

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.01.003

聚酯纤维对生活垃圾焚烧飞灰/沥青混合料 TSR 的改善效果

李菁若^{1,2}, 刘瑞全³, 唐伯明¹, 蒋立新⁴, 赵战伟⁵

- (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 400060;
4. 重庆三峰环境产业集团有限公司 国家环境保护垃圾焚烧处理与资源化工程技术中心, 重庆 400084;
5. 重庆渝黔高速公路有限公司, 重庆 404100)

摘要: 为了缓解焚烧飞灰对沥青混合料冻融劈裂强度的影响, 利用聚酯纤维桥连加筋、增韧阻裂的效应, 将其作为添加剂添加到焚烧飞灰/沥青混合料中。试验对比分析了单掺聚酯纤维、聚酯纤维与水泥造粒共作用两种方法对焚烧飞灰/沥青混合料冻融劈裂强度的改善效果, 并研究了不同纤维种类、沥青种类的叠加效应。结果表明: 焚烧飞灰因含可溶盐(如氯盐、硫酸盐等)、遇水反应膨胀物(如CaO, Ca(OH)₂等)、低价阳离子(如Na⁺, K⁺等)等物质, 分别能够在低温下产生结晶膨胀作用、水化时固相体积增加以及与沥青膜接触产生乳化与侵蚀作用等, 严重损害了沥青混合料的TSR; 单掺聚酯纤维时, 对焚烧飞灰/沥青混合料的冻融劈裂强度提高程度有限且难以弥补焚烧飞灰对TSR造成的影响, 单独采用水泥封装焚烧飞灰时, 对可溶盐溢出引起的TSR性能恶化的缓解效果亦有限, 而在两者的共作用下TSR改善效果显著且满足规范要求; 对于质量比分别为1:0.25, 1:0.5, 1:1, 1:1.5的焚烧飞灰/水泥颗粒, 在聚酯纤维的叠加作用下, TSR满足规范要求的焚烧飞灰最大容许掺量依次为0.71%, 1.82%, 2.24%, 3.36%; 在对焚烧飞灰/沥青混合料的TSR改善效果上, 聚酯纤维因桥连加筋效果显著而优于木质素纤维, 改性沥青因物理力学性能优势而优于普通沥青。

关键词: 道路工程; 生活垃圾焚烧飞灰; 沥青混合料; 聚酯纤维; 冻融劈裂比

中图分类号: U414.7⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2022)01-0017-07

Improvement Effect of Polyester Fiber on TSR of MSWI Fly Ash/Asphalt Mixture

LI Jing-ruo^{1,2}, LIU Rui-quan³, TANG Bo-ming¹, JIANG Li-xin⁴, ZHAO Zhan-wei⁵

- (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 400060, China;
4. State Environmental Protection Engineering Center for Waste Combustion and Recycle, Chongqing Sanfeng Environmental Industrial Group Co., Ltd., Chongqing 400084, China;
5. Chongqing Chongqing-Guizhou Expressway Co., Ltd., Chongqing 404100, China)

Abstract: In order to alleviate the influence of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash on the freeze-thaw splitting strength of asphalt mixture, polyester fiber is used as additive in MSWI fly ash / asphalt mixture depends on the effect of its bridging reinforcement, toughening and cracking resistance. The improvement effects of freeze-thaw split strength of MSWI fly ash/asphalt mixture are compared and analyzed

收稿日期: 2020-05-06

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)

作者简介: 李菁若(1988-), 女, 河南商丘人, 博士研究生, 高级工程师。(lijingruo@cmhk.com)

by methods of single-blending polyester fiber and the combined action of polyester fiber and cement granulating, and the superposition effects of different fiber and asphalt types are studied. The result shows that (1) MSWI fly ash contains soluble salts (such as chloride and sulfate, etc.), swelling products that react with water (such as CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, etc.), and low-valent cations (such as Na^+ , K^+ , etc.), which can cause crystal expansion at low temperature, increase in solid volume during hydration, and emulsification and erosion caused by contact with asphalt membrane, which seriously damage the *TSR* of asphalt mixture. (2) Adding polyester fiber alone can not greatly improve the freeze-thaw split strength of MSWI fly ash/asphalt mixture, and it is difficult to make up for the influence of incineration of fly ash on *TSR*, the performance degradation of *TSR* caused by the overflow of soluble salt can not be alleviated only by using cement to encapsulate MSWI fly ash. However, under the combined action of both, the *TSR* improvement effect is significant and meets the specification requirements. (3) For the MSWI fly ash/cement particles with mass ratio of 1:0.25, 1:0.5, 1:1, 1:1.5 respectively, under the superimposed effect of polyester fiber, the maximum allowable dosage of MSWI fly ash that make *TSR* meet the requirements of the specification is 0.71%, 1.82%, 2.24%, and 3.36% in order. (4) In terms of improving the *TSR* of the MSWI fly ash/asphalt mixture, polyester fiber is superior to lignin fiber due to its significant bridging reinforcement effect, and modified asphalt is superior to ordinary asphalt due to its advantages in physical and mechanical properties.

