

新型高摩擦道路表面处治材料研究及应用进展

关博文^{1,2}, 郭乐^{1,3}, 薛兴杰^{1,2}, 姜艺², 李硕⁴, 丁冬海⁵

(1. 长安大学 交通铺面材料教育部工程研究中心, 陕西 西安 710064)

(2. 普渡大学理工学院, 美国印第安纳州 西拉法叶 47907)

(3. 东南大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189)

(4. 印第安纳州交通厅研究与发展部, 美国印第安纳州 西拉法叶 47907)

(5. 西安建筑科技大学材料学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 作为一种新型路面材料, 高摩擦道路表面处治 (high friction surface treatment, HFST) 材料由高耐磨集料和粘结剂组成, 用于解决传统路面材料修筑的弯道、长大纵坡等特殊路段因路面抗滑能力衰减过快导致的安全性问题。为了推动 HFST 技术在我国路面养护中的发展, 提高道路安全性, 降低养护投资成本, 回顾了相关学者对 HFST 材料抗滑性能的研究现状, 综述了高耐磨集料的物理、力学性能, 评价了 HFST 集料的耐磨特性, 分析了矿物组成对集料耐磨性能的影响, 阐明了高耐磨集料长期磨光机制; 概述了用于 HFST 的粘结剂性能, 分析不同类型环氧树脂粘结剂的适用性; 总结集料种类、集料粒径、集料掺配方式、粘结剂种类、厚度等 HFST 材料组成设计关键参数对其抗滑性能的影响规律, 提出了 HFST 材料组成建议; 总结分析了 HFST 试验路段长期抗滑衰变特性以及经济效益, 最后探讨了现有 HFST 研究存在的问题, 并对后续研究提出了建议。

关键词: 路面工程; 高耐磨集料; 表面处治材料; 组成设计; 长期抗滑性能

中图分类号: U416.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2022)10-0836-13

引用格式: 关博文, 郭乐, 薛兴杰, 等. 新型高摩擦道路表面处治材料研究及应用进展[J]. 中国材料进展, 2022, 41(10): 836-848.

GUAN B W, GUO L, XUE X J, *et al.* Research and Application Review on High Friction Surface Treatment Materials of Pavement[J]. Materials China, 2022, 41(10): 836-848.

Research and Application Review on High Friction Surface Treatment Materials of Pavement

GUAN Bowen^{1,2}, GUO Le^{1,3}, XUE Xingjie^{1,2},
JIANG Yi², LI Shuo⁴, DING Donghai⁵

(1. Engineering Research Center of Transportation Materials, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

(2. Polytechnic Institute, Purdue University, West Lafayette 47907, Indiana, USA)

(3. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

(4. Division of Research and Development of Indiana Department of Transportation, West Lafayette 47907, Indiana, USA)

(5. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: As a new type of pavement material, high friction surface treatment (HFST) materials is composed of high wear-resistant aggregate and polymer resin binder, which is used to solve the safety problems caused by the rapid attenuation of skid resistance of special sections such as curves and large longitudinal slopes built by traditional pavement materials. In

order to promote the development of HFST technology in pavement maintenance in China, improve road safety and reduce the cost of maintenance investment, the research status of skid resistance of HFST materials by relevant scholars are reviewed in this paper. Physical and mechanical properties of high wear-resistant aggregates are summarized, the wear resistance of HFST aggregates is evaluated,

收稿日期: 2020-11-25 修回日期: 2021-04-10

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目(20JY039)

第一作者: 关博文, 男, 1985年生, 副教授, 硕士生导师,

Email: guanbowen2001@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202011032

the influence of mineral composition on wear resistance is analyzed, and the long-term polishing mechanism of high wear-resistant aggregates is clarified. Properties of binders used for HFST are also mentioned, and the suitability of different types of epoxy resin binders is summarized. The influence of the key parameters of HFST material composition design on its anti-skid performance is analyzed, such as aggregate type, aggregate particle size, aggregate blending method, binder type, thickness, etc., and recommendations of HFST material composition are put forward. The long-term skid resistance attenuation characteristics and economic benefits of HFST test strips are presented as well. Finally, the existing problems of HFST studies and proposals for further research are discussed.

Key words: pavement engineering; high wear-resistant aggregates; surface treatment materials; composition and design; long-term skid resistance

1 前言

随着我国经济快速发展,高速公路建设得到了迅猛的发展,2020 年全国高速公路里程已达 16 万千米,位列世界第一。对已建高速公路服役情况调研发现,我国高速公路具有车速高、车流量大的特点,尤其是弯道、长大纵坡等特殊路段的高频服役和车轮荷载(尤其是重载车辆)加速了沥青路面的磨光和磨耗,使路面的抗滑能力迅速衰减,交通安全问题日益突出^[1]。在高速公路沥青路面表层材料的选择和设计过程中,需要综合考虑混合料的耐久性和表面耐磨性。提高路面抗滑能力,并在使用年限内维持抗滑性能的耐久性是我国高速公路建设面临的一个紧迫任务。

大量研究表明:高质量集料有助于维持沥青路面表面抗滑性能^[2,3]。国内传统研究成果强调优质玄武岩、花岗岩等传统天然高耐磨集料用于抗滑表层的优势,但经长期磨耗后其抗滑持久性表现不佳^[4-6]。国内外众多学者研究发现,传统薄层罩面技术可应用于高等级沥青或水泥混凝土路面的预防性养护,以及对其表面功能进行恢复,综合恢复原路面使用性能,但在提升及维持抗滑性能方面有所局限^[7-9]。

针对路面抗滑性不足或衰减过快的问题,高摩擦道路表面处治(high friction surface treatment, HFST)材料应运而生。HFST 材料是针对高速公路特殊路段(如隧道出入口、弯道、长大纵坡、桥面铺装等事故高发路段)路面表层使用,适用于新建路面或事故高发路段表面重建,这些特殊路段对抗滑尤其是抗滑持久性的要求远远超过常规的路面,传统薄层罩面技术一般无法达到其要求^[10]。HFST 材料在美国被定义为一种新兴材料,通过高耐磨集料与树脂或其他粘结剂组合而成(组成结构如图 1 所示),被认为是能够充分提高抗滑性的一种最佳表面处治材料,能有效减少事故伤亡并降低养护投资成本。为了解决现有高摩擦道路处治技术不足的问题,美国联邦公路局,交通运输安全协会,印第安纳州、伊利诺伊州、佛罗里达州等 20 个联邦、州的交通厅近年来(2012 年至今)分别立项对 HFST 技术开展了研究并应用,并取

得了显著的效果^[11]。为了推动 HFST 技术在我国路面养护中的发展,提高道路安全性,降低养护投资成本,本文系统总结了 HFST 原材料性能、HFST 配合比设计方法及抗滑性能影响因素,并对 HFST 试验段进行应用效果评价与经济社会效益分析,以期为我国新型沥青路面表层抗滑性能的提升与持久提供参考。

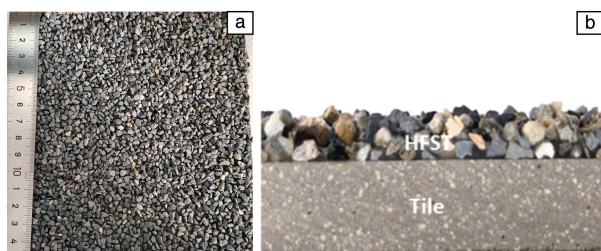


图 1 高摩擦道路表面处治(high friction surface treatment, HFST)材料结构示意图:(a)平面图,(b)截面图

Fig. 1 HFST structure schematic: (a) surface plan, (b) sectional plan

2 HFST 集料性能

2.1 集料基本物理、力学性能

HFST 材料一般由高耐磨集料和粘结剂组成,集料的物理、力学性能对 HFST 的抗滑性能有很大影响。常见的 HFST 集料有煅烧铝矾土、铁燧岩、燧石、花岗岩、玄武岩、白云岩、砂岩、钢渣等,其中最常用的是煅烧铝矾土,它是由铝矾土在 1450~1700 °C 高温下经煅烧形成的。目前国内仅对超薄磨耗层作出了相关技术要求,而尚未形成 HFST 材料的规范,为比较各规范间的差异,本文汇总了国内的《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)、《超薄磨耗层设计与施工技术规范》(DB21/T 1995—2012)、《公路沥青路面超薄磨耗层施工技术规范》(DB33/T 2113—2018)及美国宾夕法尼亚州交通厅(PennDOT)、北卡罗来纳州交通厅(NCDOT)、印第安纳州交通厅(INDOT)的 HFST 用集料技术要求(如表 1 所示^[4-6, 12-35]),可以看出国外 HFST 用集料的技术要求普遍比国内超薄磨耗层的要高,尤其是石料磨光值(polishing stone value, PSV)要求更高。

