

文章编号:1007-9629(2021)05-1048-06

焚烧飞灰颗粒对沥青混合料水稳定性的影响

李菁若^{1,2}, 唐伯明¹, 刘瑞全³, 李聪², 陈飞²

(1.重庆交通大学土木工程学院,重庆400074;2.招商局重庆交通科研设计院有限公司,重庆400067;3.招商局重庆公路工程检测中心有限公司,重庆400067)

摘要:为了实现焚烧飞灰(IFA)在沥青路面中的资源转化,将焚烧飞灰与水泥造粒以及与水泥、硅灰、粉煤灰造粒,研究掺有造粒颗粒沥青混合料的水稳定性以及冻融劈裂试验条件对其水稳定性的影响机制.结果表明:焚烧飞灰造粒后,氯离子浸出率分别降低了56.76%、59.12%;冻融劈裂试验条件对焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料水稳定性影响顺序为抽真空过程>冷冻过程>击实次数,抽真空过程破坏造粒颗粒表面沥青膜,导致可溶氯盐溶出,氯盐溶液在冻融过程中产生的冻胀、盐胀与腐蚀综合作用是导致沥青混合料内部结构受损关键因素;焚烧飞灰与水泥、硅灰、粉煤灰造粒的方法能有效改善沥青混合料的水稳定性.

关键词:道路工程;焚烧飞灰;沥青混合料;造粒预处理;水稳定性;影响机制

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.020

Influence of Incineration Fly Ash Granulated Particles on Water Stability of Asphalt Mixture

LI Jingruo^{1,2}, TANG Boming¹, LIU Ruiquan³, LI Cong², CHEN Fei²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. China Merchants Chongqing Communications Technology Research and Design Institute Co., Ltd.,

Chongqing 400067, China;3. China Merchants Chongqing Highway Engineering Testing

Center Co., Ltd., Chongqing 400067, China)

Abstract: In order to realize the utilization of incineration fly ash (IFA) in asphalt pavement, the IFA was granulated with cement, and silica fume, coal ash. The water stability of asphalt mixture with granulated particles and the influence mechanism of freeze thaw splitting test conditions on its water stability were studied. The results show that after IFA is granulated, the chloride ion leaching rate decrease by about 56.76% and 59.12% respectively. The order of the influence of freeze thaw splitting test conditions on the water stability is vacuum extraction process>freezing process>compaction times. During the process of vacuum extraction, the asphalt film on the surface of IFA/cement granulated particles is destroyed, thus the soluble chloride is dissolved out, the combined action of frost heaving, salt heaving and corrosion of chloride solution in the course of freeze thaw cycle is the key cause of damage to the internal structure of asphalt mixture. The method of co-granulation of cement, silica fume, coal ash and IFA can effectively improve the water stability of asphalt mixture.

Key words: road engineering; incineration fly ash; asphalt mixture; granulation pretreatment; water stability; influence mechanism

收稿日期:2020-07-01; 修订日期:2020-09-18

基金项目:重庆市技术创新与应用示范专项产业类重点研发项目(cstc2018jszx-cyzdX0026);重庆市环境保护局环保科技项目(环科字2016CF第(5)号)

第一作者:李菁若(1988—),女,河南商丘人,招商局重庆交通科研设计院有限公司高级工程师,重庆交通大学博士生.E-mail:lijingruo@cmmhk.com