Key words: road engineering; municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash; asphalt mixture; polyester fiber; freeze-thaw split strength ratio

0 引言

目前,生活垃圾焚烧飞灰(简称焚烧飞灰)国内的处置方法主要有进入危险废弃物填埋场、经稳定固化后进入卫生填埋场以及进入水泥窑协同处置^[1-2]。其中危险废弃物填埋场数量有限,选址困难,而且不符合“无害化、减量化、资源化”的发展策略;焚烧飞灰经固化后进入卫生填埋场存在浸出毒性试验难以满足标准的情况,给环境和人体健康埋下安全隐患,而且越来越多的生活垃圾以焚烧方式进行处理,卫生填埋场即将出现容量过饱和的窘况;水泥窑协同处置焚烧飞灰不仅受水泥产能的影响,而且处置焚烧飞灰的量比较少,更会造成水泥质量的不稳定。国外发达国家处置焚烧飞灰的典型方法有德国的矿井深埋法、日本的高温熔融法、美国的焚烧飞灰炉渣混合处置法等^[3-4]。然而,目前国内外垃圾焚烧飞灰的处置方法均存在一定的局限性,寻找新的焚烧飞灰处置方法十分有必要,而焚烧飞灰的资源化利用将是垃圾焚烧行业可持续发展的必然趋势^[5]。对焚烧飞灰的资源化利用需要考虑以下3个因素:焚烧飞灰的物理化学性质是否适合资源化处置;经资源化处置后的产品是否具有良好性能、实用性、市场可行性和经济性;资源化处置手段能否对焚烧飞灰起到稳定作用。鉴于焚烧飞灰本身的理化性质,目前研究和应

用较多的资源化方法是用于建筑材料,如将焚烧飞灰作为替代原料生产水泥、陶瓷、砖等,另外焚烧飞灰还可作为骨料或填料用于路基、路面中,或者作为土壤改良剂和吸附材料等^[6-14]。

本研究将焚烧飞灰作为道路材料运用到沥青路面中,一方面拟利用沥青良好的黏结力裹覆、稳定焚烧飞灰;另一方面拟将焚烧飞灰建材化,实现其资源化利用价值。根据前期的试验研究^[15-16]得知焚烧飞灰对沥青路面路用性能的影响最突出的是冻融劈裂强度,而影响冻融劈裂强度最关键的因素是焚烧飞灰中高含量的可溶盐。因此,为真正实现焚烧飞灰的脱“危”与资源化利用,势必解决焚烧飞灰对沥青路面路用性能的影响,如提高沥青混合料自身强度来抵抗焚烧飞灰的不良影响,或者对焚烧飞灰采取合适的预处理方法,降低不良组分可溶盐的溶出。本研究采用添加纤维的方法来提高焚烧飞灰沥青路面整体强度的思路,来间接改善焚烧飞灰/沥青混合料的冻融劈裂强度。纤维具有加筋、桥连、增韧、阻裂、自愈等作用,能显著地改善沥青路面的力学性能,有效阻止或延缓反射裂缝的发展,延长路面使用寿命2倍以上^[17]。

1 试验部分

1.1 原材料

焚烧飞灰由重庆同兴垃圾焚烧发电厂提供,为

灰色至灰白色的粉末状颗粒, 其中 0.6 mm 筛孔通过率为 100%, 0.15 mm 筛孔通过率为 90.1%, 0.075 mm 筛孔通过率为 79.3%; 焚烧飞灰表观密度为 2.624 g/cm^3 , 氯离子含量为 26.8%, 其余化学组成如表 1 所示。水泥采用 42.5 级普通硅酸盐水泥, 性质满足规范要求。聚酯纤维产自山东泰安纤维公司, 技术指标如表 2 所示。矿粉采用石灰石矿粉; 集料取自重庆某沥青拌和站的石灰岩热矿料, 集料规格为 0~3, 3~6, 6~11, 11~17, 17~22 mm, 各档集料掺配比例如表 3 所示, 其中聚酯纤维掺量为沥青混合料总质量的 0.3%, 最佳油石比为 4.8%。

表 1 焚烧飞灰的主要化学组成

Tab. 1 Main chemical composition of MSWI fly ash

氧化物种类	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
含量/%	28.1	11.2	3.7	3.6	2.3
氧化物种类	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	ZnO
含量/%	3.9	8.3	1.4	6.9	0.49

