃圾在路基回填料中的使用性能研究[J].中外公路,2019,39(1):253-256.
LI Hang, WU Chaofan, WAN Shu, et al. Study on performance of construction waste in roadbed backfill materials[J].Journal of China & Foreign Highway,2019,39(1):253-256.
- [6] ISHCENKO V. Heavy metals in municipal waste: The content and leaching ability by waste fraction[J]. Journal of Environmental Science and Health Part A, Toxic/ Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2019,54(14):1448-1456.
- [7] HUA C Y,ZHOU G Z,YIN X,et al.Assessment of heavy metal in coal gangue: Distribution, leaching characteristic and potential ecological risk[J]. Environmental Science and Pollution Research,2018,25(32):32321-32331.
- [8] 冯新军,赵梦龙,李猛,等.煤矸石粉与传统填料沥青混凝土力学性能和环境影响的对比研究[J].中外公路,2017,37(5):251-256.
FENG Xinjun,ZHAO Menglong,LI Meng,et al.Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: Mix mechanical properties and environmental impacts[J]. Journal of China & Foreign Highway,2017,37(5):251-256.
- [9] TANG Q, GU F, GAO Y F, et al. Desorption characteristics of Cr(Ⅲ), Mn(Ⅱ), and Ni(Ⅱ) in contaminated soil using citric acid and citric acid-containing wastewater[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(1): 50-64.
- [10] QIANG T, HEEJONG K, KAZUTO E, et al. Size effect on lysimeter test evaluating the properties of construction and demolition waste leachate[J]. Soils and Foundations, 2015, 55(4): 720-736.
- [11] 上海市环境工程设计科学研究院有限公司,中国城市环境卫生协会建筑垃圾管理与资源化工作委员会.建筑垃圾垃圾处理技术标准:CJJ/T 134—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
Shanghai Institute for Design & Research on Environmental Engineering Co., Ltd., China Association of Urban Environmental Committee of Construction Waste Management and Recycling. Technical standard for construction and demolition waste treatment: CJJ/T 134—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [12] 刘喜.建筑垃圾在公路路基中的再生应用研究[J].公路工程,2019,44(4):208-212.
LIU Xi. Research on the application of construction waste regeneration in highway subgrade[J]. Highway Engineering, 2019, 44(4): 208-212.
- [13] 姚志雄.建筑渣土填料路用性能的试验研究[J].工业建筑,2010,40(增刊1):773-777.
YAO Zhixiong. Experimental study on pavement performance of building debris as subgrade backfill[J]. Industrial Construction, 2010, 40(sup 1): 773-777.

- [14] 李丽华,文贝,胡智,等. 建筑垃圾填料与土工合成材料加筋剪切性能研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2019,52(4):311-316.
LI Lihua, WEN Bei, HU Zhi, et al. Study on reinforced shear behavior of construction waste filler and geosynthetics[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019,52(4):311-316.
- [15] ZHANG J H, GU F, ZHANG Y Q. Use of building-related construction and demolition wastes in highway embankment: Laboratory and field evaluations[J]. Journal of Cleaner Production, 2019,230:1051-1060.
- [16] ZHANG J H, DING L, LI F, et al. Recycled aggregates from construction and demolition wastes as alternative filling materials for highway subgrades in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,255:120223.
- [17] ZHANG J H, ZHANG A S, LI J, et al. Gray correlation analysis and prediction on permanent deformation of subgrade filled with construction and demolition materials [J]. Materials, 2019,12(18):3035.
- [18] 张军辉,彭俊辉,郑健龙. 路基土动态回弹模量预估进展与展望[J]. 中国公路学报, 2020,33(1):1-13.
ZHANG Junhui, PENG Junhui, ZHENG Jianlong. Progress and prospect of the prediction model of the resilient modulus of subgrade soils[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020,33(1):1-13.
- [19] 张军辉,丁乐,张安顺. 建筑垃圾再生料在路基工程中的应用综述[J]. 中国公路学报, 2021,34(10):135-154.
ZHANG Junhui, DING Le, ZHANG Anshun. Application of recycled aggregates from construction and demolition waste in subgrade engineering: A review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021,34(10):135-154.
- [20] GAO X, YUAN B, YU Q L, et al. Characterization and application of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash and waste granite powder in alkali activated slag[J]. Journal of Cleaner Production, 2017,164:410-419.
