

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.06.018

## 复合因素下机场土质道面聚合物功能性面层耐磨性能研究

肖定侃<sup>1</sup>, 高培伟<sup>1</sup>, 张俊<sup>2</sup>, 许巍<sup>2</sup>, 刘咏茜<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106; 2. 空军工程大学航空工程学院, 西安 710038;  
3. 空军后勤部, 北京 100009)

**摘要:** 机场土质道面易松散, 耐磨性能较差, 产生大量扬尘和碎屑, 危害飞机安全。提出将改性聚脲、环氧树脂以及硅烷渗透型材料作为机场土质道面功能性面层, 对其进行复合因素作用下的磨耗试验, 并通过扫描电子显微镜分析 3 种功能性面层材料的作用机理, 分析功能性面层材料在机场土质跑道的适用性。结果表明, 冻融-紫外线老化下, 与对比组相比, 改性聚脲组质量损失降低 59.7%, 硅烷组降低 32.4%, 环氧树脂组降低 16.1%, 改性聚脲在冻融-紫外线中的改善作用较明显; 环氧树脂在前期虽具有较高的耐磨性能, 但 20 转磨耗之后, 其损耗质量快速增长, 不建议长期使用; 经过冻融-火焰喷蚀、干湿循环-紫外线老化以及干湿循环-火焰喷蚀试验后, 硅烷组的质量损失较小, 分别为 4.28%、3.02%、2.87%, 均远低于对比组, 干湿循环及火焰喷蚀后硅烷组显示出了良好的防水及耐高温性能, 硅烷材料对面层使用性能强化作用明显。硅烷/改性聚脲组合强度在干湿循环后相较初始值降幅仅 23.1%, 冻融循环后仅下降 29.5%, 其抗干湿循环及抗冻性能提升较大。研究结果可为机场土质道面功能性面层材料的选择提供借鉴。

**关键词:** 简易机场; 土质道面; 功能性面层; 道面材料; 耐磨性能

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2024)06-1143-09

## Wear Resistance of Functional Surface Layer of Airport Soil Pavement Polymer Under Composite Factors

XIAO Dingkan<sup>1</sup>, GAO Peiwei<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>2</sup>, XU Wei<sup>2</sup>, LIU Yongqian<sup>3</sup>

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. College of Aeronautical Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

3. Air Force Logistics Department, Beijing 100009, China)

**Abstract:** The soil pavement of the airport is easy to lose, the wear resistance is poor, and a large amount of dust and debris are generated, which endangers the safety of the aircraft. Modified polyurea, epoxy resin and silane permeable materials are used as functional surface layers of airport soil pavement, and the abrasion test under the action of composite factors is carried out. The action mechanism of the three functional surface materials is analyzed by scanning electron microscopy, and the applicability of functional surface materials to the airport soil runway is analyzed. The results show that under freeze-thaw and ultraviolet aging conditions, the mass loss of the modified polyurea group is reduced by 59.7%, the silane group is reduced by 32.4%, and the epoxy resin group is reduced by 16.1% compared with the comparison group, which means the improvement effect of modified polyurea under freeze-thaw and ultraviolet aging conditions. Although epoxy resin has high wear resistance in the early stage, after 20 revolutions of wear, its loss quality grows rapidly, and long-term use is not recommended. After freeze-thaw-flame spraying, dry-wet cycle-ultraviolet aging and dry-wet cycle-flame spray

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52308470); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-YB-375)。

**收稿日期:** 2024-03-26; **修订日期:** 2024-09-06

**通信作者:** 张俊, 男, 副教授, E-mail: zhangjun\_afeu@sina.com。

**引用格式:** 肖定侃, 高培伟, 张俊, 等. 复合因素下机场土质道面聚合物功能性面层耐磨性能研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(6): 1143-1151. XIAO Dingkan, GAO Peiwei, ZHANG Jun, et al. Wear resistance of functional surface layer of airport soil pavement polymer under composite factors[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(6): 1143-1151.

test, the mass loss of the silane group is smallest, which is 4.28%, 3.02% and 2.87%, respectively, which are much lower than those of the comparison group. The silane group shows good waterproof and high temperature resistance after dry and wet cycle and flame etching. The silane material enhances the performance of the surface layer obviously. The strength of the silane/modified polyurea combination decrease by only 23.1% after the initial value after the dry-wet cycle and only 29.5% after the freeze-thaw cycle, indicating that its resistance to dry-wet cycle and frost resistance is greatly improved. The results can provide a reference for the selection of functional surface materials of the airport soil pavement.

**Key words:** airstrip; soil surface; functional surface; surface materials; wear resistance

简易机场是在紧急情况下为弥补永备机场数量不足而修建的供飞机紧急起降的机场,其优点在于经济快速、机动灵活,符合应急救援、抢险救灾的基本要求<sup>[1-2]</sup>。简易机场道面通常为土质跑道,世界各国对简易机场土质道面材料进行了大量研究<sup>[3-6]</sup>。但土质跑道由于自身特点,在干湿交替、温度变化频繁、水分蒸发、紫外线照射等因素下容易产生干缩裂缝和体积变形,进而导致道面出现起皮剥落、孔洞等情况,产生大量扬尘与飞散物,危及飞机的起降滑行<sup>[7-9]</sup>。为此,有必要对土质跑道表面功能层材料在恶劣环境下的耐磨性能进行研究,为土质跑道建设提供参考。