表 2 聚酯纤维的技术指标

Tab. 2 Technical indicators of polyester fiber

纤维名称	公称长度/ mm	单丝直径/ μm	外观合格 率/%	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
聚酯纤维	3	10	100	2.415

表 4 原样飞灰/聚酯纤维改性沥青混合料的 TSR

Tab. 4 TSRs of original fly ash/polyester fiber modified asphalt mixture

飞灰类型	0.3 mm 聚酯纤维 掺量/%	沥青品种	油石比/%	焚烧飞灰掺量/%	冻融前劈裂 强度/MPa	冻融后劈裂 强度/MPa	冻融劈裂 强度比/%
—	—	SBS 改性沥青	4.4	0	0.790 1	0.670 6	84.9
原样飞灰	—	SBS 改性沥青	4.4	0.5	1.014 6	0.623 6	61.5
—	0.3	SBS 改性沥青	4.8	0	0.845 1	0.751 3	88.9
原样飞灰	0.3	SBS 改性沥青	4.8	0.5	0.820 2	0.646 5	78.8

从表 3 可知, 原样飞灰直接加入到改性沥青混合料中, 即便掺量仅占改性沥青混合料总重量的 0.5%, 冻融劈裂强度比 (TSR) 也大大降低到 61.5%, 远小于规范要求值 ($\text{TSR} \geq 80\%$)。这是因为焚烧飞灰中含有高达 26.8% 的可溶盐, 且大部分为可溶氯盐, 还有一小部分为可溶硫酸盐, 除此之外焚烧飞灰中还含有游离 CaO 与熟石灰 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等遇水 (或空气) 反应能够产生固相体积膨胀的物质, 因此在冻融劈裂试验的冷冻降温过程中, 硫酸盐首先结晶析出, 然后随着混合料孔隙内溶液的结冰, 水盐浓度不断增高, 氯盐也开始不断在混合料内部

表 3 AC-20C 型聚酯纤维/沥青混合料的矿料掺配比例

Tab. 3 Mineral ratio of AC-20C polyester fiber/asphalt mixture

材料名称/mm	0~3	3~6	6~11	11~17	17~22	矿粉
掺配比例/%	25	6	19	31	15	4

1.2 聚酯纤维型焚烧飞灰/沥青混合料的制备过程

先将各档矿料与聚酯纤维混合, 干拌 30 s; 然后添加沥青, 湿拌 90 s; 最后添加矿粉, 再拌和 90 s。其中焚烧飞灰若以原样飞灰粉体的形式添加到聚酯纤维沥青混合料中, 则以等量取代矿粉的形式添加, 且其加热温度、加热时间、添加次序同矿粉; 若以焚烧飞灰/水泥颗粒的形式添加到聚酯纤维沥青混合料中, 则以 0.6~2.36 mm 的颗粒等量代替 0~3 mm 的石灰岩细集料的形式添加, 且其加热温度、加热时间、添加次序同矿料。另外, 焚烧飞灰/水泥颗粒的制备工艺为: 首先将焚烧飞灰与水泥按照一定的质量比混合均匀, 添加适量水搅拌均匀, 然后将焚烧飞灰/水泥浆体养生 7 d, 最后破碎成 <4.75 mm 的焚烧飞灰/水泥颗粒。

2 结果与讨论

2.1 聚酯纤维对原样飞灰/沥青混合料 TSR 的影响

将原样飞灰以等量取代矿粉的形式掺加到 AC-20C 型聚酯纤维改性沥青混合料中, 冻融劈裂试验结果如表 4 所示。

聚集并结晶, 产生体积膨胀, 于混合料内部形成盐胀应力, 使得混合料内部出现微细裂缝, 进而降低混合料的劈裂强度。另外, 可溶盐的结晶产物也会填充在混合料微裂缝中, 从而降低了沥青混合料的自愈合能力, 进一步形成微裂隙通道, 为水分及其他水溶液的侵入提供了可能。之后, 在上述微裂隙通道下, 水分侵入, 被沥青包裹的焚烧飞灰因其中的游离 CaO 或 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等遇水反应物具备了水化反应的条件而逐步水化, 进一步产生体积膨胀, 进一步胀裂微裂隙, 裂缝得到发展, 混合料强度受到影响而再次降低^[18-21]。再者, 包覆在沥青膜中的焚烧

