

机场道面自密实碱激发混凝土性能研究

吴永根, 蔡良才, 付亚伟
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:针对机场道面混凝土强度、耐久性高性能化的要求,采用“优质矿渣+复合碱激发剂”的技术路线,配制出坍落度 ≥ 160 mm,抗折强度7 d达7.6 MPa、28 d达8.5 MPa的自密实碱激发胶凝材料混凝土,并研究了碱激发胶凝材料混凝土的耐久性能、变形性能、施工和经济性。与目前机场道面施工中采用的水泥混凝土进行对比试验,结果表明:其抗渗性、抗冻性、耐腐蚀性和耐磨性远优于传统水泥混凝土,抗渗等级达到S40以上,抗冻等级达到F300以上,耐硫酸盐和耐磨性能优异;碱激发胶凝材料混凝土属低收缩混凝土,但早期收缩略高,应采取措施加强早期养护。自密实碱激发胶凝材料道面混凝土的和易性、强度、耐久性可以满足机场道面铺筑要求,且具有良好的施工和经济性,可用于机场道面的建设。

关键词:机场道面;碱激发混凝土;强度;耐久性

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.03.001

中图分类号: V351.2;TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)03-0001-05

水泥混凝土是机场道面的主要建筑材料,由于其置于自然中,长期处于干湿交替、冻融循环等恶劣使用环境并承受着飞机多次重复荷载作用,使用时缺乏足够的物理力学性能与耐久性^[1]。近年来我国北方地区新建、扩建的机场,陆续出现了混凝土道面使用仅3-5年便发生冻胀、碎裂、脱皮、腐蚀等耐久性破坏现象^[2]。为了提高混凝土强度和流动性,往往需要增大水泥混凝土道面的水泥用量,这样不但增加工程的成本,而且进一步加剧水化热,易导致混凝土开裂和劣化。因此,配制高性能混凝土、提高混凝土道面的性能成为亟待解决的问题。另一方面,工业生产带来了大量的副产品诸如高炉矿渣、粉煤灰等,综合利用工业固体废弃物,一直是各国政府和专家关心研究的重大课题。为全面提高机场混凝土道面的综合性能,本文对采用碱激发胶凝材料替代水泥配制高性能道面混凝土进行研究。

1 碱激发胶凝材料道面混凝土配制

碱激发胶凝材料(Alkali-Activated Cementitious Materials, AAC)是一类以强碱性物质为激发剂,以工业废渣(硅铝酸盐玻璃体或晶体)或天然矿物(粘土类矿物、长石等)为主要原料,经适当的工艺处理后制备的具有胶凝性质的材料。碱激发胶凝材料混凝土(简称AAC混凝土)以碱激发胶凝材料取代传统水泥,与骨料和水配制而成,具有小时强度高、硬化速度快、耐久性好、便于施工的特点。

1.1 配制目标

- 1)工作性指标:设计混凝土坍落度 ≥ 160 mm。
- 2)强度指标:设计抗折强度为6.0 MPa。
- 3)耐久性指标:①抗冻性:抗冻等级为F300;②抗渗性:静水压力渗透试验P25;氯离子渗透电量1 000-2 000 C;③耐磨性:平均磨耗深度为1.0-2.0 mm;④收缩:与普通混凝土相当。

1.2 配合比设计

收稿日期:2009-12-07

作者简介:吴永根(1969-),男,上海人,副教授,博士,主要从事机场施工与材料研究。E-mail:wuyonggen1@163.com.

实验采取正交设计进行碱激发胶凝材料混凝土的配合比设计。根据设计要求的工作性指标选用原材料,通过理论计算、试拌调整,对矿渣用量、溶胶比和砂率进行优选和配合比设计优化,确定其配合比。

1.2.1 试验用材料

1) 激发剂:采用哈尔滨工业大学深圳研究院提供的激发剂,复配后的溶液密度为 1.43 g/cm^3 。

2) 高炉矿渣微粉:采用江西萍乡联达高新建材厂生产的冶金高炉矿渣微粉,比表面积 $410 \text{ m}^2/\text{kg}$,密度 2.86 g/cm^3 。

