

文章编号:1673-2049(2012)02-0061-06

水泥混凝土在机场道面除冰液作用下的化学腐蚀

马好霞,余红发,卢一亭,刘曙光,付同仁

(南京航空航天大学 土木工程系,江苏 南京 210016)

摘要:进行了普通混凝土(OPC)和高性能混凝土(HPC)试件在质量分数为3.5%,12.5%,25%的醋酸钙镁(CMA)溶液中的浸泡试验,测定了腐蚀过程中混凝土试件的质量变化和相对动弹性模量,跟踪了试件表面的剥落特征,比较了硅酸盐水泥 HPC 和抗硫酸盐水泥 HPC 的抗 CMA 腐蚀性。结果表明:CMA 对水泥混凝土的腐蚀破坏以表面剥落及其引起的质量损失为特征,反映内在质量的相对动弹性模量并没有显著降低;混凝土的 CMA 腐蚀剥落程度与 CMA 溶液浓度和腐蚀时间有关,当浸泡腐蚀时间超过 450 d 以后,其腐蚀剥落现象开始加剧,而且浓度越大,腐蚀剥落越明显;25%质量分数 CMA 溶液对 OPC 具有非常严重的腐蚀破坏,对 P·Ⅱ52.5 水泥 HPC 的腐蚀破坏最小,对 P·HSR42.5 水泥 HPC 的腐蚀破坏介于两者之间;CMA 对混凝土的腐蚀破坏属于表面腐蚀剥落,并不会在混凝土内部产生腐蚀微裂缝,这为今后研究 CMA 对混凝土的腐蚀破坏机理提供了可靠的试验基础;采用 P·Ⅱ52.5 水泥 HPC 可以解决机场道面水泥混凝土的 CMA 机场道面除冰液的腐蚀破坏问题,为中国北方地区机场道面 HPC 的研发提供了依据。

关键词:水泥混凝土;机场道面除冰液;醋酸钙镁;化学腐蚀;剥落

中图分类号:TU528.2

文献标志码:A

Chemical Corrosion of Cement Concrete Exposed to Airport Pavement Deicers

MA Hao-xia, YU Hong-fa, LU Yi-ting, LIU Shu-guang, FU Tong-ren

(Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: The immersion tests that ordinary Portland concrete (OPC) and high performance concrete (HPC) specimens placed in calcium magnesium acetate (CMA) of 3.5%, 12.5% and 25% mass fraction of solution were carried out, and the mass loss and the relative dynamic elastic modulus were measured. Meanwhile, the surface exfoliative characteristics of specimens were observed, the corrosion resistances between Portland cement HPC and resisting sulfate cement HPC in CMA were compared. The results show that the surface exfoliative phenomenon and the quality loss are the main characteristics of corrosive damage in the CMA, its inner relative dynamic elastic modulus doesn't reduced significantly. The concrete's CMA corrosive exfoliative degree is related with the concentration of CMA solution and the corrosion time. When soaked corrosive time is more than 450 d, the corrosive exfoliative phenomena grow serious when the CMA's concentration becomes greater, the corrosive exfoliative phenomenon is more obvious. The 25% mass fraction of CMA solution has the most severe corrosion in OPC among the three

收稿日期:2012-01-07

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)

作者简介:马好霞(1985-),女,山东潍坊人,工学硕士研究生,E-mail:mahaoxia2@163.com。

kinds of concrete and the HPC-P · II 52.5 is better than the HPC-P · HSR42.5. Therefore, the CMA's corrosion and damage to the concrete are the surface corrosion not the interior corrosion, and the research of CMA to the concrete corrosion damage mechanism provides reliable experimental basis for the future. Furthermore, adopting HPC-P · II 52.5 cement can solve the corrosive and damage problem which caused by the CMA deicing fluid and can provide a basis for the airport pavement HPC's research in the northern region.

