

文章编号:1674-8190(2019)01-139-08

# 机场道面浅层高早强快速修补砂浆的性能研究

田耀刚<sup>1</sup>,王帅飞<sup>1</sup>,卢东<sup>1</sup>,赵成<sup>1</sup>,杨文奇<sup>2</sup>,李炜光<sup>3</sup>

(1. 长安大学 材料科学与工程学院,西安 710064)

(2. 陕西省交通运输厅 建设处,西安 710075)

(3. 长安大学 公路学院,西安 710064)

**摘要:** 在满足繁忙机场不停航施工要求下,制备出道面浅层高早强快速修补砂浆对保障飞机准点运行及安全起降具有重要意义。采用自制的特种胶凝材料,通过优选砂胶比、水胶比及外加剂复配等技术制备出高早强快速修补砂浆,研究该修补砂浆的力学性能、黏结性能与耐久性能。结果表明:高早强快速修补砂浆 2 h 抗压、抗折强度分别为 32.5 MPa 和 4.8 MPa,且 2 h 和 28 d 黏结强度可分别达到其抗折强度的 75% 和 84%;与 C40 混凝土相比,该修补砂浆早期具有微膨胀性,可补偿收缩,减小与旧混凝土间变形差异,120 d 收缩率降低了 60.5%,3 d 耐磨性可达到 C40 混凝土 28 d 的耐磨性,且具有优良的抗渗性与抗冲击性。

**关键词:** 机场道面;浅层病害;快速修补;高早强砂浆;飞行安全

**中图分类号:** TQ177.6;V351.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.01.018

## Research on the Performance of High Early Strength Quick Repair Mortar for Shallow Layer of Airport Pavement

Tian Yaogang<sup>1</sup>, Wang Shuaifei<sup>1</sup>, Lu Dong<sup>1</sup>, Zhao Cheng<sup>1</sup>, Yang Wenqi<sup>2</sup>, Li Weiguang<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

(2. Construction Office, Shaanxi Provincial Transport Department, Xi'an 710075, China)

(3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of non-suspend air construction of busy airports, the preparation of high early strength quick repairing mortar is of great significance to ensure on-time operation of aircraft and the safety of aircraft take-off and landing. The special cementing material is used to prepare quick repair mortar. It is obtained by optimizing the sand to binder ratio, the water to binder ratio and the proportion of admixtures. The mechanical properties, bond properties and durability of the repaired mortar are studied. Results indicate that its 2 h compressive strength and flexural strength can reach 32.5 MPa and 4.8 MPa, respectively, and the bending strength reached 75% and 84% of the flexural strength at 2 h and 28 d, respectively. Compared with C40 concrete, the repair mortar has micro-expansion in the early stage, which can compensate for shrinkage and reduce the deformation difference between the old concrete. The shrinkage rate of the 120 d is reduced by 60.5%, and the wear resistance of 3 d can reach the wear resistance of C40 concrete for 28 d. At the same time, it has excellent impermeability and impact resistance.

**Key words:** airport pavement; shallow damages; quick repair; high early strength mortar; flight safety

收稿日期:2018-07-04; 修回日期:2018-09-10

基金项目:国家自然科学基金(51878065);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JM5030)

陕西省交通科技厅资助项目(12-22k);河南省交通规划设计研究院科研课题(220231180007)

通信作者:田耀刚,tiangang78@126.com

引用格式:田耀刚,王帅飞,卢东,等. 机场道面浅层高早强快速修补砂浆的性能研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(1): 139-146.

Tian Yaogang, Wang Shuaifei, Lu Dong, et al. Research on the performance of high early strength quick repair mortar for shallow layer of airport pavement[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(1): 139-146. (in Chinese)

## 0 引言

道面作为机场的主体工程,承担着飞机停放、起飞、降落、维修养护等重要任务,其服务水平的好坏将直接影响飞机起降的安全性与舒适性<sup>[1]</sup>。近年来,随着我国航空运输业的快速发展,机场航班日益繁忙,导致大型飞机数量逐步增加、飞机起降次数频繁增多。道面受飞机高荷载反复作用(冲击与摩擦)<sup>[2]</sup>与环境因素(风、温度、侵蚀介质)<sup>[3-7]</sup>影响,局部磨损严重,易导致机场道面混凝土出现松散、剥落、裂缝等浅层病害。若不及时处理,会进一步加速机场道面混凝土路用性能衰变;更为重要的是,从机场道面脱落的碎屑极有可能被卷入发动机中,严重威胁飞机的飞行安全<sup>[8-9]</sup>。为了保证飞机飞行安全,防止道面进一步产生结构性破坏,造成更大的生命财产损失,必须对道面浅层病害及时进行修补<sup>[10-11]</sup>。