3) 水泥:为与 AAC 混凝土进行性能对比,选用耀县秦岭牌 42.5R 普通硅酸盐水泥,密度 3.10 g/cm^3 。

4) 细骨料:选用灞河中砂,II区,级配合格,细度模数为 2.73,密度 2.63 g/cm^3 ,堆积密度 1503 g/cm^3 ,含泥量 0.5%。

5) 粗骨料:采用泾阳石灰岩碎石,5-20 mm,20-40 mm 二级配,级配比例为 45:55,级配合格,密度 2.78 g/cm^3 ,堆积密度 1590.4 g/cm^3 。

1.2.2 试验用配合比

通过正交试验,选取 3 个溶胶比 0.54、0.56、0.58 和 5 个矿渣用量 360 kg/m^3 、 380 kg/m^3 、 400 kg/m^3 、 420 kg/m^3 、 440 kg/m^3 ,确定碱激发胶凝材料混凝土配合比,共 11 组,类型代号为 A,见表 1,同时选用机场道面常用的水泥混凝土配合比进行对比试验,类型代号为 P,见表 2。

表 1 碱激发胶凝材料混凝土试验配合比

Tab. 1 Mixes of AAC concrete

混凝土代号	溶胶比	砂率(%)	矿渣/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	激发剂/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	砂/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	石/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
A1	0.58	34	440	255.2	588	120 6
A2	0.56	34	440	246.4	605	124 3
A3	0.54	34	440	237.6	613	125 2
A4	0.58	34	420	243.6	600	123 4
A5	0.56	34	420	235.2	607	124 5
A6	0.54	34	420	226.8	612	125 4
A7	0.58	34	400	232.0	615	126 5
A8	0.56	34	400	224.0	620	127 2
A9	0.54	34	400	216.0	625	128 3
A10	0.58	34	380	220.4	628	129 0
A11	0.58	34	360	208.8	642	131 8

表 2 普通水泥道面混凝土试验配合比

Tab. 2 Mixes of portland pavement concrete

水灰比	砂率(%)	水泥/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	砂/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	石/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
0.43	32	330	141.9	624	1 404

2 碱激发胶凝材料道面混凝土的工作性

自密实碱激发胶凝材料道面混凝土属于大流动性混凝土,参照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》^[3],主要采用坍落度指标,同时观察其粘聚性、保水性,综合评价其工作性。试验结果见表 3。11 组配比除 A6、A9、A10、A11 外,各配比工作性均达到了设计坍落度指标。

表 3 混凝土工作性试验结果

Tab. 3 Workability of concretes

混凝土代号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	P(Vb)
坍落度/mm	210	205	181	206	197	147	193	172	130	157	50	17S
粘聚性	良好	不好	良好	不好	良好							
保水性	无	无	无	无	无	无	无	无	无	无	无	无

3 碱激发胶凝材料道面混凝土的力学性能

混凝土抗折、抗压强度试验参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[4]规定进行。试验结果见表 4。

表4 混凝土强度试验结果
Tab.4 Strength of concretes

强度类型	时间/d	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	P
抗折强度/MPa	7	6.69	6.80	7.02	7.03	7.14	7.70	7.08	7.26	7.47	7.59	7.49	5.43
	28	6.86	7.56	7.39	7.20	7.66	8.09	7.46	8.18	8.36	8.51	8.38	6.83
抗压强度/MPa	7	80.7	80.4	81.5	77.1	79.6	83.5	79.2	80.1	83.7	83.9	84.8	35.2
	28	86.8	86.9	88.7	86.7	87.4	89.5	87.1	87.6	90.1	90.3	91.9	50.7

从试验结果可以看出,AAC混凝土抗折强度均满足道面抗折强度设计指标,强度增长很快。28 d抗折强度较普通水泥混凝土P提高24.6%,达8.5 MPa,抗压强度提高81.3%,达92 MPa。7 d抗折强度提高41.8%,达7.6 MPa,7 d抗压强度提高138.4%,达85 MPa。AAC混凝土的强度增长快,7 d抗折强度约为28 d强度的88.8% - 97.6%,远高于普通水泥混凝土P的79.5%,7 d抗压强度为28 d的88.9% - 93.3%,远高于普通水泥混凝土的69.4%。