飞灰与沥青直接接触,可溶盐中的低价阳离子如 Na^+ 能够与沥青形成极不稳定的化学吸附层,降低沥青与集料的黏结力。

当掺入0.3%的聚酯纤维后,焚烧飞灰/沥青混合料的 TSR 有所提高(TSR 为78.8%),提高率为28.1%。这是因为掺入聚酯纤维后,一方面沥青混合料的最佳油石比增加了(增加量为0.4%),使得混合料颗粒间的沥青膜厚度增大,同时由于聚酯纤维对沥青轻质组分的吸附作用,使得矿料颗粒表面结构沥青厚度增加,从而有效改善了沥青与矿料间的界面结合条件,界面黏结力得到增强,因此在水分离作用、焚烧飞灰中的可溶盐对沥青的乳化作用、可溶盐结晶膨胀作用等外力作用下则需要更大的界面能来破坏沥青与矿料间的黏结;另一方面,聚酯纤维均匀分散在沥青混合料中,形成空间网状结构,不仅能够增加矿料间的内摩阻角,还可以承担、传递与分散外力荷载,减缓应力集中现象,发挥桥连加筋、增韧阻裂的作用,从而提高了沥青混合料的自身强度^[17-19]。

然而,即便添加了聚酯纤维之后,焚烧飞灰/沥青混合料的 TSR 虽然得到改善,但相比于不添加焚烧飞灰的聚酯纤维沥青混合料,其 TSR 仍然下降了11.4%,且降低后的 TSR 值不满足规范要求。可见,添加聚酯纤维后,聚酯纤维虽然能够补偿原样飞灰的化学组分对沥青混合料冻融劈裂强度的损伤作用,但是从试验结果上也显露了聚酯纤维的增黏、桥连加筋、增韧阻裂等效果并没有完全地平衡原样飞灰中可溶盐、遇水膨胀物质等对沥青混合料劈裂强度的降低作用。因此,原样飞灰在AC-20C型聚酯纤维改性沥青混合料的应用尚需进行进一步的预处理。

2.2 聚酯纤维与造粒预处理共同作用对焚烧飞灰/沥青混合料 TSR 的影响

采用无机胶凝材料如水泥对焚烧飞灰进行造粒预处理,以降低焚烧飞灰中可溶盐的溶出以及焚烧飞灰与沥青直接接触的面积或概率。将焚烧飞灰/水泥颗粒以等量取代石灰岩细集料的形式掺加到AC-20C型聚酯纤维改性沥青混合料中,进行冻融劈裂试验,结果如图1所示。

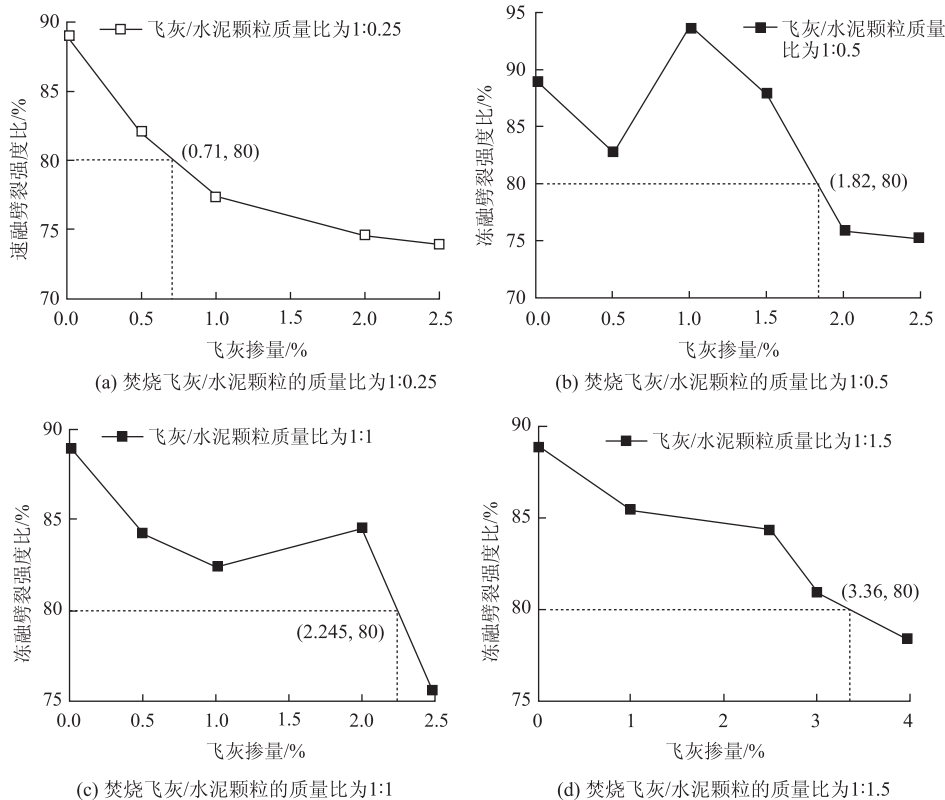


图1 焚烧飞灰/水泥颗粒聚酯纤维改性沥青混合料的 TSR

Fig. 1 $TSRs$ of MSWI fly ash/cement particle polyester fiber modified asphalt mixture

