

文章编号:1673-2049(2014)02-0078-06

机场道面除冰液作用下大掺量粉煤灰 混凝土的抗冻性

麻海燕¹, 吴雅玲¹, 余红发¹, 白 康², 袁银峰¹

(1. 南京航空航天大学 土木工程系, 江苏 南京 210016;

2. 济南城建设计研究院有限责任公司, 山东 济南 250031)

摘要:通过大掺量粉煤灰混凝土(HFCC)试件在质量分数为 3.5%, 12.5%, 25% 机场道面除冰液(CMA 溶液)、质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液、质量分数为 3.5% 的飞机除冰液(AD 溶液)、质量分数为 25% 的商品飞机除冰液与水中快速冻融试验, 获得了冻融过程中 HFCC 的质量损失率和相对弹性模量的变化规律。结果表明:在质量分数为 3.5% 的介质中, HFCC 在 NaCl 溶液中的冻融破坏以表面剥落为主, 在 AD, CMA 溶液中以内部冻融损伤为主;与水中冻融条件相比, 质量分数为 3.5% 的 CMA 溶液延缓了 HFCC 的冻融破坏作用;HFCC 在 CMA 溶液作用下的冻融破坏与其质量分数密切相关, CMA 溶液质量分数越高, HFCC 的冻融破坏作用越小, 当 CMA 溶液的质量分数在 12.5% 以上时, 即使经受 600 次快速冻融循环, 其质量损失率和相对动弹性模量损失均很小;在质量分数为 25% 的冻融介质中, HFCC 在商品飞机除冰液中的抗冻性较差, 在机场道面除冰液中抗冻性较好;HFCC 完全能够应用于较高质量分数 CMA 溶液进行冬季除冰雪作业的水泥混凝土机场跑道。

关键词:大掺量粉煤灰混凝土;机场道面除冰液;抗冻性;冻融循环;动弹性模量

中图分类号: TU528.2

文献标志码: A

Freeze-thaw Durability of High Volume Fly Ash Content Concrete Exposed to Airfield Pavement Deicer

MA Hai-yan¹, WU Ya-ling¹, YU Hong-fa¹, BAI Kang², YUAN Yin-feng¹

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. Jinan Urban Construction Design & Research

Institute Co., Ltd., Jinan 250031, Shandong, China)

Abstract: The freeze-thaw durability of high volume fly ash content concrete (HFCC) specimens were tested by fast freezing-thawing experiments. In the experiments, HFCC specimens exposed to different solutions which were composed of airfield pavement deicer, NaCl solution, aircraft deicer (AD), commercial deicer and water. The airfield pavement deicer mainly contained calcium magnesium acetate (CMA) and was changed at mass fractions of 3.5%, 12.5% and 25%. The mass fractions of NaCl solution, aircraft deicer and commercial deicer were 3.5%, 3.5% and 25%, respectively. Through the experiments, the change rules of the mass loss rate per unit area and the relative dynamic elastic modulus of HFCC were obtained. The results show that freeze-

收稿日期:2014-03-22

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2009CB623203);国家自然科学基金项目(51178221, 21276264)

作者简介:麻海燕(1976-),女,江苏南京人,讲师,工学博士,博士后, E-mail: mahaiyan@nuaa.edu.cn.

thaw damage of HFCC exposed to 3.5% NaCl solution is closely attributed to surface deterioration. When HFCC specimens exposed to 3.5% AD or 3.5% CMA solution, it will be damaged by internal freeze-thaw damage. Compared with water, freeze-thaw damage effect of HFCC is delayed by 3.5% CMA solution. Freeze-thaw durability of concrete exposed to CMA solutions is closely related to the solution mass fractions, the higher the CMA mass fraction is, the smaller the freeze-thaw damage effects are. When the CMA mass fraction is greater than 12.5%, the mass loss rate and the relative dynamic elastic modulus losses are small after 600 times fast freeze-thaw cycle. HFCC has a poor freeze-thaw durability when exposed to 25% commercial deicer and has a good freeze-thaw durability when exposed to 25% airfield pavement deicer. Therefore, HFCC can be completely applied to the cement concrete airfield runway which is deiced by high mass fractions of CMA.