李硕等^[12]对比了不同 HFST 集料的主要性能指标,

结果表明, 煅烧铝矾土的主要性能指标基本满足各规范要求, 且综合物理、力学性能明显优于其他集料。煅烧铝矾土和钢渣的表观相对密度较大, 这是因为其分别含有铝、铁等金属元素^[12-14]。煅烧铝矾土的吸水率受煅烧过程影响较大, 通常在 0.81%~1.61% 之间, 虽然较部分集料高, 但仍满足规范要求。从压碎值、洛杉矶磨耗值 (Los Angeles abrasion, LAA) 及磨光值 (PSV) 等耐磨性指标综合来看, 煅烧铝矾土耐磨耗性能最为优异, 砂岩和钢渣次之, 白云岩和石灰岩最差。

Yang 等^[15] 基于《高铝矾土熟料》(YB/T 5179—2005) 对比了多个品级煅烧铝矾土的物理、力学性能 (见表 2), 结果表明, 煅烧铝矾土品级越高, 即 Al_2O_3 含量越高, 密度、硬度越大而吸水率越小, 压碎值和 LAA 越小且 PSV 越大, 综合物理、力学性能越优异; 结合表 1 可知, 70# 以下的煅烧铝矾土的耐磨耗性能已不如花岗岩和玄武岩, 故一般考虑 75# 以上的煅烧铝矾土用作超薄抗滑表层材料。88# 煅烧铝矾土是作为 HFST 材料的理想耐磨集料。

表 1 不同 HFST 材料用集料的基本物理、力学性能及规范要求^[4-6, 12-35]

Table 1 Basic physical and mechanical properties of different aggregates used in HFST materials and technical standards^[4-6, 12-35]

Aggregate type and technical standards	Apparent specific density	Water absorption/%	Crushed value/%	LAA/%	PSV
88# Calcined bauxite	3.03~3.43	0.81~1.61	3.4~14.9	8.0~13.5	54~81
Granite	2.83~3.04	0.51~0.70	11.5~19.8	8.0~25.0	46~57
Basalt	2.75~3.04	0.32~1.50	9.1~16.0	7.9~18.0	45~57
Limestone	2.66~2.90	0.70~1.95	13.3~25.8	11.8~25.9	33~54
Sandstone	2.85~3.12	0.49~0.74	13.7~23.4	12.5~17.7	60~70
Dolomite	2.65~2.80	1.66~1.95	12.2~18.1	16.9~24.4	37~53
Steel slag	3.11~3.60	1.00~2.48	11.3~20.1	9.8~25.7	45~75
JTG F40—2004	≥2.60	≤2.00	≤26.0	≤28.0	≥36
DB21/T 1995—2012	≥2.60	≤2.00	≤26.0	≤28.0	≥45
DB33/T 2113—2018	≥2.60	≤2.00	≤26.0	≤15.0	≥42
PennDOT, 2014	—	—	≤20.0	≤20.0	≥38
NCDOT, 2018	—	—	≤20.0	≤20.0	≥50
INDOT, 2014	≥3.30	≤3.00	≤20.0	≤12.5	≥55

表 2 不同品级煅烧铝矾土的物理和力学性能^[15]

Table 2 Physical and mechanical properties of calcined bauxite of different grades^[15]

Types of calcined bauxite	Apparent specific density	Water absorption /%	Crushed value /%	LAA/%	PSV	Vickers hardness /GPa
88#	3.328	1.373	7.84	8.64	55.5	1721.33
85#	3.316	1.566	8.52	11.02	52.5	1357.81
80#	3.288	2.257	11.31	12.11	49.5	1263.07
75#	3.059	3.582	13.87	13.97	44.8	817.45
70#	3.047	4.176	20.44	16.84	41.3	694.85
65#	3.034	4.758	22.36	20.06	36.8	484.26

2.2 集料主要化学成分与矿物组成

集料耐磨特性对 HFST 材料抗滑性能有很大的影响, 而集料的耐磨特性又与其化学成分及晶体结构息息相关, 因此有必要对集料的化学成分及矿物组成进行分析。表 3 统计了不同 HFST 用集料的化学组成, 煅烧铝矾土中主要的耐磨耗成分是 Al_2O_3 ^[12, 15, 36, 37], 而花岗岩、玄武岩

和砂岩中主要的耐磨耗成分是 SiO_2 ^[38-43], 石灰岩、白云岩和钢渣中主要的耐磨耗成分是 CaO ^[12, 14, 22, 44-50], 因此煅烧铝矾土要比其他集料硬得多。表 4 汇总了不同 HFST 用集料的矿物组分与硬度, 煅烧铝矾土主要由硬度大的刚玉相和莫来石相组成^[15, 37], 花岗岩、玄武岩和砂岩的主要晶相有硬度较大的石英和长石^[15, 37, 38, 41-43], 石灰

岩、白云岩和钢渣的硬度较低^[15, 22, 44, 48-50]。由于粗集料硬度是决定粗集料耐磨性能的重要因素，且与粗集料 LAA 和 PSV 相关性良好^[19, 37]，因此煅烧铝矾土具有更优良的耐磨损性能。李硕和熊锐等认为这是由于煅烧铝

矾土中刚玉相和莫来石相交错形成的微观结构可以起网状骨架作用，能够减小磨耗作用所产生的应力破坏，认为这是煅烧铝矾土具有良好耐磨、抗滑性能的主要原因^[12, 37]。

表 3 不同 HFST 用集料的化学组成^[12, 14, 15, 22, 36-50]

Table 3 Chemical compositions of different aggregates used in HFST (ω/%)^[12, 14, 15, 22, 36-50]

Aggregate type	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO
Calcined bauxite	2.87~25.31	2.32~4.84	70.53~90.32	0.41~1.78	0.13~0.22	0.08~0.35	<0.01~0.03	0.06~0.18	0.17~0.26	0.01~0.29
Granite	65.90~79.80	0.09~0.60	10.50~15.94	0.12~3.82	0.05~1.34	0.14~3.71	0.88~4.68	1.86~7.32	0.03~0.28	0.01~0.16
Basalt	41.30~51.19	1.46~5.15	9.70~17.71	9.52~17.61	0.16~15.60	4.97~12.10	1.60~8.67	0.43~1.92	0.23~1.42	0.05~0.29
Limestone	2.25~13.92	0.01~0.63	0.20~4.69	0.11~4.84	0.53~6.26	30.36~52.72	0.008~0.75	0.013~0.95	0.01~1.23	0.004~0.064
Sandstone	61.64~65.05	0.65~0.78	16.99~17.63	2.24~4.70	1.33~1.74	0.59~0.82	1.13~2.07	4.80~5.43	0.15~0.29	0.06~0.23
Dolomite	0.29~8.02	0.03~0.06	0.14~1.43	0.05~0.19	18.60~23.28	29.01~33.20	0.05~0.21	0.15~0.83	0.001~0.01	0.01~0.06
Steel slag	8.33~18.20	0.88~1.80	1.12~11.48	11.26~33.14	3.06~14.22	29.30~51.34	0.06~0.29	0.08~0.24	0.19~2.31	0.80~3.56

表 4 不同 HFST 用集料的岩性和晶相^[15, 22, 34, 35, 37, 38, 41-44, 48-50]

Table 4 Lithology and crystalline phases of different aggregates used in HFST^[15, 22, 34, 35, 37, 38, 41-44, 48-50]

Aggregate type	Phase composition	Moh's hardness
Calcined bauxite	Corundum,	8.5~9
	Mullite	6~7
Granite	Potash feldspar,	6~6.5
	Quartz	7~7.5
Basalt	Plagioclase,	6~6.5
	Pyroxene,	5.5~6
	Olivine	6.5~7
Limestone	Calcite,	3~4
	Dolomite	3.5~4
Sandstone	Quartz,	7~7.5
	Feldspar	6~6.5
Dolomite	Dolomite	3.5~4
Steel slag	C ₂ S,	4~5
	C ₃ S,	4~5
	RO Phase	4~5

2.3 高耐磨集料长期磨光机制

PSV 是反映粗集料抵抗轮胎磨光作用的能力的指标，研究集料的长期 PSV 衰减规律对铺设抗滑性优异的路面时集料的选择及使用寿命的预测具有重要意义。丛林等^[6]研究了集料性能与沥青混合料长期抗滑性能之间的关系，结果表明，集料 PSV 是影响沥青混合料抗滑性能初始值和最终稳定值的主要因素，压碎值是影响沥青混合料抗滑性能衰减速率的主要因素。图 2 汇总了不同集