Anderton等<sup>[10]</sup>进行简易机场土质道面应急铺设演练时,通过试验发现在固化土表层直接喷涂一层速凝并具有一定耐久性的聚合物乳液面层,能够有效提升防水性并最大程度地减小粉尘对飞机的不利影响,在飞机通行对面层造成不可避免的损害时,通过喷涂手段可以快速对面层进行修复补喷。刘军忠等<sup>[11]</sup>在对简易机场面层材料进行筛选时,将改性聚脲弹性体、水性环氧树脂、羧基丁苯胶乳等聚合物高分子材料应用于简易机场土质道面的耐磨表层,对其开展了耐磨试验和抗滑试验,对比分析了高分子材料在一般环境条件下的耐磨性能以及抗滑性能,验证了聚合物高分子材料应用在简易机场土质道面的可行性。温小平等<sup>[12]</sup>对土质道面功能性面层进行了磨耗试验、干燥与潮湿情况下

的抗滑试验等,试验结果表明,改性聚脲弹性体在干燥情况下耐磨性较好,土质道面功能性面层在潮湿状态下抗滑性降低,但仍可满足简易机场防滑性的基本要求。

以上对聚合物功能性面层的研究中,多局限在单一因素作用,而机场土质跑道在实际中会受到干湿、冻融、高温、强紫外线等多种因素的复合作用。因此,本文根据土质道面使用的环境特点,对不同聚合物功能性面层材料的纤维加筋固化砂土进行干湿循环、冻融循环、紫外线老化、火焰喷蚀、磨耗等试验,分析它们在多种因素复合作用下的使用性能,并通过扫描电子显微镜(SEM)分析其作用机理,建立土质道面功能性面层材料宏观性能与微观作用机理的对应关系,为我国机场土质道面在不良环境条件下的使用性能的提高提供参考。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料及涂刷

试验所用纤维加筋固化砂土性能参数见表1。借鉴水泥混凝土相关表层强化耐久性试验,为筛选性能优异面层材料,本研究选用了具有代表性的3种表层耐磨耗材料:海洋化工研究所生产的SPUA-103型改性聚脲材料,广州某公司生产的T-8175硅烷浸渍型混凝土保护剂,苏州某公司的HTW-608型环氧树脂和HTW-101型固化剂混合材料。材料性能参数分别见表2和表3。

表1 纤维加筋固化砂土基本性能参数

Table 1 Basic performance parameters of fiber-reinforced solidified sand

最佳含水率/%	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	无侧限抗压强度/MPa				水稳系数/%	
		干燥		饱水		3 d	7 d
		3 d	7 d	3 d	7 d		
9.38	1.94	4.82	5.5	2.45	3.1	52	61

表2 改性聚脲性能参数

Table 2 Modified polyurea performance parameters

名称	双组分比例	固含量/%	固化时间/h	底漆
改性聚脲	31:1	50	12	黑色
拉伸强度/MPa	撕裂强度/(kN·m <sup>-1</sup> )	邵氏硬度	干态适用温度/°C	施工温度/°C
≥20	82.2	85~95	-60~100	10~40

表3 硅烷、环氧树脂以及固化剂性能参数

Table 3 Performance parameters of silane, epoxy resin and curing agent

名称	密度/(kg·L <sup>-1</sup> )	黏度	环氧当量	活泼氢当量
T-1875型硅烷	0.915~0.990(25℃)	1~5 mm <sup>2</sup> /s(25℃)		
环氧树脂	1.12	7 000~11 000 cps	180~190	
固化剂	1.09	3 000~65 00 cps		175

### 1.2 试件涂刷

制作  $D150 \times H50$  的圆柱形试件,试件干燥后对试件上表面进行磨砂处理,磨砂后去除表面浮尘,通过喷涂、涂刷的方法将功能性面层材料铺设于试件的表层。改性聚脲材料配制好后搅拌均匀,用喷枪对试件进行喷涂,设定厚度为 2 mm,分 5 次喷涂,相邻两次喷涂的时间间隔大于 10 min 或上次喷涂不流挂时为止。将 HTW-608 型环氧树脂和水稀释后按照树脂:固化剂=1:1 的比例进行配制,充分搅拌均匀后用毛刷刷涂,铺设厚度设定为 2 mm。T-1875 硅烷材料的试验用量为  $0.35 \text{ kg/m}^2$ 。3 种材料均涂刷至试件的上表面。

### 1.3 测试方法

试验操作规程参照 JTG E51-2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行<sup>[13]</sup>,冻融循环试验过程如图 1 所示,干湿循环试验过程如图 2 所示;紫外线老化试验参照文献[14],设置暴露周期

为 11 h 辐照 ( $65 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 1 h 黑暗 ( $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ); 火焰喷蚀试验参照文献[15],进行试验时,火焰喷射器喷口距离试样表层约 20 cm,方向呈  $30^\circ$ ,并用高温红外线测温仪对试样中心区域实时表层温度进行监控,当中心区域温度上升至  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  时开启秒表进行计时,达到试验时间后关闭燃烧器。磨耗试验主要参考 JTG E30-2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》<sup>[16]</sup>中水泥混凝土的耐磨性试验进行,磨头转速设定为 18 r/min,负荷为 200 N。试验时将试件放置于磨耗机上磨耗 10 圈进行预磨耗,按照试验设定圈数对功能性面层材料试样进行磨耗,测量经过不同处理后的 50 转磨耗质量变化以及累计磨耗质量。冻融-紫外线老化一个循环设定为先冻融循环 2 次、然后紫外线照射 24 h;冻融-火焰喷蚀一次循环设定为先冻融循环 2 次后立即进行火焰喷蚀试验 5 min;干湿循环-紫外线老化以及干湿循环-火焰喷蚀循环参照前述试验方法进行。试验过程如图 3 所示。

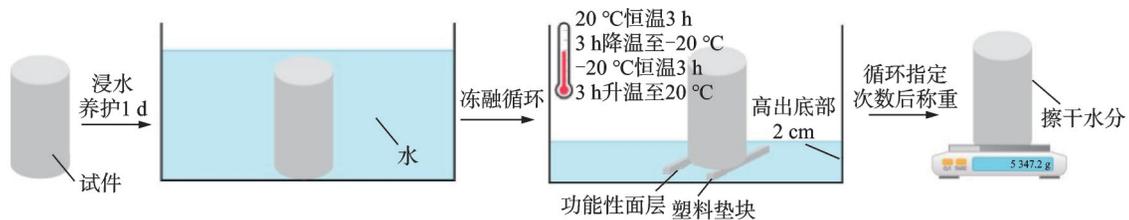


图 1 冻融循环试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of the freeze-thaw cycle test