生活垃圾焚烧飞灰(IFA)是生活垃圾焚烧厂烟气净化系统的捕集物和烟道及烟囱底部沉降的底灰,因含有二噁英、可溶性重金属及高含量可溶盐^[1],被列为HW18类危险废物.国外有将焚烧飞灰用于沥青材料中的研究^[2-3],而鲜见焚烧飞灰用于沥青路面的报道.近几年国内很多企业及研究机构加快了焚烧飞灰的资源化利用:重庆三峰环境联合重庆交科院、中国环科院等企业于2011年起着力研究焚烧飞灰在沥青路面中的应用(路用性能^[4-7]与环境风险评估^[8-9]),在重庆渝黔、成渝和渝合高速成功铺筑试验路;上海大学潘赟对焚烧飞灰用于沥青路面施工过程扬尘散逸风险、使用过程风险进行评估,提出基于保护地下水的沥青混凝土中Zn、Pb和Cd最大允许量推荐值^[10];湖南大学向鹏、颜可珍等研究了焚烧飞灰对沥青胶浆、沥青混合料性能的影响,提出焚烧飞灰作为新型填料具有可行性^[11-12];北京工业大学乔建刚等提出控制焚烧飞灰掺量能满足交通道路的使用要求^[13].

焚烧飞灰对沥青路面路用性能影响最为敏感的是水稳定性,而可溶氯盐是影响水稳定性的主要因素.因此,本文拟利用焚烧飞灰、水泥、硅灰、粉煤灰的胶凝性质及不同粒径,将焚烧飞灰分别与水泥造粒以及水泥、硅灰和粉煤灰造粒,缓解焚烧飞灰中可溶氯盐对沥青混合料水稳定性的影响程度,提高焚烧飞灰清洁应用的效果.

1 试验

1.1 原材料

焚烧飞灰(IFA)由重庆同兴垃圾焚烧发电厂提供,经过低温热降解处理后二噁英含量不超过10 ng-TEQ/kg,不具有二噁英致毒风险;水泥(C)为42.5级普通硅酸盐水泥;硅灰(SF)为高品质硅灰,其中SiO₂含量¹⁾_w(SiO₂)>93%;粉煤灰(CA)为Ⅱ级干排灰.

1.2 焚烧飞灰的造粒过程

焚烧飞灰/水泥(IFA+C)造粒步骤:将焚烧飞灰与水泥分别按照一定质量比($m_{IFA}:m_C=1.00:0.30$ 、 $1.00:0.50$ 、 $1.00:1.00$)混合均匀;添加粉体质量25%~35%的水,制备成焚烧飞灰/水泥胶浆;养生7 d后破碎成小于4.75 mm的焚烧飞灰/水泥的颗粒.焚烧飞灰/水泥/硅灰/粉煤灰(IFA+C+SF+CA)颗粒造粒步骤:按照一定质量比($m_{IFA}:m_C:m_{SF}:m_{CA}=1.00:0.62:0.20:0.18$)分别称量水泥、硅灰、粉煤灰、

焚烧飞灰,每加入1种粉体后均需进行干粉混合;所有粉体混合均匀后加入粉体总质量25%~35%的水,其余步骤同焚烧飞灰/水泥造粒.

1.3 氯离子滴定试验

1.3.1 造粒颗粒中氯离子滴定过程

称取23.6 g造粒颗粒,加入1 000.0 g水中,在500 r/min转速下搅拌1 h;静置24 h至上层清液不再浑浊,取100 mL上层清液进行滴定;根据GB 15453—1995《工业循环冷却水中氯离子的测定 硝酸银滴定法》进行滴定试验,当出现砖红色沉淀时,记录硝酸银溶液滴加前后的读数,以此来计算氯离子的浸出量.

1.3.2 焚烧飞灰中氯离子滴定过程

称取焚烧飞灰0.5~1.0 g,加入到50 mL蒸馏水中,并在通风厨中边搅拌边加入50 mL的稀硝酸(1份硝酸+300份水,混合均匀),加热煮沸5 min;用蒸馏水将上述液体稀释至200 mL,冷却至室温;采用NaOH溶液与稀硝酸溶液来调节pH值,使pH值为5~9;根据GB 15453—1995进行滴定试验.