料的 PSV 衰减情况，PSV 随磨光次数的增加而减小，PSV 的变化过程可分为加速衰减阶段、减速衰减阶段和稳定阶段^[16, 19, 51, 52]。Liu 等^[13]认为集料表面微观纹理构造对其耐磨、抗滑性能影响更大。Guan 等^[16]研究得出，集料的宏观构造在初期磨光过程中起主要作用，而集料的微观纹理构造在后期磨光过程中起主要作用，即宏观构造主要影响集料的初始抗滑性能，而微观纹理构造是集料长期抗滑性能的主要影响因素。

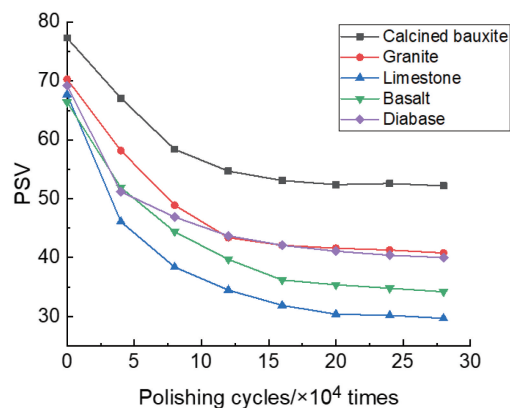


图 2 不同集料的磨光值 (polishing stone value, PSV) 衰减曲线^[16, 19, 51, 52]

Fig. 2 PSV attenuation curves of different aggregates^[16, 19, 51, 52]

刘清泉^[53]研究认为，石料中矿物分布的均匀性越差，矿物颗粒间或矿物颗粒与基质间的硬度差异越大，就越有利于产生较大的摩擦系数，这与丛林的研究结论一致^[19]。Wang 等^[54]研究认为，磨光过程中集料的微

观纹理及抗滑性能变化与磨料、集料初始粗糙度及矿物组成有关,集料中软弱相磨光破坏会对坚硬相产生一定影响,进而引起表面构造变化。Yang 等^[15]研究了不同等级煅烧铝矾土在延长磨光时间下的 PSV 变化及其长期磨光机制,研究表明,集料长期抗磨光性能与矿物成分的硬度有关,主要矿物的硬度越大,其保持表面构造的能力越好,抗磨光能力越强;矿物成分的硬度差越大,长期耐磨光能力越强。集料中的软弱相在磨光作用下首先被破坏,一部分从集料表面剥落,另一部分成为粉末填充于集料表面孔隙中。随着磨光次数的增加,

大量软弱相被破坏并嵌入孔隙中,使坚硬相形成新的表面纹理构造并提供抗滑能力。在不断的磨光作用下,坚硬相也逐渐被破坏,当坚硬相破坏到一定程度时,软弱相露出集料表面又形成新的微观纹理构造,集料磨光过程便是如此反复的破坏-恢复过程(如图 3 所示)。因此高耐磨集料应具有较高含量的高硬度的矿物成分,同时具有一定的相对的软弱相以保持其长期抗磨光性能。长期磨光作用下煅烧铝矾土的表面形貌变化如图 4 所示^[16],在不断的磨光过程中集料的表面微观纹理不断衰减最终趋于稳定。

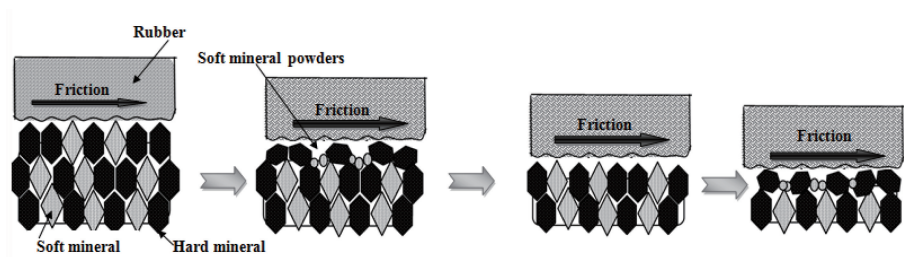


图 3 集料表面磨光及恢复过程示意图^[15]

Fig. 3 Schematic of destruction and recovery of aggregates surface microtexture^[15]

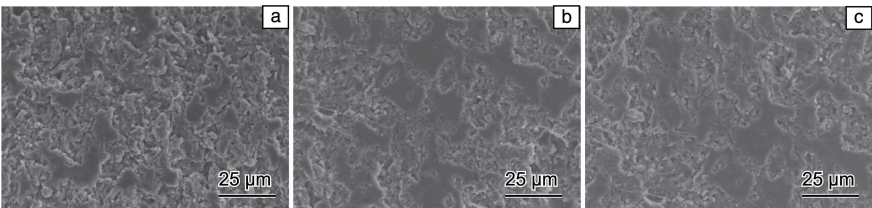


图 4 长期磨耗作用下煅烧铝矾土集料表面形貌变化^[16]: (a) 未磨耗, (b) 磨光 20×10^4 次, (c) 磨光 28×10^4 次

Fig. 4 Micromorphology of calcined bauxite surface under long-term polishing process^[16]: (a) before the polishing process, (b) after 20×10^4 polishing cycles, (c) after 28×10^4 polishing cycles

3 HFST 粘结剂性能

粘结剂对 HFST 的抗滑性及耐久性能有重要影响,常用的 HFST 粘结剂有环氧树脂粘结剂、松香酯粘结剂、聚氨酯粘结剂、丙烯酸树脂粘结剂及聚酯树脂粘结剂等。环氧树脂(EP)粘结剂主要由环氧树脂和固化剂两大部分

组成,具有优异的粘结性能,在 HFST 中应用最为广泛。由于 EP 韧性低、耐冲击性差,因此通常对 EP 进行改性以提高其力学性能^[55]。表 5 统计了 EP、聚氨酯改性 EP(PU/EP)、纳米 SiO₂ 改性 EP(nano-SiO₂/EP)及氧化石墨烯改性 EP(GO/EP)粘结剂的力学性能,可以看出,3 种改性 EP 的力学性能均得到不同程度的提高,其中 GO/EP

表 5 不同类型环氧树脂粘结剂的力学性能^[56-70]

Table 5 Mechanical properties of different types of epoxy(EP) resin binders^[56-70]

Binder type	Tensile strength/MPa	Elongation at break /%	Shear strength /MPa	Bending strength /MPa	References
EP	16.10~48.60	2.13~9.27	2.68~18.10	36.12~66.32	[56-59]
PU/EP	19.36~76.21	5.74~19.74	10.23~21.04	56.73~85.68	[60, 61]
Nano-SiO ₂ /EP	22.50~76.21	11.60~14.14	11.33~24.17	72.00~112.47	[62, 63]
GO/EP	13.00~112.50	12.16~65.00	14.20~59.70	94.50~150.30	[64-70]
Technical requirements	≥17	≥30	—	—	PennDOT, NCDOT, etc.

综合力学性能最优。此外, 统计发现国内 EP 的断裂伸长率很难满足要求, 因此有必要对 EP 粘结剂进行改性以满足 HFST 粘结剂技术要求。

4 HFST 组成设计

4.1 HFST 组成设计关键参数

集料和粘结剂合理的配合比设计是获得抗滑性能优良的 HFST 的关键, 本文主要从 HFST 集料种类及粒径、集料掺配方式、粘结剂种类及 HFST 厚度等关键设计参数进行分析。

4.1.1 集料种类

不同集料具有不同的矿物组成, 因而具有不同的耐磨耗性能, 会对 HFST 的抗滑性能产生一定影响。动态摩擦系数 DFT(40) 可反映试件抗滑性能的优劣, 通常 DFT(40) 越大, 试件抗滑性能越好; 平均断面深度 (mean profile depth, MPD) 可用来表征试件表面的纹理构造, 通常 MPD 越大, 试件表面宏观构造越好。不同集料的 HFST 在磨光过程中的 DFT(40) 和 MPD 变化趋势如图 5 所示, HFST 试件 DFT(40) 和 MPD 均随磨光次数的增加