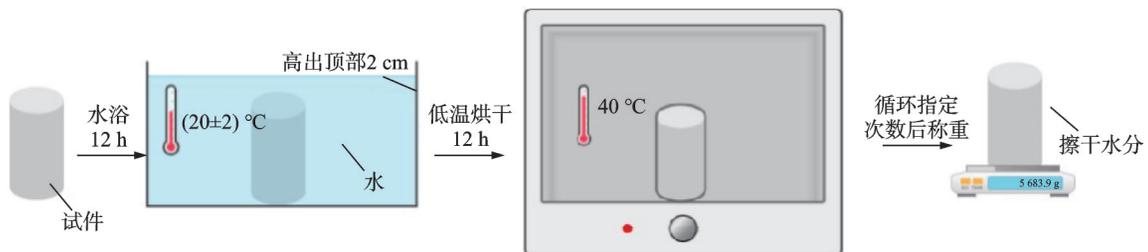


图 2 干湿循环试验示意图

Fig.2 Schematic diagram of the dry-wet cycle test



(a) Ultraviolet aging (b) Flame injection (c) Abrasion

图 3 紫外线老化、火焰喷蚀、磨耗试验过程

Fig.3 Test processes of ultraviolet aging, flame injection and abrasion

## 2 试验结果分析

### 2.1 冻融循环-紫外线老化对磨耗性能的影响

图 4 为冻融-紫外线老化循环后试样的质量损失率,图 5 为功能性面层材料冻融-紫外线老化循环后 50 转磨耗质量,图 6 为功能性面层材料在冻融-紫

外线老化 6 次循环后累计磨耗质量。由图 4~6 可知,冻融-紫外线老化循环对改性聚脲弹性体的影响较小,相较于对比组,改性聚脲组质量损失降低 59.7%,50 转磨耗质量改性聚脲弹性体组较对比组降低 17.8%;环氧树脂在经历 3 次循环后 50 转磨耗

质量显著上升,在20转后由于面层材料的破坏导致土层被磨耗,使得20转后累计磨耗质量大幅度增长。在经历冻融-紫外线老化循环后磨耗性能最好的是改性聚脲弹性体,环氧树脂最差。

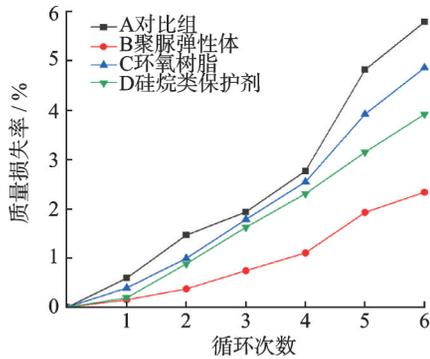


图4 冻融循环-紫外线老化后功能性面层质量损失率  
Fig.4 Mass loss rate of functional surface layer after freeze-thaw cycle-ultraviolet aging

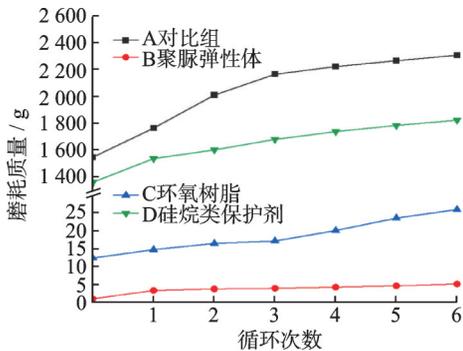


图5 冻融循环-紫外线老化后功能性面层50转磨耗质量变化曲线  
Fig.5 Mass change curves of functional surface layer after 50 revolutions of wear under freeze-thaw cycle-ultraviolet aging

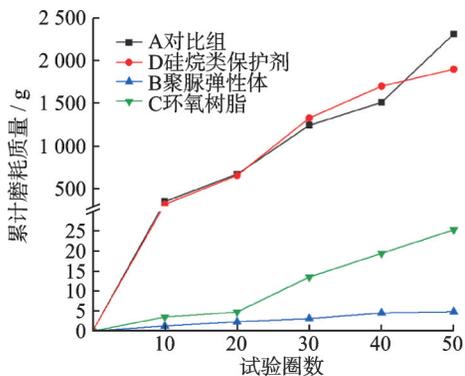


图6 功能性面层冻融循环-紫外线老化后累计质量损耗  
Fig.6 Cumulative mass loss of functional surface layer after frozen-thaw cycle-ultraviolet aging

2.2 冻融循环-火焰喷蚀对磨耗性能的影响

图7为在冻融-火焰喷蚀循环后试样的质量损失率。由图7可知,功能性面层的质量损失率随冻融-火焰喷蚀循环次数的增加而增大。在冻融循环和火焰喷蚀试验的复合作用下,硅烷类保护剂作为渗入型材

料其稳定性能最好,聚脲弹性体次之,环氧树脂组较差,质量损失率分别为4.28%、4.52%、5.16%。图8为冻融-火焰喷蚀循环后试样的50转磨耗质量,图9为冻融-火焰喷蚀6次循环后试样的累计磨耗质量。由图8、9可知,功能性面层在经历6次冻融-火焰喷蚀循环后累计磨耗质量随磨耗圈数增加而逐渐增大,硅烷组每磨耗10转累计磨耗质量的增长率比较稳定;6次冻融-火焰喷蚀循环后硅烷组50转磨耗质量较对比组降低19.7%,说明硅烷在冻融循环和火焰喷蚀复合作用下对耐磨性能有明显提升。