Key words: cement concrete; airport pavement deicing fluid; calcium magnesium acetate; chemical corrosion; exfoliation

0 引言

近年来,中国三北地区许多民航机场普遍出现了水泥混凝土道面耐久性损坏,调查显示^[1],三北地区民航机场的水泥混凝土破坏,大部分是出现在喷洒除冰液区域的低洼积水地区,如沈阳桃仙机场停机坪上停放 10 架飞机,其中靠西边停放 3 架飞机的地势较低,道面破坏严重,这种破坏与机场除冰液有直接的关系。目前,机场使用的除冰液主要有 2 种:以乙二醇为主要成分的飞机除冰液^[2]和以醋酸钙镁(CMA)为主要成分的机场道面除冰液^[3]。关于机场除冰液对混凝土的耐久性问题的文献比较少,现有的研究工作多侧重于抗冻性和飞机除冰液^[4-7],对于机场道面除冰液,笔者所在课题组对水中抗冻性为 150 次的普通混凝土(OPC)进行了在不同浓度 CMA 溶液中的快速冻融试验^[8],结果表明:普通混凝土在质量分数为 3.5%的 CMA 溶液中需要 275 次冻融循环才能使相对动弹性模量下降到 60%以下,在质量分数为 12.5%和 25%的 CMA 溶液中即使经过 600 次冻融循环,其相对动弹性模量仍然保持在 100%,质量没有任何损失,试件表面完好无损。这充分表明,CMA 并不能加速水泥混凝土的冻融破坏,化学腐蚀可能是 CMA 对混凝土的主要破坏形式。国外有文献指出^[9],CMA 对混凝土的腐蚀需要进行较长时间的腐蚀试验。

笔者通过长达 2 年多的浸泡试验,研究了不同配合比混凝土在不同浓度 CMA 溶液中的腐蚀规律,为进一步研究混凝土的 CMA 腐蚀机理提供了可靠的试验基础。

1 原材料、配合比与试验方法

1.1 原材料

江南小野田水泥厂生产的 P · II 52.5 纯硅酸盐水泥,其熟料组成为: $w(C_3S) = 55.5\%$, $w(C_2S) = 19.9\%$, $w(C_3A) = 6.6\%$, $w(C_4AF) = 10.2\%$, $w(\cdot)$ 为各化学成分的质量分数。山东华银特种水泥股份有限公司生产的 P · HSR42.5 级高抗硫酸盐水泥,其熟料的组成为: $w(C_3S) = 48.20\%$, $w(C_3A) = 2.02\%$ 。水泥的基本物理力学性能和化学成分见表 1 和表 2。镇江产风选 I 级粉煤灰(FA),细度模数 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 质量分数 1.22%,化学成分见表 2。南京产黄砂,表观密度 $2\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,堆积密度 $1\,615\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,含泥量(质量分数,下同)1.0%,细度模数 2.72,属于 II 区级配,中砂。南京六合产玄武岩碎石,最大粒径 10 mm,表观密度 $2\,820\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,堆积密度 $1\,435\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,含泥量 0.3%,针片状颗粒含量(质量分数)11.4%,压碎指标 6%,属于 5~10 mm 连续级配。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 质量分数小于 2%,氯离子质量分数小于 0.01%。采用江苏省建筑科学研究院有限公司生产的液体 JM-2000c 高效引气剂,推荐质量掺量为 $0.5\times 10^{-4}\sim 1.0\times 10^{-4}$,自来水。CMA 采用无锡阳山生化有限责任公司生产的工业级一水醋酸钙和四水醋酸镁配制。

表 1 水泥的物理力学性能

Tab. 1 Physical and Mechanical Properties of Cement

水泥种类	比表面积/ $(\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1})$	凝结时间/min		3 d 抗折强度/ MPa	28 d 抗折强度/ MPa	3 d 抗压强度/ MPa	28 d 抗压强度/ MPa
		初凝	终凝				
P · HSR42.5	392	140	195	5.8	7.5	29.0	46.0
P · II 52.5	395	131	185	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 Raw Materials by Mass %

材料	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{SO}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{MnO})$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{K}_2\text{O})$	$w(\text{I. L.})$	w_r
P·HSR42.5	20.60	5.03	65.06	0.55	2.24	4.38				1.00	1.14
P·Ⅱ52.5	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: $w(\text{I. L.})$ 为烧失量的质量分数; w_r 为剩余成分质量分数。