- [21] OEHMIG W N, ROESSLER J G, BLAIS I N I, et al. Contemporary practices and findings essential to the development of effective MSWI ash reuse policy in the United States[J]. Environmental Science & Policy, 2015,51:304-312.
- [22] 白宇帆,徐永福. 垃圾焚烧炉渣物理化学及力学特性研究[J]. 公路, 2021,66(11):318-322.
BAI Yufan, XU Yongfu. Study on physical, chemical and mechanical properties of municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash[J]. Highway, 2021,66(11):318-322.
- [23] XIE R F, XU Y F, HUANG M, et al. Assessment of municipal solid waste incineration bottom ash as a potential road material[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017,18(4):992-998.
- [24] HUANG Y C, CHEN J, SHI S J, et al. Mechanical properties of municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash as alternatives of subgrade materials[J]. Advances in Civil Engineering, 2020,2020:1-11.
- [25] TANG Q, GU F, CHEN H, et al. Mechanical evaluation of bottom ash from municipal solid waste incineration used in roadbase[J]. Advances in Civil Engineering, 2018,2018:1-11.
- [26] 陈德珍,耿翠洁,孙文州,等. 焚烧炉渣集料用于道路铺筑的节能减排定量[J]. 建筑材料学报, 2011,14(1):71-77.
CHEN Dezhen, GENG Cuijie, SUN Wenzhou, et al. Energy saving and pollution alleviation by replacement of crushed rock with municipal solid waste incineration bottom ash for road construction[J]. Journal of Building Materials, 2011,14(1):71-77.
- [27] LI Z X, GUO T T, CHEN Y Z, et al. Road performance analysis of cement stabilized coal gangue mixture[J]. Materials Research Express, 2021,8(12):125502.
- [28] 陈仁朋,王鹏飞,刘鹏,等. 路基煤矸石填料土-水特征曲线试验研究[J]. 岩土力学, 2020,41(2):372-378.
CHEN Renpeng, WANG Pengfei, LIU Peng, et al. Experimental study on soil-water characteristic curves of subgrade coal gangue filler[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020,41(2):372-378.
- [29] 程红光. 煤矸石在公路工程中的应用研究[D]. 西安:长安大学, 2009.
CHENG Hongguang. Study on the applied research of coal gangue in subgrade[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [30] 王川,刘超,裴文晶,等. 活化煤矸石制备路基充填材料的探讨[J]. 材料科学与工程学报, 2022,40(1):97-103.
WANG Chuan, LIU Chao, PEI Wenjing, et al. Discussion on the preparation of roadbed filling material with activated coal gangue[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2022,40(1):97-103.
- [31] 胡雪松,唐朝晖,万佳文,等. 煤矸石换填膨胀土路基的沉降研究[J]. 地质科技情报, 2017,36(6):261-266.
HU Xuesong, TANG Zhaohui, WAN Jiawen, et al. Replacing expansive soil with coal gangue in subgrade settlement[J]. Geological Science and Technology Information, 2017,36(6):261-266.
- [32] YANG X Y, ZHANG Y, LI Z H. Embankment displacement

- PLAXIS simulation and microstructural behavior of treated-coal gangue[J]. *Minerals*,2020,10(3):218.
- [33] 耿琳,唐浩,罗军,等.掺煤矸石高速铁路路基填料冻胀特性试验研究[J]. *铁道建筑*,2019,59(2):41-45,49.
- GENG Lin,TANG Hao,LUO Jun,et al.Experimental study on frost-heaving characteristics of high speed railway subgrade fillers mixed with coal gangue[J]. *Railway Engineering*,2019,59(2):41-45,49.
- [34] 邱钰,繆林昌,刘松玉.煤矸石在道路建设中的应用研究现状及实例[J]. *公路交通科技*,2002,19(2):1-5.
- QIU Yu,MIAO Linchang,LIU Songyu.Application study and practice of coal gangue applied in road construction [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*,2002,19(2):1-5.
- [35] 王彪,肖泽天,孙国鹏.高速公路尾矿渣填筑路基施工技术[J]. *施工技术*,2016,45(24):75-78.
- WANG Biao,XIAO Zetian,SUN Guopeng.Construction of tailings filling roadbed of expressway[J]. *Construction Technology*,2016,45(24):75-78.
- [36] DE CASTRO BASTOS L A,SILVA G C,MENDES J C,et al. Using iron ore tailings from tailing dams as road material[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*,2016, 28(10):0001613.