由于在普通水泥混凝土的水化物中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量占水泥质量的25% - 30%,且富集于骨料底面形成的过渡带中,由于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 无粘结力,受力时在迁移带周围形成应力集中,促使微裂缝宽度和长度急剧增大,直至相互联在一起,降低其强度。而AAC混凝土水化过程中几乎不生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,因而大大增强骨料与胶凝体的粘结力,从而显著提高强度。在二者不同的抗压破坏断面形态上,AAC混凝土破坏时出现一条斜裂缝贯穿试件,破坏过程较慢。峰值应力之前,内部仅出现微裂纹,稳定扩展;峰值应力后,出现可视裂缝,此后裂缝失稳扩展并贯穿,但持续时间较长,最终破坏后试件基本裂而不散。而水泥混凝土试件在峰值荷载后不久,出现裂缝,并迅速增宽、扩展与贯穿,试件发生脆性破坏,试件部分散开或完全碎掉。

4 碱激发胶凝材料道面混凝土耐久性能

4.1 抗渗性能

采用静水压力法与氯离子渗透法相结合的方法,研究碱激发胶凝材料混凝土的抗渗性能。静水压力抗渗性能试验依据《普通混凝土长期性能与耐久性试验方法》规定进行,氯离子渗透性能试验依据 ASTM C1202—05^[6]的快速测试方法规定进行,试验结果见表5。

表5 混凝土静水压力抗渗试验结果

Tab.5 Penetration resistance of concretes under hydraulic pressure

混凝土代号	P	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
压力值/MPa	1.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
渗水高度/mm	已渗水	1	0	0	0	0	0	0	0	0
抗渗标号	S10	>S40								
6 h 通电量/C	2 735	1 894	1 889	1 876	1 856	1 847	1 841	1 773	1 771	1 751
氯离子渗透性	中	低	低	低	低	低	低	低	低	低

从试验结果可以看出,AAC混凝土抗渗性能比水泥混凝土高很多。这是由于所配制的AAC混凝土工作性较好,且不存在水泥混凝土的薄弱过渡区结构^[7-9],孔结构优良,内部多为封闭状小孔,细小孔(3×10^{-7} - 8×10^{-7} mm)多达16.6%,而硅酸盐水泥仅3.4%^[10-11],混凝土结构更为致密,故AAC混凝土的抗渗透性优于普通水泥混凝土。

4.2 抗冻性能

采用快冻法,按照《普通混凝土长期性能与耐久性试验方法》的规定进行。抗冻性能试验选取5组代表性配比,同一组P进行对比试验,结果见表6。

表6 混凝土抗冻性能试验结果
Fig. 6 Frost resistance of concretes

混凝土代号	P	A2	A5	A7	A8	A9
质量初值/kg	10.25	10.54	10.49	10.48	10.63	10.45
动弹初值/GPa	53.23	55.40	55.71	56.21	56.44	56.03
次数	100	275	275	275	275	275
试验1 质量损失(%)	1.0	0.1	0.4	0.6	0.6	0.2
相对动弹(%)	67.2	93.7	91.4	90.3	91.1	94.6
次数	125	300	300	300	300	300
试验2 质量损失(%)	1.2	0.1	0.5	0.7	0.6	0.4
相对动弹(%)	52.8	92.0	90.5	89.8	89.9	94.6
抗冻等级	F100	> F300				

可以看出,普通水泥混凝土P抗冻等级为F100,AAC混凝土抗冻等级均在F300以上,抗冻性能更好,完全满足严寒地区道面混凝土抗冻要求。这是因为AAC混凝土不存在水泥混凝土的薄弱过渡区,细小孔比例大,结构密实,抗渗透能力强,不易达到冻结饱和状态;同时强度高,抵抗破坏能力强;且其含气量也较水泥混凝土高出许多,缓解了冻融过程中产生的冰胀压力和毛细孔水的渗透压力,这些都对提高抗冻性十分有利。

4.3 耐磨性能

依据《混凝土及其制品耐磨性试验方法》^[12]规定进行耐磨性能试验,研究结果见表7。

表7 混凝土耐磨性试验结果
Tab. 7 Abrasion resistance of concretes

混凝土代号	P	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
磨槽深度/mm	1.17	0.85	0.58	0.61	0.96	0.91	0.45	0.77	0.58	0.46
耐磨度	1.92	2.64	3.87	3.68	2.34	2.45	4.99	2.92	3.87	4.91

可以看出AAC混凝土耐磨性能较普通水泥混凝土好,耐磨度最高达4.99,较水泥混凝土提高了1.22-2.60倍。其原因在于AAC混凝土不存在普通水泥混凝土的薄弱界面结构,提高了浆体的密实度,表面更为致密,早期原生缺陷较之大大降低,且具有更高的强度和硬度,因而有着优异的耐磨性能。