2 结果与讨论

2.1 造粒颗粒的基本性能

2.1.1 造粒颗粒的氯离子浸出性能

焚烧飞灰的氯离子浸出量为16.56%,焚烧飞灰/水泥、焚烧飞灰/水泥/硅灰/粉煤灰颗粒的氯离子浸出量分别为7.16%、6.77%,浸出量分别降低了56.76%、59.12%,这是因为在水泥水化产生的碱性环境下,氯离子与Ca(OH)₂生成CaCl₂,CaCl₂与未水化的铝酸三钙(C₃A)反应生成结构稳定的Friedel盐(3CaO·Al₂O₃·CaCl₂·10H₂O).另外,焚烧飞灰中的CaSO₄在水化早期也会与C₃A反应生成钙矾石(AFt),当后期CaSO₄的含量逐渐减少时,AFt与剩余的C₃A继续反应生成单硫型硫铝酸钙(AFm),氯离子置换AFm中的SO₄²⁻生成Friedel盐;水泥水化产物水化硅酸钙(C-S-H)凝胶由于具有较大的比表面积,通过胶粒表面所带“负”动电荷产生的扩散双电层对焚烧飞灰氯盐中的正负离子产生强吸附固化作用等^[14-15].因此,在水泥水化产物的物理化学固化作用下,氯离子被禁锢在水化产物的晶格中或微孔壁上,使造粒颗粒的氯离子浸出率降低.

焚烧飞灰/水泥/硅灰/粉煤灰颗粒比焚烧飞灰/水泥颗粒的氯离子浸出量降低了0.39%,这是因为水泥、粉煤灰、硅灰、焚烧飞灰4种粉体的粒径和比表面积是有差异的,在适当配比下的造粒颗粒能够达

1)文中涉及的含量、掺量及油石比等均为质量分数或质量比.

到密级配堆积效果,对氯离子起到了更好的抗溶出作用。

2.1.2 造粒颗粒的物理性能

造粒颗粒用于替代沥青混合料中同规格的石灰岩细集料,其与石灰岩细集料的物理性能见表1。由表1可见:焚烧飞灰/水泥颗粒的表观相对密度为2.363,低于焚烧飞灰(2.628)和水泥(3.052),这说明焚烧飞灰/水泥颗粒表面或内部含有微孔或连通孔,在水的作用下可使部分氯离子得以溶出;焚烧飞灰/水泥颗粒的含泥量、砂当量分别约为石灰岩细集料的7.19倍和0.61倍,

这是因为在焚烧飞灰/水泥颗粒破碎过程中,粒径较小的粉末黏附在颗粒表面,从而导致造粒颗粒的含泥量超标、砂当量降低;焚烧飞灰/水泥颗粒的棱角性大于石灰岩细集料,这是因为人工破碎的焚烧飞灰/水泥颗粒表面构造不均匀,多凸起,粗糙度大;焚烧飞灰/水泥/硅灰/粉煤灰颗粒的造粒过程与材料组成与焚烧飞灰/水泥颗粒类似,所以两者的物理性能也相差不大。表2为造粒颗粒的筛分结果。由表2可见,破碎造粒颗粒的粒径规格符合沥青混合料用机制砂或石屑规格的技术要求。

表1 造粒颗粒与石灰岩细集料的物理性能
Table 1 Physical properties of granulated particles and fine aggregate of limestone

Property	Fine aggregate of limestone	IFA+C($m_{\text{IFA}}:m_{\text{C}}=1.00:1.00$)	IFA+C+SF+CA
Apparent relative density	2.746	2.363	2.427
Mud (< 0.075 mm) content (by mass)/%	1.6	11.5	11.8
Sand equivalent (by mass)/%	71	43	41
Angular property (flow time)/s	57	62	63

表2 造粒颗粒的筛分结果
Table 2 Sieving results of granulated particles

Sample	Passing ratio (by mass)/%						
	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
IFA+C($m_{\text{IFA}}:m_{\text{C}}=1.00:1.00$)	100.0	69.2	43.7	30.7	21.7	6.1	1.6
IFA+C+SF+CA	100.0	72.3	43.9	30.9	21.1	3.9	0.7
JTG F40—2004	90—100	60—90	40—75	20—55	7—40	2—20	0—10