Key words: high volume fly ash concrete; airfield pavement deicer; freeze-thaw durability; freeze-thaw cycle; dynamic elastic modulus

0 引言

中国北方地区冬季普遍较低的气温致使机场道面及飞机表面都有雪、冰覆盖,若不及时除去,极易导致飞行事故^[1]。为了保证机场飞机起降的安全,需要对飞机跑道进行除冰雪作业。美国等发达国家最早使用的机场道面除冰液是醋酸钙镁(Calcium Magnesium Acetate, CMA),后来改用了醋酸钾(钠),反而加剧了混凝土的碱集料反应^[2-3],最近几年又重新改用醋酸钙镁。各国关于除冰液对机场道面除冰雪的作用研究主要是针对以乙二醇为主要成分的飞机除冰液^[4-13]和以醋酸钙镁为主要成分的机场道面除冰液^[2]。早在1991年,美国TRB开始关注CMA溶液对混凝土的危害^[5]。随后的相关研究表明^[6-7],CMA溶液会降低水泥砂浆的力学性能,致使混凝土表面剥落加剧,强度大幅降低。宋聿修等^[8]和马好霞等^[9]的研究涉及混凝土在含有除冰液条件下的常温腐蚀剥落破坏。文献[10]~[13]中的研究表明,混凝土的冻融剥落现象与CMA溶液的质量分数关系密切。本文中笔者将进一步研究CMA溶液对大掺量粉煤灰混凝土(High Volume Fly Ash Content Concrete, HFCC)的抗冻性影响规律。

1 试验概况

1.1 原材料

试验采用的水泥为南京市江南小野田水泥厂生产的P·Ⅱ52.5纯硅酸盐水泥,其基本物理力学性能见表1,化学成分见表2,熟料的矿物组成为: $w(C_3S)=55.5\%$, $w(C_2S)=19.9\%$, $w(C_3A)=$

6.6% , $w(C_4AF)=10.2\%$, $w(\cdot)$ 为原材料各化学成分的质量分数。砂采用南京产黄砂,表观密度为 $2\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,堆积密度为 $1\,615\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,含泥量(质量分数,下同) 1.0% ,细度模数为2.72,属于Ⅱ区级配,中砂。石料采用南京六合产玄武岩碎石,最大粒径为10 mm,表观密度为 $2\,820\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,堆积密度为 $1\,435\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,含泥量 0.3% ,针片状颗粒含量(质量分数,下同) 11.4% ,压碎指标 6% ,基本属于粒径 $5\sim 10\text{ mm}$ 连续级配。采用南京市自来水。粉煤灰(Fly Ash, FA)为镇江产风选Ⅰ级粉煤灰,细度 6.8% ,含水率 0.04% ,烧失量(质量分数) 2.04% ,需水量比(质量比) 93% , SO_3 含量 1.22% (表2)。高效减水剂采用江苏省建筑科学研究院有限公司生产的JM-B型萘系高效减水剂,黄褐色粉末,减水率在 20% 以上, Na_2SO_4 含量小于 2% ,氯离子含量小于 0.01% 。引气剂是江苏省建筑科学研究院公司生产的液体JM-2000c高效引气剂,推荐掺量(质量分数)为 $0.5\times 10^{-4}\sim 1.0\times 10^{-4}$ 。

1.2 配合比设计及试件的成型与养护

按照《机场道面水泥混凝土配合比设计技术标准》(GJB 1578—92)^[14],设计了大掺量粉煤灰混凝土HFCC,其水胶比为0.29,粉煤灰掺量为 40% 。混凝土拌合物的试验执行《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2002),出料后测定混凝土拌合物的坍落度,浇注、振动成规格为 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 160\text{ mm}$ 的试件,养护至150 d龄期时进行冻融试验,同时制作规格为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的试件用于测定强度。混凝土的配合比及150 d强度如表3所示。试件成型后在标准养护室带模养护24 h后拆模,然后移入温度为