目前,国内外学者发表了大量关于修补材料的文献,主要围绕特种水泥、环氧树脂砂浆与聚合物改性水泥砂浆三大类进行研究。Yang Q 等<sup>[12]</sup>和孙佳龙等<sup>[13]</sup>认为磷酸镁水泥用作道路修补材料具有早强、快硬、黏结性能好等优点,但该类修补材料需加入改性材料才可满足路用性能要求;杨正宏等<sup>[14]</sup>研究表明聚合物乳液能够提高修补砂浆的抗折强度与黏结强度,但存在施工性能差、早期强度发展缓慢、污染环境等问题;张文武等<sup>[15]</sup>和 Luo J 等<sup>[16]</sup>研究表明环氧树脂砂浆干缩小、与旧路面黏结力强、修补方法简单,但该类砂浆存在疲劳破坏与老化现象。以上修补材料主要针对道路混凝土病害修补,鲜有涉及机场道面浅层病害的修补,尤其缺少在繁忙机场不停航施工要求下机场道面修补材料的研究。

本文采用自制的特种胶凝材料,通过优选砂胶比、水胶比、矿物掺合料复掺比例等技术手段,并使用减水剂、增强剂和调凝剂复配的方式制备出一种高早强快速修补砂浆,以期对保障飞行安全、提高机场道面使用寿命、降低维修费用等方面具有重要意义。

## 1 快速修补材料技术要求

按照《民用机场飞行区场地维护技术指南》

(AC-140-CA-2010-3),根据机场道面病害特点、不停航施工要求以及道面使用性能要求,作为机场道面修补材料应满足以下技术要求:

(1) 快硬早强。修补材料必须快硬早强,且与原机场道面混凝土具有良好黏结性能。由于在不停航施工要求下进行修补,要求修补材料 2~3 h 达到通航要求,即通航时抗压强度 $\geq 30$  MPa,抗折强度 $\geq 3.5$  MPa,黏结强度 $\geq 3.5$  MPa。

(2) 耐久性。要求修补材料 28 d 收缩率 $\leq 300 \times 10^{-6}$ ,且允许修补材料具有微膨胀性,补偿收缩;耐磨性高于普通混凝土,提高抵抗飞机与道面的磨耗作用;具有良好的抗冲击能力,可抵抗载荷的反复作用。

## 2 原材料及试验

### 2.1 原材料

#### (1) 胶凝材料

选用自制的特种胶凝材料,以普通硅酸盐水泥 42.5R 为基础材料,加入硫铝酸盐水泥复配制得,其主要技术指标如表 1 所示。

表 1 胶凝材料技术指标

Table 1 Technical indexes of cementitious material

凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		安定性 (沸煮法)	标准稠度 用水量/%
初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d		
20	30	5.7	9.8	30.0	52.0	合格	28

#### (2) 矿物掺合料

选用的矿粉等级为 S95,主要化学成分为 CaO、SiO<sub>2</sub> 及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,共占总量的 90% 以上,其主要技术指标如表 2 所示;粉煤灰主要的化学成分为 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,其主要技术指标如表 3 所示。

表 2 矿粉主要技术指标

Table 2 Technical indexes of mineral powder

技术指标	实测值	技术指标	实测值
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.93	含水量/%	0.11
比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	410	SO <sub>3</sub> /%	1.92
活性指数/%	77	烧失量/%	0.12

表 3 粉煤灰主要技术指标  
Table 3 Technical indexes of fly ash

单位: %			
技术指标	实测值	技术指标	实测值
细度	22.10	含水量	0.35
需水比	101	SO <sub>3</sub>	0.46
烧失量	0.63	游离 CaO	0.08

(3) 集料

选用天然河砂和石英砂,其中,天然河砂细度模数 2.8;石英砂粒径 0.6~2.7 mm,密度 2 650 kg/m<sup>3</sup>,硬度 5 HB,SiO<sub>2</sub> 含量 97.6%。