2.2 焚烧飞灰/水泥颗粒对沥青混合料水稳定性的影响

2.2.1 冻融条件下的水稳定性

以SK 70[#]为沥青原料,在AC-20C型沥青混合料中掺入0~3 mm粒径的焚烧飞灰/水泥颗粒(替代部分同规格细集料),其油石比为0.044。焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料的冻融劈裂结果见表3。由表3可见:与未掺加焚烧飞灰/水泥颗粒的沥青混合料(焚烧飞灰掺量 $w_{\text{IFA}}=0\%$)相比,焚烧飞灰掺量为0.5%的沥青混合料的冻融劈裂强度比(TSR)降低了35.7%,不满足规范要求($\geq 75\%$)。这是因为焚烧飞灰中含有大量的可溶性氯盐,在冻融循环作用下,氯盐溶液在降温结晶过程中对沥青混合料试件产生了冻胀破坏与盐胀破坏^[16-17],在升温浸泡过程中焚烧飞灰产生的氯盐溶液对沥青的乳化作用、老化作用以及加速碱集料反应等侵蚀破坏作用^[18],另外,焚烧飞灰自身化学组分如CaO、SO₃等,遇水发生水化反应,固相体积增加,也能在沥青混合料试件内部形成膨胀损伤破坏^[4-6],在以上各种破坏作用的叠加下,少量的焚烧飞灰就能对沥青混合料的水稳定性产生极其不利的影响。

表3 焚烧飞灰/水泥颗粒的沥青混合料冻融劈裂结果
Table 3 Freeze thaw splitting results of asphalt mixture with IFA+C particles

$m_{\text{IFA}}:m_{\text{C}}$	$w_{\text{IFA}}/\%$	TSR/%
0	0	81.3
1.00:0	0.5	52.3
1.00:0.50	2.0	63.9
1.00:0.50	3.0	59.4
1.00:1.00	2.0	72.3

由表3还可见,焚烧飞灰与水泥造粒后,沥青混合料的TSR有所提高。这是因为水泥用量越多,对焚烧飞灰的裹覆、稳固效果越强,越能抑制其可溶氯盐的溶出,且能更好地降低焚烧飞灰与沥青的直接接触的面积;在造粒过程中,焚烧飞灰的水化反应也能提前释放因CaO、SO₃等组分而引起的膨胀应力;水泥作为沥青混合料常用的抗剥落剂,也可以改善沥青混合料的水稳定性。但是,焚烧飞灰/水泥颗粒掺入沥青混合料中,其TSR均不满足规范要求,这是因为经水泥裹覆、稳固后,焚烧飞灰中氯离子浸出量虽然降低了56.76%,但尚有一定的浸出性,且在造粒

过程中粒径极小的粉尘黏附在焚烧飞灰/水泥颗粒的表面,不仅使其含泥量超标、砂当量降低,还进一步成为黏性沥青的隔离剂,进一步降低了沥青与集料之间的黏附性。由此可见,将焚烧飞灰与水泥造粒对焚烧飞灰氯离子的封装效果及其沥青混合料水稳定性的综合改善效果有限,还需要进一步采取抑制氯离子的溶出或改善焚烧飞灰/水泥颗粒界面状态等措施。

2.2.2 浸水条件下的水稳定性

焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料的浸水马歇尔试验结果见表4。表4中: N 为双面击实次数;试件3在真空度为97.3~98.7 kPa下饱水15 min;浸水残留稳定度(MS_0)的测试条件为60℃、48 h。由表4可知,掺加焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料的 MS_0 高于未掺焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料,与TSR结论相反。这是因为浸水马歇尔试验条件比冻融劈裂试验温和得多,其没有真空饱水过程与冻融过程,弱化了焚烧飞灰中可溶氯盐对沥青混合料产生的冻胀破坏与盐胀破坏;另外,焚烧飞灰/水泥颗粒与集料混合后,其表面的微细粉尘能够在集料表面形成一层覆盖层,在试验条件较温和的条件下有助于提高集料与酸性沥青之间的黏附力。当焚烧飞灰掺量相同时,试件3的 MS_0 为89.0%,比试件2降低了15.9%,但仍然满足规范要求($\geq 80\%$)。这是因为降低双面击实次数,使沥青混合料内部空隙增多,其本身的强度会有所降低,另外额外施加真空饱水条件也会使水分进一步进入混合料内部空隙中,更加影响沥青与集料之间的黏附性导致其 MS_0 降低,但这种外部条件的改变对沥青混合料强度的降低作用有限,其仍满足规范要求。