1.2 配合比与试件制作

按照《机场道面水泥混凝土配合比设计技术标准》(GJB 1578—92),设计了 3 种配合比混凝土:普通硅酸盐水泥混凝土、硅酸盐水泥高性能混凝土(HPC-P·Ⅱ)和抗硫酸盐水泥高性能混凝土(HPC-P·HSR)。OPC 和 HPC-P·Ⅱ采用 P·Ⅱ52.5 硅酸盐水泥,HPC-P·HSR 采用 P·HSR42.5 高抗硫酸盐水泥。OPC 的水灰比为 0.48,HPC-P·Ⅱ和 HPC-P·HSR 的水胶比均为 0.32,并且参加了

粉煤灰(质量分数)20%。混凝土采用机械搅拌、振动成型,试件规格为 40 mm×40 mm×160 mm,试件成型后在标准养护室带模养护 1 d 后拆模,然后在(20±3)℃饱和石灰水中养护至 90 d,之后进行耐久性试验。同时成型了用于测定强度的试件,规格为 100 mm×100 mm×400 mm,强度试验执行《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)。3 种试件的配合比及基本性能如表 3 所示。

表 3 混凝土的配合比和 90 d 强度

Tab. 3 Mixture Proportions and 90 d Strength of Concrete

材料	各材料用量/(kg·m ⁻³)							水胶比	90 d 强度/MPa		
	水泥	粉煤灰	砂	石	减水剂	引气剂	水		抗压	抗折	劈拉
OPC	350	0	734	1198	0.000	0.000 0	168	0.48	69.7	6.16	3.33
HPC-P·Ⅱ	384	96	690	1126	3.120	0.038 4	154	0.32	88.7	7.11	3.17
HPC-P·HSR	384	96	690	1126	3.120	0.038 4	154	0.32	82.9	6.83	4.44

1.3 试验方法

CMA 溶液的质量分数分别为 0%,3.5%,12.5%,25%,浸泡时间分别为 28,60,90,120,150,180,210,470,570,650,680,724 d。在浸泡前和不同浸泡时间分别用电子天平和超声波检测仪测量试件的质量和超声波传播速度。测试仪器为 MP-5002 型电子天平(精度为 0.01 g)和 NM-4B 型无损非金属超声波检测仪。超声仪的测试参数为:发射电压 500 V,换能器的频率 50 kHz,采样周期 0.1 μs,首波控制电平 4,起点延迟长度 100,零声时读数 1.70 s,超声波初始振幅 126.89 dB。混凝土试件的质量损失率按式(1)计算

$$W_L = \frac{G_0 - G_n}{G_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中: W_L 为 N 次冻融循环后试件的质量损失率; G_0 为腐蚀前试件的质量; G_n 为 n 天腐蚀后试件的质量。

相对动弹性模量 E_r 可用式(2)计算

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

式中: E_0 、 t_0 分别为混凝土腐蚀前的初始动弹性模量和初始声时; E_n 、 t_n 分别为 n 天腐蚀后试件的动

弹性模量和声时, $t_n = l/v_0$, l 为试件的长度, v_0 为超声波传播速度。

2 结果与讨论

2.1 OPC 在 CMA 机场道面除冰液中的质量损失和相对动弹性模量变化

图 1 为 OPC 试件在不同浓度 CMA 溶液中的质量损失率和相对动弹性模量变化。由图 1(a)可见,OPC 在 CMA 溶液的腐蚀行为与溶液浓度和腐蚀时间有关,在质量分数为 3.5%的 CMA 溶液中几乎不发生质量损失,在质量分数为 12.5%的 CMA 溶液中直到 570 d 才开始发生质量损失,但是其增长速度缓慢,即使经过 724 d,其质量损失率仅为 0.26%,在质量分数为 25%的 CMA 溶液中腐蚀 450 d 以后,OPC 的质量损失率开始随着时间的延长而加剧,腐蚀时间达到 724 d 时其质量损失率高达 22.7%。这说明,OPC 腐蚀的质量损失随着 CMA 溶液浓度的提高而增加,时间越长,腐蚀越显著^[10-11]。由图 1(b)可见,OPC 在 CMA 溶液中的相对动弹性模量变化不大,即使在质量分数为 25%的 CMA 溶液中经过 724 d 腐蚀后的质量损失严重,其