- [37] 路畅,陈洪运,傅梁杰,等.铁尾矿制备新型建筑材料的国内外进展[J]. *材料导报*,2021,35(5):5011-5026.
- LU Chang,CHEN Hongyun,FU Liangjie,et al. Research progress on the preparation of new building materials using iron tailings[J]. *Materials Reports*,2021,35(5):5011-5026.
- [38] MALLICK S,MISHRA M. Geotechnical characterization of clinker-stabilized fly ash - coal mine overburden mixes for subbase of mine haul road[J]. *Coal Combustion and Gasification Products*,2013,5(1):51-56.
- [39] 王海成,金娇,刘帅,等.环境友好型绿色道路研究进展与展望[J]. *中南大学学报(自然科学版)*,2021,52(7):2137-2169.
- WANG Haicheng,JIN Jiao,LIU Shuai,et al. Research progress and prospect of environment-friendly green road [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*,2021,52(7):2137-2169.
- [40] 王炳华,赵明.固体废弃物浸出毒性特性及美国EPA的实验室测定(待续)[J]. *干旱环境监测*,2001,15(4):224-230,233.
- WANG Binghua,ZHAO Ming. Infusion toxicity of soil waste and its experimental determination of americal EPA (continuing) [J]. *Arid Environmental Monitoring*,2001, 15(4):224-230,233.
- [41] INTRAKAMHAENG V,CLAVIER K A,ROESSLER J G, et al. Limitations of the toxicity characteristic leaching procedure for providing a conservative estimate of landfilled municipal solid waste incineration ash leaching [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2019,69(5):623-632.
- [42] TIWARI M K,BAJPAI S,DEWANGAN U K, et al. Suitability of leaching test methods for fly ash and slag: A review[J]. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*,2015,8(4):523-537.
- [43] CAO X D,DERMATAS D. Evaluating the applicability of regulatory leaching tests for assessing lead leachability in contaminated shooting range soils[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*,2008,139(1):1-13.
- [44] ZHANG D D,FANG S P,ZHANG H Z,et al. Utilization of spent FCC catalyst as fine aggregate in non-sintered brick: Alkali activation and environmental risk assessment[J]. *Frontiers in Chemistry*,2021,9:674271.
- [45] DRINČIĆ A,NIKOLIĆ I,ZULIANI T, et al. Long-term environmental impacts of building composites containing waste materials: Evaluation of the leaching protocols[J]. *Waste Management*,2017,59:340-349.
- [46] ESAKKU S,KARTHIKEYAN O P,JOSEPH K,et al. Heavy metal fractionation and leachability studies on fresh and partially decomposed municipal solid waste[J]. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*,2008,12(2):127-132.
- [47] 韦江雄,白瑞英,余其俊,等.水泥硬化体中Cr的形态及分布:改进的 Tessier 连续浸提法[J]. *硅酸盐学报*,2010,38(7):1167-1172.
- WEI Jiangxiong,BAI Ruiying,YU Qijun,et al. Speciation and distribution of Cr in hardened cement paste— modified tessier sequential extraction procedure[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*,2010,38(7):1167-1172.
- [48] DAVIDSON C M,FERREIRA P C S,URE A M. Some sources of variability in application of the three-stage sequential extraction procedure recommended by BCR to industrially-contaminated soil[J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*,1999,363(5):446-451.
- [49] DONG H C,FENG L,QIN Y,et al. Comparison of different sequential extraction procedures for mercury fractionation in polluted soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research*,2019,26(10):9955-9965.
- [50] 高焕方,曹园城,何炉杰,等. Tessier 法和 BCR 法对比磷酸

- 二氢钠处置含铅污染土壤形态分析[J]. 环境工程学报, 2017,11(10):5751-5756.
- GAO Huanfang, CAO Yuancheng, HE Lujie, et al. Speciation analysis of lead-contaminated soil treated with sodium dihydrogen phosphate using Tessier and BCR[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(10):5751-5756.
- [51] 赵国华,罗兴章,陈贵,等. 固体废物中重金属浸出毒性评价方法的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2013,35(7):80-84.
- ZHAO Guohua, LUO Xingzhang, CHEN Gui, et al. Progress on the testing method of heavy metals leaching toxicity of solid waste[J]. Environmental Pollution & Control, 2013, 35(7):80-84.
- [52] 朱建平,乐红志,朱俊阁,等. 黄金尾矿材料及环境属性研究[J]. 硅酸盐通报, 2021,40(10):3457-3463.