综上,对于焚烧飞灰在沥青路面中的应用,考察其水稳定性的关键试验为冻融劈裂试验。

表4 焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料的浸水马歇尔试验结果
Table 4 Immersion Marshall test results of asphalt mixture with IFA+C particles

Specimen No.	N /times	$m_{\text{IFA}}:m_{\text{C}}$	$w_{\text{IFA}}/\%$	$MS_0/\%$
1	75	0	0	97.7
2	75	1.00:1.00	2.0	105.8
3	50	1.00:1.00	2.0	89.0

2.2.3 冻融条件对水稳定性的影响机制分析

冻融劈裂试验条件包括是否冷冻、真空度高低、击实次数等,其对焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料性能的影响见表5,其中:焚烧飞灰/水泥颗粒的 $m_{\text{IFA}}:m_{\text{C}}=1.00:1.00$;真空度根据JTGE20—2011《公路工程沥青试验规程》,通过抽真空的时间来控制。由表5可见:(1)击实次数相同时,非冷冻或非真空的条件下混合

料的TSR均有所改善,且非真空条件对TSR的改善程度更大,这说明抽真空过程比冷冻过程对焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料TSR的损伤更大;非真空条件下混合料的吸水率比真空条件减小了约34.2%;非真空条件下混合料的TSR比真空条件下的高约8.7%,这是非真空及小吸水率共同作用的结果。(2)增加击实次数,可以增加试件的密实度,降低其吸水率,冻融前试件的劈裂强度较高,而经过真空、冷冻过程后,其劈裂强度降低的幅度显著,混合料的TSR为所有试验条件下最小,这说明抽真空过程比吸水率对焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料TSR的损伤大。(3)降低击实次数和真空度,试件空隙较多,其吸水率达到最大,冻融前试件的劈裂强度最低,经过低真空度与冷冻的过程后,其劈裂强度进一步降低且最小,而其TSR不是最小的,这说明真空度的大小对焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料TSR有一定影响。综上,焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料的TSR主要取决于试件是否经历抽真空过程或冷冻过程,冻融劈裂试验条件对其水稳定性影响顺序为抽真空过程>冷冻过程>击实次数。

结合焚烧飞灰/水泥的造粒过程可知,在造粒过程中为了增加施工和易性,往往加入多余水分,但水泥水化所需水分较少,因此当多余水分蒸发后,在焚烧飞灰/水泥颗粒表面留下很多毛细微孔。在冻融劈裂试验条件下,如抽真空时会使得焚烧飞灰/水泥颗粒毛细微孔内的空气膨胀,进而使得裹覆在颗粒表面的沥青膜被抽破,一方面在抽破处失去黏结作用,在劈裂受拉时形成应力集中点;另一方面外部水分通过焚烧飞灰/水泥颗粒表面的微孔或者内部连通孔进入焚烧飞灰/水泥颗粒中,溶解其含有的可溶性氯盐,在抽真空的压力下氯盐溶液在混合料内部由局部浓度较高的地方向其他浓度较低的地方渗透扩散,致使氯盐溶液进一步充斥在沥青混合料的空隙结构中,以至于在后续的冷冻与热融过程中产生温度应力及结晶膨胀力作用。如在温度降低的过程中,氯盐溶液会逐渐结冰,产生结冰膨胀压,并且随着结冰的继续以及氯盐浓度的不断增大,氯盐也开始不断在混合料内部聚集并结晶^[19]。氯盐溶液的结冰以及氯盐分子的结晶均会使混合料内部产生较大的盐冻压力与盐胀应力,导致混合料出现微裂缝。同时,填充在微裂缝中的氯盐晶体降低了沥青混合料对微裂缝的自愈合能力^[20],造成沥青混合料水稳定性的大幅度降低。另外,沥青混合料长时间浸泡在可溶氯盐的电解质溶液中,产生了一系列的物理化学腐蚀作