而减小, 但衰减幅度变小。不同 HFST 试件在磨光过程中表现出不同的抗滑性能和表面构造变化, 采用煅烧铝矾土的 HFST 试件表面初始及长期抗滑性能都明显优于其他集料, 铁燧岩次之, 其他集料相近; 采用钢渣的 HFST 试件表面宏观构造最差^[71, 72]。Friel 和 Woodward 通过测定多种 HFST 磨光过程中的摆值 (British pendulum number, BPN) 和构造深度 (texture depth, TD) 也得出煅烧铝矾土 HFST 的抗滑及抗滑耐久性能最优^[8, 73]。Zahir 评估了采用燧石的 HFST 试验段的抗滑性能, 得出燧石可代替煅烧铝矾土作为 HFST 的集料使用^[74]。因此, 当路面对抗滑性能要求较低或者考虑经济成本问题时, 可选择适当天然集料作为煅烧铝矾土的替代材料来制备 HFST。

如图 5c 所示, 磨光后的 DFT(40) 与 MPD 无直接关系, 即表明 HFST 表面抗滑性能与宏观构造没有明显的相关性。这可能是由于采用不同集料的试件表面微观纹理及宏观构造均不同, 而 MPD 仅反映 HFST 试件表面的宏观构造, 因此仅通过 MPD 不足以说明表面纹理构造对试件抗滑性能的影响规律, 这与作者等所得研究结论一致^[16]。

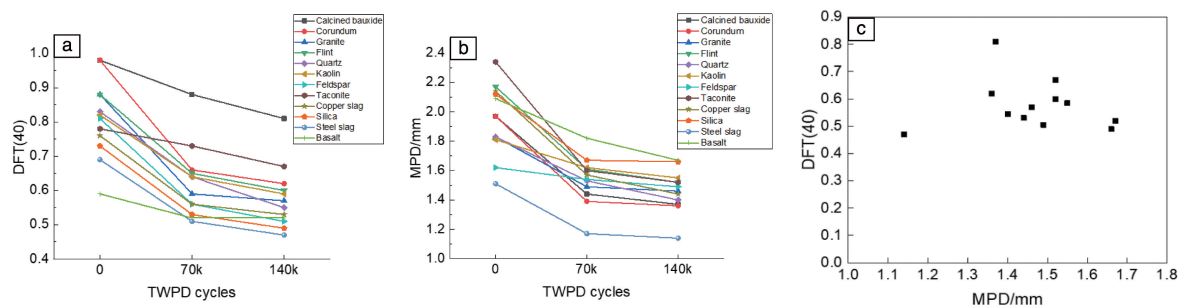


图 5 HFST 试件的动态摩擦系数 DFT(40) 和平均断面深度 (mean profile depth, MPD) 在磨光过程中变化^[71, 72]: (a) DFT(40), (b) MPD, (c) 磨光 14×10^4 次后的 DFT(40)-MPD 关系

Fig. 5 DFT(40) and MPD variations of HFST specimens during polishing process^[71, 72]: (a) DFT(40), (b) MPD, (c) correlation of DFT(40) and MPD after 14×10^4 polishing cycles

4.1.2 集料粒径

良好的宏观构造和微观构造是沥青路面抗滑表层具备良好抗滑性能的基础。微观构造主要影响低速且干燥时的沥青路面抗滑性能, 宏观构造主要影响高速或者路面潮湿时的沥青路面抗滑性能。粗集料表面纹理决定微观构造, 而集料公称最大粒径决定宏观构造进而影响 HFST 抗滑性能。集料粒径对 HFST 抗滑性能的影响如图 6 所示, 当集料粒径从 1.18 增加至 2.36 mm 时, DFT(40) 和 MPD 迅速增加^[12, 71]; 当集料粒径大于 2.36 mm 时, DFT(40) 趋于平稳, 而 MPD 增大, 分析原因为, 集料粒径越大, 其 TD 越大, 但这些大粒径的集料必须承担提供轮胎向前所产生的剪力, 结果这些大粒径集料很快会被磨光, 反映为 DFT(40) 并未随着 MPD 的增大而增

大。考虑粒径对抗滑性能的影响, 建议 HFST 集料粒径不低于 2.36 mm。

4.1.3 集料掺配方式

李菁若等^[75]研究得出, 互掺集料的抗滑耐磨性能相比弱者达到增强的效果, 不同岩性集料互掺技术有待成为抗滑表层选材技术的新方向。解晓光、刘东旭和陈贺等^[33-35]基于差异磨耗原理将不同粗细集料按不同掺配方式和比例进行设计, 结果发现掺配后的沥青混合料长期抗滑性能明显提高, 且两种集料 PSV 的差异性越大, 其掺配后沥青混合料的长期抗滑性能表现得越好。Friel 和 Woodward^[76]测定了采用多种集料掺配方式制备的 HFST 的 BPN 和 TD, 以探究集料掺配对抗滑性能的影响 (如图 7 所示)。结果表明, 不同集料掺配方式的 HFST 试件

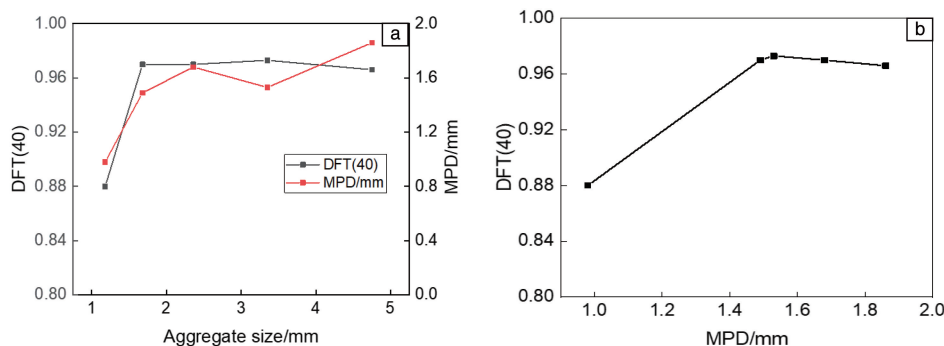


图 6 不同粒径集料的 HFST 试件的性能测试结果^[12, 71]: (a) DFT(40)和 MPD, (b) DFT(40)-MPD 关系

Fig. 6 Test results of HFST specimens with different aggregate sizes^[12, 71]: (a) DFT(40) and MPD results, (b) correlation of DFT(40) and MPD

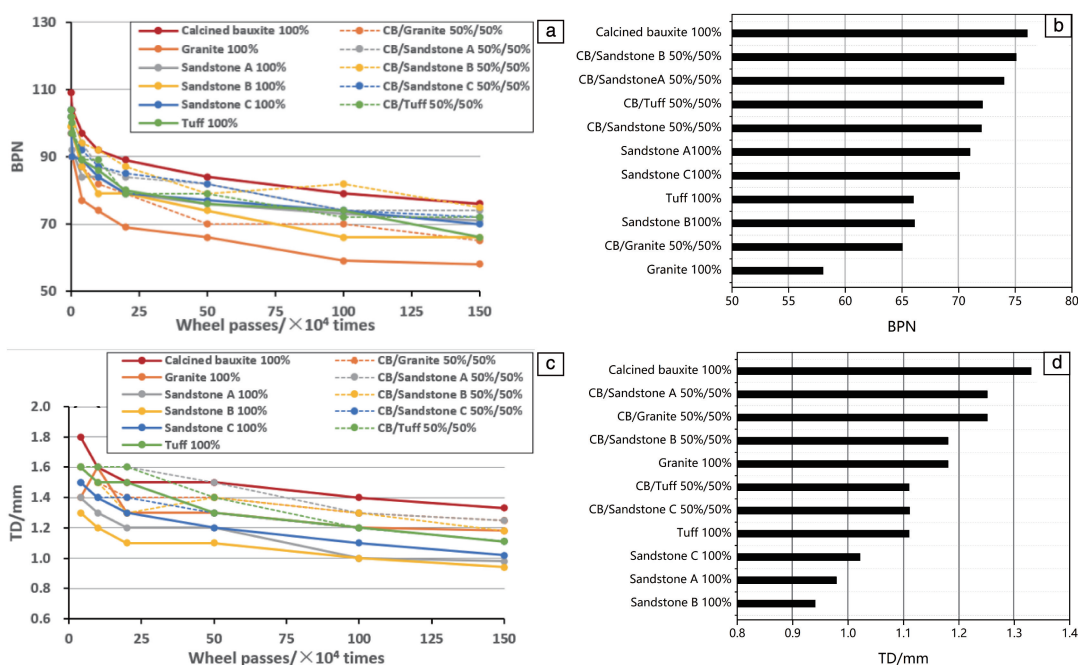


图 7 不同集料掺配方式的 HFST 的摆值 (British pendulum number, BPN) 及构造深度 (texture depth, TD) 在磨光过程中的衰减情况^[76]: (a) BPN 变化, (b) 磨光 1.5×10^6 次后的 BPN, (c) TD 变化, (d) 磨光 150×10^4 次后的 TD