从图1可知,焚烧飞灰经过水泥造粒后,将不同质量比的焚烧飞灰/水泥颗粒添加到聚酯纤维沥青混合料中,混合料的 TSR 均得到改善。若以满足规

范要求为依据,随着水泥质量比的增加,焚烧飞灰/水泥颗粒在聚酯纤维改性沥青混合料中的最大容许掺量依次增加,折合成焚烧飞灰的掺量分别为

0.71%, 1.82%, 2.24%, 3.36%。这说明在聚酯纤维沥青混合料中, 叠加水泥胶凝材料对焚烧飞灰的固结造粒作用之后, 能够有效减弱焚烧飞灰中可溶盐对沥青混合料水稳定性能的影响, 降低焚烧飞灰与沥青混合料直接接触的概率, 且水泥用量越多, 对焚烧飞灰的封装效果越好。然而水泥造粒的叠加效应也是有限度的, 对于每一个质量比的焚烧飞灰/水泥颗粒, 随着焚烧飞灰/水泥颗粒掺量的增加, 聚酯纤维沥青混合料的 TSR 均呈现递减的趋势。这是因为随着焚烧飞灰掺量的增多, 焚烧飞灰/水泥颗粒中可溶盐的含量也随之增多, 增大了可溶盐从焚烧飞灰/水泥颗粒中浸出的可能性, 从而在冻融劈裂的过程中增加了可溶盐的溶解-结晶膨胀损伤以及乳化作用、腐蚀作用等对沥青与集料黏附性的侵蚀作用^[15-16]。

采用水泥单独对焚烧飞灰进行造粒后, 在不添加聚酯纤维的情况下, 沥青混合料的 TSR 结果如表 5 所示。从表 5 可知, 当将质量比为 1 : 0.25 的焚烧飞灰/水泥颗粒等量取代石灰岩细集料掺加到改性沥

青混合料中, 即便焚烧飞灰的掺量低至 0.5%, 沥青混合料 TSR 也不满足规范要求 (为 67.1%); 当在焚烧飞灰/水泥颗粒中依次增加水泥的用量, 如依次添加 50%, 100%, 150% 的水泥分别对焚烧飞灰进行造粒, 即便焚烧飞灰/水泥颗粒中水泥质量分数高达 150%, 将其取代石灰岩细集料掺加到改性沥青混合料中, 2% 焚烧飞灰掺量的沥青混合料 TSR 亦不满足规范要求 (为 78.6%), 而将 3% 的该水泥颗粒添加到聚酯纤维改性沥青混合料中时, 其 TSR 满足了规范要求 (为 80.9%)。这说明单独采用水泥对焚烧飞灰进行造粒处理时, 水泥对焚烧飞灰的封装效果有限, 封装效果体现在水泥水化过程中焚烧飞灰的可溶盐组分如硫酸盐、氯盐分别与水泥硅酸钙、铝酸钙发生反应生成钙矾石、Friedel 盐等, 从而化学固化可溶盐离子, 另外可溶盐离子也会以物理固化的形式吸附在水泥水化产物 C-S-H 凝胶结构上, 然而焚烧飞灰中可溶盐组分含量高, 难以全部被固化, 因此处于游离状态的可溶盐在冻融过程中仍能损害沥青混合料的 TSR。

表 5 水泥造粒与聚酯纤维对焚烧飞灰/沥青混合料 TSR 的影响

Tab. 5 Influence of cement granulation and polyester fiber on TSR of MSWI fly ash/asphalt mixture

飞灰类型	0.3 mm 聚酯纤维掺量/%	沥青品种	油石比/%	焚烧飞灰/水泥颗粒掺量/%	折合成焚烧飞灰的掺量/%	冻融前劈裂强度/MPa	冻融后劈裂强度/MPa	冻融劈裂强度比/%
焚烧飞灰/水泥颗粒 (质量比为 1 : 0.25)	—	SBS 改性沥青	4.4	0.625	0.5	0.836 5	0.561 3	67.1
焚烧飞灰/水泥颗粒 (质量比为 1 : 0.5)	—	SBS 改性沥青	4.4	1.5	1	0.876 4	0.627 5	71.6
	—	SBS 改性沥青	4.4	3	2	0.860 0	0.570 3	66.3
	—	SBS 改性沥青	4.4	2	1	0.847 0	0.635 4	75.0
焚烧飞灰/水泥颗粒 (质量比为 1 : 1)	—	SBS 改性沥青	4.4	4	2	0.987 4	0.780 1	79.0
	0.3	SBS 改性沥青	4.8	4	2	0.988 1	0.835 2	84.5
焚烧飞灰/水泥颗粒 (质量比为 1 : 1.5)	—	SBS 改性沥青	4.4	5	2	0.922 6	0.725 2	78.6
	0.3	SBS 改性沥青	4.8	7.5	3	0.863 0	0.697 9	80.9