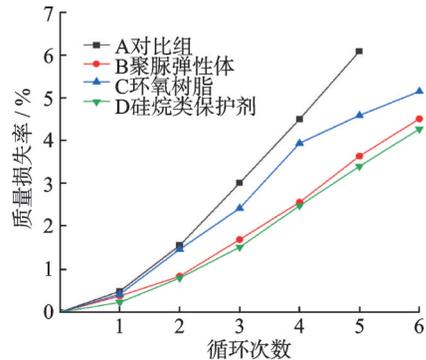


图7 冻融-火焰喷蚀循环下功能性面层质量损失率  
Fig.7 Mass loss rate of functional surface layer under freeze-thaw-flame injection cycle

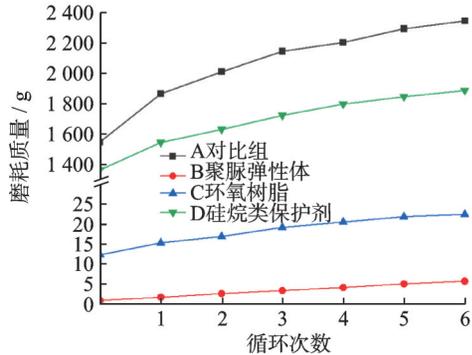


图8 冻融-火焰喷蚀循环下功能性面层50转磨耗质量变化曲线  
Fig.8 Mass change curves of functional surface layer after 50 revolutions of wear under freeze-thaw-flame injection cycle

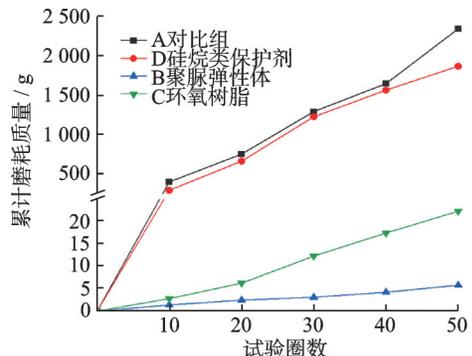


图9 冻融-火焰喷蚀循环下功能性面层累计质量损耗曲线  
Fig.9 Cumulative mass loss curves of functional surface layer under freeze-thaw-flame injection

### 2.3 干湿循环-紫外线老化对磨耗性能的影响

图 10 为干湿循环-紫外线老化后试样的质量损失率。由图 10 可知,相同次数的干湿循环-紫外线老化试验,试样的质量损失率分别是聚脲组 4.51%、环氧树脂组 4.93%、硅烷组 3.02%,均低于对比组的 5.06%,说明 3 种功能性面层材料的抗干湿循环-紫外线老化复合作用的性能显著增强。图 11 为干湿循环-紫外线老化后试样的 50 转磨耗质量。由图 11 可知,干湿循环-紫外线老化次数相同时,试样的 50 转磨耗质量远低于对比组,其中改性聚脲效果最佳,其 6 次试验循环的磨耗质量仅为

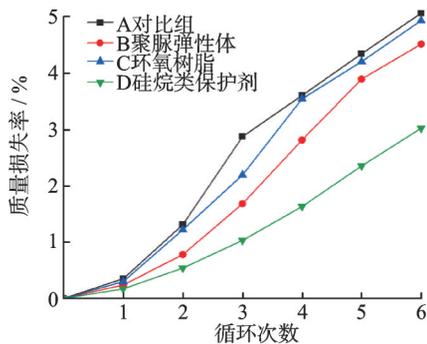


图 10 干湿循环-紫外线老化下功能性面层质量损失率  
Fig.10 Mass loss rate of dry and wet cycle functional surface layer under-ultraviolet aging

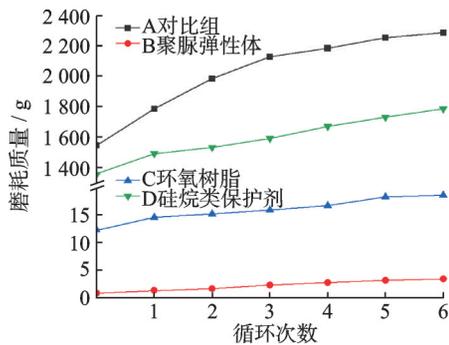


图 11 干湿循环-紫外线老化下功能性面层 50 转磨耗质量变化曲线  
Fig.11 Mass change curves of functional surface layer after 50 revolutions of wear under dry-wet cycle-ultraviolet aging

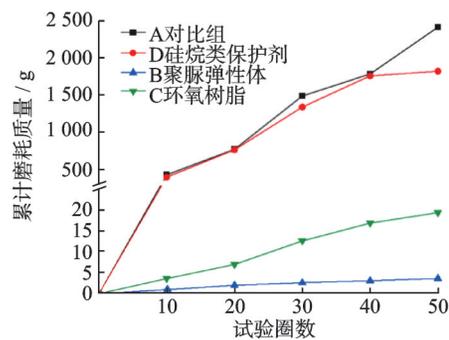


图 12 功能性面层 6 次干湿循环-紫外线老化后累计质量损耗曲线  
Fig.12 Cumulative mass loss curves of functional surface layer after six dry-wet cycles-ultraviolet aging

3.42 g, 较对比组 50 转磨耗质量降低约 22.0%。图 12 为 6 次干湿循环-紫外线老化循环后试样的累计磨耗质量。由图 12 可知,环氧树脂在前期虽具有较高的耐磨性能,但经过 20 转磨耗之后,其损耗质量快速增长,说明其结构牢固性较低,不建议相对长期的使用。