表 1 水泥的基本物理力学性能

Tab. 1 Basic Physical and Mechanical Properties of Cement

水泥型号	密度/(g·cm ⁻³)	80 μm 筛余/%	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	凝结时间/min		需水量比/%	抗弯强度/MPa		抗压强度/MPa	
				初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
P. II 52.5	3.15	0.3	395	131	185	27.20	6.4	9.1	34.7	60.3

表 2 主要原材料的化学成分

Tab. 2 Chemical Compositions of Portland Cement

原材料	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(CaO)	w(MgO)	w(SO ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(Na ₂ O)	w(K ₂ O)	w(I. L.)	w(R)
P. II 52.5	21.53	4.60	64.09	0.96	2.09	3.37	0.12	0.62	1.84	0.78
粉煤灰	52.37	32.13	2.16	0.47	0.33	4.13	0.25	0.61	1.30	6.25

注:w(I. L.)为烧失量的质量分数;w(R)为剩余成分的质量分数。

表 3 混凝土的配合比及 150 d 强度

Tab. 3 Mixture Proportions and 150 d Strength of Concrete

混凝土种类	各材料用量/(kg·m ⁻³)							坍落度/mm	150 d 强度/MPa			水胶比
	水泥	粉煤灰	砂	粗骨料	水	减水剂	引气剂		抗压	抗弯	抗裂	
HFCC	318	212	671	1 095	154	3.445	0.042 4	200	77.14	5.82	3.87	0.29

(20±3)℃的饱和石灰水中养护 90 d,对试件的力学性能测试执行《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)。

1.3 试验方法

试验在水、NaCl、乙二醇、CMA 溶液的冻融介质中进行,其中 NaCl 溶液的质量分数为 3.5%,乙二醇溶液及 CMA 溶液的质量分数分别为 3.5%,12.5%,25%。由于缺少 LBR-A 型商品飞机除冰液,在冻融过程中分别采用相对动弹性模量和质量损失率评判混凝土试件发生的内部冻融损伤和表面剥蚀现象。本文中采用 NM-4B 型无损非金属超声波检测分析仪测定混凝土试件在冻融过程中的超声波声时,按下式计算得出动弹性模量 E_r ^[9]

$$E_r = \frac{E_n}{E_0} = \frac{t_n^2}{t_0^2} \times 100\%$$

(1)

式中: E_0 、 t_0 分别为混凝土试件沿长度方向的初始动弹性模量和初始超声波声时; E_n 、 t_n 分别为 n 次冻融循环后混凝土试件沿长度方向的动弹性模量和超声波声时。

按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB/T 50082—2009)中的相关规定,以相对动弹性模量下降到 60%作为评判混凝土失效的标准之一。

采用电子天平(精度 0.1 g)测定混凝土试件冻融过程中的质量损失,质量损失率按下式计算

$$W_1 = \frac{G_n - G_0}{G_0} \times 100\%$$

(2)

式中: W_1 为质量损失率; G_0 为试件的初始质量; G_n 为 n 次冻融循环后试件的质量。

按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB/T 50082—2009),采用 5%的质量损失率作为冻融破坏标准之一。

2 结果分析

2.1 HFCC 在不同冻融介质作用下的抗冻性

图 1 为 HFCC 在水、质量分数为 3.5%的 NaCl,AD,CMA 溶液中的快速冻融循环作用下的质量损失率和相对动弹性模量变化规律。由图 1(a)可知,在不同冻融介质中,HFCC 的质量损失率随着冻融循环次数的增加而逐渐增大,当超过一定的冻融循环次数时,其质量损失率急剧增大。对于不同的冻融介质,HFCC 发生质量损失率急剧变化的该冻融循环次数(临界冻融点)与冻融介质的种类有关。与水中冻融过程相比,HFCC 在质量分数为 3.5%的 AD,CMA 溶液中的临界冻融点没有明显差异,均为 300 次,而在 NaCl 溶液中的临界冻融点则提前到 250 次,冻融循环次数减少 17%。HFCC 在不同冻融介质中达到混凝土质量损失标准(质量损失率为 5%)的抗冻融循环次数依次为:水中约为 375 次,在质量分数为 3.5%的 AD,CMA,NaCl 溶液中分别为 375,375,300 次。图 2 为 HFCC 在水、质量分数为 3.5%的 NaCl,AD,CMA 溶液 300 次冻融循环作用下的破坏表面状态。由图 2 可以看出,HFCC 在水、质量分数为 3.5%的 AD,CMA 溶液中的冻融表面剥蚀规律比较接近,在质量分数为 3.5%的 NaCl 溶液中的冻融表面剥蚀破坏作用明显加快,甚至出现端头冻酥现象。

