

废旧沥青混合料在路基路面中的应用

谢胜加^{1,2}, 于晓晓^{1,2}, 倪文全¹

[1. 上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海市 200433; 2. 上海绿色路面材料工程技术研究中心, 上海市 200433]

摘要: 废旧沥青混合料的使用响应了节能双碳的国家政策。道路、高速公路、机场等这些基础设施建设和拆除过程中会产生大量的废旧沥青混合料,其回收和再利用适应了节能与环保的政策需求,从而备受研究者们关注需要。介绍了废旧沥青混合料的定义、影响其使用效率的特性以及控制其回收的因素,总结并介绍了废旧沥青混合料的典型性能范围。结合废旧沥青混合料的特征,讨论了其在路基层和稳定土壤中的应用,并对其经济、环境效益以及可能的挑战进行了分析。

关键词: 废旧沥青混合料; 土木工程; 应用; 路基; 土壤

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)05-0325-06

Application of Waste Asphalt Mixture in Roadbed Pavement

XIE Shengjia^{1,2}, YU Xiaoxiao^{1,2}, NI Wenquan¹

[1. Shanghai Highway and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Green Pavement Materials, Shanghai 200433, China]

Abstract: The use of waste asphalt mixtures responds to the national policy of energy conservation and dual carbon. In the construction and demolition process of infrastructures such as roads, expressways, airports and so on, a large amount of waste asphalt mixture is generated. The recycling and reuse of the waste asphalt mixtures meet the policy requirements of energy conservation and environmental protection, which are paid attention by the researchers. The definition, the characteristics affecting the use efficiency and the factors controlling the recycling of waste asphalt mixtures are introduced, and the typical range of properties of waste asphalt mixtures are summarized and described. Combined with the characteristics of waste asphalt mixture, its application in the roadbed layer and soil stabilization is discussed, and its economic and environmental benefits as well as possible challenges are analyzed.

Keywords: waste asphalt mixture; civil engineering; application; roadbed; soil

0 引言

公路交通运输是我国综合交通运输体系中重要的组成部分,是我国基础设施建设长期稳定发展的基本保障,也是我国基建行业基础性、先导性、重要性的支柱。俗话说:“要想富,先修路”,由此可见公路交通运输对于我国经济发展有着关键地位与作用。截至2022年,我国公路总里程达到535.48万km,其中高速公路17.73万km,公路总里程相比上一年度增加了7.41万km^[1-3]。目前我国公路总里程位居世界第一,覆盖了98.6%的20万人口以上的城市和地级行政中心,随着城镇化进程的推进,我国公路的建设规模还将进一步扩大。

与此同时,公路的维修规模也日益壮大。在中国以及全世界各地,每年道路和高速公路的维护都会产生数百万吨的Reclaimed Asphalt Pavement(RAP)。仅在美国,每年RAP的估计数量就超过1亿t^[4],沉积和填埋是常用的处理方式。

随着能源危机的不断加剧,沥青、矿料等不可再生资源的大幅度减少,以及我国环保政策对石化资源开采的限制,用于道路沥青路面建设的材料逐渐减少,对废旧沥青混合料进行高效节能再利用成为未来发展的重要需求^[5-6]。这一举措也可以节省大量的天然骨料和优质材料,保护自然资源,为垃圾填埋场提供更多的空间^[7],是具有广泛的社会、技术、环境和经济价值的。在过去的几十年中,人们尝试通过再利用或回收技术,将它们应用于不同的土木工程建设中^[8-9]。

本文对RAP材料的定义和性能进行了综述和讨论,阐述了RAP材料在道路与土壤稳定土的应用。

收稿日期: 2024-02-28

基金项目: 上海市科委创新行动计划(23DZ1202105)

作者简介: 谢胜加(1990—),男,工学硕士,工程师,从事道路工程研究工作。

可以深化研究人员、工程师和承包商对RAP材料的认知,加强其在土木工程应用中的受关注度,以及拓宽对RAP材料循环利用的思路。

1 RAP的定义和性能

RAP是指来自破损路面的块状材料^[10],也可以被定义为铣刨的路面材料(沥青和集料)混合物^[11]。Imad等人指出^[12],沥青面层再生骨料就是RAP,它是从失效路面的表面获得的^[13]。此外,RAP也包括道路修复或养护而获得的老化沥青路面废弃物^[14-15]。