### 2.4 干湿循环-火焰喷蚀对磨耗性能的影响

图 13 为干湿循环-火焰喷蚀老化后试样的质量损失率。从图 13 可知,在干湿循环-火焰喷蚀老化试验之后,硅烷组的质量损失最小,经过 6 次循环试验质量损失仅为 2.87%,效果远高于对比组的 6.13%。图 14 为干湿循环-火焰喷蚀老化试验后试样的 50 转磨耗质量,图 15 为经过 6 次干湿循环-火

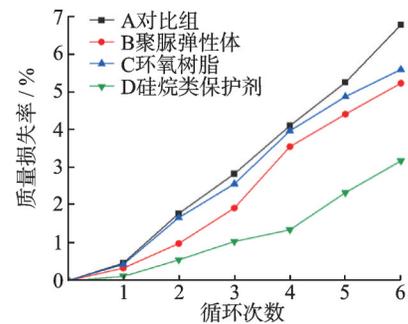


图 13 干湿-火焰喷蚀循环下功能性面层质量损失率  
Fig.13 Mass loss rate of functional surface layer under dry and wet-flame injection cycle

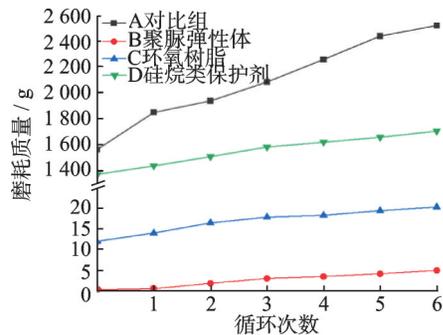


图 14 干湿-火焰喷蚀循环下功能性面层 50 转磨耗质量变化曲线  
Fig.14 Mass change curves of functional surface layer after 50 revolutions of wear under dry-wet cycle-flame injection

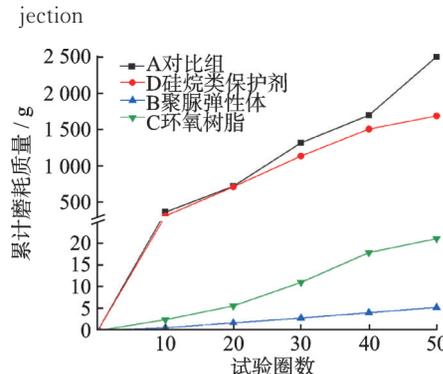


图 15 功能性面层干湿循环-火焰喷蚀后累计质量损耗  
Fig.15 Cumulative mass loss of functional surface layer after dry and wet cycle-flame injection

焰喷蚀老化试验后试样的累计磨耗质量。从图14、15可知,干湿循环-火焰喷蚀老化次数相同时,硅烷组的50转磨耗质量远低于对比组;经过6次干湿循环-火焰喷蚀老化试验后,硅烷组50转磨耗质量较对比组减少32.0%,说明经干湿循环及火焰喷蚀后硅烷组显示出良好的防水及耐高温性能。

### 3 最优组合功能性面层材料力学性能试验及结果分析

将改性聚脲组材料和硅烷材料分别强化表层和内部结构。试样为7 d龄期的复合固化砂土试样,将试样分为B<sub>1</sub>(改性聚脲组)、D<sub>1</sub>(硅烷组)、BD<sub>1</sub>(最优组合组)以及不涂刷强化材料的对比组A<sub>1</sub>共4个试验组。B<sub>1</sub>组改性聚脲按2.0 kg/m<sup>2</sup>涂布率和厚度2 mm的用量喷涂,D<sub>1</sub>组硅烷用量为0.35 kg/m<sup>2</sup>,BD<sub>1</sub>组改性聚脲与硅烷材料用量分别为2.0 kg/m<sup>2</sup>和0.35 kg/m<sup>2</sup>。BD<sub>1</sub>组涂刷时先进行硅烷材料涂刷,待试件表层硬化干燥后再进行改性聚脲材料的喷涂,改性聚脲厚度约为2 mm。功能性面层材料均在达到养护龄期的前一天即6 d龄期时进行涂刷。

图16为最优组合材料分别在干湿循环和冻融循环条件下的无侧限抗压强度与质量变化。由图16可知,涂刷最优组合材料的试样初始强度相较于对比组并无明显提升,但在经过干湿循环和冻

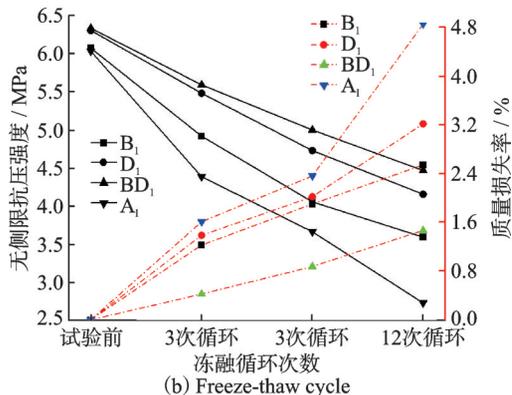
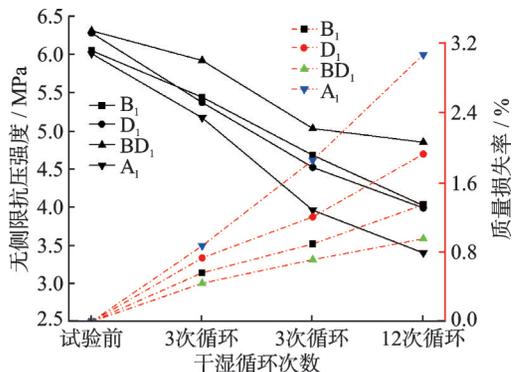


图16 最优组合材料干湿及冻融循环后强度及质量变化  
Fig.16 Strength and quality changes of the optimal combined materials after dry, wet and freeze-thaw cycles