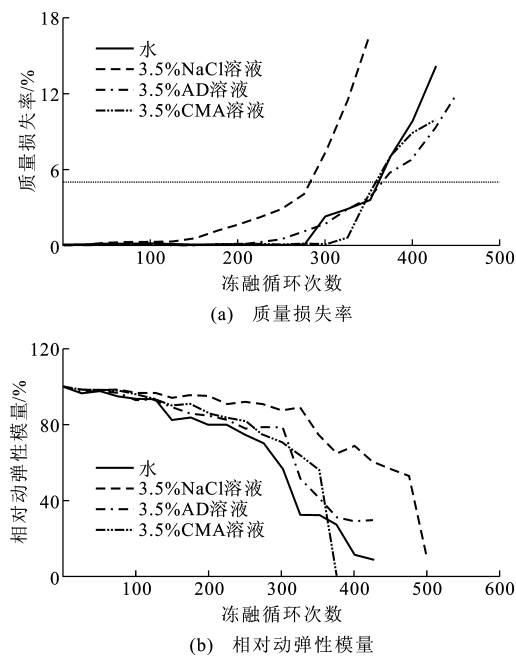


图 1 HFCC 在水、质量分数为 3.5% 的 NaCl,AD,CMA 溶液中的抗冻性

Fig. 1 Freez-thawing Durability of HFCC Exposed to Water, 3.5% NaCl, AD and CMA Solutions

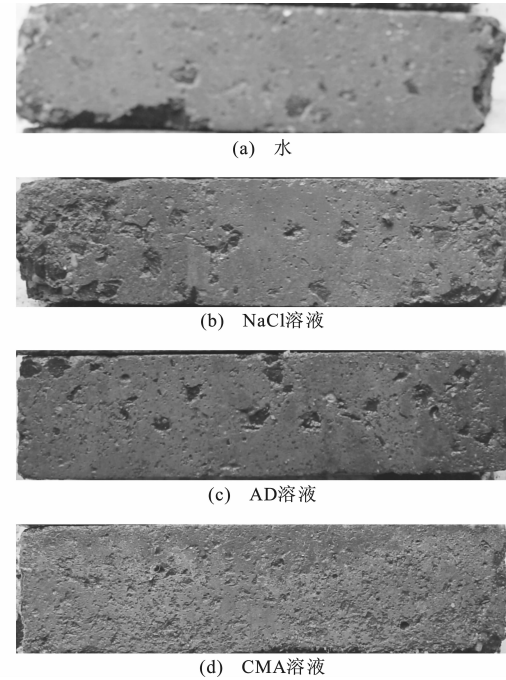


图 2 HFCC 在水、质量分数为 3.5% 的 NaCl,AD,CMA 溶液 300 次冻融循环作用下的破坏表面状态

Fig. 2 Damage Surface States of HFCC Samples Under 300 Times Freeze-thaw Cycles Exposed to Water, 3.5% NaCl, AD and CMA Solutions