RAP的回收方法取决于使用需求和现有技术^[17]。从路面回收RAP有两个过程,即铣刨和破碎^[16]。破碎或铣刨方式和沥青混合料类型是影响RAP性能的主要因素^[14]。沥青混合料类型,包括水分含量、沥青含量和状况、RAP级配、骨料类型等^[16]。经济和环境因素同样影响着沥青材料的回收利用。RAP级配是直接影响RAP使用效率的重要因素,如RAP的耐久性、刚度和稳定性。该因素主要取决于RAP的来源或其特性。此外,铣刨技术,如铣刨速度、铣刨深度和铣刨温度以及现场条件也会影响RAP级配^[16]。

Mishra等人提出了典型的RAP性能指标范围^[18],其中典型的压实密度、含水量、沥青含量和CBR值分别为:1.5~1.95 g/cm³、3%~5%、5%~6%以及20%~25%。Gupta的研究表明RAP内摩擦角的变化为37°~47°^[19]。Xiao等人的统计研究表明RAP中沥青含量的常见范围为4.0%~7.5%^[16]。

图1至图5显示了RAP的比重、最大干密度、最佳含水量、CBR和沥青含量,数据来自不同国家的研究,包括美国、泰国、印度尼西亚、新加坡、智利、伊拉克、沙特阿拉伯、伊朗和尼日利亚。数据表明,RAP的基本特性因国家而异。RAP材料比土壤轻,它们的比重值范围为2.25~2.53,平均值为2.40。新加坡的RAP材料比重最大,尼日利亚的RAP材料比重最小。此外,RAP材料的密度值的变化非常大,而最佳含水量的变化较小,最小、最大密度分别为1 500、2 220 kg/m³。如图4所示,RAP压实特性差异大,这可归因于RAP主要成分的不同。来自伊拉克等一些国家的RAP材料的CBR值较低,而来自沙特阿拉伯等其他国家的RAP材料的CBR值较低,最小值、最大值分别为5%、25%,说明RAP材料的承载值差异大。这可能是由于骨料类型、RAP中沥青老化程度和含