融循环后,其无侧限抗压强度和质量损失率相较于硅烷组、改性聚脲组以及对比组均有明显提升,可知最优组合在抗干湿循环和抗冻性能方面有较大提升;经历相同次数的干湿循环以及冻融循环之后,硅烷/改性聚脲组合的无侧限抗压强度最高、质量损失率最低,其性能高于硅烷组、改性聚脲组以及对比组;硅烷/改性聚脲组合强度在干湿循环后相较初始值降幅仅23.1%,冻融循环后仅下降29.5%,其抗干湿循环及抗冻性能提升较大。

### 4 功能性面层微观机理分析

#### 4.1 功能性面层材料初始微观分析

图17~19为3种功能性面层材料在不同放大倍数下的微观形貌。可以看出,改性聚脲弹性和环氧树脂面层的表面构造比较平滑,主要以裹覆在表面的膜状结构为主。由于固化砂土的孔隙较大,使得改性聚脲材料在喷涂过程中一部分渗入表层颗粒之间的孔隙中,但不影响改性聚脲材料表面整体平滑性。由于硅烷材料属于渗入型结晶材料,因此在复合固化砂土表面并没有形成类似改性聚脲和环氧树脂面层的膜状结构,在外观上与不参加硅

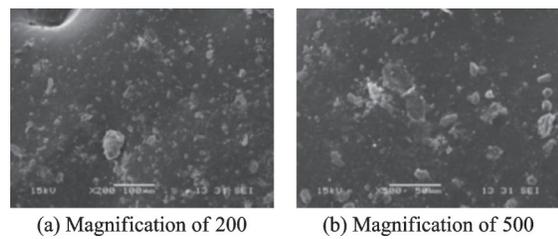


图17 改性聚脲弹性体面层初始状态微观形貌

Fig.17 Microscopic morphology of the initial state of surface layer of modified polyurea elastomer

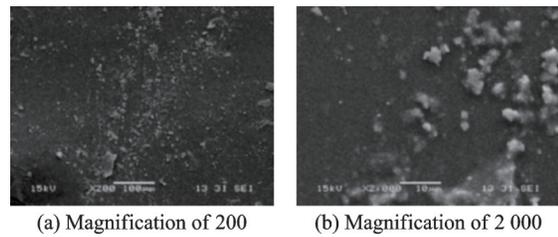


图18 环氧树脂面层初始状态微观形貌

Fig.18 Microscopic morphology of the initial state of epoxy resin surface layer

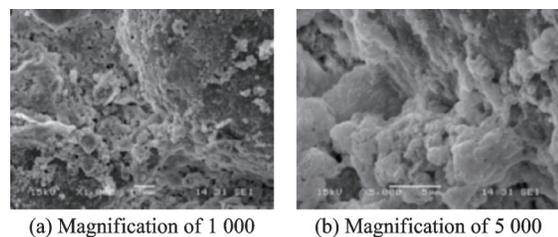


图19 硅烷保护剂面层初始状态微观形貌

Fig.19 Microscopic morphology of the initial state of the surface layer of silane protectant

烷材料时差别很小。相邻土颗粒间水化产物与硅烷结晶体相互嵌套,硅烷分子能够有效附着在微小裂缝与空隙之中,土颗粒间水化物的孔隙大大减小,从而形成了非常致密的空间结构,这使得硅烷组试样的防水性、抗冻性显著增强。

#### 4.2 冻融循环后微观分析

图 20 为改性聚脲弹性体面层经过 6 次冻融循环后在不同放大倍数下的微观形貌。可以看到,在经过多次冻融循环后,改性聚脲材料面层出现了大量“韧窝”状凹陷,说明冻融循环破坏了土体面层及内部结构,改性聚脲材料在冻融循环后会产生较大变化,其耐磨性会有一定程度下降。虽然改性聚脲材料产生大量凹陷,但这种凹陷没有进一步的形成大量的孔洞,这使得改性聚脲面层在经过冻融循环时减缓了水分的浸入与冻胀破坏,从而在一定次数的冻融循环之后仍能够保持较高的强度,这与上述试验结果相符。

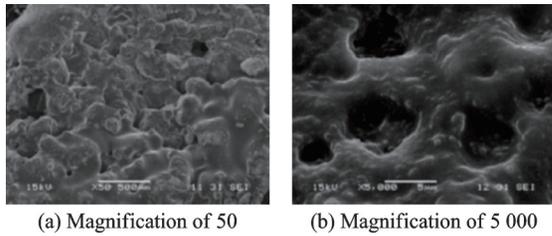


图 20 改性聚脲弹性体面层经 6 次冻融循环后微观形貌  
Fig.20 Microscopic morphology of the surface layer of modified polyurea elastomer after six freeze-thaw cycles

图 21 为硅烷材料面层经过冻融循环后不同放大倍数的微观图像。通过对比可知,原本致密的硅烷结晶体与固化剂水化物胶凝结构经过冻融循环后出现大量微小孔洞,相邻土颗粒之间联接结构遭到破坏,使得部分自由水进入孔隙之中,在较低温度时水分冻胀作用进一步破坏土体,从而使强度和

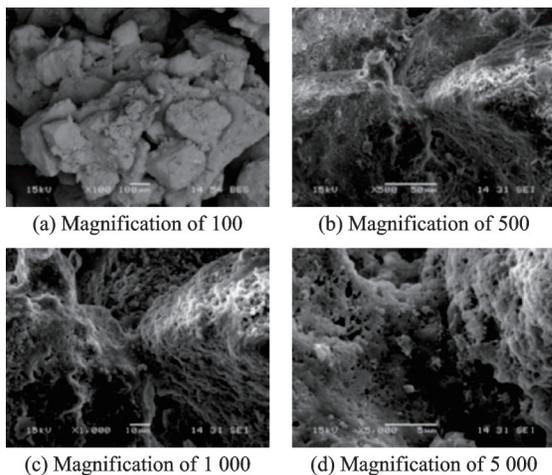


图 21 硅烷保护剂面层经过 6 次冻融循环微观形貌  
Fig.21 Microscopic morphology of the surface layer of silane protector after six freeze-thaw cycles