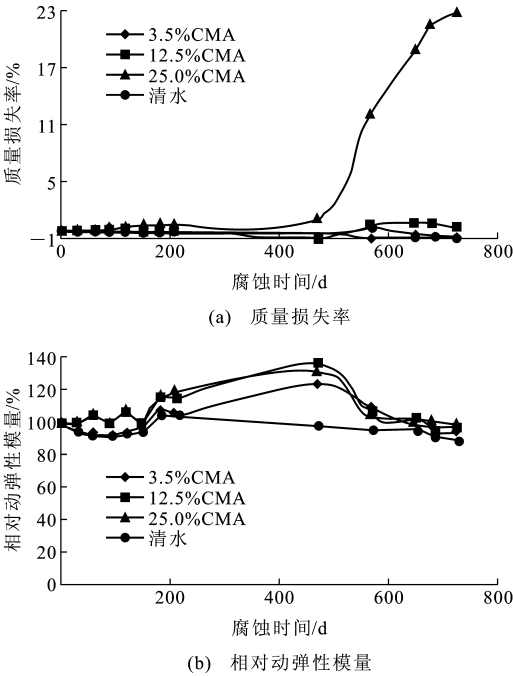


图 1 OPC 在 CMA 溶液作用下的质量损失率和相对动弹性模量变化

Fig. 1 Mass Loss Ratios and Relative Dynamic Moduli of OPC Concrete Samples in CMA Solution

相对动弹性模量仍然保持在 90% 以上。这充分表明, CMA 对混凝土的腐蚀破坏属于表面剥落引起的破坏, 而不是腐蚀引起混凝土结构内部的微裂纹及其扩展导致的破坏, 因为动弹性模量反映了混凝土的内在质量^[12-13]。

2.2 混凝土在 CMA 机场道面除冰液中的腐蚀破坏特征

图 2 为 OPC 在不同浓度 CMA 溶液中腐蚀的表面剥落现象。由图 2 可见, 在腐蚀时间为 724 d 时, OPC 在质量分数为 3.5% 的 CMA 溶液中, 表面完好无损, 在质量分数为 12.5% 的 CMA 溶液中, 其表面出现了大量的白色析出物, 在质量分数为 25% 的 CMA 溶液中表面剥落非常严重, 同时还存在较多的白色析出物; 在质量分数同为 25% 的 CMA 溶液中, 腐蚀 210 d 时混凝土表面完好无损, 腐蚀 570 d 时表面出现大量白色析出结晶物, 腐蚀 724 d 表面大量砂浆剥落。可见, CMA 溶液的浓度越高, 腐蚀时间越长, OPC 腐蚀的表面剥落越严重, 这种表面剥落破坏是由表及里逐层进行的。在腐蚀条件下, 混凝土试件表面剥落的原因, 一般是腐蚀产物形成、晶体生长引起的结晶压破坏。Darwin 等^[14]、Santagata 等^[15]和 Peterson^[16]指出, CMA 与混凝土表层结构内部的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生腐蚀反应, 形成了一水醋酸钙和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 晶体, 该反应不