量不同。如图5所示,不同国家RAP中沥青含量的常见范围为2.9%~7.5%,来自泰国和智利的RAP样品的沥青含量较高。

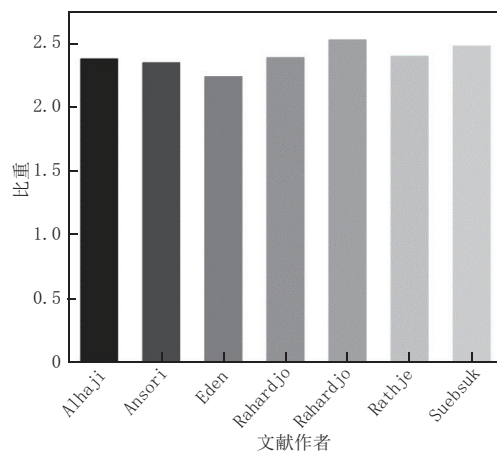


图1 废旧沥青混合料比重对比

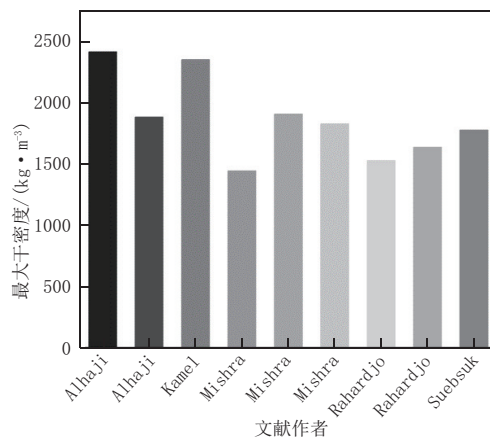


图2 废旧沥青混合料最大干密度对比

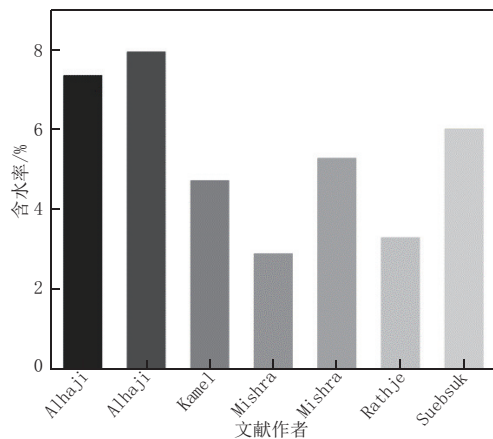


图3 废旧沥青混合料含水率对比

沥青路面层RAP料的回收通常采用路表铣刨或全深度铣刨来处理。铣刨需要使用铣床去除路面表面,铣床一次可去除50 mm的厚度。铣刨机可以配备各种类型的铣刨刀鼓^[21],铣刨滚筒上铣齿间距可以调整为3~25 mm。更多的铣齿可以进行更精细的铣刨作业,但其生产率偏低。铣齿间距越大,则生产率越高,但会产生更粗糙的表面^[20-23]。铣刨工艺具

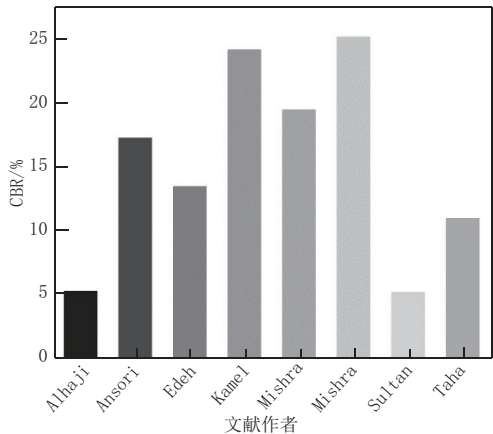


图4 废旧沥青混合料CBR对比

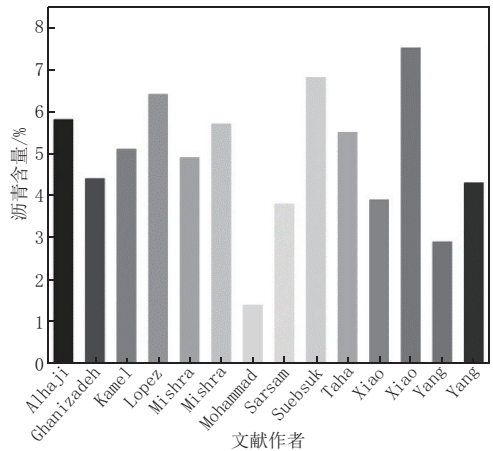


图5 废旧沥青混合料沥青含量对比

有一些明显优缺点,如铣刨可以产生一个粗糙的纹理表面,形成非常好的结合面,恢复路面纵横坡,加铺新面层后能形成更好的平整度;铣刨机通过安装在滚筒上旋转的铣齿冲击路面来去除路面层,能量消耗太大,集料颗粒的破碎导致铣刨后的级配比原路面级配细得多。并且,骨料铣刨分离的程度取决于骨料的硬度和脆性(抗冲击性)、沥青的硬度(主要取决于铣刨时路面的温度)以及铣刨机的铣刨速度和深度^[22]。

2 RAP 在道路中的应用

RAP可用于低等级道路基层的施工。Hack等人指出,回收的沥青材料可以用作基层材料,也可以用作路面材料^[25]。Papp等人指出RAP可以作为粒状路基材料^[26]。Taha等人的研究表明RAP与天然骨料的混合物可以作为良好的路基层^[27]。他们将天然骨料与五种不同含量的RAP混合,即20%、40%、60%、80%、100%。所用RAP的沥青含量为5.5%,CBR值为11%。其发现底基层和基层施工所需的最大RAP含量分别为60%和10%。而McGarrah等人认为,建造底基层所需的最大RAP含量为50%^[28]。另一方

面,Cooley等人使用25%、50%、75%和100%RAP来改善骨料的性能,发现CBR值与RAP含量成反比^[29]。Gregory等人研究了全深度回收RAP作为新的基层,此类结构的RAP含量通常在20%~50%^[30]。