耐磨性下降。硅烷组与改性聚脲材料组和环氧树脂组相比,经过冻融循环后,内部结构受损较轻,在一定程度上减弱了质量损失和强度损耗。

图 22 为环氧树脂面层经过冻融循环后在不同放大倍数下的微观形貌,与初始状态相比,冻融循环试验后,环氧树脂材料表面由平滑变得十分粗糙,面层出现了大量具有膜状结构的凹凸不平的纹理构造;从放大 500 倍图像可以看出,初始状态较为平滑的表层也出现了孔洞,这对环氧树脂面层的抗冻性产生了严重的破坏作用,也显著影响了质量变化,这与冻融循环质量损失增大强度降低的现象一致。

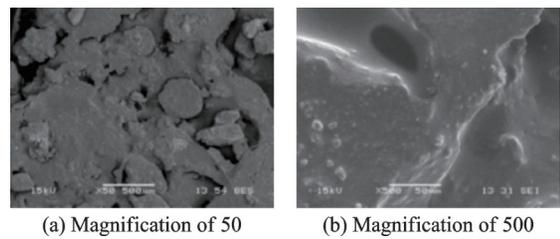


图 22 环氧树脂面层经 6 次冻融循环后微观形貌  
Fig.22 Microscopic morphology of epoxy resin surface layer after six freeze-thaw cycles

#### 4.3 紫外线老化后微观分析

图 23~25 为 3 种功能性面层材料经紫外线老化后在不同放大倍数下的微观图像,选取紫外线照射时间为 96 h 之后的功能性面层材料试样进行观测。可以看出,改性聚脲材料经过紫外线老化试验之后表层出现细微的波纹状褶皱,一些区域出现了较深的“沟壑”状纹理,但并未见微裂缝和孔洞。硅烷材料经过紫外线老化试验后,在土颗粒中的连接

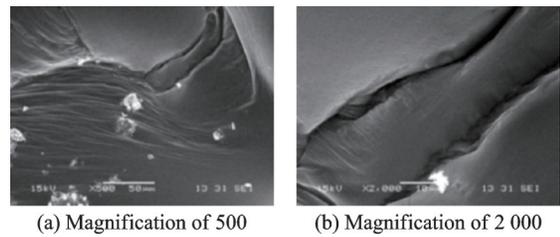


图 23 改性聚脲弹性体面层经紫外线老化后微观形貌  
Fig.23 Microscopic morphology of the surface layer of modified polyurea elastomer after ultraviolet aging

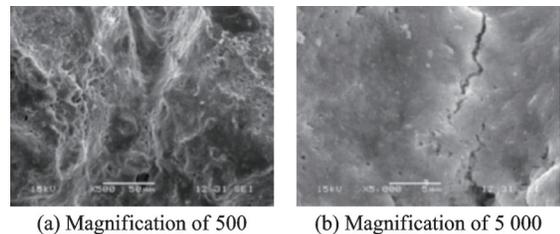
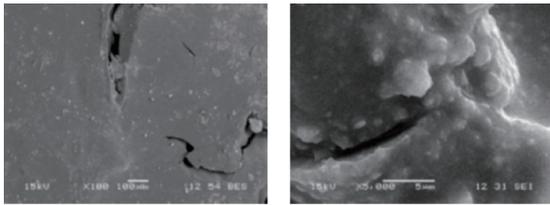


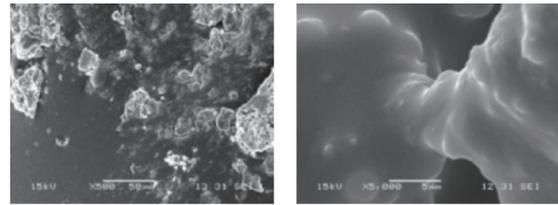
图 24 硅烷保护剂面层经紫外线老化后微观形貌  
Fig.24 Microscopic morphology of the surface layer of silane protectant after ultraviolet aging



(a) Magnification of 100 (b) Magnification of 5000

图25 环氧树脂面层经紫外线老化后微观形貌

Fig.25 Microscopic morphology of epoxy resin surface layer after ultraviolet aging



(a) Magnification of 500 (b) Magnification of 5000

图28 环氧树脂面层经火焰喷蚀后微观形貌

Fig.28 Microscopic morphology of epoxy resin surface layer after flame spraying

结构以及水化产物的形状、孔隙变化、微裂缝发展等方面与初始状态相比未见明显损伤,这说明紫外线对硅烷材料的影响较小。环氧树脂材料在紫外线作用下生成较多较大的裂缝及孔洞,一些裂缝呈现类似干缩裂缝的收缩特征,在3种功能性面层材料中的损伤也最为明显,说明环氧树脂对紫外线老化最为敏感。

#### 4.4 火焰喷蚀后微观分析

图26~28为3种功能性面层材料经火焰喷蚀老化后在不同放大倍数下的微观图像,选取火焰喷蚀时间为30 min之后的功能性面层材料试样进行观测。由图可知,经火焰喷蚀之后,改性聚脲弹性体面层平滑膜状结构受损严重,在高温作用下,聚脲弹性体面层发生大量褶皱,部分区域因为褶皱继续收缩出现了轻微撕裂现象,使其防水抗冻能力下降。硅烷材料微裂缝发展明显裂缝特征为呈簇群分布特点,裂缝簇群沿裂缝方向开展,引起了薄弱部位的开裂,这使得硅烷原本优良的防水抗冻性能减弱。环氧树脂面层材料经过火焰喷蚀试验后,部分区域膜状结构发生凹陷,并伴有结构层裂纹的产