在水泥胶凝材料对焚烧飞灰的包裹、密封作用的基础上, 进一步叠加纤维的增黏、桥连加筋、增韧阻裂作用, 在两者的双重作用下能够有效改善焚烧飞灰中可溶盐及遇水反应膨胀物等不利因素对沥青混合料 TSR 的影响。

2.3 纤维种类对造粒飞灰改性沥青混合料 TSR 的影响

采用木质素纤维、聚酯纤维两种纤维对比研究纤维种类对焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料水稳定性的改善效果。冻融劈裂试验结果如表 6 所示。

表 6 掺加不同种类纤维的焚烧飞灰/水泥颗粒改性沥青混合料的 TSR

Tab. 6 TSRs of MSWI fly ash/cement particles modified asphalt mixture mixed with different kinds of fiber

焚烧飞灰类型	纤维掺量/%		沥青品种	油石比/%	焚烧飞灰/水泥颗粒掺量/%	折合成焚烧飞灰的掺量/%	冻融前劈裂强度/MPa	冻融后劈裂强度/MPa	冻融劈裂强度比/%
	木质素纤维	聚酯纤维							
焚烧飞灰/水泥颗粒 (质量比为 1 : 1)	0.3	—	SBS 改性沥青	4.8	4	2	0.948 1	0.663 9	70.0
	—	0.3	SBS 改性沥青	4.8	4	2	0.988 1	0.835 2	84.5

从表 6 可知,在其他条件相同而所用纤维种类不同时,焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料的 TSR 显著不同,添加木质素纤维的焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料 TSR 比添加聚酯纤维的焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料 TSR 降低了约 17.2%,且不满足规范要求 ($TSR \geq 80\%$),说明了絮状木质素纤维未能有效弥补由于焚烧飞灰可溶盐的溶解-结晶膨胀、低价阳离子的乳化作用、电化学腐蚀以及遇水反应物的水化膨胀等对沥青与集料黏附性的侵蚀作用而导致的沥青混合料劈裂强度的损失;而聚酯纤维对沥青混合料的加筋与增韧作用强于木质素纤维,其沥青混合料冻融前与冻融后劈裂强度均高于木质素纤维,且 TSR 高达 84.5%,满

足规范要求。这是因为絮状木质素纤维长径比较小,在矿料间易团聚,分散不均匀,基本起不到桥连加筋的作用,而聚酯纤维比絮状木质素纤维的长径比大,搭接和桥连作用比较明显,能够起到较好的搭接加筋的增强效果。因此,应选用聚酯纤维来增强焚烧飞灰/水泥颗粒改性沥青混合料的强度。

2.4 沥青种类对聚酯纤维/造粒飞灰沥青混合料 TSR 的影响

采用 SK70#沥青、SBS 改性沥青两种沥青,在同一级配类型、同一矿料级配、同一油石比下对比研究聚酯纤维/造粒飞灰沥青混合料中沥青种类的适用性。冻融劈裂试验结果如表 7 所示。

表 7 不同沥青种类下的焚烧飞灰/水泥颗粒聚酯纤维改性沥青混合料的 TSR

Tab. 7 $TSRs$ of MSWI fly ash/cement particle polyester fiber modified asphalt mixture with different types of asphalt

焚烧飞灰类型	聚酯纤维 掺量/%	沥青品种	油石比/ %	焚烧飞灰/水泥 颗粒掺量/%	折合成焚烧 飞灰的掺量/%	冻融前劈裂 强度/MPa	冻融后劈裂 强度/MPa	冻融劈裂 强度比/%
焚烧飞灰/水泥颗粒	0.3	SBS 改性沥青	4.8	4	2	0.988 1	0.835 2	84.5
(质量比为 1:1)	0.3	SK70#沥青	4.8	4	2	0.774 2	0.516 8	66.8

从表 7 可知,在其他条件相同而所用沥青种类不同时,焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料的 TSR 亦显著不同,如使用 SK70#沥青作胶结料的焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料 TSR 比使用 SBS 改性沥青作胶结料的焚烧飞灰/水泥颗粒沥青混合料 TSR 降低了约 20.9%,且不满足规范要求 ($TSR \geq 80\%$)。这是因为 SBS 改性沥青是在原有的基质沥青的基础上加入了热塑性弹性体 SBS 改性剂。SBS 改性剂是以丁二烯和 1,3-苯乙炔单体通过阴离子聚合制得的共聚物,其中聚丁二烯具有较好的弹性和抗疲劳性能,SBS 改性剂熔入沥青后,端基转化并流动,中基吸收沥青的软沥青组分,形成海绵状材料,体积增大许多倍,冷却以后,端基再度硬化,且物理交联,使中基嵌段进入具有弹性的三维网状中。因此 SBS 改性剂在加热时能够呈塑性流动状态,将 SBS 改性剂加入沥青中,能够有效改善基质沥青的物理力学性能。因此,在油石比一定时,SBS 改性沥青混合料试件冻融前与冻融后劈裂强度均高于普通沥青混合料试件的强度,且 TSR 高达 84.5%,满足规范要求。