RAP材料可以通过加入添加剂的方式提升其使用性能,如土壤、石灰、水泥、沥青乳液、再生剂等,还具有许多环境效益。Mohammad等人使用泡沫沥青处理RAP,并用于路基层,其推荐经过处理的RAP的沥青含量最低为1.5%^[31]。Suebsuk等人采用水泥处理的土壤和RAP制备混合料,研究表明,处理过的混合料可用于基层和底基层的施工^[32]。他们通过使用水泥提高土壤和RAP混合物的固化强度并减少其变形。根据Mishra的研究,用30%的RAP替代天然骨料可制备出适合基层与面层的混合料^[18]。Ansori等人将不同含量的RAP与天然骨料结合起来,生产出适合路基层使用的材料,其发现RAP和骨料的结合降低了比重和CBR值^[9]。将3%或9%的RAP与骨料组合,分别满足基层和底基层的要求。

RAP也可用于路堤、挡土墙、护坡、垃圾填埋系统、坑洞填充和排水工程^[9,13-15]。Yang等人研究了RAP对环境的影响,这项研究的结果证明,即使在酸性环境中,RAP也可以作为非结合材料使用^[15]。Troeger等人提出了一种经济的解决方案,即重复利用和回收RAP,其研究表明,在人迹罕至的道路、人行道以及其他农村和城市场所都是这些材料可能回收和再利用的场所^[33]。解决方案包括将现有道路铣刨到合适的深度,生产均匀级配的材料,铣刨破碎并平整面层,再与沥青乳液混合,然后碾压并形成面层。

RAP可作为骨料或沥青结合料用于沥青混合料中^[7,32,34,36]。沥青混合料主要包含骨料80%~95%,2%~8%的填料和3%~7%的结合料。在道路路面的建设中,沥青混合料面层的厚度可高达60 cm,需要大量的骨料和沥青结合料^[37]。RAP的资源再利用可以节约大量的物料资源,还有助于减少沥青混合料设计中沥青和天然骨料的消耗^[42-45]。此外,在沥青混合料中添加RAP可以降低拌和温度,降低沥青用量以及降低集料的用量^[38-41]。RAP的加入有助于提高间接拉伸强度和刚度,降低水敏感性,并增加抗车辙性和抗疲劳性。此外,在沥青混合料应用中使用RAP材料具有许多环境效益,包括减少这些材料和能源需求的影响。

在混合料的设计中,需全面考虑多个关键因素,

首先现场RAP的含水量。其次RAP沥青结合料的活性,以及RAP的级配和来源^[16,44]。Swiertz等人认为细粒的RAP可以直接用于沥青砂浆的制备,其性能并不会发生较大影响^[45]。

在一些国家,对于不同道路层级,RAP掺量不同。面层中RAP的最大含量为10%~30%,而黏结层和基层中的RAP含量为50%以上均可。对于使用Superpave混合料的国家,面层中最大允许的RAP含量为10%~15%,其他层中的最大允许含量为50%^[46]。在印度尼西亚,允许在热拌沥青设计中使用的RAP上限为15%^[47]。在美国,传统上20%的RAP用于耐磨层,而黏结层中RAP的含量为30%^[48-49]。而一些欧洲国家允许更多RAP掺量。在这些国家,50%的RAP被允许用于新的基层^[42,50]。López等人推荐使用44%的RAP含量来建造温拌沥青路面^[51]。赵嘉等^[67]用RAP与铁尾矿复合改进水泥稳定碎石的力学性能,其推荐的RAP掺量可达50%。赵国民等^[68]认为水泥和RAP的掺量分别为6%与15%可用于道路基层材料使用。同样,李盼等^[69]采用了单因素分析方法,认为水泥与RAP混合后,通过合理的养护手段,也能用于道路工程。赵东东^[70]认为可以利用增韧剂对废旧塑料改性沥青混合料进行改善,可合理提升其性能。邱川等^[71]研究了大比例RAP掺量的