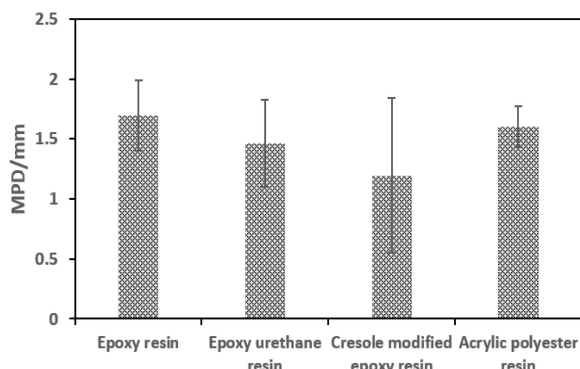
Fig. 7 BPN and TD attenuation of HFST with different ways of mixing aggregate during polishing process^[76]: (a) variation of BPN, (b) BPN after 150×10^4 polishing cycles, (c) variation of TD, (d) TD after 150×10^4 polishing cycles

的 BPN、TD 变化趋势相近, 均随磨光次数的增加而减小, 最后逐渐趋于平缓。长期磨光后, 掺加 100%天然集料的 HFST 试件的抗滑性能较差, 掺加 100%煅烧铝矾土或等比例掺配煅烧铝矾土与砂岩、凝灰岩的 HFST 试件的抗滑性能较优; 煅烧铝矾土与其他高耐磨集料掺配制备的 HFST 试件比 100%天然集料制备的 HFST 试件的 TD 大^[76]。这表明基于差异磨损原理对煅烧铝矾土与其他高耐磨集料进行掺配以制备 HFST 有一定的可行性, 可降低成本和减少环境污染, 使 HFST 具有更广泛的应用空间。

4.1.4 粘结剂种类

不同的粘结剂具有不同的粘结性能, 会对 HFST 的

抗滑性及耐久性能产生重要的影响。Nicholls^[77]研究了不同粘结剂对 HFST 性能的影响, 发现使用 EP 和 PU 的 HFST 抗滑性能较优, 丙烯酸树脂次之, 松香酯最差。Wilson 等^[78]采用 4 种粘结剂制备 HFST 试件并测定其磨光前后的 MPD 变化 (如图 8 所示), 磨光后的 MPD 由大到小依次为: EP 组、丙烯酸树脂组、环氧聚氨基甲酸酯组、甲酚改性 EP 组, 这表明采用 EP 的 HFST 表面宏观构造最好, 采用甲酚改性 EP 的 HFST 试件表面宏观构造最差。此外, 采用甲酚改性 EP 的 HFST 试件的 MPD 变化范围很大, 说明耐磨性较差, 表面集料易脱落, 导致表面宏观构造 MPD 有较大的变化范围。

图 8 采用不同粘结剂的 HFST 磨光后的 MPD^[78]Fig. 8 MPD results of HFST with different binders after polishing process^[78]

4.1.5 HFST 厚度

为探究 HFST 厚度(层数)对其抗滑及耐久性能的影响, Li 等^[79]以煅烧铝矾土和 EP 粘结剂为原料铺筑单、双层 HFST 试验段, 分别测定其新铺后、开放交通 3 个月和 9 个月后的 DFT(20) 和 MPD, 如图 9 所示。单层 HFST 和双层 HFST 的 MPD 相差不大, 双层 HFST 的两组 DFT(20)

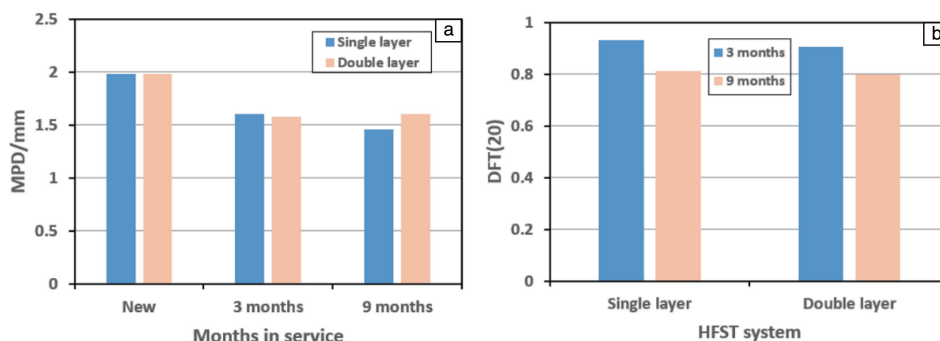
图 9 单双层 HFST 的 MPD 及 DFT(20)^[79]Fig. 9 MPD and DFT(20) of single and double layer HFST^[79]

表 6 HFST 集料和粘结剂的用量范围

Table 6 The dosages of the aggregate and binder for HFST

Binder dosage /(L/m ²)	Aggregate dosage /(g/cm ²)	Standards
1.273~1.630	0.597~0.814	PennDOT
1.273~1.509	0.651~0.814	NCDOT
1.268~1.449	0.705~1.085	Alaska DOT
1.273~1.630	0.651~0.814	ALDOT
1.273~1.630	0.651~0.814	SCDOT
1.529~1.782	0.759~0.868	TDOT
≥1.630	≥0.597	IDOT
1.352~2.046	—	KDOT
≥1.630	—	Michigan DOT
1.181~1.832	0.732~1.074	Li, et al. ^[12]

均比单层 HFST 要小, 且 DFT(20) 衰减率比单层 HFST 稍大, 这表明 HFST 层数对其抗滑性能影响较小。

4.2 HFST 的材料组成

针对 HFST 配合比设计方法, 美国宾夕法尼亚州交通厅(PennDOT)、北卡罗来纳州交通厅(NODOT)、阿拉斯加州交通厅(AlaskaDOT)、亚拉巴马州交通厅(ALDOT)、南卡罗来纳州交通厅(SCDOT)、田纳西州交通厅(TDOT)等美国州府制定大量规范标准, 目前仅给出了 HFST 集料和粘结剂的适宜用量范围(如表 6 所示), 并未规定一套确切的设计流程。Li^[12]等分别提出了粘结剂和集料的建议用量范围, 并根据经验从中选取了各自的确定用量 1.279 L/m² 和 0.750 g/cm² 进行测试板成型。Zahir^[74]针对不同集料种类确定了不同的粘结剂和集料用量, 煅烧铝矾土 HFST 的粘结剂和集料用量分别为 1.811 L/m² 和 0.718 g/cm², 燧石的 HFST 则分别为 1.585 L/m² 和 0.538 g/cm²。Heitzman 等^[72]先确定粘结剂用量为 1.630 L/m², 再均匀铺撒过量集料至完全覆盖粘结剂, 这避免了集料过少的问题, 且操作方便。对前人研究成

果总结分析, 推荐 HFST 粘结剂用量范围为 1.273 ~ 1.782 L/m², 集料用量过量至完全覆盖粘结剂即可。实际应用时建议可先初选多组粘结剂用量制作 HFST 试件并进行抗滑性能测定, 从而确定粘结剂的最佳用量。

5 HFST 试验段应用效果评价

为了更好地推动 HFST 的应用与发展, 美国多州开展了 HFST 试验路段抗滑性能研究(如图 10 所示^[80])。Anderson 等^[81]测定发现 HFST 路段抗滑性能优异, 并通过 Tyregrip[®]HFST 试验段的长期监测发现, HFST 能够保持良好的抗滑耐久性能且事故率降低了 79%, 表明 Tyregrip[®]HFST 是针对事故高发路段的一种有效措施。Dave^[82]设计了多种高摩擦桥面铺装(high friction overlays, HFO)方式, 测得 HFO 可有效降低事故率达 20%。已有



图 10 美国各州的 HFST 应用情况^[80]

Fig. 10 Application status of HFST in the United States^[80]

研究表明,集料采用煅烧铝矾土的 HFST 路段的耐磨抗滑性能最好,而粘结剂使用 EP 或丙烯酸酯粘结剂(MMA)最为常见^[83-85]。大量学者^[10, 11, 83-90]针对 HFST 试验段的病害类型、抗滑性能、事故降低率和效益成本率

等进行系统研究,得出 HFST 可显著提高路面抗滑性能,降低事故率达 75% 以上,效益成本率(B/C)达 3.97 ~ 27.90,具有良好的经济效益和社会效益。