- ZHU Jianping, YUE Hongzhi, ZHU Junge, et al. Research on material and environmental properties of gold tailings [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(10): 3457-3463.
- [53] MALLIOU O, KATSIOTI M, GEORGIADIS A, et al. Properties of stabilized/solidified admixtures of cement and sewage sludge[J]. Cement and Concrete Composites, 2007,29(1):55-61.
- [54] 杜延军,金飞,刘松玉,等. 重金属工业污染场地固化/稳定化处理研究进展[J]. 岩土力学, 2011,32(1):116-124.
- DU Yanjun, JIN Fei, LIU Songyu, et al. Review of stabilization/solidification technique for remediation of heavy metals contaminated lands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1):116-124.
- [55] CORUH S, ELEVLI S, ERGUN O N, et al. Assessment of leaching characteristics of heavy metals from industrial leach waste[J]. International Journal of Mineral Processing, 2013,123:165-171.
- [56] 孙军,李博,聂鑫蕊,等. 垃圾焚烧飞灰中重金属稳定性评价方法研究[J]. 环境科学与技术, 2015,38(增刊 2):132-135,144.
- SUN Jun, LI Bo, NIE Xinrui, et al. Experimental study on stabilization assessment method of heavy metal in fly ash [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(sup 2): 132-135, 144.
- [57] 谷庆宝,马福俊,张倩,等. 污染场地固化/稳定化修复的评价方法与标准[J]. 环境科学研究, 2017,30(5):755-764.
- GU Qingbao, MA Fujun, ZHANG Qian, et al. Remediation of contaminated sites by solidification/stabilization: testing and performance criteria[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(5):755-764.
- [58] 王广西,李丹,侯鑫,等. 建筑垃圾中重金属元素的 X 射线荧光光谱分析[J]. 核电子学与探测技术, 2013,33(7): 873-875.
- WANG Guangxi, LI Dan, HOU Xin, et al. X-ray fluorescence spectrometry analysis of heavy metals in the construction waste[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, 33(7):873-875.
- [59] 于丹凤. 建筑废弃物处理处置过程重金属及溴化阻燃剂分布特征及迁移转化规律研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2018.
- YU Danfeng. Study on the distribution characteristics and migration and transformation patterns of heavy metals and brominated flame retardants during the treatment and disposal of construction waste[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [60] BUTERA S, CHRISTENSEN T H, ASTRUP T F. Composition and leaching of construction and demolition waste: Inorganic elements and organic compounds[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 276:302-311.
- [61] 赵晓红,王文科,陈宇云,等. 建筑垃圾再生材料应用于公路工程的环境影响[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2016,44(2):111-115.
- ZHAO Xiaohong, WANG Wenke, CHEN Yuyun, et al. Environmental impact of construction waste used as recycled material in highway construction[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(2):111-115.
- [62] DEL REY I, AYUSO J, GALVÍN A P, et al. Analysis of chromium and sulphate origins in construction recycled materials based on leaching test results[J]. Waste Management, 2015, 46:278-286.
- [63] SORMUNEN L A, KALLIAINEN A, KOLISOJA P, et al. Combining mineral fractions of recovered MSWI bottom ash: Improvement for utilization in civil engineering structures[J]. Waste and Biomass Valorization, 2017, 8(5): 1467-1478.
- [64] 徐斌,赵玲芹,胡艳军,等. 生活垃圾焚烧炉渣湿法处理前后化学特性表征[J]. 环境污染与防治, 2020,42(7): 858-863.
- XU Bin, ZHAO Lingqin, HU Yanjun, et al. Characterization of chemical characteristics of domestic waste incinerator slag before and after wet treatment[J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(7):858-863.
- [65] 何绪文,崔炜,王春荣,等. 气化炉渣的重金属浸出特性及

- 化学形态分析[J].化工环保,2014,34(5):499-502.
- HE Xuwen, CUI Wei, WANG Chunrong, et al. Analysis on leaching characteristics and chemical speciation of heavy metals in gasification slag[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2014, 34(5): 499-502.
- [66] LI J Y, WANG J M. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 117946.
- [67] 张明亮, 岳兴玲, 杨淑英. 煤矸石重金属释放活性及其污染土壤的生态风险评价[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 249-252.
- ZHANG Mingliang, YUE Xingling, YANG Shuying. Characteristics of heavy metals release from coal waste and potential ecological risk assessment of contaminated soil around coal waste piles[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 249-252.