冷再生混合料,认为合适的乳化沥青与水泥可以满足大掺量RAP的需求,并且保证性能满足规范要求。张雄等^[72]对10%、30%、50%三个回收料掺量制备AC-16热再生沥青混合料进行研究,认为随着RAP掺量增加,热其高温性能逐渐提高,低温性能逐渐降低,水稳性能先提高后降低。王锦辉等^[73]也对高掺量RAP的温拌技术进行了研究,认为含有35%RAP的温拌沥青混合料提高了抗永久变形能力,采用更高比例的RAP和温拌技术,可提高抗裂性能。詹世佐等^[74]认为再生沥青混合料试验试件的厚度变化对抗压强度和劈裂强度影响较大,具有明显的尺寸效应。王业飞等^[75]为提高RAP的利用比例采用不同加热方式(电热鼓风加热、微波加热)和不同搅拌方式(振动搅拌、传统搅拌)制备再生沥青混合料,与传统的方式对比,认为搅拌方式相较于加热方式对再生沥青混合料性能的影响更为显著,微波加热和振动搅拌均能改善再生沥青混合料内部孔隙分布状况。

3 RAP在土壤稳定中的应用

目前文献探索了RAP稳定土壤的可能性,一些工作研究了单独使用RAP的潜力,而其他工作则使用了含有RAP的混合物^[39,51-54]。初步总结了路基中RAP最大使用掺量如表1所列。

表1 路面结构中RAP掺量分布

路面结构	最大RAP掺量/%									
	Ansori	Alhaji	Cavalli	McGarrah	McDaniel	Mishra	Mohajeri	Mustapha	Suebsuk	Taha
路基	—	30	—	—	—	—	—	40	50	—
底基层	—	—	—	50	50	50	—	—	—	60
土基	9	—	50	—	10	30	50	—	—	10

Edeh等人对采用RAP和水泥来稳定的黏性土进行了研究,表明添加2%水泥的稳定土满足路面层数的要求^[35]。Suebsuk等人通过添加RAP和水泥,解决了泰国红土不稳定的问题,所用RAP含量为20%、40%、60%、80%^[32]。值得注意的是,RAP含量提高至50%时,土壤的最佳含水量降低,土壤与RAP混合物的强度随着水泥含量和养护时间的增加而增加。Ochepo等人认为RAP和甘蔗渣灰可以稳定路面施工的土壤,40%的RAP将土壤的干密度从1.77 g/cm³增加到1.79 g/cm³^[56]。添加4%的甘蔗渣灰分可将密度进一步提高至1.82 g/cm³,甘蔗渣灰含量为6~8%时可以提高土与RAP混合物承载力。Kamel等人评估了掺有RAP材料的路基土的加州承载比,所用RAP中沥青的含量约为5%,认为RAP的加入使最大干密

度从2.155 g/cm³提高到2.212 g/cm³,并将最佳含水量从5.8%降低到4.6%,CBR值均增加^[8]。Alhaji等人采用RAP稳定黏性土^[52],测定其压实度和强度,发现混合有30%RAP的土壤的最大密度从1 890 kg/m³增加到2 036 kg/m³,在此情况下,CBR值从11%增加到35%。Alhaji等人关于掺有RAP的低塑性黏土的研究表明,RAP改善了混合物的分级,提高了混合物密度^[53]。使土壤满足了底基层的要求,而基层的要求则需要再额外添加2%的水泥。然而,使用RAP材料稳定黏性土壤很大程度上受所用RAP中所含骨料类型的影响,使用高比重骨料RAP稳定的黏性土,其最大密度明显提高。

4 效益与挑战

RAP在沥青混合料中的应用带来了可观的环境

和经济效益^[58-59]。这主要是因为沥青混合料中,使用的原始骨料和沥青结合料数量减少导致材料成本的节约。环境效益则与原材料获取、加工和运输过程中碳排放和能耗的减少,不可再生资源需求的减少,填埋运输和废弃路面材料处置空间的减少有关^[22,60]。