5.1 服役后 HFST 的摩擦特性衰减分析

表 7 汇总了新铺筑后和开放交通一段时间后 HFST 试验段的 DFT(40)及 DFT(40)损失,以评价其抗滑及抗滑耐久性^[71, 85]。在新铺筑后, HFST1 和 HFST9 的 DFT(40)明显大于其他 HFST 类型,而 HFST8 次之,即采用煅烧铝矾土和 EP 粘结剂或 MMA 粘结剂的 HFST 初始抗滑性能最优。开放交通 6 个月后的 HFST 试验段抗滑性能均有不同程度的下降, HFST1 的 DFT(40)依旧最大,可见其抗滑耐久性也最好; HFST8 次之; HFST9 的 DFT(40)损失最大,说明其抗滑耐久性较差;而 HFST4 和 HFST1 的 DFT(40)损失小于 10%,说明其抗滑耐久性优异。综上, HFST1 的抗滑综合表现优异,即采用煅烧铝矾土和 EP 粘结剂制备 HFST 有很好的应用效果;若考虑经济成本问题,可选用铁燧岩作为煅烧铝矾土的替代材料来制备 HFST。

表 7 常见 HFST 类型及相应的 DFT(40)测试结果^[71, 85]

Table 7 Common HFST types and corresponding DFT(40) results^[71, 85]

HFST type	Aggregate type	Binder type	DFT(40) (New HFST pavement)	DFT(40) (after 6 months)	DFT(40) loss/%
HFST 1	Calcined bauxite	EP	0.92	0.83	9.78
HFST 2	Steel slag	EP	0.52	0.45	13.46
HFST 3	Granite	EP	0.61	0.51	16.39
HFST 4	Silica	EP	0.61	0.57	6.56
HFST 5	Basalt	EP	0.67	0.56	16.42
HFST 6	Flint	EP	0.67	0.60	10.45
HFST 7	Corundum	EP	0.73	0.58	20.55
HFST 8	Taconite	EP	0.75	0.65	13.33
HFST 9	Calcined bauxite	MMA	1.01	0.50	50.29

5.2 服役后 HFST 的 MPD 衰减分析

表 8 汇总了 HFST 试验段新铺筑后和开放交通 6 个月后的 MPD 及 MPD 损失,以评价其表面纹理构造。在新铺筑后, HFST1、HFST2、HFST4 和 HFST8 的 MPD 较大,说明其表面宏观构造较好;开放交通一段时间后, HFST8 的 MPD 依旧较大, HFST1 次之,且两者的 MPD 损失较小,可见采用铁燧岩或煅烧铝矾土和 EP 粘结剂的 HFST 表面宏观构造较为优异^[12, 71]。

5.3 不同集料 HFST 经济效益分析

全寿命周期费用分析(life cycle cost analysis, LCCA)是一种工程经济分析工具,用于比较竞争项目间的相对

优点。在道路工程建设项目评价过程中, LCCA 是指在全寿命周期内,分析计算路面某路段的初始建设费用和道路使用期间费用并进行经济评价,从而为决策者提供合理的依据。本文通过调查研究大量的国内外路面养护资料^[9, 78, 81, 89],采用费用现值(present cost, PC)法比较多种集料用于 HFST 的性价比(如表 9 和图 11 所示),进而对各 HFST 的经济合理性进行综合评价。

由图 11 可以看出,采用玄武岩的 HFST 的 PC 值最高,采用煅烧铝矾土的 HFST 的 PC 值最低,这表明采用煅烧铝矾土制备 HFST 具有良好的经济效益。因此,煅烧铝矾土 HFST 具有良好的经济效益和较强的可行性。

表 8 常见 HFST 类型及相应的 MPD 测试结果^[12, 71]Table 8 Common HFST types and corresponding MPD results^[12, 71]

HFS Type	Aggregate type	Binder type	MPD/mm (New HFST pavement)	MPD/mm (after 6 months)	MPD loss/%
HFST 1	Calcined bauxite	EP	1.79	1.47	17.15
HFST 2	Steel slag	EP	1.88	1.08	44.35
HFST 3	Granite	EP	1.64	1.25	23.78
HFST 4	Silica	EP	1.85	1.39	24.86
HFST 5	Basalt	EP	1.67	1.43	14.37
HFST 6	Flint	EP	1.74	1.40	19.54
HFST 7	Corundum	EP	1.56	1.21	22.44
HFST 8	Taconite	EP	1.85	1.55	16.22

表 9 采用不同集料的 HFST 的费用现值^[9, 78, 81, 89]Table 9 Present cost (PC) of HFST with different aggregates^[9, 78, 81, 89]

Aggregate type	Analysis period	Discount rate	Premaintenance cost /(CNY/m ²)	Premaintenance time (compared to the opening year)	Interim repair cost /(CNY/m ²)	Interim time (compared to the opening year)	PC /(CNY/m ²)
Calcined bauxite	14	8%	270	5	6276.73	14	2320.99
Steel slag	14	8%	190	5	6276.73	11	2821.40
Granite	14	8%	198	5	6276.73	12	2627.25
Silica	14	8%	217	5	6276.73	12	2640.18
Basalt	14	8%	198	5	6276.73	10	3042.14
Flint	14	8%	230	5	6276.73	13	2464.49
Corundum	14	8%	265	5	6276.73	13	2488.31
Taconite	14	8%	240	5	6276.73	11	2855.43

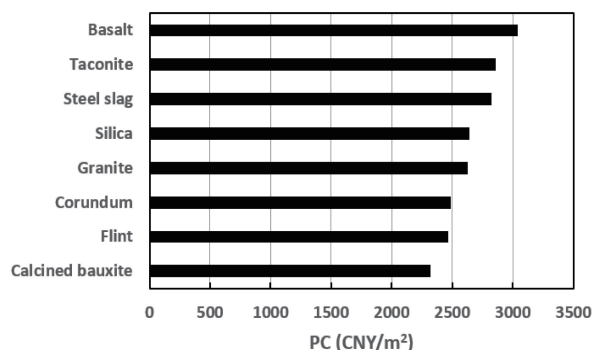


图 11 采用不同集料 HFST 的费用现值比较

Fig. 11 PC comparison of HFST with different aggregates

6 结 语

(1) 采用煅烧铝矾土制备的高摩擦道路表面处治 (high friction surface treatment, HFST) 材料具有优异的抗滑及抗滑耐久性, 考虑材料来源及成本问题, 也可选用铁燧岩、燧石、砂岩为替代材料制备 HFST。煅烧铝矾土与其他高耐磨集料掺配制备 HFST 具有一定的可行性, 可降低成本和减少环境污染, 使 HFST 更易在道路工程中推广应用。

(2) 采用环氧树脂作为粘结材料制备的 HFST 具有优异的长期抗滑性能, 然而目前国内环氧树脂的关键指标—断裂伸长率, 很难满足 HFST 的要求, 有必要对环氧树脂粘结剂进一步改性研究。

(3) HFST 粘结剂推荐用量范围为 1.273~1.782 L/m², 集料推荐用量为集料完全覆盖粘结剂的用量。实际应用时建议可先初选多组粘结剂用量制作 HFST 试件并进行抗滑性能测定, 从而确定粘结剂的最佳用量。

(4) HFST 的抗滑性能优异, 可大幅度降低交通事故率, 提高道路行驶安全性; 采用煅烧铝矾土的 HFST 的费用现值最低, 具有良好的经济及社会效益。建议结合我国交通基础设施建设具体情况, 进一步开展针对各地区不同地质条件与气候特点的适用性试验。

参考文献 References

- [1] 黄晓明, 郑彬双. 中国公路学报[J], 2019, 32(4): 32-49.
HUANG X M, ZHENG B S. China Journal of Highway and Transport [J], 2019, 32(4): 32-49.
- [2] KOGBARA R B, MASAD E A, KASSEM E, *et al.* Construction and Building Materials[J], 2016, 114: 602-617.
- [3] WANG H, WANG C, BU Y, *et al.* Construction and Building Materi-