用。如根据表面张力理论,氯盐溶液的表面张力比沥青大很多,氯盐溶液更易侵入沥青与集料的结合处并与沥青发生置换,一方面使得沥青膜逐渐从集料表面剥落,显著降低沥青与集料的黏附性^[21],另一方面会加速碱骨料反应,加剧沥青混合料的膨胀开裂^[18,22];氯离子的渗透作用则会加速沥青膜的老化,使沥青变硬、变脆^[22-23],间接导致沥青膜的剥落,削弱

沥青结合料与集料的黏结能力;Na⁺等低价阳离子与沥青产生化学吸附时形成的吸附层极不稳定,且遇水后易被乳化,显著降低集料与沥青之间的黏结性能^[18,22]。焚烧飞灰溶解形成的盐溶液在冻融循环过程中产生的冻胀、盐胀与腐蚀的综合作用,是导致沥青混合料内部结构受损的关键因素,亦是导致沥青混合料水稳定性降低的直接原因。

表5 冻融劈裂试验条件对焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料性能的影响

Table 5 Influence of freeze thaw splitting test conditions on performance of asphalt mixture with IFA+C particles

N/times	Vacuum	Freezing	$w_{\text{IFA}}/\%$	Cracking strength /MPa		TSR/%	Water absorption (by mass)/%
				Before test	After test		
50	High	Yes	2.0	0.892 3	0.645 4	72.3	0.78
50	High	No	2.0	0.892 3	0.656 7	73.6	0.79
50	No	Yes	2.0	0.892 3	0.700 9	78.6	0.52
75	High	Yes	2.0	0.956 3	0.636 6	66.6	0.50
40	Low	Yes	2.0	0.849 4	0.591 4	69.6	0.84

2.3 焚烧飞灰/水泥/硅灰/粉煤灰颗粒对沥青混合料水稳定性的影响

以苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青为原料,油石比为0.044,制备了SBS改性沥青混合料(对照组)以及焚烧飞灰/水泥、焚烧飞灰/水泥/硅灰/粉煤灰颗粒SBS改性沥青混合料,其冻融劈裂试验结果见表6。由表6可见:焚烧飞灰/水泥/硅灰/粉煤灰颗粒沥青混合料的TSR为84.5%,接近对照组,且满足规范要求,这说明了硅灰、水泥、粉煤灰与焚烧飞灰共造粒方法提高了造粒颗粒的密实度,有效缓解了焚烧飞灰中可溶氯盐组分的溶出。

表6 焚烧飞灰/水泥/硅灰/粉煤灰颗粒SBS改性沥青混合料的冻融劈裂试验结果

Table 6 Freeze thaw splitting test results of SBS modified asphalt mixture with IFA+C+SF+CA particles

Asphalt mixture	$w_{\text{IFA}}/\%$	TSR/%
Control	0	84.9
IFA+C	1.0	75.0
IFA+C+SF+CA	1.0	84.5

3 结论

(1)焚烧飞灰造粒后,氯离子浸出率分别降低了56.76%、59.12%;造粒颗粒棱角性好、粒径规格好、表观相对密度偏小,但含泥量大,砂当量大。

(2)表征掺焚烧飞灰沥青混合料水稳定性的关键在于冻融劈裂试验,试验条件对焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料水稳定性的影响顺序为抽真空过程>冷冻过程>击实次数。抽真空过程破坏了焚烧飞灰/