此前,欧盟发布了一项准则,以促进包括RAP在内的废弃物的再利用。根据准则要求,欧盟成员国应采取措施支持材料产品的再利用,以实现高质量的回收。因此,资源的浪费程度被最小化,当材料达到生命周期结束阶段时,它将被重新利用,以进一步创造价值^[61-62]。2008—2014年,欧洲热拌(HMA)和温拌(WMA)沥青混合料的平均产量为3亿t/a^[63]。两项不同的研究表明,加入RAP的再生方案,成本得到节约,并且具有很大的环境效益。对于在新沥青混合料中100%掺入RAP,其节约成本可能高达70%^[64]。此外,RAP的应用也减少了原材料的开采。在碳排放和能源节约方面也具有一定收益。Zaumanis等^[65]通过对比不含RAP的混合料与含100%RAP及12%再生剂的混合料来估计排放和节能,相比于新HMA,含有100%RAP的HMA二氧化碳当量排放量节省了35%,能源需求节省了20%^[66]。

5 结 语

本文综述了废旧沥青混合料在道路和土壤稳定方面的应用,主要结论如下。

(1)RAP的选择及其使用效率,受其含水量、级配、骨料类型、沥青的含量类型和状况以及破碎技术的影响。

(2)RAP材料的利用方式涵盖各类土木工程应用,例如道路基层、面层、沥青混合料、路肩路堤等。

(3)建议RAP性能从低到高的典型通用范围如下:比重2.25~2.53;最大密度1 500~2 220 kg/m³;最佳含水量为3%~8%,CBR含量为5%~25%,沥青含量为2.9%~7.5%。

(4)可以采用添加剂(如土壤、石灰、水泥、沥青乳液、再生剂等)来恢复RAP的使用性能。

(5)环境和经济效益是RAP使用过程中值得关心的问题,其带来的效益是可观的。

参考文献:

- [1] 刘昭然.“十三五”时期我国综合交通投资和运输形势分析[J].综合运输,2021,43(2):31-35.
- [2] 欧国立,宁静.促进我国公路运输绿色低碳发展的政策与路径[J].可持续发展经济导刊,2022,37(7):39-42.
- [3] 姚晓光,许涛,王燕.沥青路面不同厂拌热再生方案经济环保性量

化评价[J].武汉大学学报(工学版),2021,54(12):1133-1139.

- [4] Chesner W H, Collins R J, Mackay M H. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction[J]. costs, 1998:110-119.
- [5] 赵丹.营口地区城市道路泡沫沥青再生技术的应用研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2015.
- [6] 李城.沥青路面工程就地冷再生施工技术应用研究.城市建设理论[J].2023,429(3):92-94.
- [7] Khatib J. Sustainability of Construction Materials[J]. 2009(20):211-220.
- [8] Kamel M A, Al-Bustami N M, Alsulami B T. Evaluation of the Suitability of Recycled Asphalt Pavement (RAP) for Subbases[J]. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2016, 6(5): 212-215.
- [9] Ansori M, Radam I F. The Use of Reclaimed Asphalt Pavement as a Foundation for Pavements Based On the Indonesian National Standard [J]. international journal of engineering research & applications, 2015, 5(2): 14-18.
- [10] Kearney, E. COLD MIX RECYCLING: STATE-OF-THE-PRACTICE (WITH DISCUSSION)[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1997, 66.
- [11] Cosentino P J, Kalajian E H, Shieh C, et al. Developing Specifications for Using Recycled Asphalt Pavement as Base, Subbase or General Fill Materials, Phase II[J]. California Bearing Ratio, 2003(30): 12436.
- [12] Al-Qadi I L. Reclaimed Asphalt Pavement—a Literature Review[J]. Cracking of Asphalt Concrete Pavements. 2016(6): 56-62.
- [13] Saud A. Improvement of the Mechanical Characteristics of Reclaimed Asphalt Pavement in Iraq[J]. 2013, 2(4):11439.
- [14] Rahardjo H, Satyanaga A, Leong E C, et al. Unsaturated properties of recycled concrete aggregate and reclaimed asphalt pavement[J]. Engineering Geology, 2013(161): 44-54.
- [15] Yang Q, Yin H, He X, et al. Environmental impacts of reclaimed asphalt pavement on leaching of metals into groundwater[J]. Transportation Research Part D Transport and Environment, 2020(85): 102415.
- [16] Xiao F, Yao S, Wang J, et al. A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement [J]. Construction and Building Materials, 2018, 180(AUG.20): 579-604.
- [17] Wilburn BDR, Goonan TG. Aggregates from natural and recycled sources[R]. Dublin:U.S. geological Survey, 1998.
- [18] Mishra B. A Study on Use of Waste Plastic Materials in Flexible Pavements[J]. 2017, 8(5): 310-314.
- [19] Kang D H, Gupta S C, Ranaivoson A Z, et al. Recycled Materials as Substitutes for Virgin Aggregates in Road Construction: I. Hydraulic and Mechanical Characteristics[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(4): 1265.
- [20] Cao R, Leng Z, Hsu S C. Eco-Efficiency Analysis on Asphalt Pavement Rehabilitation Alternatives: Hot In-Place Recycling (HIPR) and Milling and Filling (M&F)[J]. Deutsche Publications, 2017: 290.
- [21] Farooq M A, Mir M S, Sharma A. Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator[J]. Construction & Building Materials, 2018, 168(4): 61-72.
- [22] Randy C. West, Ph.D. Best Practices for RAP and RAS Management[J]. [2024-04-24].
- [23] Mallick R B, O'Sullivan K A, Tao M, et al. Why Not Use Rejuvenator for 100% RAP Recycling?[C]//Transportation Research Board Meeting.