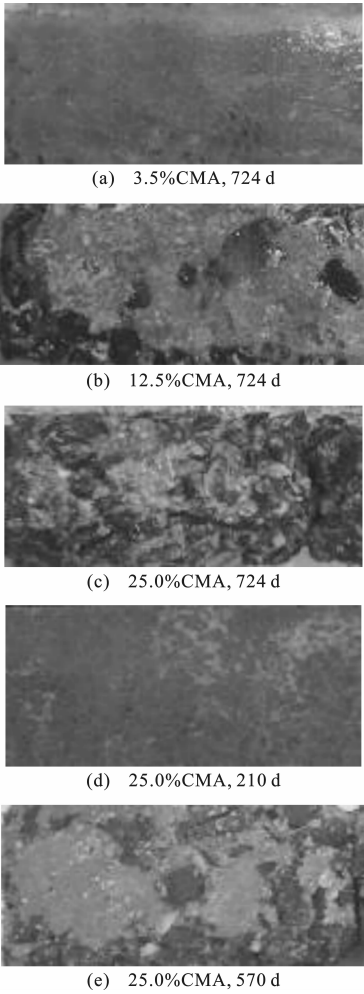


图 2 OPC 在 CMA 溶液中的腐蚀表面剥落
Fig. 2 Corrosion Surface Shedding of OPC Samples in CMA Solution

仅发生于混凝土试件的表面, 而且还在混凝土毛细孔的溶液中进行, 当各种离子浓度达到过饱和状态, 晶体析出, 随着结晶体生长, 产生结晶应力, 导致毛细孔的孔壁(硬化水泥浆体)膨胀、开裂, 进而导致附近的表层混凝土剥落。混凝土表面的白色析出物的主要成分可能是一水醋酸钙和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$, 详细的化学腐蚀和表面剥落机理需要进一步研究^[17-21]。

2.3 HPC 在 CMA 机场道面除冰液中的腐蚀规律

图 3 为 HPC-P·II 和 HPC-P·HSR 在不同浓度 CMA 溶液作用下的质量损失率。由图 3 可见, HPC 在 CMA 溶液中具有与 OPC 相同的腐蚀行为, 其质量损失率同样与 CMA 溶液浓度和腐蚀时间有关, 在质量分数为 25% 的 CMA 溶液中的腐蚀时间超过 450 d 以后, 其表面剥落引起的质量损失迅速增加。图 4 比较了 HPC 和 OPC 在质量分数为 25% 的 CMA 溶液作用下的质量损失率。由图 4 可以看出, 不同混凝土的质量损失率由大到小依次为:

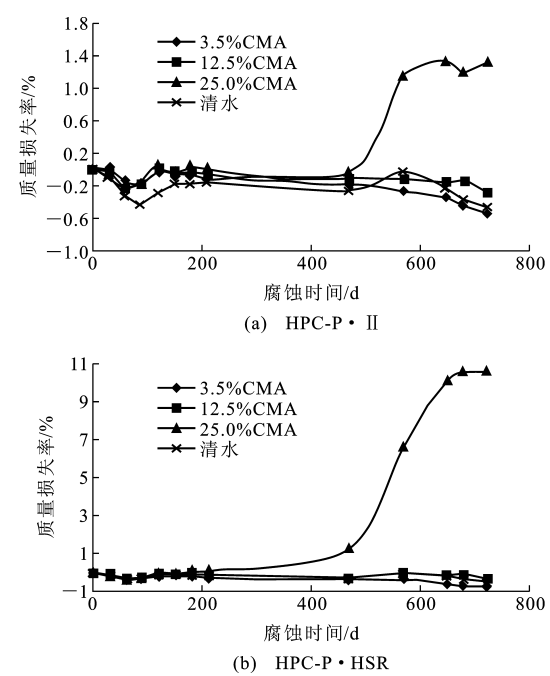


图 3 HPC-P · II 和 HPC-P · HSR 在 CMA 溶液作用下的质量损失率

Fig. 3 Mass Loss Ratios of HPC-P · II and HPC-P · HSR Concrete Samples in CMA Solution

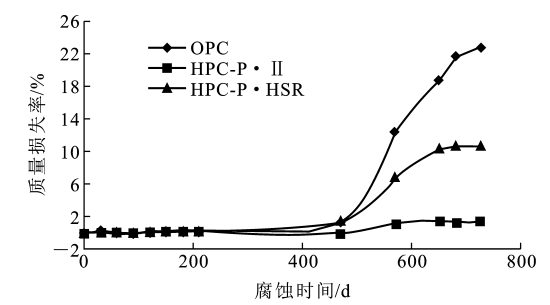


图 4 OPC 和 HPC 在 25% CMA 溶液作用下的质量损失率

Fig. 4 Mass Loss Ratios of OPC and HPC Samples in 25% CMA Solution

OPC, HPC-P · HSR, HPC-P · II。因此,混凝土的抗 CMA 腐蚀性由强到弱依次为: HPC-P · II, HPC-P · HSR, OPC。