- als[J], 2020, 242: 118150–118159.
- [4] 田强春. 基于集料特性与级配的沥青路面抗滑性能预测研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- TIAN Q C. The Research Based on Aggregate and Gradation of the Asphalt Pavement's Forecast for Anti-Sliding Performance [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [5] 孔令云, 尹果果, 林雄伟, 等. 长沙理工大学学报(自然科学版)[J], 2017, 14(3): 13–20.
- KONG L Y, YIN G G, LIN X W, *et al.* Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)[J], 2017, 14(3): 13–20.
- [6] 丛林, 谭乐, 吴敏, 等. 同济大学学报(自然科学版)[J], 2019, 47(5): 668–672.
- CONG L, TAN L, WU M, *et al.* Journal of Tongji University (Natural Science)[J], 2019, 47(5): 668–672.
- [7] ABAZA O A, CHOWDHURY T D, ARAFAT M. American Journal of Engineering and Applied Sciences[J], 2017, 10(4): 890–899.
- [8] FRIEL S, WOODWARD D. Predicting the Development of Asphalt Surfacing Properties in Ireland[M]//Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements. American Society of Civil Engineers, 2013: 829–840.
- [9] 伍祥松. 高速公路沥青路面使用性能预测及预防性养护对策研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- WU X S. Asphalt Pavement Performance Forecast and Preventive Maintenance Measure Research in Expressway [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [10] ATKINSON J E, CLARK J, ERCISLI S. High Friction Surface Treatment Curve Selection and Installation Guide[R]. United States: Office of Safety, Federal Highway Administration, 2016.
- [11] BARGEN T V, BARTELT M, KLINE C, *et al.* High Friction Surface Treatments[R]. United States: Office of Safety, Federal Highway Administration, 2018.
- [12] LI S, XIONG R, YU D, *et al.* Friction Surface Treatment Selection: Aggregate Properties, Surface Characteristics, Alternative Treatments, and Safety Effects[R]. West Lafayette: Purdue University, 2017.
- [13] LIU J, GUAN B, CHEN H, *et al.* Materials[J], 2020, 13(8): 1875–1889.
- [14] 李超, 陈宗武, 谢君, 等. 材料导报[J], 2017, 31(3): 86–95.
- LI C, CHEN Z W, XIE J, *et al.* Materials Reports[J], 2017, 31(3): 86–95.
- [15] YANG F, GUAN B, LIU J, *et al.* Coatings[J], 2019, 9(11): 760–775.
- [16] GUAN B W, WU J, XIE C, *et al.* Advances in Materials Science and Engineering[J], 2018: 1437069.
- [17] WU X R, ZHENG N X, KONG F S. Construction and Building Materials[J], 2020, 244: 118334–118342.
- [18] 孔令云, 曹慧平, 唐樊龙, 等. 重庆交通大学学报(自然科学版)[J], 2017, 36(5): 35–39.
- KONG L Y, CAO H P, TANG F L, *et al.* Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)[J], 2017, 36(5): 35–39.
- [19] 丛林, 卞绍辉, 谭乐. 建筑材料学报[J], 2014, 17(2): 336–339.
- CONG L, BIAN S H, TAN L. Journal of Building Materials[J], 2014, 17(2): 336–339.
- [20] 吴将丰. 集料抗磨损性能的多尺度试验与模拟研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- WU J F. Study on the Aggregate Abrasion Resistance Using Multi-Scale Test and Simulation[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [21] 张毓. 基于集料表面纹理构造特征的沥青路面抗滑机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- ZHANG Y. Research on Skid Resistance Mechanism of Asphalt Pavement Based on Characteristics of Aggregate Surface Texture [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [22] 陈宗武. 钢渣理化特性及其沥青混凝土性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- CHEN Z W. Research on Physical and Chemical Characteristics of Steel Slag and Performances of Steel Slag Based Asphalt Concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [23] 徐金标, 陈挺, 李剑, 等. 山东交通科技[J], 2019(6): 31–37.
- XU J B, CHEN T, LI J, *et al.* Shandong Jiaotong Keji[J], 2019(6): 31–37.
- [24] 李灿华, 刘思, 陈琳. 武钢技术[J], 2011, 49(3): 34–36.
- LI C H, LIU S, CHEN L. Wuhan Iron and Steel Corporation Technology[J], 2011, 49(3): 34–36.
- [25] 刘洪成, 唐小丹, 阚涛, 等. 上海公路[J], 2019(4): 69–72.
- LIU H C, TANG X D, KAN T, *et al.* Shanghai Highways[J], 2019(4): 69–72.
- [26] 董元帅, 侯芸, 周绪利. 公路[J], 2020, 65(3): 232–237.
- DONG Y S, HOU Y, ZHOU X L. Highway[J], 2020, 65(3): 232–237.
- [27] HARITONOV V, ZAUMANIS M, BRENCIS G, *et al.* Construction Science[J], 2012, 13(1): 11–16.
- [28] 汤雄, 雷俊, 张凌云, 等. 公路交通科技(应用技术版)[J], 2016, 12(2): 103–105.
- TANG X, LEI J, ZHANG L Y, *et al.* Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition)[J], 2016, 12(2): 103–105.
- [29] 杨涛. 广西砂岩沥青混凝土路用性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- YANG T. Study on Road Performance of Guangxi Sandstone Asphalt Concrete[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [30] 曾宪文, 傅建军. 西部交通科技[J], 2014(8): 14–18.
- ZENG X W, FU J J. Western China Communication Science & Technology[J], 2014(8): 14–18.
- [31] 高宏新. 北方交通[J], 2012(11): 62–64.
- GAO H X. Northern Communications[J], 2012(11): 62–64.
- [32] 黄远殷. 加速磨损试验与沥青路面表层抗滑研究[D]. 广州: 广州大学, 2017.

- HUANG Y Y. Accelerated Wear Test and Asphalt Pavement Surface Skid Research[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017.
- [33] 解晓光, 刘东旭, 陈贺. 哈尔滨工业大学学报[J], 2020, 52(9): 45-50.
- XIE X G, LIU D X, CHEN H. Journal of Harbin Institute of Technology[J], 2020, 52(9): 45-50.
- [34] 刘东旭. 基于分异磨损原理的沥青混合料抗滑性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- LIU D X. Research of Skid Resistance of Asphalt Based on the Principle of Differential Abrasion[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [35] 陈贺. 基于差异磨损原理的 SMA 路面抗滑性能优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- CHEN H. Research on Optimizing the Skid Resistance of SMA Pavement Based on Aggregates' Discrepant Abrasion Principle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [36] GUAN B W, WU J Y, TIAN H T, *et al.* Journal of Materials in Civil Engineering[J], 2020, 32(7): 4020168.
- [37] 熊锐, 杨发, 关博文, 等. 材料导报[J], 2019, 33(20): 3436-3440.
- XIONG R, YANG F, GUAN B W, *et al.* Materials Reports[J], 2019, 33(20): 3436-3440.
- [38] 孙立强. 南岭诸广山地区中生代花岗岩成因及其对铀成矿作用的启示[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- SUN L Q. Petrogenesis of the Mesozoic Granites in the Zhuguangshan Area in the Nanjing Region and Their Implications for the Uranium Mineralization[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- [39] 刘军平, 孙柏东, 崔晓庄, 等. 中国地质[J], 2020, 47(3): 693-708.
- LIU J P, SUN B D, CUI X Z, *et al.* Geology in China[J], 2020, 47(3): 693-708.
- [40] 何叶, 陈立辉, 曾罡, 等. 高校地质学报[J], 2020, 26(3): 241-254.
- HE Y, CHEN L H, ZENG G, *et al.* Geological Journal of China Universities[J], 2020, 26(3): 241-254.
- [41] 程文斌, 董树义, 金灿海, 等. 矿物岩石[J], 2019, 39(4): 49-60.
- CHEN W B, DONG S Y, JIN C H, *et al.* Journal of Mineralogy and Petrology[J], 2019, 39(4): 49-60.
- [42] 高金亮, 刘嘉麒, 郭正府, 等. 岩石学报[J], 2017, 33(1): 81-92.
- GAO J L, LIU J Q, GUO Z F, *et al.* Acta Petrologica Sinica[J], 2017, 33(1): 81-92.
- [43] 张径通, 胡大千, 战乃臣, 等. 世界地质[J], 2019, 38(1): 119-129.
- ZHANG J T, HU D Q, ZHAN N C, *et al.* Global Geology[J], 2019, 38(1): 119-129.
- [44] 谷彩红. 石灰岩矿物与化学组成及其在沥青路面结构中的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- GU C H. Study on Mineral and Chemical Composition of Limestone and Its Application in Asphalt Pavement Structure[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [45] 姜尧发, 唐跃刚, 代世峰, 等. 矿物学报[J], 2013, 33(3): 337-343.
- JIANG Y F, TANG Y G, DAI S F, *et al.* Acta Mineralogica Sinica[J], 2013, 33(3): 337-343.
- [46] 牛龙龙, 邓敏, 阳勇福, 等. 硅酸盐通报[J], 2015, 34(10): 2757-2763.
- NIU L L, DENG M, YANG Y F, *et al.* Bulletin of the Chinese Ceramic Society[J], 2015, 34(10): 2757-2763.
- [47] 季宏兵, 欧阳自远, 王世杰, 等. 中国科学(地球科学)[J], 1999, 29(6): 504-513.
- JI H B, OUYANG Z Y, WANG S J, *et al.* Scientia Sinica(Terrae)[J], 1999, 29(6): 504-513.
- [48] 许丁斌. 钢渣沥青混合料的材料及性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- XU D B. The Material and Performance Research of Steel Slag Asphalt Mixtures[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [49] 史志新, 刘锦燕, 王春梅. 冶金分析[J], 2015, 35(11): 16-22.
- SHI Z X, LIU J Y, WANG C M. Metallurgical Analysis[J], 2015, 35(11): 16-22.
- [50] 张亮亮, 张瑞艳, 郑云, 等. 中国建材科技[J], 2014, 23(2): 59-62.
- ZHANG L L, ZHANG R Y, ZHENG Y, *et al.* China Building Materials Science & Technology[J], 2014, 23(2): 59-62.
- [51] 谭乐, 吴敏, 邓德毅, 等. 公路交通科技[J], 2020, 37(5): 20-24.
- TAN L, WU M, DENG D Y, *et al.* Journal of Highway and Transportation Research and Development[J], 2020, 37(5): 20-24.
- [52] 张维仁, 张耀东, 王永平. 重庆交通大学学报(自然科学版)[J], 2016, 35(5): 58-64.
- ZHANG W R, ZHANG Y D, WANG Y P. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)[J], 2016, 35(5): 58-64.
- [53] 刘清泉. 中国公路学报[J], 2004, 17(3): 19-22.
- LIU Q Q. China Journal of Highway and Transport[J], 2004, 17(3): 19-22.
- [54] WANG D W, CHEN X H, OESER M, *et al.* Wear[J], 2014, 318(1/2): 1-11.
- [55] 李娟, 蔡益波. 中国胶粘剂[J], 2020, 29(3): 52-56.
- LI J, CAI Y B. China Adhesives[J], 2020, 29(3): 52-56.
- [56] 胡新贺. 钢桥面维修环氧树脂混凝土的组成设计及路用性能研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2016.
- HU X H. The Material Composition Design and Pavement Performance Study of Epoxy Resin Modified Concrete for Steel Bridge Deck Maintenance[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2016.
- [57] 朱可嘉. 常温固化型环氧胶粘剂结构分析及改性研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- ZHU K J. Study on the Structural Analysis and Modification of Epoxy Adhesive Cured at room Temperature[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015.
- [58] 吕强. 粘接[J], 2020, 41(4): 16-20.
- LV Q. Adhesion[J], 2020, 41(4): 16-20.