生和土体裸露,致使高温作用后抗冻防水性能及耐磨性能的降低。

### 5 结 论

(1) 改性聚脲弹性体的抗冻和抗紫外老化性能较优;环氧树脂在前期虽具有较高的耐磨性能,但20转磨耗之后,其损耗质量快速增长,不建议长期使用;经过系列试验后,硅烷组的质量损失较小,远低于对比组,硅烷材料对面层使用性能强化作用明显。

(2) 改性聚脲材料与环氧树脂材料具有一定规模的高强度膜状结构覆盖外层裂缝并阻挡水的进入,减弱水的冻胀破坏。硅烷组材料渗入土体水化物网状结构内部并填补微小孔隙,可阻止冻融条件下水分的迁移,降低了冻融破坏危害。

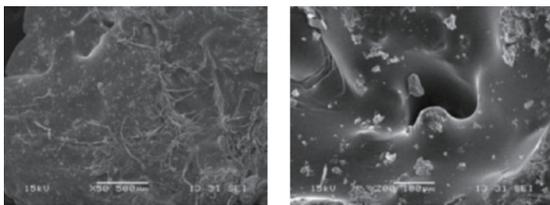
(3) 改性聚脲材料适宜布设在纤维加筋固化砂土的表层;硅烷类保护剂能够渗入固化土内部并增强固化土内部黏聚力与土颗粒联接结构的强度,表现出良好的防水性,可将硅烷类保护剂用于内部增强材料。

#### 参考文献:

[1] 刘军忠,翁兴中,张俊,等. 简易机场纤维格栅-水泥土基层使用性能研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(6): 1043-1048.  
LIU Junzhong, WENG Xingzhong, ZHANG Jun, et al. Study on the performance of simple airport fiber grille-cement soil base[J]. Journal of Building Materials, 2014,17(6): 1043-1048.

[2] PYTKA J, TARKOWSKI P, DABROWSKI J, et al. Soil stress and deformation determination under a landing airplane on an unsurfaced airfield[J]. Journal of Terramec-Hanics, 2003, 40(4): 255-269.

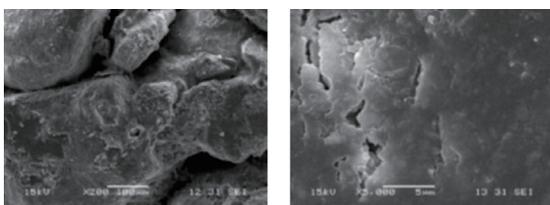
[3] 谭滔,蔡良才,刘晓军,等. 简易机场土质跑道设计方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(6): 11-14.  
TAN Tao, CAI Liangcai, LIU Xiaojun, et al. Design method of soil runway of summary airstrip[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2012, 13(6): 11-14.



(a) Magnification of 50 (b) Magnification of 200

图26 改性聚脲弹性体面层经火焰喷蚀后微观形貌

Fig.26 Microscopic morphology of the surface layer of modified polyurea elastomer after flame spraying



(a) Magnification of 200 (b) Magnification of 5000

图27 硅烷保护剂面层经火焰喷蚀后微观形貌

Fig.27 Microscopic morphology of the surface layer of silane protector after flame spraying

- [4] SOBHAN K, MASHNAD M. Mechanical stabilization of cemented soil-fly ash mixtures with recycled plastic strips[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2003, 129(10): 943-947.
- [5] 张俊, 高培伟, 许巍, 等. 基于大型运输机作用的土跑道轮辙预估模型的建立方法: 中国, CN112149307A [P]. 2020-12-29.  
ZHANG Jun, GAO Peiwei, XU Wei, et al. The establishment method of the prediction model of earth runway rut based on the action of large transport aircraft: China, CN112149307A[P]. 2020-12-29.
- [6] ESTABRAGH A R, NAMDAR P, JAVADI A. Behavior of cement-stabilized clay reinforced with nylon fiber[J]. *Geosynthetics International*, 2012, 19(1): 85-92.
- [7] 许嘉豪. 机场跑道异物检测系统设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2024.  
XU Jiahao. Design of the foreign body detection system on the airport runway[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.
- [8] ZHANG Jun, WENG Xingzhong, JIANG Le, et al. Durability of airport concrete pavement improved by four novel coatings[J]. *Advances in Cement Research*, 2019, 58(5): 1-11.
- [9] CHOW A T. Temperature, water content and wet-dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(3): 477-488.
- [10] Anderton G L, Gartrell C A, Newman J K, . Performance measurements of pavement matting systems by full-scale testing over differing soil strengths[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009, 21(10): 561-568.
- [11] 刘军忠, 翁兴中, 张俊, 等. 应急机场土质道面疲劳变形特性模型试验[J]. *西南交通大学学报*, 2014, 49(3): 412-418.  
LIU Junzhong, WENG Xingzhong, ZHANG Jun, et al. Model test of fatigue and deformation characteristics of soil road surface in emergency airport [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2014, 49(3): 412-418.
- [12] 温小平, 翁兴中, 张俊, 等. 快速固化土质道面功能性面层材料性能研究[J]. *材料导报*, 2015, 29(18): 89-93.  
WEN Xiaoping, WENG Xingzhong, ZHANG Jun, et al. Study on the material properties of the functional surface layer of the rapidly solidified soil pavement surface[J]. *Material Guide*, 2015, 29(18): 89-93.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test procedure for stabilized material of highway engineering: TG E51—2009 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [14] ASTM. Rapid UV aging test: G154—2005[S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2005.
- [15] ASTM. Determine the standard implementation specification for 20 mm (50 W) and 125 mm (500 W) test flame for small-scale combustion test on plastic materials: D5207—2009[S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2009.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程: JTG E30—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test regulations for cement and cement concrete in highway engineering: JTG E30—2005 [S]. Beijing: China Communications Press, 2005.

(编辑:夏道家)