图 5 为 HPC-P · II 和 HPC-P · HSR 在质量分数为 25% 的 CMA 溶液中浸泡 724 d 的表面破坏特征。由图 5 可见,在质量分数为 25% 的 CMA 溶液中经过 724 d 腐蚀以后, P · HSR42.5 水泥 HPC 表面剥落比较严重,而 P · II 水泥 HPC 表面有白色析出物,在试件棱角出现少量剥落。

3 结 语

(1) 以 CMA 为主要成分的机场道面除冰液对

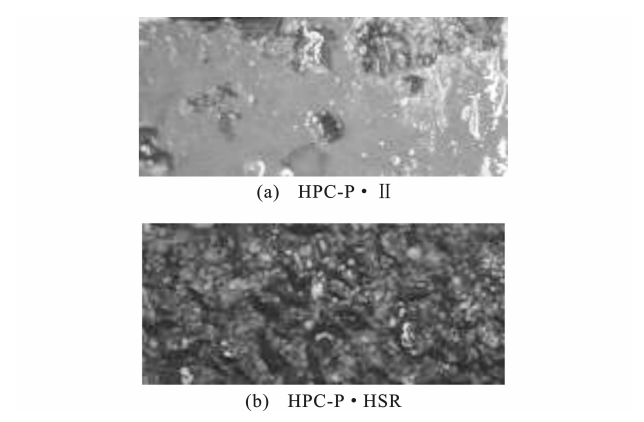


图 5 HPC-P · II 和 HPC-P · HSR 在 25% CMA 溶液中浸泡 724 d 的表面破坏特征

Fig. 5 Surface Destructive Characteristics of HPC-P · II and HPC-P · HSR Samples in 25% CMA Solution After 724 d

水泥混凝土具有比较严重的化学腐蚀破坏作用,其腐蚀破坏以表面剥落及其引起的质量损失为特征,混凝土的这种表面剥落破坏是由表及里逐层进行,对混凝土的内在质量并不会产生明显的不利影响,其相对动弹性模量降低效果并不明显。

(2) 混凝土的 CMA 腐蚀剥落程度与 CMA 溶液浓度和腐蚀时间有关,在较低浓度溶液中的腐蚀非常缓慢,在较高浓度溶液中的腐蚀作用较快,腐蚀剥落越明显。在质量分数为 25% 的 CMA 溶液中,当浸泡腐蚀时间超过 450 d 以后,其腐蚀剥落现象开始加剧。

(3) 质量分数为 25% 的 CMA 溶液对 OPC 具有非常严重的腐蚀破坏,对于 P · II 52.5 水泥 HPC 的腐蚀破坏最小,对 P · HSR42.5 水泥 HPC 的腐蚀破坏介于两者之间。

(4) 采用 P · II 42.5 水泥 HPC 可以解决机场道面水泥混凝土的 CMA 机场道面除冰液的腐蚀破坏问题,为中国北方地区机场道面 HPC 的研发提供了依据。

参考文献: References:

[1] 宋聿修,刘雪松.“三北”地区机场水泥混凝土道面损坏原因分析[J]. 中国民用航空,1995(5):25-26.
SONG Yu-xiu, LIU Xue-song. Broke Analysis of Airport Runway in Sanbei Region[J]. China Civil Aviation, 1995(5):25-26.

[2] MH 3145.49—1998,民用航空器除冰/防冰[S].
MH 3145.49—1998, Civil Aircraft Eliminate/Prevent Freezing[S].