(4) 纤维

选用聚丙烯纤维,其主要技术指标如表 4 所示。

表 4 聚丙烯纤维主要技术指标

Table 4 Technical indexes of polypropylene fiber

技术指标	实测值	技术指标	实测值
直径/μm	34.3	断裂强度/MPa	600
长度/mm	6	断裂伸长率/%	25.6
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.92	模量/MPa	4 830

(5) 外加剂

综合考虑减水剂的减水效果与水泥基材料的相容性、稳定性,确定选用减水剂为萘系减水剂,减水率为 15~25%;选用的增强剂和调凝剂分别为有机系早强剂、无机系调凝剂。

(6) 界面剂

为了提高修补砂浆与旧水泥混凝土间的黏结性能,采用界面剂聚合物乳液 YJJ,通过试验优选聚合物乳液 YJJ 与胶凝材料的比例为 1:2。

2.2 测试方法

(1) 抗压、抗折强度

按照《民用机场飞行区场地维护技术指南》(AC-140-CA-2010-3)测试修补砂浆的抗压、抗折强度。成型尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm,将成型后的试件放入养护箱((20±1)℃,相对湿度大于 90%)养护至规定龄期测试抗压、抗折强度。

(2) 黏结强度

黏结强度直接影响修补后修补砂浆与原道面的整体性与使用寿命,本文采用弯曲拉应力法评价修补砂浆与机场道面 C40 普通水泥混凝土的黏结

强度。其测试方法为:预先成型尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的 C40 混凝土试块,养护 28 d 后,采用切割机将其切割成 40 mm×40 mm×80 mm 试块,用粗砂纸打毛尺寸为 40 mm×40 mm 的截面,并将该截面作为黏结面,放入 40 mm×40 mm×160 mm 试模一端,另一端采用修补砂浆填满,标准养护至规定龄期测试黏结抗折强度,测试方式如图 1 所示。

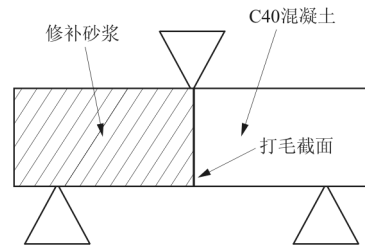


图 1 砂浆黏结强度测试示意图  
Fig. 1 Test of mortar bond strength

(3) 抗渗性

按照《建筑砂浆基本性能试验方法》(JGJ/T70-2009)测试修补砂浆的抗渗性。将拌和好的砂浆装入上口直径 70 mm、下口直径 80 mm、高 30 mm 的截头圆锥带底试模中,室温((20±5)℃)下静置 24 h 脱模,放入养护箱((20±2)℃,相对湿度大于 90%)中养护至规定龄期测试抗渗性。

(4) 抗冲击性

参照美国 ACI544 委员会推荐的自由落锤冲击试验方法,试件尺寸为 φ150 mm×64 mm,将试件置于标准养护箱(20℃,相对湿度 95%)养护 28 d。试验方法通常为落锤法,即将 4 kg 的钢锤提升到 45 cm 高处后自由落下,击打放在试件中央的钢球上,至试件出现第一道裂缝时的击打次数为试件抗冲击荷载能力。其冲击试验原理图如图 2 所示。

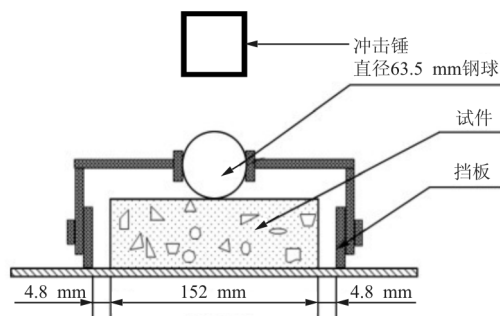


图 2 落锤冲击试验示意图  
Fig. 2 Test of drop hammer impact

### (5) 收缩性

按照《民用机场飞行区场地维护技术指南》(AC-140-CA-2010-3)测试修补砂浆的收缩性。成型试件尺寸为 25 mm×25 mm×280 mm,将试件放入干燥养护箱中((20±3) °C,相对湿度 50%±4%)养护至规定龄期测量长度。