- [68] TANG Q, LI L Y, ZHANG S, et al. Characterization of heavy metals in coal gangue-reclaimed soils from a coal mining area[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, 186: 1-11.
- [69] 陈宇云, 贾瑞, 杨胜科, 等. 建筑垃圾中镉和砷的释放特征研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(9): 50-55, 111.
- CHEN Yuyun, JIA Rui, YANG Shengke, et al. Characterization of Cd and As released from construction and demolition wastes recycled in road construction[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(9): 50-55, 111.
- [70] GALVÍN A P, AYUSO J, JIMÉNEZ J R, et al. Comparison of batch leaching tests and influence of pH on the release of metals from construction and demolition wastes[J]. Waste Management, 2012, 32(1): 88-95.
- [71] GALVÍN A P, AYUSO J, AGRELA F, et al. Analysis of leaching procedures for environmental risk assessment of recycled aggregate use in unpaved roads[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 1207-1214.
- [72] 于丹凤, 李小月, 段华波, 等. 城市拆除和装修建筑垃圾重金属浸出特性分析[J]. 环境工程, 2019, 37(1): 153-157.
- YU Danfeng, LI Xiaoyue, DUAN Huabo, et al. Leaching characteristics of heavy metals from urban building-demolition and renovation wastes[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(1): 153-157.
- [73] 周新华, 舒悦, 周亮亮, 等. pH值对碱性煤矸石碱度和重金属释放规律影响研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5): 2752-2758.
- ZHOU Xinhua, SHU Yue, ZHOU Liangliang, et al. Study on effects of pH value on alkalinity and heavy metal release of alkaline coal gangue[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(5): 2752-2758.
- [74] 张思思, 陈旭峰, 李春萍, 等. 尾矿及其浸出液中重金属形态分析与评价[J]. 应用化工, 2017, 46(6): 1108-1112, 1117.
- ZHANG Sisi, CHEN Xufeng, LI Chunping, et al. Speciation analysis and evaluation of heavy metals in tailings and its leaching solution[J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(6): 1108-1112, 1117.
- [75] ECKE H, ÅBERG A. Quantification of the effects of environmental leaching factors on emissions from bottom ash in road construction[J]. Science of the Total Environment, 2006, 362(1/2/3): 42-49.
- [76] KARIUS V, HAMER K. pH and grain-size variation in leaching tests with bricks made of harbour sediments compared to commercial bricks[J]. The Science of the Total Environment, 2001, 278(1/2/3): 73-85.
- [77] WANG J L, ZHANG P P, YANG L Q, et al. Adsorption characteristics of construction waste for heavy metals from urban stormwater runoff[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 23(9): 1542-1550.
- [78] 闫莎莎, 郭忠平, 陈军涛. 基于不同矸石粒径的典型金属及重金属溶出特征[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(11): 112-116.
- YAN Shasha, GUO Zhongping, CHEN Juntao. Dissolution characteristics of typical metals and heavy metals based on different gangue particle sizes[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(11): 112-116.
- [79] 魏芳, 钱秋兰, 唐景春, 等. 不同浸出条件下水泥中重金属释放特性的研究[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(2): 85-89.
- WEI Fang, QIAN Qiulan, TANG Jingchun, et al. Influence of different leaching conditions on the release of heavy metals in cement[J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(2): 85-89.
- [80] LI H Y, SHI A B, LI M Y, et al. Effect of pH, temperature, dissolved oxygen, and flow rate of overlying water on heavy metals release from storm sewer sediments[J]. Journal of Chemistry, 2013, 2013: 434012.
- [81] 孙亚乔, 王旭东, 段磊, 等. 冻融作用下煤矸石重金属释放特性及潜在生态风险评价[J]. 环境工程, 2018, 36(11): 152-157.
- SUN Yaqiao, WANG Xudong, DUAN Lei, et al. Release characteristics and potential ecological risk evaluation of heavy metals in coal gangues under freeze-thaw action[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(11): 152-157.

- [82] 王念秦,贺磊,汤廉超,等.陕北矿区煤矸石淋滤试验研究[J].煤田地质与勘探,2017,45(1):110-113.
WANG Nianqin, HE Lei, TANG Lianchao, et al. Coal gangue leaching experiment of mining area in Northern Shaanxi[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(1): 110-113.
- [83] 邓仁健,周德如.基于人工降雨作用下煤矸石路堤污染物释放研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2009,26(1):66-68,75.
DENG Renjian,ZHOU Deru.Research on pollutant release from coal gangue under runoff leaching operation[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition),2009,26(1):66-68,75.