- [3] RANGARAJU P R. Mitigation of ASR in Presence of Pavement Deicing Chemicals[R]. Clemson: Clemson University, 2007.
- [4] COLLINS A R. The Destruction of Concrete by Frost[J]. Journal of Institution of Civil Engineers, 1944, 23(1): 29-41.
- [5] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of Volume Change in Hardened Portland-cement Paste During Freezing[J]. Highway Research Board Proceedings, 1949, 32(8): 285-297.
- [6] LITVAN G G. Freeze-thaw Durability of Porous Building Materials[R]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1980: 293-298.
- [7] YU H F, MA H Y, BAI K, et al. Freeze-thaw Durability of Thaw Durability of Portland Cement Concrete Subjected to Airfield Pavement Deicer [C]// RILEM. Proceedings of the 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites. Nanjing: RILEM, 2008: 721-722.
- [8] 白 康. 水泥混凝土在机场道面除冰液作用下的抗冻性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- BAI Kang. Research on Freezing-thawing Durability of Concrete Subjected to Airfield Pavement Deicer [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [9] SUTTER L L, PETERSON K R, JULIO-BETANCOURT G, et al. The Deleterious Chemical Effects of Concentrated Deicing Solutions on Portland Cement Concrete [R]. Houghton: Michigan Technological University, 2008.
- [10] 杨全兵, 杨钱荣. 硫酸钠盐结晶对混凝土破坏的影响[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(7): 877-885.
- YANG Quan-bing, YANG Qian-rong. Effects of Salt-crystallization of Sodium Sulfate on Deterioration of Concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(7): 877-885.
- [11] 杨全兵, 朱蓓蓉. 混凝土盐结晶破坏的研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(4): 392-396.
- YANG Quan-bing, ZHU Bei-rong. Deterioration of Concrete Due to Action of Salt Crystallization[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(4): 392-396.
- [12] 蒋敏强, 陈建康, 杨鼎宜. 硫酸盐侵蚀水泥砂浆动弹模量的超声检测[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(1): 126-132.
- JIANG Min-Qiang, CHEN Jian-kang, YANG Ding-yi. Dynamic Modulus of Cement Mortar in Sulphate Erosion Measured by Ultrasonic Checking[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005, 33(1): 126-132.
- [13] Transportation Research Board. Comparing Salt and CMA[R]. Washington DC: TRB, 1991.
- [14] DARWIN D, BROWNING J, GONG L, et al. Effects of Deicers on Concrete Deterioration[R]. Lawrence: University of Kansas, 2007.
- [15] SANTAGATA M C, COLLEPARDI M. The Effect of CMA Deicers on Concrete Properties[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(9): 1389-1394.
- [16] PETERSON O. A Reply to a Discussion by John Bensted of the Paper "Chemical Effects on Cement Mortar of Calcium Magnesium Acetate as a Deicing Agent"[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(4): 637-639.
- [17] 刘晓曦, 王硕太. 机场混凝土道面封缝材料疲劳特性[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 44-47.
- LIU Xiao-xi, WANG Shuo-tai. Joint Sealant Fatigue Property of Airport Concrete Pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 44-47.
- [18] 敦 晓, 岑国平, 黄灿华, 等. 机场道面混凝土冻融破坏评价指标[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(1): 13-18.
- DUN Xiao, CEN Guo-ping, HUANG Can-hua, et al. Evaluation Indices of Freezing-thawing Destruction for Airfield Runway Concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(1): 13-18.
- [19] 王观虎, 蔡良才, 邵 斌, 等. 机场水泥混凝土道面使用寿命的改进灰色预测模型[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(3): 45-48.
- WANG Guan-hu, CAI Liang-cai, SHAO Bin, et al. Modified Gray Prediction Model of Service Life for Airport Cement Concrete Pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3): 45-48.
- [20] 岑国平, 马国强, 王硕太, 等. 机场道面合成纤维混凝土的耐久性[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(3): 43-45.
- CEN Guo-ping, MA Guo-qiang, WANG Shuo-tai, et al. Durability of Synthetic Fiber Reinforced Concrete for Airport Pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(3): 43-45.
- [21] 张 擎, 蔡友清, 冯 勇. 水泥混凝土路面加铺层的疲劳性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(4): 26-29.
- ZHANG Qing, CAI You-qing, FENG Yong. Fatigue Performance of Overlay on Concrete Pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(4): 26-29.