### (6) 耐磨性

按照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30-2005)测试耐磨性。试件尺寸为 150 mm×150 mm×30 mm,每组三个试件。将成型试件养护至 27 d 龄期后擦干试件表面水分后,在室内自然干燥 12 h,再放入(60+5) °C烘箱中烘 12 h 至恒重。试验中, $m_1$  为在 200 N 负荷下磨 30 转清除表面粉尘后称取的初始质量, $m_2$  为试件继续在 200 N 负荷下磨 60 转清除表面粉尘后称取的磨损后质量。记录试验前后的质量后,按照式(1)计算单位面积的磨耗量  $G$ 。

$$G = (m_1 - m_2) / 0.0125 \quad (1)$$

式中: $m_1$  为试件初始质量(kg); $m_2$  为试件磨损后的质量(kg);0.0125 为磨损面积。

## 2.3 试验配合比

为了保证快速修补砂浆具有高早强和良好的工作性能,本文采用自制的特种胶凝材料,通过添加减水剂、增强剂以及调凝剂复配等技术手段,经多次试配,确定出高早强快速修补砂浆配合比如表 5 所示。为了提高薄层修补砂浆的耐磨性,采用 10% 的石英砂替代河砂。

表 5 高早强快速修补砂浆配合比  
Table 5 Mix proportions of high early strength quick repair mortar

名称	用量	名称	用量
胶凝材料/kg	550	纤维/%	0.8
水胶比	0.31	减水剂/%	1.2
胶砂比	1:2	增强剂/%	0.5
粉煤灰/%	10	调凝剂/%	2.5
矿粉/%	10		

## 3 结果与分析

### 3.1 物理力学性能

高早强快速修补砂浆 2 h、1 d、28 d 力学性能

进行测试,其测试结果如表 6 所示。

表 6 高早强快速修补砂浆力学性能测试结果  
Table 6 Test results of mechanical properties of high early strength quick repair mortar

流动度 /mm	凝结时间/min		抗压强度/MPa			抗折强度/MPa		
	初凝	终凝	2 h	1 d	28 d	2 h	1 d	28 d
190	25	35	32.5	45.8	56.8	4.8	6.2	7.6

从表 6 可以看出:高早强快速修补砂浆初凝时间 25 min,流动度 190 mm,可提供充足的修补时间,且工作性能良好;2 h 抗压、抗折强度分别为 32.5 MPa 和 4.8 MPa,可满足机场道面 2 h 通航要求。优选的增强剂与胶凝材料适应性强,使胶凝材料高早强特性更加明显,保证了高早强快速修补砂浆 2 h 强度;矿粉与粉煤灰的双掺具有“微粉体”润滑作用,并增加浆体的塑形黏度,进而改善工作性能<sup>[17-18]</sup>,同时矿物掺合料与调凝剂的掺入有助于调整水泥固化时间,保证浆体保有充足的可工作时间。

### 3.2 黏结强度

黏结强度是衡量修补材料性能重要的力学指标之一,修补材料必须具有足够的黏结强度,以保证新旧界面黏结可靠,防止在飞机高载荷作用下修补界面发生开裂,避免积水或雨水通过裂缝进入道面内部,造成二次破坏。本文对机场道面 C40 水泥混凝土与高早强快速修补砂浆黏结强度进行测试,其中,C40 混凝土 28 d 抗压强度为 50.1 MPa,相应配合比如表 7 所示。

表 7 C40 混凝土配合比

Table 7 Mix proportions of C40 concrete

名称	用量	名称	用量
水泥/(kg·m <sup>-3</sup> )	340	碎石/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 420
粉煤灰/(kg·m <sup>-3</sup> )	80	水/(kg·m <sup>-3</sup> )	120
砂/(kg·m <sup>-3</sup> )	630	减水剂/%	1.8