- [84] 马福荣,庞迎波,陈日高.重金属污染物运移耦合模型研究新进展[J].南宁职业技术学院学报,2011,16(6):84-88.
MA Furong,PANG Yingbo,CHEN Rigao.On new progress of research on coupling models for heavy metal contaminants transport[J].Journal of Nanning Polytechnic, 2011,16(6):84-88.
- [85] DEJAM M. Advective-diffusive-reactive solute transport due to non-Newtonian fluid flows in a fracture surrounded by a tight porous medium[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2019,128:1307-1321.
- [86] 陈云敏.环境土工基本理论及工程应用[J].岩土工程学报,2014,36(1):1-46.
CHEN Yunmin. A fundamental theory of environmental geotechnics and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(1):1-46.
- [87] 王娇,邵明安.土壤一维稳态溶质迁移研究的边界层方法比较[J].土壤学报,2022,59(4):964-974.
WANG Jiao,SHAO Ming'an. A comparative analysis of boundary layer methods in solving convection- dispersion equation of solute transport[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022,59(4):964-974.
- [88] LIU Y, QIAN J Z, MA L, et al. Improvement of numerical simulation of bimolecular reactive transport using time-dependent parameters[J].Journal of Hydrodynamics,2015, 27(1):62-67.
- [89] 马小云,康小兵,王在敏,等.不同孔隙条件下饱和土壤内Cl⁻运移规律试验[J].实验室研究与探索,2018,37(12):30-33,67.
MA Xiaoyun,KANG Xiaobing, WANG Zaimin, et al. Cl⁻ transport in saturated soils under different pore conditions [J].Research and Exploration in Laboratory,2018,37(12): 30-33,67.
- [90] 苑绍东,张文杰,袁姗姗.溶质迁移的弥散度取值试验研究[J].岩土力学,2020(增刊2):1-6.
YUAN Shaodong, ZHANG Wenjie, YUAN Shanshan. Dispersion values in solute migration tests[J]. Rock and Soil Mechanics,2020(sup 2):1-6.
- [91] SINGH H, PANDEY R K, SINGH J, et al. A reliable numerical algorithm for fractional advection - dispersion equation arising in contaminant transport through porous media[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications,2019,527:121077.
- [92] BODDULA S, ELDHO T I. A moving least squares based meshless local petrov-galerkin method for the simulation of contaminant transport in porous media[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements,2017,78:8-19.
- [93] ENGELSEN C J, WIBETOE G, VAN DER SLOOT H A, et al. Field site leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction[J]. The Science of the Total Environment,2012,427/428:86-97.
- [94] BEYER C, KONRAD W, RÜGNER H, et al. Model-based prediction of long-term leaching of contaminants from secondary materials in road constructions and noise protection dams[J]. Waste Management, 2009, 29(2): 839-850.
- [95] LI J M, HUANG Y L, SONG T Q, et al. Study on the migration characteristics of Cu²⁺ ions of backfill gangue in subsided area[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018,27(1):145-154.
- [96] 冉德钦,安斌,李轶然,等.基于多孔介质煤矸石路基汞元素的扩散规律研究[J].材料导报,2020,34(增刊1):255-257,267.
RAN Deqin, AN Bin, LI Yiran, et al. Research on the diffusion law of mercury in roadbed of coal gangue based on porous media[J].Materials Reports,2020,34(sup 1):255-257,267.
- [97] SHI X Y, REN B Z. Predict three-dimensional soil manganese transport by HYDRUS-1D and spatial interpolation in Xiangtan manganese mine[J]. Journal of Cleaner Production,2021,292:125879.
- [98] 刘项,李传强,许林季.垃圾焚烧飞灰处理技术研究进展[J].应用化工,2021,50(9):2501-2508.
LIU Xiang,LI Chuanqiang,XU Linji.Research progress on treatment technology of MSWI fly ash[J]. Applied Chemical Industry,2021,50(9):2501-2508.
- [99] LI J S, XUE Q, WANG P, et al. Solidification/stabilization of lead-contaminated soil using cement and waste

- phosphorus slag[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2015, 34(4): 957-963.
- [100] TANG Q, LIU Y, GU F, et al. Solidification/stabilization of fly ash from a municipal solid waste incineration facility using Portland cement[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 2016: 7101243.