水泥颗粒表面的沥青膜,导致可溶氯盐溶出;盐溶液在冻融循环过程中产生的冻胀、盐胀与腐蚀的综合作用是导致沥青混合料内部结构受损的关键因素。

(3)采用水泥、硅灰、粉煤灰对焚烧飞灰进行造粒,可有效弥补焚烧飞灰对沥青混合料路用性能的伤害作用。

(4)焚烧飞灰在沥青混合料中的应用关键在于如何简便、经济以及有效地抑制可溶氯盐的浸出。

参考文献:

- [1] 张晶. 焚烧飞灰用于沥青路面重金属溶出特性及风险评估[D]. 青岛:青岛理工大学, 2017.
ZHANG Jing. Dissolution characteristics and risk assessment of heavy metals in fly ash used for asphalt pavement [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [2] EYMAEL M M T, WIJS W D, MAHADEW D. The use of MSWI bottom ash in asphalt concrete [J]. Studies in Environmental Science, 1994, 60: 851-862.
- [3] MATTHEW L S, KYLE A C, TIMOTHY G T, et al. Assessment of the total content and leaching behavior of blends of incinerator bottom ash and natural aggregates in view of their utilization as road base construction material [J]. Waste Management, 2019, 98: 92-101.
- [4] 李菁若, 谭巍, 张东长, 等. 沥青路用城市生活垃圾焚烧飞灰的物化性能研究[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(2): 268-275.
LI Jingruo, TAN Wei, ZHANG Dongchang, et al. Physical-chemical properties of municipal solid waste incinerator fly ash applied in asphalt pavement [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(2): 268-275. (in Chinese)
- [5] 李菁若, 谭巍. 城市生活垃圾焚烧飞灰对沥青混合料 TSR 的影响分析[J]. 中外公路, 2016, 36(1): 250-253.