注:碎石粒径选用 5~25 mm。

采用清水洗涤和涂界面剂两种界面处理方式对高早强快速修补砂浆黏结强度影响的试验结果如图 3 所示。



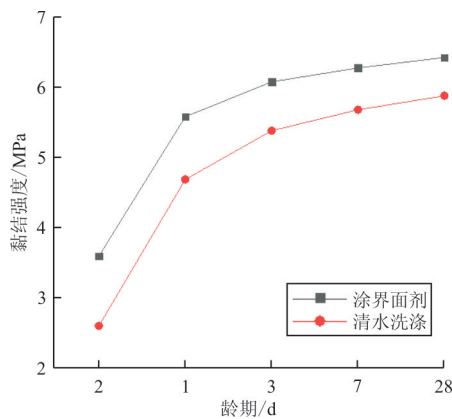


图 3 高早强快速修补砂浆黏结强度试验结果

Fig. 3 Bonding strength of mortar with high early strength quick repair mortar

从图 3 可以看出:采用清水洗涤的界面处理方式,该砂浆的 2 h 黏结强度为 2.6 MPa,不满足技术要求;采用涂界面剂的处理方式,其 2 h 黏结强度达到 3.6 MPa,28 d 黏结强度达到 6.4 MPa,分别为高早强快速修补砂浆抗折强度的 75%、84%,可满足技术要求,故采用涂界面剂的界面处理方式。

由于界面剂可渗入界面孔隙聚合成膜,其聚合物膜在水泥水化产物中穿梭并交织在一起,使聚合物与水泥水化产物形成强有力的黏结,同时,界面剂能够改善高早强快速修补砂浆与混凝土界面的水灰比与水化产物形态,减缓墙壁效应,降低界面处的缝隙与空洞,增强黏结性能;粉煤灰可降低修补砂浆的早期收缩变形,有利于防止界面开裂和改善修补性能;此外,纤维在高早强快速修补砂浆中的乱向分布,会进一步限制收缩,显著降低与旧混凝土收缩差异,而该收缩差异是导致黏结强度下降的主要原因之一<sup>[19]</sup>。

### 3.3 抗渗性

抗渗性能是影响水泥基材料耐久性最直接的因素。本文对机场道面 C40 混凝土  $K_0$  与高早强快速修补砂浆  $K_1$  进行抗渗试验,其试验结果如表 8 所示,可以看出:在水压达到 1.4 MPa 时,C40 混凝土发生透水,抗渗等级为 P12,高早强快速修补砂浆仍未发生透水情况,抗渗等级  $>P12$ ,抗渗性

十分良好。这是由于试验所采用的胶凝材料本身水化产物密实,内部空隙较少,因此具有良好的抗渗性;同时掺加粉煤灰的微集料填充作用和火山灰效应显著,可有效减少其内部孔隙率,优化孔隙结构,使结构更加密实,进而提高抗渗性。

表 8 高早强快速修补砂浆的抗渗性试验结果

Table 8 Impermeability of high early strength quick repair mortar

水压/MPa	试件渗水情况	
	$K_0$	$K_1$
0.2	无	无
0.4	无	无
0.6	无	无
0.8	无	无
1.0	无	无
1.2	无	无
1.4	有	无

### 3.4 抗冲击性

抗冲击性可很好地反映修复结构承受冲击荷载的整体性能,也最能体现机场道面抵抗飞机荷载冲击的能力。本文在 5 cm 厚 28 d 标准养护的 C40 混凝土试件表层加铺 1 cm 厚 7 d 标准养护修补材料制备冲击试件,采用落锤冲击试验进行整体抗冲击能力测试,经测试高早强快速修补砂浆 7 d 龄期的抗冲击初裂次数大于 420 次,其抗冲击试验测试结果图如图 4 所示。



(a) 冲击前

(b) 冲击后

图 4 高早强快速修补砂浆抗冲击试验图

Fig. 4 Impact resistance of high early strength quick repair mortar

从图 4 可以看出:高早强快速修补砂浆与 C40 混凝土的整体结构经冲击后,底层 5 cm 厚混凝土

基体产生了贯穿裂缝,而面层 1 cm 厚高早强快速修补砂浆修补层未出现破碎与裂缝,表明该修补砂浆的黏结和抗冲击能力良好,甚至超过了 C40 混凝土的抗冲击性。

由于矿物掺合料的掺入,一方面填充高早强快速修补砂浆内部空隙,优化孔隙结构与水化产物,增大密实性,改善其抵抗变形的能力;另一方面降低水泥水化热,减小温度应力,减少温差裂纹数量,延长高早强快速修补砂浆在重复冲击荷载下裂缝的贯穿时间;水泥基材料与纤维紧密结合在一起,提高了韧性与黏结能力,阻止和约束裂纹的发展,同时纤维可分散由冲击力引起的应力集中,延缓开裂时间,提高抗冲击能力。