- [59] BARUA S, DUTTA G, KARAK N, *et al.* Chemical Engineering Science[J], 2013, 95: 138–147.
- [60] 陈会敏. 改性环氧树脂结构胶的制备及其应用性能[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- CHEN H M. Preparation and Application Performance of Modified Epoxy Resin Structural Adhesive[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [61] 杨涛. 聚氨酯改性环氧树脂胶黏剂的研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2017.
- YANG T. Study on Polyurethane Modified Epoxy Resin Adhesive[D]. Beijing: General Institute of Mechanical Sciences, 2017.
- [62] 王金库. 高性能环氧型建筑结构胶粘剂的研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- WANG J K. The Study on High-Performance Structural Adhesive of Epoxy Resin for Architecture [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [63] BAGHERZADEH A, JAMSHIDI M, MONEMIAN F. Construction and Building Materials[J], 2020, 240: 117979–117989.
- [64] 王学宝, 李晋庆, 罗运军. 高分子材料科学与工程[J], 2013, 29(7): 161–165.
- WANG X B, LI J Q, LUO Y J. Polymer Materials Science & Engineering[J], 2013, 29(7): 161–165.
- [65] ABDULLAH S I, ANSARI M N. HBRC Journal[J], 2015, 11(2): 151–156.
- [66] 张竞, 王洪亮, 叶瑞. 高分子材料科学与工程[J], 2015, 31(6): 167–171.
- ZHANG J, WANG H L, YE R. Polymer Materials Science & Engineering[J], 2015, 31(6): 167–171.
- [67] 邢继烨, 薛刚, 张斌, 等. 中国胶粘剂[J], 2020, 29(6): 7–10.
- XING J Y, XUE G, ZHANG B, *et al.* China Adhesives[J], 2020, 29(6): 7–10.
- [68] LI Y Q, PAN D Y, CHEN S B, *et al.* Materials & Design[J], 2013, 47: 850–856.
- [69] 赵梦雪, 孔米秋, 刘成俊, 等. 高分子学报[J], 2018(6): 721–732.
- ZHAO M X, KONG M Q, LIU C J, *et al.* Acta Polymerica Sinica[J], 2018(6): 721–732.
- [70] 刘括, 班建峰, 谭明雄. 热固性树脂[J], 2015, 30(6): 28–32.
- LIU K, BAN J F, TAN M X. Thermosetting Resin[J], 2015, 30(6): 28–32.
- [71] HEITZMAN M, TURNER P, GREER M. High Friction Surface Treatment Alternative Aggregates Study(NCAT Report 15–04)[R]. National Center for Asphalt Technology at Auburn University, 2015.
- [72] HEITZMAN M, MOORE J. Evaluation of Laboratory Friction Performance of Aggregates for High Friction Surface Treatments(NCAT Report 17–01)[R]. Auburn, Alabama: National Center for Asphalt Technology, Auburn University, 2017.
- [73] WOODWARD D, FRIEL S. Coatings[J], 2017, 7(5): 71–85.
- [74] ZAHIR H. Performance of Local Aggregate in High Friction Surface Treatment[D]. Manhattan: Kansas State University, 2016.
- [75] 李菁若, 张东长, 谭巍. 公路交通科技[J], 2016, 33(12): 76–82.
- LI J R, ZHANG D C, TAN W. Journal of Highway and Transportation Research and Development[J], 2016, 33(12): 76–82.
- [76] FRIEL S, WOODWARD D. Coatings[J], 2019, 9(3): 177–192.
- [77] NICHOLLS C. Laboratory Tests on High Friction Surfaces for Highways; TRL Report 176[R]. Crowthorne, UK: Transport Research Laboratory, 1997.
- [78] WILSON B, MUKHOPADHYAY A. Alternative Aggregates and Materials for High Friction Surface Treatments[R]. Florida Department of Transportation, 2016.
- [79] LI S, CONG P, YU D, *et al.* Transportation Research Record[J], 2019, 2673(2): 552–561.
- [80] MORAVEC M. High Friction Surface Treatments at High-Crash Horizontal Curves[R]. Chicago: APWA World Congress, 2013.
- [81] ANDERSON K W, RUSSELL M, SHEETS J, *et al.* Evaluation of Tyregrip High-Friction Surfacing-Final Report [R]. Washington (State): Office of Research and Library Services, Department of Transportation, 2017.
- [82] DAVE E V, KOSTICK R D, Dailey J. Journal of Performance of Constructed Facilities[J], 2017, 31(2): 04016094.
- [83] YANG G, LI Q J, ZHAN Y, *et al.* Canadian Journal of Civil Engineering[J], 2019, 46(12): 1142–1150.
- [84] LI Q J, YANG G, WANG K C P, *et al.* Canadian Journal of Civil Engineering[J], 2016, 43(9): 812–821.
- [85] High Friction Surface Treatment Experimental Feature-Final Report and 3rd Year Monitoring Results[R]. Alaska Department of Transportation & Public Facilities 2019.
- [86] IZEPPi E L, FLINTSCH G W, MCGHEE K K. Field Performance of High Friction Surfaces[R]. Virginia Center for Transportation Innovation and Research, 2010.
- [87] SPRINKEL M M, MCGHEE K K, de LEÓN IZEPPi E D. Transportation Research Record[J], 2015, 2481(1): 100–106.
- [88] BRIMLEY B, CARLSON P. Using High Friction Surface Treatments to Improve Safety at Horizontal Curves[R]. Texas: Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, 2012.
- [89] WILSON B T, BRIMLEY B K, MILLS J, *et al.* Transportation Research Record[J], 2016, 2550(1): 54–62.
- [90] MERRITT D K, LYON C, PERSAUD B. Evaluation of Pavement Safety Performance[R]. United States: Federal Highway Administration, 2015.