4.4 干缩变形性能

依据《普通混凝土长期性能与耐久性试验方法》规定进行,选取5组代表性配比,及机场道面常用配比水泥混凝土P,对混凝土各龄期干缩值进行测量计算,结果见表8。

可以看出,AAC混凝土早期收缩值比水泥混凝土略大,而后期(从28d起)和水泥混凝土基本相当,二者处于同一档次,属低收缩混凝土。

表8 混凝土干缩试验结果

Tab. 8 Desiccation shrinkage of concretes

时间/d	P	A2	A5	A7	A8	A9
1	30	50	47	51	42	54
3	49	117	105	121	98	126
7	87	178	166	187	149	191
14	117	206	201	212	197	220
28	209	227	223	234	217	244
45	243	244	240	251	245	259
60	269	278	273	284	271	287

5 碱激发胶凝材料道面混凝土的施工和经济性

根据规范在新疆某机场进行现场铺筑,结果表明:AAC混凝土具有良好的施工性,由于快凝、早强,因此特别要求各道工序紧密衔接,同时在做面工艺上增加抹面机抹面,施工工艺和技术基本与水泥混凝土相同,只是拆模、切缝时间要提前5-8h,养护3d即可,从而使工作效率和平整度大大提高。AAC混凝土道面表面性能优异,很少有干裂现象,满足机场混凝土道面各项要求,说明利用现行的施工工艺和方法进行AAC混凝土的铺筑是合理可行的。

同时,套用民用机场预算定额,按新疆乌鲁木齐地区2009年10月材料信息价分析计算,对AAC混凝土和机场道面常用普通高强水泥混凝土的成本单价(直接成本)进行对比分析,结果见表9。

表9 AAC混凝土和机场道面常用普通高强水泥混凝土的成本单价分析(按1 m³计,单位:元)

混凝土类型	人工费	材料费	机械使用费	其他费用	合计
AAC 混凝土	85.00	358.20	25.51	10	478.70
普通高强 水泥混凝土	80.00	400.55	25.51	10	516.05

由表9结果可以看出,AAC混凝土的成本单价要比普通高强水泥混凝土减少7.24%,具有较好的经济性能和推广应用的前景。

6 结束语

本文采用“优质矿渣+复合激发剂”的技术路线,配制出碱激发胶凝材料自密实道面混凝土。通过物理学性能、耐久性能和变形性能的试验研究,可得以下结论:

1)通过优化配合比设计,配制出了坍落度大于160 mm,粘聚性、保水性优良的AAC混凝土。AAC混凝土28 d抗折强度高达8.5 MPa,抗压强度高92 MPa,且强度发展较快,7 d抗折强度即达7.6 MPa,为28 d的88.8% - 97.6%;抗压强度达85 MPa,为28 d的88.9% - 93.3%。

2)AAC混凝土的各项耐久性能均优于普通水泥道面混凝土。MPPC静水压力抗渗等级均在S40以上,氯离子渗透性低;抗冻等级F300,完全满足严寒地区道面混凝土抗冻要求;耐磨性优于普通水泥混凝土。

3)AAC混凝土的各龄期干缩值均略高于普通水泥道面混凝土,早期收缩值稍大,而后期(28 d起)和水泥混凝土基本相当,二者处于同一档次,属低收缩混凝土,故对AAC混凝土应加强早期养护。

4)AAC混凝土具有良好的施工性,施工工艺和技术与水泥混凝土基本相同,且具有更好的经济性能,具有十分广阔的推广应用前景。

参考文献:

- [1] Mahta P K. Durability - Critical Issues for the Future[J]. Concrete International, 1997(3):30-33.
- [2] 黄土元. 21世纪初期我国混凝土技术发展中的几个重点问题[J]. 混凝土, 2002, 24(3):3-8.
HUANG Shiyuan. High Lights of Development of Concrete Technology in Future Some Years in China[J]. Concrete, 2002, 24(3):3-8. (in Chinese)
- [3] GB/T 50080-2002. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S].
GB/T 50080-2002. Standard Test Method of Performance on Ordinary Fresh Concrete[S]. (in Chinese)
- [4] GB/T 50081-2002. 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
GB/T 50081-2002. Standard Test Method of Mechanical Properties on Ordinary Concrete[S]. (in Chinese)
- [5] GBJ 82-85. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法[S].
GBJ 82-85. Standard Test Method of Long-term Performance and Durability on Ordinary Concrete[S]. (in Chinese)
- [6] ASTM C 1202-05. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration[S].
- [7] Bakharev T, Sanjayan J G, Cheng Y B. Effect of Admixtures on Properties of Alkali-activated Slag Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(9):1367-1374.
- [8] Fernando Pacheco Torgal, Joo Castrogomes, Said Jalali. Alkali-activated Binders: A Review. Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(7):1305-1314.
- [9] Maragkos Ioannis, Giannopoulou Ioanna P, Dimitros Panias. Synthesis of Ferronickel Slag-based Geopolymer[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(2):196-203.
- [10] 张程博, 石宗利, 王顺花. 土聚水泥的研究现状与展望[J]. 硅酸盐通报, 2008, 27(1):127-132.
ZHANG Chengbo, SHI Zongli, WANG Shunhua. Current Status and Perspective of Researches on Geopolymer[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2008, 27(1):127-132. (in Chinese)
- [11] 翁履谦, 宋申华. 新型地质聚合物胶凝材料[J]. 材料导报, 2005, 19(2):67-68.
WENG Lüqian, SONG Shenhua. Development of Novel Cementitious Geopolymers[J]. Bulletin of Materials, 2005, 19(2):67-68. (in Chinese)

- FANG Kaitai. Theory, Method and Application of Uniform Design of Experiment: A Review of History [J]. *Mathematical Statistics and Management*, 2004, 23(3): 69-80. (in Chinese)
- [8] Mullur Anoop A, Messac Achille. Extended Radial Basis Functions: More Flexible and Effective Metamodeling [R]. AIAA 2004-4573.
- [9] Simpson Timothy W, Mauery Timothy M. Comparison of Response Surface and Kriging Models for Multidisciplinary Design Optimization [R] AIAA 98-4755.
- [10] Marcel M J, Baker J. Interdisciplinary Design of A Near Space Vehicle [C] // Proceedings of Southeast Conference. Richmond: IEEE Press, 2007: 421-426.

(编辑:徐敏)

Response Surface Construction of Wing Structure with Optimal Shape Parameter

WEI Yue-xing, CHEN Xiao-qian, XU Lin

(Collage of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

ABSTRACT: The shape parameter in Radius Basis Function (RBF) determines RBF's ability of approximation. Aimed to improve the ability, the error function of RBF is build, and then the shape parameter is chosen by optimization of the error function. The results of test functions show that the algorithm proposed here is much more adaptable to higher dimensional problems than Kriging model. Compare with Kriging, when the present algorithm is used in building Response Surface of wing structure, better approximation results are obtained in the computation of the mass of wing, the maximum stress of skin and the front edge displacement of wing. The effectiveness of the algorithm is further verified at the same time.

Key words: radius basis interpolation function; shape parameter; response surface

(上接第5页)

- [12] GB/T 16925-1997. 混凝土及其制品耐磨性试验方法(滚珠轴承法) [S].
GB/T 16925-1997. Standard Test Method of Wear Resistance on Concrete and Goods (Ball Bearing Method) [S]. (in Chinese)

(编辑:徐敏)

Performance of Airport Pavement Self-compacting Alkali-activated Concrete

WU Yong-gen, CAI Liang-cai, FU Ya-wei

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Aimed at high strength, durability requirements of airport pavement concrete, by adding Na_2SiO_3 and NaOH complex activator in slag, self-compacting alkali-activated concrete (AAC) is prepared with slump 160 mm and upwards, flexural strength 7 d and 28 d respectively reaching 7.6 MPa and 8.5 MPa. Its durability, distortion, construction and economy performances are also studied by comparing with porland concrete. The results show that the anti-permeability, anti-frozen, corrosion resistance and abrasion resistance of SCAAC are superior to the porland concrete, and its anti-permeability rank exceeds S40, anti-frozen rank exceeds F300, sulfate resistance and abrasion are excellent. The Alkali-activated concrete is of low deformation concrete but with ratherish great early deformation, therefore early keep should be reinforced. AAC can meet the requirements of airport pavement in workability, strength, durability, constructing and economy, and it can be applied to the construction of airport pavement.

Key words: airport pavement; alkali-activated concrete; strength; durability