由图 1(b)可见,在水、质量分数为 3.5% 的 AD, CMA 溶液的快速冻融过程中, HFCC 的相对动弹性模量下降规律比较接近,但是质量分数为 3.5%

的 NaCl 溶液中其相对动弹性模量的下降速度明显减慢。对于 300 次快速冻融循环, HFCC 在水、质量分数为 3.5% 的 AD, CMA 溶液中的相对动弹性模量分别为 56%, 78%, 71%, 而在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中仍然达到 88%。按照相对动弹性模量下降到 60% 的冻融破坏标准, HFCC 在水、质量分数为 3.5% 的 AD, CMA, NaCl 溶液中的抗冻融循环次数分别为 275~300, 300~325, 325~350, 425 次。与上述按照质量损失率的半段结果进行对比可知,在水、质量分数为 3.5% 的 AD, CMA 溶液中, HFCC 的相对动弹性模量下降速度比质量损失率要快,而在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的规律正好相反。由此可见, HFCC 在水、质量分数为 3.5% 的 AD, CMA 溶液中的冻融破坏机理以内部的冻融微裂纹等损伤为主,在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的冻融破坏机理则以表面剥蚀为主。综合分析发现,当冻融介质的质量分数为 3.5% 时, 3 种冻融介质都不同程度地延缓了 HFCC 内部冻融损伤的发展过程,但是 NaCl 溶液却同时加速了 HFCC 的表面冻融剥蚀。

2.2 CMA 溶液质量分数对 HFCC 抗冻性的影响

Ma 等^[10] 和杨全兵^[12] 的研究表明,由于除冰液的冰点降低效应,混凝土在较低质量分数的 AD 溶液和氯化钠除冰盐作用下的抗冻性更差。图 3 为 HFCC 在水、质量分数为 3.5%, 12.5%, 25% 的 CMA 溶液作用下的抗冻性。由图 3 可见,在水、质量分数为 3.5%, 12.5%, 25% 的 CMA 溶液作用下, HFCC 的质量损失率和相对动弹性模量规律主要分为 2 大类:一类是以水和质量分数为 3.5% CMA 溶液为代表的低质量分数除冰液作用下 HFCC 的变化规律,另一类就是质量分数在 12.5% 以上的高质量分数 CMA 溶液作用下的 HFCC 的变化规律。

由图 3(a)可见,在 275 次快速冻融循环之前,无论 CMA 溶液的质量分数高低, HFCC 均不发生质量损失,但是 HFCC 在水和 3.5% CMA 溶液中分别经受 275 次和 300 次冻融循环(临界冻融点)以后,其质量损失率急剧升高,按照 GB/T 50082—2009 中的质量损失率标准确定的抗冻融循环次数均为 350 次。HFCC 在质量分数为 12.5%, 25% 的 CMA 溶液中,即使经受 600 次快速冻融循环作用,仍然没有出现表面剥蚀现象。由图 3(b)可以看出, HFCC 在水和 3.5% CMA 溶液作用下的相对动弹性模量下降速度相似,按照 GB/T 50082—2009 的相对动弹性模量标准,其抗冻融循环次数分别为

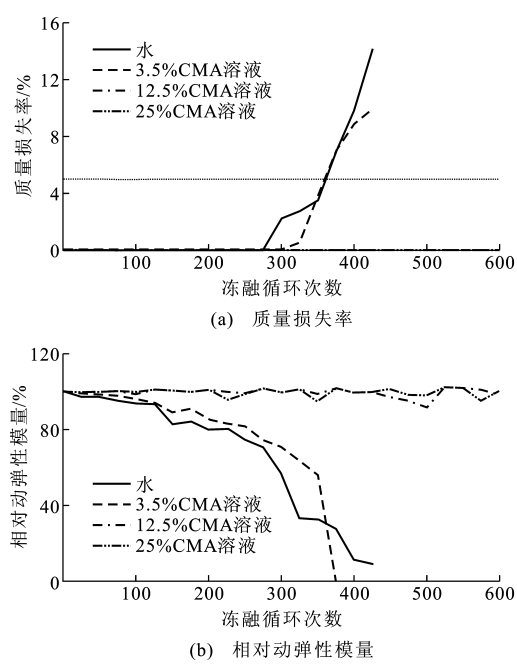


图 3 HFCC 在水、质量分数为 3.5%, 12.5%, 25% 的 CMA 溶液下的抗冻性

Fig. 3 Freeze-thaw Durability of HFCC Exposed to Water, 3.5%, 12.5%, 25% CMA Solutions

275~300 次和 325~350 次,后者比前者延缓了 50 次。随着 CMA 溶液质量分数的提高, HFCC 的抗冻性增强,在质量分数为 12.5%, 25% 的 CMA 溶液中快速冻融循环 600 次,其相对动弹性模量仍然高达 100%。