3 结论

(1) 分析了原样飞灰对沥青混合料 TSR 影响的原因,主要是因为原样飞灰的可溶盐如氯盐、硫酸盐,在低温下结晶膨胀,不仅产生微裂缝,结晶体

还可以填充在微裂缝中,降低沥青混合料的劈裂强度与自愈合能力;低价阳离子如 Na^+ , K^+ 等,能够对沥青膜产生乳化、侵蚀等作用,降低沥青与集料间的界面黏结力;另外,游离 CaO 或 $Ca(OH)_2$ 等遇水反应物,遇水水化固相体积膨胀,促使微裂缝进一步发展导致沥青混合料强度进一步损失。

(2) 对比分析了聚酯纤维与水泥造粒分别单独作用与共作用对焚烧飞灰/沥青混合料 TSR 的改善效果。聚酯纤维或者水泥造粒单独作用下对焚烧飞灰/沥青混合料的 TSR 改善效果有限,两者共同作用下 TSR 改善效果显著,其中聚酯纤维发挥了桥连加筋、增韧阻裂的效果,水泥造粒预处理实现了对焚烧飞灰的包裹、密封作用,降低了焚烧飞灰中可溶盐的溶出率以及焚烧飞灰与沥青直接接触的面积。

(3) 絮状木质素纤维因长径比小,桥连加筋效果不明显;普通沥青因物理力学性能有限,强度增进效果不明显。所以在对焚烧飞灰/沥青混合料的 TSR 改善效果上,聚酯纤维增强效果优于木质素纤维,改性沥青增强效果优于普通沥青。

(4) 对于焚烧飞灰与水泥质量比分别为 1:0.25, 1:0.5, 1:1, 1:1.5 的焚烧飞灰/水泥颗粒,应用在聚酯纤维改性沥青混合料中,折合成焚烧飞灰的掺量时,焚烧飞灰最大容许掺量依次为 0.71%, 1.82%, 2.24%, 3.36%。

参考文献:

References:

- [1] QUINA M J, BORDADO J C M, QUINTA-FERREIRA R M. Chemical Stabilization of Air Pollution Control Residues from Municipal Solid Waste Incineration [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 179 (1): 382-392.
- [2] 郑元格, 沈东升, 陈志斌, 等. 固体废物焚烧飞灰水泥窑协同处置的试验研究 [J]. 浙江大学学报: 理学版, 2011, 38 (5): 562-569.
- ZHENG Yuan-ge, SHEN Dong-sheng, CHEN Zhi-bin, et al. Research on Disposal of Solid Waste Incineration Fly Ashes by Cement Rotary Kiln Co-processing [J]. Journal of Zhejiang University: Science Edition, 2011, 38 (5): 562-569.
- [3] WU H Y, TING Y P. Metal Extraction from Municipal Solid Waste (MSW) Incinerator Fly Ash-chemical Leaching and Fungal Bioleaching [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2005, 38 (6): 839-847.
- [4] KARLOY Z, MOHAI I, TOTH M, et al. Production of Glass-ceramics from Fly Ash Using Arc Plasma [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2006, 27 (2): 1721-1725.
- [5] AUBERT J E, HUSSON B, SARRAMONE N. Utilization of Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Fly Ash in Blended Cement Part 1: Processing and Characterization of MSWI Fly Ash [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 136 (3): 624-631.
- [6] LÓPEZ-ZALDÍVARA O, MAYOR-LOBOA P L, FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ B F, et al. Improved Cement Mortars by Addition of Carbonated Fly Ash from Solid Waste Incinerators [J]. Materiales de Construcción, 2015, 65 (319): 1-15.
- [7] XUE Y J, HOU H B, ZHU S J, et al. Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Ash in Stone Mastic Asphalt Mixture: Pavement Performance and Environmental Impact [J]. Construction and Building Materials, 2008, 23 (2): 989-996.
- [8] KAMON M, KATSUMI T, SANO Y. MSW Fly Ash Stabilized with Coal Ash for Geotechnical Application [J]. Journal of Hazardous Materials, 2000; 76 (2): 265-283.
- [9] AUBERT J E, HUSSON B, VAQUIER A. Use of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash in Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 34 (6): 957-963.
- [10] 环境保护部污染防治司, 巴塞尔公约亚太区域中心. 2013 年度巴塞尔公约亚太区域中心固体废物污染防治研究报告 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2015.
- Pollution Prevention and Control Department of Ministry of Environmental Protection, Basel Convention Regional Centre for Asia and Pacific. 2013 Report on Prevention and Control of Pollution by Solid Waste of Basel Convention Regional Centre for Asia and Pacific [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015.
- [11] 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 [J]. 中国公路学报, 2016, 29 (40): 14-21.
- TAN Wei, LI Jing-ruo, JI Wei, et al. Application of Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash in Asphalt Mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29 (4): 14-21.
- [12] 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 Jing-ruo, TAN Wei, ZHANG Dong-chang, 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.
- [13] 李达, 孔恒, 郭飞, 等. 垃圾焚烧水洗飞灰沥青混合料重金属浸出机理研究 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (8): 13-18.
- LI Da, KONG Heng, GUO Fei, et al. Study on Extraction Mechanism of Heavy Metal in Waste Incineration Washed Fly Ash Asphalt Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (8): 13-18.
- [14] 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. Study on Performance of Asphalt Mortar and Mixture Mixed with MSWI Fly Ash [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [15] 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 Jing-ruo, TAN Wei, ZHANG Dong-chang, 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.
- [16] 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.