- [101] 崔素萍, 兰明章, 张江, 等. 废弃物中重金属元素在水泥熟料形成过程中的作用及其固化机理[J]. *硅酸盐学报*, 2004, 32(10): 1264-1270.
- CUI Suping, LAN Mingzhang, ZHANG Jiang, et al. Effect and incorporation mechanism of heavy metal elements in hazardous industrial wastes during clinker formation[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2004, 32(10): 1264-1270.
- [102] 周建国, 张曙光, 李萍, 等. 城市生活垃圾焚烧飞灰中重金属的固化/稳定化处理[J]. *天津城建大学学报*, 2015, 21(2): 109-113.
- ZHOU Jianguo, ZHANG Shuguang, LI Ping, et al. The solidification/stabilization treatment research of heavy metals from fly ash of municipal solid waste incineration [J]. *Journal of Tianjin Chengjian University*, 2015, 21(2): 109-113.
- [103] SHEN Z T, JIN F, O'CONNOR D, et al. Solidification/stabilization for soil remediation: An old technology with new vitality[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(20): 11615-11617.
- [104] 陈灿, 谢伟强, 李小明, 等. 水泥、粉煤灰及生石灰固化/稳定处理铅锌废渣[J]. *环境化学*, 2015, 34(8): 1553-1560.
- CHEN Can, XIE Weiqiang, LI Xiaoming, et al. Solidification/stabilization treatment of Pb and Zn in tailing waste using cement, fly ash and quick lime[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(8): 1553-1560.
- [105] TANG Q, ZHANG Y, GAO Y F, et al. Use of cement-chelated, solidified, municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash for pavement material: mechanical and environmental evaluations[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(11): 1553-1566.
- [106] 罗忠涛, 刘垒, 康少杰, 等. 地聚合物固化/稳定有毒重金属及作用机理研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(11): 1834-1841.
- LUO Zhongtao, LIU Lei, KANG Shaojie, et al. Research progress on immobilization/stabilization of toxic heavy metals by geopolymers[J]. *Materials Review*, 2018, 32(11): 1834-1841.
- [107] GUO X L, ZHANG L Y, HUANG J B, et al. Detoxification and solidification of heavy metal of chromium using fly ash-based geopolymer with chemical agents[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 151: 394-404.
- [108] WANG Y G, HAN F L, MU J Q. Solidification/stabilization mechanism of Pb(II), Cd(II), Mn(II) and Cr(III) in fly ash based geopolymers[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 160: 818-827.
- [109] 仇秀梅, 刘亚东, 严春杰, 等. 粉煤灰地质聚合物固化 Pb^{2+} 及其高温稳定性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(7): 2281-2287, 2294.
- QIU Xiumei, LIU Yadong, YAN Chunjie, et al. Research on immobilization of Pb^{2+} using fly ash-based geopolymer and its thermostability[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(7): 2281-2287, 2294.
- [110] 王维, 许向群, 李杰, 等. 磷石膏与铜尾渣的高效耦合固定/稳定化处理[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(5): 1601-1609.
- WANG Wei, XU Xiangqun, LI Jie, et al. Efficient synergistic stabilization/solidification of phosphogypsum and copper smelter slag[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(5): 1601-1609.
- [111] 郑娟荣, 刘丽娜. 碱激发胶凝材料固化 Pb^{2+} 及浸出毒性的试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2009, 28(3): 435-439.
- ZHENG Juanrong, LIU Lina. Test investigation on the solidification of heavy metal (Pb^{2+}) by alkali-activated cementing materials and their soaking toxicity[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2009, 28(3): 435-439.
- [112] 陈云敏, 谢海建, 张春华. 污染物击穿防污屏障与地下水土污染防治研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36(1): 1-10.
- CHEN Yunmin, XIE Haijian, ZHANG Chunhua. Review on penetration of barriers by contaminants and technologies for groundwater and soil contamination control[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(1): 1-10.
- [113] 刘睿, 杜延军, 梅丹兵, 等. 土-膨润土系竖向隔离工程屏障阻滞重金属污染物运移特性试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(5): 815-821.
- LIU Rui, DU Yanjun, MEI Danbing, et al. Laboratory study of soil-bentonite vertical barrier on heavy metal migration retardation[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(5): 815-821.
- [114] WU H L, JIN F, NI J, et al. Engineering properties of vertical cutoff walls consisting of reactive magnesia-activated slag and bentonite: Workability, strength, and hydraulic conductivity[J]. *Journal of Materials in Civil*

- Engineering,2019,31(11):0002908.