- Washington DC:TRB, 2010.
- [24] João Santos, Ferreira A, Flintsch G, *et al.* A multi-objective optimization approach for sustainable pavement management in: Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure[J]. 2017.
- [25] Hack D R . Comparison of Commercial Mine Planning Packages Available to the Aggregate Industry[J]. 2011(10): 10124.
- [26] Papp WJ, Maher MH, Bennert TA, *et al.* Behavior of construction and demolition debris in base and subbase applications[C]//Recycled Materials in Geotechnical Applications. New York:ASCE, 1998.
- [27] Taha R, Ali G, Basma A, *et al.* Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate in Road Bases and Subbases[J]. Transportation Research Record, 1999(1652): 264-269.
- [28] Mcgarrah EJ . Evaluation of Current Practices of Reclaimed Asphalt Pavement/Virgin Aggregate As Base Course Material[J]. 2007(10):100246.
- [29] Cooley D. Effects of reclaimed asphalt on mechanical properties of base materials [D]. Brigham:Master Thesis, Brigham Young University, 2007.
- [30] Gregory E, Halsted PE. Using Cement to Reclaim Asphalt Pavement [C]//Toronto: Annual Conference of the Transportation Association of Canada, 2007, 1-20.
- [31] Mohammad L N, Corresponding P D, Murad A, *et al.* Louisiana Experience with Foamed Recycled Asphalt Pavement Base Materials[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2003, 1832(1): 12-16.
- [32] Suebsuk J, Suksan A, Horpibulsuk S .Strength assessment of cement treated soil-reclaimed asphalt pavement (RAP) mixture[J].International Journal of GEOMATE, 2014, 6(2): 878-884.
- [33] Troeger J, Widyatmoko I . Development in Road Recycling[C]//11th Annual International Conference on Pavement Engineering and Infrastructure. Nanchang:Civil Engineering Academy of Jiangxi Province, 2012.
- [34] Rathje E M, Rauch A F, Trejo D, *et al.* Evaluation of Crushed Concrete and Recycled Asphalt Pavement as Backfill for Mechanically Stabilized Earth Walls[J].General Information, 2006, 309(2): 5899 - 5904.
- [35] Edeh JE, Eberemu AO, Agnes O. Lateritic Soil Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement as Flexible Highway Pavement Materials [J].Advanced Materials Research, 2012(367): 3-11.
- [36] Mustapha AM, Jibrin R , Etsuworo NM, *et al.* Stabilization of A-6 Lateritic Soil using Cold Reclaimed Asphalt Pavement[J]. International Journal of Engineering and Technology, 2014, 52(4): 46-53.
- [37] A Y L, A P S, A M L, *et al.* Review on evolution and evaluation of asphalt pavement structures and materials[J]. 交通运输工程学报(英文版), 2020, 7(5): 27.
- [38] Widyatmoko D, Elliott R .Asphalt Pavement Recycling for Hong Kong [C]//Road Pavement Recycling Seminar. 2002.
- [39] Widyatmoko I . Mechanistic-empirical mixture design for hot mix asphalt pavement recycling [J]. Construction & Building Materials, 2008, 22(2): 77-87.
- [40] Carswell I, Taylor J H, Nicholls J C, *et al.* RECYCLING SURFACE COURSE MATERIALS BACK INTO THIN SURFACING[C]//4th Eurasphalt & Eurobitume Congress. 2008.
- [41] Hoyos L R, Puppala A J, Ordóñez C A . Characterization of Cement-Fiber-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates: Preliminary Investigation[J].Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(7): 977-989.