### 3.5 收缩性

早强快速修补砂浆收缩性直接影响其与旧混凝土的黏结性能,高早强快速修补砂浆与 C40 混凝土收缩试验结果如图 5 所示。

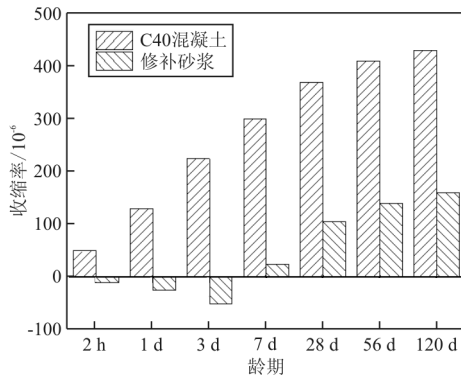


图 5 高早强快速修补砂浆收缩试验结果

Fig. 5 Shrink of high early strength quick repair mortar

从图 5 可以看出:C40 混凝土收缩随着龄期的增长而增大,高早强快速修补砂浆在 2 h~3 d 具有微膨胀性,随着龄期增长,7 d 出现收缩,28 d 收缩率为  $102 \times 10^{-6}$ ,满足了《民用机场飞行区场地维护技术指南》(AC-140-CA-2010-3)表 5.4.1-1 中修补材料 28 d 收缩率(收缩率  $\leq 300 \times 10^{-6}$ )的技术要求;C40 混凝土 120 d 收缩率为  $430 \times 10^{-6}$ ,高早强快速修补砂浆收缩率仅为  $170 \times 10^{-6}$ ,相比降低了 60.5%。表明该修补砂浆具有优异的体积稳定性,可有效避免修补界面裂缝产生,有利于增强

机场道面修补结构的整体性。

由于使用胶凝材料中含有一定量的硫铝酸盐,其具有微膨胀性<sup>[20]</sup>,可补偿收缩,减少高早强快速修补砂浆与旧混凝土间的变形差异,提高修复结构的抗裂与抗渗能力;矿物掺合料与纤维的掺入有利于降低和限制收缩,进一步降低早强快速修补砂浆的收缩变形。

### 3.6 耐磨性

耐磨性是机场道面混凝土的一个重要性能指标。本文测试机场 C40 混凝土  $K_0$  与高早强快速修补砂浆  $K_1$  的耐磨性,其试验结果如表 9 所示。

表 9 修补砂浆的耐磨性试验结果  
Table 9 Abrasion resistance of high early strength quick repair mortar

编号/龄期	组别	$m_1/\text{kg}$	$m_2/\text{kg}$	$G/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	$G$ 平均值/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$
$K_0/28 \text{ d}$	1	7.843 1	7.830 5	1.008	
	2	7.767 5	7.753 5	1.120	1.053
	3	7.743 4	7.730 5	1.032	
$K_1/3 \text{ d}$	1	7.973 6	7.960 2	1.072	
	2	7.893 6	7.880 1	1.080	1.083
	3	7.997 6	7.983 9	1.096	

从表 9 可以看出:C40 混凝土 28 d 平均磨耗量为  $1.053 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,高早强快速修补砂浆 3 d 的平均磨耗量为  $1.083 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,接近于 C40 混凝土。表明该修补砂浆 3 d 耐磨性可达到 C40 混凝土 28 d 的耐磨性,具有良好的耐磨性。

高早强快速修补砂浆具有高早强特性,早期力学性能发展较快,强度较高,而耐磨性与强度密切相关<sup>[21]</sup>;石英砂具有坚硬、耐磨、化学性质稳定等特点,可降低磨损量;矿物掺合料本身具有较好的耐磨性,且掺入后可提高密实性,增强胶凝材料对骨料的黏结性能;纤维提高了水泥基体间的联结作用,增强修补结构的整体性,使高早强快速修补砂浆能够抵抗较大的切削应力。上述综合作用显著提高了高早强快速修补砂浆耐磨性。

## 4 结 论

(1) 本文采用自制的特种胶凝材料制备出了

机场道面浅层高早强快速修补砂浆。该修补砂浆具有高早强、与旧面黏结性能良好、耐久性优良等特点,且能够满足繁忙机场不停航施工要求,有效解决了道面维修施工与保障飞行在时间上的冲突矛盾。