- [115] 龚亚龙,李红艳,李喜青,等.郴州市王仙岭尾砂库重金属污染治理工程实例[J].环境工程,2016,34(2):170-174.
GONG Yalong,LI Hongyan,LI Xiqing,et al.Case study on remediation of heavy metal contamination by tailings in wangxianling tourism resort of Chenzhou city[J]. Environmental Engineering,2016,34(2):170-174.
- [116] 陈冠益,韩克旋,刘彩霞,等.污泥中重金属处理方法[J].化学进展,2021,33(6):998-1009.
CHEN Guanyi,HAN Kexuan,LIU Caixia,et al.Removing heavy metals from sludge[J].Progress in Chemistry,2021, 33(6):998-1009.
- [117] 陆建平,马柳军,黄彦明,等.聚环氧琥珀酸对锰渣中锰的萃取研究[J].环境科学与技术,2011,34(8):101-103.
LU Jianping, MA Liujun, HUANG Yanming, et al. Extraction of manganese from its slag by polyepoxysuccinic acid[J].Environmental Science & Technology,2011,34(8): 101-103.
- [118] 陆建平,庞洁,张立颖,等.PESA和MA/AA分别萃取污泥中汞的比较研究[J].环境科学与技术,2013,36(8):120-122,181.
LU Jianping,PANG Jie,ZHANG Liying,et al.Comparison of mercury extraction from its sludge with PESA and MA/AA[J].Environmental Science & Technology,2013,36(8): 120-122,181.
- [119] WEIBEL G, EGGENBERGER U, KULIK D A, et al. Extraction of heavy metals from MSWI fly ash using hydrochloric acid and sodium chloride solution[J]. Waste Management,2018,76:457-471.
- [120] SÁNCHEZ-CAMARGO A D, PARADA-ALFONSO F, IBÁÑEZ E, et al. On-line coupling of supercritical fluid extraction and chromatographic techniques[J]. Journal of Separation Science,2017,40(1):213-227.
- [121] GHOREISHI S M, HEDAYATI A, ANSARI K. Experimental investigation and optimization of supercritical carbon dioxide extraction of toxic heavy metals from solid waste using different modifiers and chelating agents[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2016,117:131-137.
- [122] 花莉,常江峰,李军军.超临界CO₂萃取铅锌尾矿重金属工艺研究[J].陕西科技大学学报,2021,39(3):27-33.
HUA Li, CHANG Jiangfeng, LI Junjun. Study on the process of supercritical CO₂ extraction of heavy metals from lead and zinc tailings[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology,2021,39(3):27-33.
- [123] 高旭波,潘振东,龚培俐,等.微生物诱导碳酸盐岩沉淀过程及作用机理[J].中国岩溶,2022,41(3):441-452.
GAO Xubo,PAN Zhendong,GONG Peili,et al.Process and mechanism of microbial induced carbonate precipitation [J].Carsologica Sinica,2022,41(3):441-452.
- [124] LIU S H, WEN K J, ARMWOOD C, et al. Enhancement of MICP-treated sandy soils against environmental deterioration[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019,31(12):0002959.
- [125] 王茂林,吴世军,杨永强,等.微生物诱导碳酸盐沉淀及其在固定重金属领域的应用进展[J].环境科学研究,2018, 31(2):206-214.
WANG Maolin, WU Shijun, YANG Yongqiang, et al. Microbial induced carbonate precipitation and its application for immobilization of heavy metals: A review [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(2): 206-214.
- [126] 邱钰峰,陈萍,郑康琪,等.利用土著微生物处理焚烧飞灰及资源化初探[J].中国环境科学,2022,42(5):2220-2228.
QIU Yufeng,CHEN Ping,ZHENG Kangqi,et al.Treatment of MSWI fly ash by using indigenous microorganism and the investigation of its promising utilization[J]. China Environmental Science,2022,42(5):2220-2228.
- [127] ACHAL V,PAN X L,LEE D J,et al.Remediation of Cr(VI) from chromium slag by biocementation[J].Chemosphere, 2013,93(7):1352-1358.
- [128] 许朝阳,杨贺,黄建璋,等.生物修复Cu²⁺、Pb²⁺污染土的稳定性[J].工业建筑,2018,48(7):33-37.
XU Zhaoyang, YANG He, HUANG Jianzhang, et al. Stability of bioremediated soil contaminated by Cu²⁺ or Pb²⁺[J].Industrial Construction,2018,48(7):33-37.