- LI Jingruo, TAN Wei. The influence of municipal solid waste incinerator fly ash on freezing-thawing splitting tensile strength ratio of asphalt mixture [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2016, 36(1): 250-253. (in Chinese)
- [6] 谭巍,李菁若,季炜,等.城市生活垃圾焚烧飞灰在沥青混合料中的应用研究[J].中国公路学报,2016,29(4):14-21.
- TAN Wei, LI Jingruo, JI Wei, et al. The applicability of municipal solid waste incinerator fly ash in asphalt mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(4): 14-21. (in Chinese)
- [7] 李菁若,谭巍,张东长,等.城市生活垃圾焚烧飞灰/沥青胶浆的性能研究[J].公路交通科技,2017,34(11):23-30.
- LI Jingruo, TAN Wei, ZHANG Dongchang, et al. Study on performance of municipal solid waste incinerator fly ash / asphalt mastic [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(11): 23-30. (in Chinese)
- [8] YANG J Z, YANG Y F, LI Y, et al. Leaching of metals from asphalt pavement incorporating municipal solid waste incineration fly ash [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 27106-27111.
- [9] 张晶,杨玉飞,杨金忠,等.造粒飞灰沥青混凝土路面利用的地下水环境风险评估[J].环境污染与防治,2019,41(1):89-94.
- ZHANG Jing, YANG Yufei, YANG Jinzhong, et al. Environmental risk assessment of groundwater of granulated fly ash utilization on asphalt pavement [J]. Environmental Pollution Control, 2019, 41(1): 89-94. (in Chinese)
- [10] 潘赟.我国生活垃圾焚烧飞灰毒性行为及其资源化利用过程的风险评估[D].上海:上海大学,2015.
- PAN Yun. Toxicity behavior of MSWIs fly ash and assessment of its recycling risk in China [D]. Shanghai: Shanghai University, 2015. (in Chinese)
- [11] YAN K Z, LI L L, ZHENG K G, et al. Research on properties of bitumen mortar containing municipal solid waste incineration fly ash [J]. Construction and Building Materials, 2019, 218: 657-666.
- [12] 向鹏.掺入垃圾焚烧飞灰的沥青胶浆及混合料性能研究[D].长沙:湖南大学,2018.
- XIANG Peng. The study on performance of asphalt mortar and mixture mixed with MSWI fly ash [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)
- [13] 乔建刚,韩苗苗,王英,等.生活垃圾焚烧飞灰沥青混合料的路用性能[J].材料科学与工程学报,2019,37(2):291-295.
- QIAO Jiangan, HAN Miaomiao, WANG Ying, et al. Pavement performance of municipal solid waste incinerator fly ash asphalt mixture [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2019, 37(2): 291-295. (in Chinese)
- [14] 包龙生,宋晓纯,于玲,等.氯盐在水泥海排灰结合料中的固化机理[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(1):36-40.
- BAO Longsheng, SONG Xiaochun, YU Ling, et al. Study on bonding mechanism of chloride in the cement sea-fly-ash binder [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2010, 26(1): 36-40. (in Chinese)
- [15] 郭明磊,肖佳,左胜浩.铝酸三钙水化浆体固化氯离子能力研究[J].建筑材料学报,2019,22(3):341-347.
- GUO Minglei, XIAO Jia, ZUO Shenghao. Chloride binding capacity of hydrated C_3A pastes [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 341-347. (in Chinese)
- [16] 刘状壮,沙爱民,蒋玮.蓄盐沥青路面研究进展:盐化材料、混合料及其性能与评价[J].中国公路学报,2019,32(4):18-31.
- LIU Zhuangzhuang, SHA Aimin, JIANG Wei. Advances in asphalt pavements containing salts: Additives, mixtures, performances, and evaluation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 18-31. (in Chinese)
- [17] 王岚,王宇.盐冻破坏下沥青混合料的抗裂性能及影响因素[J].建筑材料学报,2016,19(4):773-778.
- WANG Lan, WANG Yu. Influence factors of crack resistance of asphalt mixture under the damage of deicing salt and freezing-thawing cycles [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(4): 773-778. (in Chinese)
- [18] 吴泽媚.氯盐和冻融对混凝土破坏特征及机理研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
- WU Zemei. Failure characteristics and mechanism of chlorine deicers and freeze-thaw on concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [19] 刘宝奎.盐冻融作用下沥青混合料性能及破坏机理研究[D].西安:长安大学,2017.
- LIU Baokui. Study on the properties of asphalt mixture and its failure mechanism under freeze-thaw cycles with deicers [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)
- [20] 熊锐,陈拴发,关博文,等.硫酸盐-干湿循环侵蚀环境下纤维沥青混合料低温抗裂性研究[J].武汉理工大学学报,2014,36(3):47-52.
- XIONG Rui, CHEN Shuanfa, GUAN Bowen, et al. Low-temperature crack resistance of fiber reinforced asphalt mixture under sulfate and dry-wet circle corrosion environment [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(3): 47-52. (in Chinese)
- [21] 熊锐,陈拴发,关博文,等.冻融与腐蚀耦合作用下沥青混凝土性能研究[J].武汉理工大学学报,2011,33(2):72-76.
- XIONG Rui, CHEN Shuanfa, GUAN Bowen, et al. Research on performance of asphalt concrete under the action of freeze-thaw and corrosion [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(2): 72-76. (in Chinese)
- [22] 吴泽媚,高培伟,陈东丰,等.氯盐融雪剂对沥青混合料低温抗裂性的影响[J].公路工程,2012,37(4):26-29.
- WU Zemei, GAO Peiwei, CHEN Dongfeng, et al. Effect of chlorine deicers on performance of low temperature crack resistance of asphalt mixture [J]. Highway Engineering, 2012, 37(4): 26-29. (in Chinese)
- [23] 李根森,张豫川,高飞,等.基于氯盐冻融条件下沥青结合料性能的研究[J].石油沥青,2017,31(6):14-17.
- LI Gensen, ZHANG Yuchuan, GAO Fei, et al. Study on performance of asphalt binder based on freeze-thawing of chloride condition [J]. Petroleum Asphalt, 2017, 31(6): 14-17. (in Chinese)