- [42] Shunyashree. Effect of use of recycled materials on indirect tensile strength of asphalt concrete mixes[J].International Journal of Research in Engineering and Technology, 2013, 2(13): 226-232.
- [43] 曾梦澜, 肖杰, 吴超凡, 等. 冷再生沥青混合料 RAP 含量对使用性能的影响[J]. 中南公路工程, 2007, 32(2): 27-31.
- [44] 严超君. RAP 温度对泡沫沥青冷再生配合比设计及路用性能的影响[J]. 公路工程, 2016, 41(3): 125-131.
- [45] 李东升. 高比例 RAP 厂拌热再生沥青混合料应用技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [46] Olsson K, Lillbroanda U, Redelius P . Improved cold recycling of asphalt[J].Highways & Transportation, 1999(1/2): 46.
- [47] Daniel, Swiertz, Enad, *et al.* Estimating the Effect of Recycled Asphalt Pavements and Asphalt Shingles on Fresh Binder, Low-Temperature Properties without Extraction and Recovery:[J].Transportation Research Record, 2018, 2208(1): 48-55.
- [48] Mcdaniel R, Nantung T. Research Pays Off: Designing Superpave Mixes with Locally Reclaimed Asphalt Pavement: North Central States Jointly Fund Study[J]. Tr News, 2005(239): 28-30.
- [49] Hansen K R, Copeland A, Ross T C. Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2016 (Information Series 138) 7th Annual Survey[C]. 2017.
- [50] Mase S C, Peng S L T . Improving the Selection of Virgin Binders for Recycled Hot Mixtures in Ontario [J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2015, 4(1): 47-59.
- [51] Maria Chiara Cavalli, Partl MN, Poulikakos LD .Measuring the binder film residues on black rock in mixtures with high amounts of reclaimed asphalt[J].Journal of Cleaner Production, 2017(2): 55.
- [52] López C, Gonzalez A, Thenoux G, *et al.* Stabilized emulsions to produce warm asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavements[J].Journal of Cleaner Production, 2019, 209(2): 1461-1472.
- [53] Alhaji MM .Laboratory and field evaluation of a-6 lateritic soil treated with reclaimed asphalt pavement and ordinary portland cement[J]. International Journal of Geomate, 2019(63): 86310.
- [54] Mustapha AM, Jibrin R, Etsuworo NM, *et al.* Stabilization of A-6 Lateritic Soil using Cold Reclaimed Asphalt Pavement[J]. International Journal of Engineering and Technology, 2014, 4(1): 51-57.
- [55] Plati C, Cliatt B .A Sustainability Perspective for Unbound Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) as a Pavement Base Material[J].Sustainability, 2018, 11(1):219-228.
- [56] Ochepo, Joshua. Stabilization of laterite soil using reclaimed asphalt pavement and sugarcane bagasse ash for pavement construction[J]. Journal of Engineering Research, 2014, 2(4): 1-13.
- [57] Alhaji MM, Musa A. Effect of Reclaimed Asphalt Pavement Stabilization on the Microstructure and Strength of Black Cotton Soil[J]. International Journal of Technology, 2018.435.
- [58] Glover C J, Martin A E, Chowdhury A , *et al.* Evaluation of Binder Aging and Its Influence in Aging of Hot Mix Asphalt Concrete: Literature Review and Experimental Design[J].asphalt hardening, 2009.
- [59] Zhang Y, Goulias D, Aydilek A . Sustainability evaluation of pavements using recycled materials[C]//The 10th International Conference on the