- Yan'an Region [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2020, 46 (4): 143-149.
- [20] 中国民航机场建设集团公司空军工程设计研究局. 延安新区一期综合开发工程地基处理与土石方工程设计 [R]. 北京: 中国民航机场建设集团公司空军工程设计研究局, 2012.
- The Air Force Engineering Design & Research Bureau of China Airport Construction Group Corporation. Foundation Treatment and Earthwork Engineering Design of First Phase Comprehensive Development Project of Yan'an New District [R]. Beijing: The Air Force Engineering Design & Research Bureau of China Airport Construction Group Corporation, 2012.
- [21] 方祥位, 成培江, 申春妮, 等. 陕西蒲城 Q_2 黄土物质组成试验研究 [J]. 后勤工程学院学报, 2012, 28 (1): 1-6.
- FANG Xiang-wei, CHENG Pei-jiang, SHEN Chun-ni, et al. The Matter Composition Tests of Q_2 Loess in Pucheng, Shaanxi Province [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2012, 28 (1): 1-6.
- [22] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21 (1): 82-90.
- CHEN Zheng-han. Deformation, Strength, Yield and Moisture Change of a Remolded Unsaturated Loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21 (1): 82-90.
- [23] GB/T 50123—1999, 土工试验方法标准 [S].
- GB/T 50123—1999, Standard for soil Test Method [S].
- [24] 高登辉, 陈正汉, 郭楠, 等. 干密度和基质吸力对重塑非饱和黄土变形与强度特性的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (3): 736-744.
- GAO Deng-hui, CHEN Zheng-han, GUO Nan, et al. The Influence of Dry Density and Matric Suction on the Deformation and the Strength Characteristics of the Remolded Unsaturated Loess Soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (3): 736-744.
-
- (上接第 23 页)
- LI Jing-ruo, TAN Wei. Influence of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash on Freezing-thawing Splitting Tensile Strength Ratio of Asphalt Mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36 (1): 250-253.
- [17] 徐秀维. 聚酯纤维沥青混合料路用性能研究及改善机理分析 [J]. 公路工程, 2013, 38 (3): 219-221, 225.
- XU Xiu-wei. Study on Improvement Mechanism and Pavement Performance of Asphalt Mixture with Polyester Fiber [J]. Highway Engineering, 2013, 38 (3): 219-221, 225.
- [18] 熊锐. 盐富集条件下矿物复合纤维沥青混合料路用性能及腐蚀损伤研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
- XIONG Rui. Road Performance and Corrosion Damage of Mineral Composite Fiber Asphalt Mixture in Salt Enrichment Condition [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [19] 纪方利. 盐分对纤维沥青混合料水稳定性影响的试验研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- Ji Fang-li. Test Research of Influence about Water Stability of Fiber Asphalt Mixture by Salt [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016.
- [20] 张苛, 张争奇. 含盐高湿环境沥青混合料力学特性的劣化 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2015, 43 (8): 106-112.
- ZHANG Ke, ZHANG Zheng-qi. Deterioration of Mechanical Properties of Asphalt Mixture in Salty and Humid Environment [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2015, 43 (8): 106-112.
- [21] 吴金荣, 孙娣, 张经双, 等. 氯盐对纤维沥青混凝土马歇尔试验影响 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (34): 261-263, 275.
- WU Jin-rong, SUN Di, ZHANG Jing-shuang, et al. Influence of Chlorine Salt on Marshall Test of Fiber Reinforced Asphalt Concrete [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16 (34): 261-263, 275.