(2) 本文制备的机场道面浅层高早强快速修补砂浆,在恢复机场道面服务水平、延长道面使用寿命的同时,可降低因机场道面破损产生外来物的数量,对于保障飞机起降与飞行安全性等方面具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 韩庆. 机场旧水泥混凝土道面沥青加铺结构设计[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34(5): 51-54.  
Han Qing. Structural design of asphalt overlay on existent cement concrete pavement of airport[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2017, 34(5): 51-54. (in Chinese)
- [2] 陈丹梅. 民航机场飞行区道面损坏的修复[J]. 混凝土, 2003(5): 49-50.  
Chen Danmei. Repair of road surface damage at civil aviation airport[J]. Concrete, 2003(5): 49-50. (in Chinese)
- [3] 王硕太, 刘晓曦, 马国靖, 等. 机场混凝土道面新型封缝材料[J]. 新型建筑材料, 2002(11): 26-28.  
Wang Shuotai, Liu Xiaoxi, Ma Guojing, et al. New type airport concrete pavement sealing materials[J]. New Building Materials, 2002(11): 26-28. (in Chinese)
- [4] Kim S H, Park J Y, Jeong J H. Effect of temperature-induced load on airport concrete pavement behavior[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2014, 18(1): 182-187.
- [5] 刘金龙, 韩建德, 王曙光, 等. 硫酸盐侵蚀与环境多因素耦合作用下混凝土耐久性研究进展[J]. 混凝土, 2014(9): 33-40.  
Liu Jinlong, Han Jiande, Wang Shuguang, et al. Overview of concrete durability under sulfate attack and multi-factor coupling effects[J]. Concrete, 2014(9): 33-40. (in Chinese)
- [6] 金南国, 徐亦斌, 付传清, 等. 荷载、碳化和氯盐侵蚀对混凝土劣化的影响[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(10): 1483-1491.  
Jin Nanguo, Xu Yibin, Fu Chuanqing, et al. Influence of carbonation, chloride attack and loading on concrete deterioration[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(10): 1483-1491. (in Chinese)
- [7] Bieliatynskiy A, Krayushkina E, Skrypchenko A. Modern technologies and materials for cement concrete pavement's repair[J]. Procedia Engineering, 2016, 134(3): 344-347.
- [8] Faturechi R, Levenberg E, Millerhooks E. Evaluating and optimizing resilience of airport pavement networks [J]. Computers and Operations Research, 2014, 43: 335-348.
- [9] Price J C, Forrest J S. Chapter 3-Operations and the airport environment[J]. Practical Airport Operations Safety and Emergency Management, 2016: 39-65.
- [10] Reza Faturechi, Eyal Levenberg, Elise Miller-Hooks. Evaluating and optimizing resilience of airport pavement networks[J]. Computers and Operations Research, 2014, 43: 335-348.
- [11] YooSeok Jung, Wuguang Lin, Han Hao, et al. Interface behavior of partial depth repair for airport concrete pavement subjected to differential volume change[J]. Construction and Building Materials, 2017, 143: 515-521.
- [12] Yang Q, Zhu B, Wu X. Characteristics and durability test of magnesium phosphate cement-based material for rapid repair of concrete[J]. Materials & Structures, 2000, 33(4): 229-234.
- [13] 孙佳龙, 黄煜镔, 范英儒, 等. 磷酸镁水泥用作道路的快速修补材料研究[J]. 功能材料, 2018, 49(1): 1040-1043.  
Sun Jialong, Huang Yubin, Fan Yingru, et al. Magnesium phosphate cement as rapid road repair material[J]. Journal of Functional Materials, 2018, 49(1): 1040-1043. (in Chinese)
- [14] 杨正宏, 尹义林, 曲生华, 等. 道路用聚合物改性水泥砂浆修补材料的研制[J]. 新型建筑材料, 2006(2): 1-4.  
Yang Zhenghong, Yin Yilin, Qu Shenghua, et al. Development of polymer modified cement mortar for road repair [J]. New Building Materials, 2006(2): 1-4. (in Chinese)
- [15] 张文武, 张玉宏, 何兆益, 等. 环氧树脂砂浆在水泥路面错台修补中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2009, 26(8): 53-55.  
Zhang Wenwu, Zhang Yuhong, He Zhaoyi, et al. Application of epoxy resin mortar in repairing faulting of slab ends of cement pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2009, 26(8): 53-55. (in Chinese)
- [16] Luo J, Li Q, Zhao T, et al. Bonding and toughness properties of PVA fibre reinforced aqueous epoxy resin cement repair mortar[J]. Construction & Building Materials, 2013, 49(12): 766-771.
- [17] Zhao H, Sun W, Wu X, et al. The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 95: 66-74.
- [18] Keulen A, Yu Q L, Zhang S, et al. Effect of admixture on the pore structure refinement and enhanced performance of alkali-activated fly ash-slag concrete [J]. Construction & Building Materials, 2018, 162: 27-36.
- [19] 高丹盈, 程红强, 朱海堂, 等. 钢纤维混凝土与老混凝土劈