综上所述, CMA 溶液能够延缓 HFCC 的冻融破坏作用,且 HFCC 的抗冻融循环次数与 CMA 溶液的质量分数关系密切,其溶液质量分数越高,延缓 HFCC 冻融破坏的效果越好,当质量分数在 12.5% 以上时, HFCC 在经受 600 次快速冻融循环而质量损失率和相对动弹性模量几乎无变化,因此,质量分数高于 12.5% 的 CMA 机场道面除冰液对 HFCC 没有冻融破坏作用, HFCC 完全能够用于水泥混凝土机场跑道。

2.3 商品飞机除冰液与 CMA 溶液对 HFCC 抗冻性影响的差异

图 4 为 HFCC 在水、质量分数为 25% 的 CMA 溶液和质量分数为 25% 的商品飞机除冰液中的抗冻性。由图 4(a) 可知, HFCC 在水和质量分数为 25% 的商品飞机除冰液中的临界冻融点分别为 275 次和 200 次,在临界冻融点后,随着冻融循环次数的增加,两者的质量损失率和相对动弹性模量下降速度也加快,达到冻融破坏标准的抗冻融循环次数分别为 275~300 次和 225~250 次。可见,质量分数

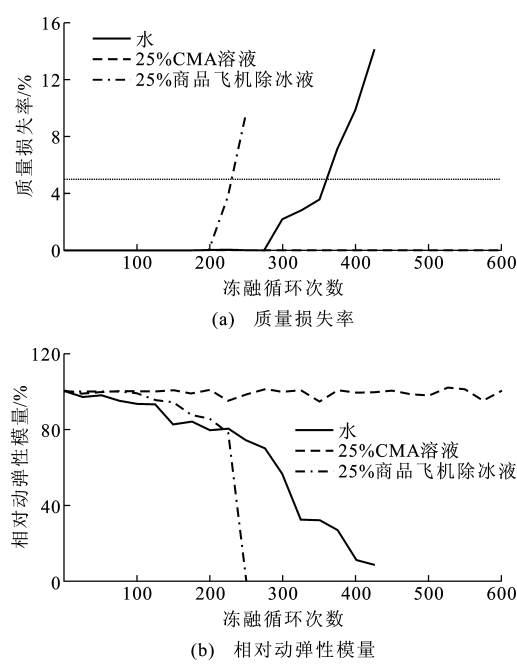


图 4 HFCC 在水、质量分数为 25% 的 CMA 溶液和质量分数 25% 的商品飞机除冰液中的抗冻性

Fig. 4 Freeze-thaw Durability of HFCC Exposed to Water, 25% CMA Solution and 25% Commercial Deicer

25% 商品飞机除冰液加速了 HFCC 的表面冻融剥蚀和内部冻融损伤作用,其抗冻融循环次数减少了 33%。相对而言, HFCC 在质量分数为 25% 的 CMA 溶液中经受 600 次冻融循环并不发生冻融破坏,证明商品飞机除冰液不但加速了 HFCC 的内部冻融损伤,而且加速了 HFCC 的表面冻融剥蚀,因而对 HFCC 具有非常严重的冻融危害。因此,为了避免对 HFCC 机场跑道的冻融破坏,应该禁止将商品飞机除冰液用于水泥混凝土机场跑道的除冰雪作业。

3 结 语

- (1) HFCC 在水、质量分数为 3.5% 的 AD, CMA 溶液的冻融表面剥蚀规律和相对动弹性模量比较接近,在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的冻融表面剥蚀破坏比在水、质量分数为 3.5% 的 AD, CMA 溶液中快,而相对动弹性模量下降速度比这 3 种冻融介质要慢。
- (2) HFCC 在水、质量分数为 3.5% 的 AD, CMA 溶液中的冻融破坏机理以内部的冻融微裂纹等损伤为主,在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的冻融破坏机理则以表面剥蚀为主。
- (3) 当冻融介质的质量分数为 3.5% 时, AD, CMA 溶液都不同程度地延缓了 HFCC 的内部冻融

损伤的发展过程,但是 NaCl 溶液却同时加速了 HFCC 的表面冻融剥蚀。

(4)CMA 溶液有延缓 HFCC 冻融破坏的作用,且 HFCC 的抗冻融循环次数与 CMA 溶液的质量分数关系密切,其溶液质量分数越高,延缓 HFCC 冻融破坏的效果越明显,当质量分数在 12.5% 以上时, HFCC 在经受 600 次快速冻融而质量损失率和相对动弹性模量几乎无变化,因此, HFCC 完全能够用于水泥混凝土机场跑道。

(5)质量分数为 25% 的商品飞机除冰液加速了 HFCC 的内部冻融损伤的发展过程和表面冻融剥蚀。为了避免对 HFCC 机场跑道的冻融破坏,冬季除冰雪作业时,建议使用质量分数高于 12.5% 的 CMA 机场道面除冰液,同时必须禁止将商品飞机除冰液用于对水泥混凝土道面的除冰液作业。

参考文献:

References:

[1] 夏祖西,彭华乔,苏正良,等. 机场除冰液对环境的影响[J]. 中国民用航空,2008,93(9):51-52.
XIA Zu-xi, PENG Hua-qiao, SU Zheng-liang, et al. Impact of Airport Deicing Fluid on the Environment [J]. China Civil Aviation, 2008, 93(9): 51-52.

[2] RANGARAJU P R. Mitigation of ASR in Presence of Pavement Deicing Chemicals [R]. Skokie: Programs Management Office, 2007.

[3] SHI X. Impact of Airport Pavement Deicing Products on Aircraft and Airfield Infrastructure[R]. Washington DC: TRB, 2008.

[4] MH 3145.49—1998, 民用航空器维修标准[S].
MH 3145.49—1998, Maintenance Standards for Civil Aircraft[S].

[5] Committee on the Comparative Costs of Rock Salt and Calcium Magnesium Acetate (CMA) for Highway Deicing. Highway Deicing: Comparing Salt and Calcium Magnesium Acetate[R]. Washington DC: TRB, 1991.

[6] PETERSON O. The Chemical Effects on Cement Mortar of Solutions of Calcium Magnesium Acetate

and Other Deicing Salts [R]. Lund: University of Lund, 1991.

[7] SANTAGATA M C, COLLEPARDI M. The Effect of CMA Deicers on Concrete Properties[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(9): 1389-1394.

[8] 宋丰修, 刘雪松. “三北”地区机场水泥混凝土道面损坏原因分析[J]. 民航经济与技术, 1995(6): 25-26.
SONG Yu-xiu, LIU Xue-song. Broke Analysis of Airport Runway in Sanbei Region[J]. Civil Economics & Technology, 1995(6): 25-26.

[9] 马好霞, 余红发, 卢一亭, 等. 水泥混凝土在机场道面除冰液作用下的化学腐蚀[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(2): 61-66.
MA Hao-xia, YU Hong-fa, LU Yi-ting, et al. Chemical Corrosion of Cement Concrete Exposed to Airport Pavement Deicers [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(2): 61-66.

[10] MA H Y, YU H F, CAO W T, et al. Freeze-thaw Durability of Portland Cement Concrete Subjected to Aircraft Deicer [J]. Advanced Materials Research, 2010, 152/153: 1856-1861.

[11] LANCASTER I E. Assessment of Alternative Deicing Chemicals to Rock Salt[R]. Crowthorne: Transportation Research Laboratory, 1993.

[12] 杨全兵. 盐及融雪剂种类对混凝土剥蚀破坏影响的研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(4): 464-467.
YANG Quan-bing. Effects of Salt and Snow-thawing Agent Types on Salt-scaling Damage of Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(4): 464-467.

[13] 赵鸿铎, 姚祖康, 张长安, 等. 飞机除冰液对停机坪水泥混凝土的影响[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2): 1-5.
ZHAO Hong-duo, YAO Zu-kang, ZHANG Chang-an, et al. Influence of Aircraft Deicer on Apron Cement Concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 1-5.

[14] GJB 1578—92, 机场道面水泥混凝土配合比设计技术标准[S].
GJB 1578—92, Technical Standard for Airport Pavement Cement Concrete Mix Design[S].