- 拉粘结强度的研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(5): 505-509.
- Gao Danying, Cheng Hongqiang, Zhu Haitang, et al. Splitting tensile bonding strength of steel fiber reinforced concrete to old concrete[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(5): 505-509. (in Chinese)
- [20] 彭艳周, 丁庆军, 胡曙光, 等. 硫铝酸盐水泥早强微膨胀钢管混凝土的制备[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(6): 636-641.
- Peng Yanzhou, Ding Qingjun, Hu Shuguang, et al. Preparation of steel tube-confined concrete with high early-strength and micro expansion by using sulphoaluminate cement[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(6): 636-641. (in Chinese)
- [21] 柯国炬, 李北星, 赵尚传, 等. 路面机制砂水泥混凝土的强度与耐磨性研究[J]. 混凝土, 2009(10): 77-79.
- Ke Guojia, Li Beixing, Zhao Shangchuan, et al. Strength and abrasion resistance of pavement manufactured sand cement concrete[J]. Concrete, 2009(10): 77-79. (in Chinese)

nese)

### 作者简介:

田耀刚(1978—),男,博士,副教授,博导。主要研究方向:道路与机场工程材料。

王帅飞(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:机场道路材料。

卢东(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:机场道路材料。

赵成(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:机场道路材料。

杨文奇(1967—),男,学士,正高级工程师。主要研究方向:公路与城市道路。

李炜光(1971—),男,博士,教授。主要研究方向:道路与机场工程材料。

(编辑:赵毓梅)

### (上接第 45 页)

- manipulation control strategy for unmanned tilt-rotor aircraft[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(1): 121-128. (in Chinese)
- [12] 吉国明, 郑配云, 邓茅菁, 等. 倾转旋翼机转动机构运动学仿真分析[J]. 航空工程进展, 2015, 6(4): 452-459.
- Ji Guoming, Zheng Peiyun, Deng Maojing, et al. Kinematic simulation and analysis of tilt-rotor rotating mechanism[J]. Advances Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(4): 452-459. (in Chinese)
- [13] 宋彦国, 王焕瑾, 沙虹伟, 等. 倾转旋翼飞行器飞行力学模型研究[J]. 空气动力学学报, 2008, 26(2): 192-196.
- Song Yanguo, Wang Huanjin, Sha Hongwei, et al. Flight dynamic mathematical model of tilt aircraft[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 26(2): 192-196. (in Chinese)
- [14] 郭剑东, 宋彦国, 夏品奇. 小型无人倾转旋翼机全模式飞行操纵控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(4): 439-444.
- Guo Jiandong, Song Yanguo, Xia Pinqi. Full envelope flight control method for small unmanned tilt-rotor aircraft[J].

Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 41(4): 439-444. (in Chinese)

- [15] 郭剑东, 宋彦国. 小型无人倾转旋翼机气动与操纵特性试验研究[J]. 空气动力学学报, 2015, 33(1): 107-112.

Guo Jiandong, Song Yanguo. Testing study on aerodynamics and control characteristic of a small unmanned tilt-rotor[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2015, 33(1): 107-112. (in Chinese)

### 作者简介:

马存旺(1977—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:无人旋翼飞行器总体设计。

文嘉瑜(1992—),男,博士研究生。主要研究方向:旋翼飞行器飞行控制。

宋彦国(1973—),男,博士,副教授。主要研究方向:旋翼飞行器飞行控制。

(编辑:赵毓梅)