



国家出版基金资助项目
“十二五”国家重点图书
材料研究与应用著作

碱矿渣胶凝材料结构 工程应用基础

APPLICATION FOUNDATION OF
ALKALI-ACTIVATED SLAG
CEMENTITIOUS MATERIAL IN
STRUCTURAL ENGINEERING

郑文忠 朱 晶 著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目
“十二五”国家重点图书
材料研究与应用著作

碱矿渣胶凝材料结构 工程应用基础

APPLICATION FOUNDATION OF
ALKALI-ACTIVATED SLAG
CEMENTITIOUS MATERIAL IN
STRUCTURAL ENGINEERING

郑文忠 朱 晶 著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书介绍碱矿渣胶凝材料(AASCM)的结构工程应用基础,主要包括其制备及反应机理;常温下、高温下和高温后的力学性能;常温下植筋性能;常温下、高温下和高温后黏结锚固性能;常温下加固梁的受弯性能;加固梁板的抗火性能。

本书可作为高等学校结构工程专业的参考教材,也可供有关科研、设计和施工管理的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

碱矿渣胶凝材料结构工程应用基础/郑文忠,朱晶著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015. 11

ISBN 978-7-5603-5022-6

I. ①碱… II. ①郑…②朱… III. ①碱矿渣混凝土-胶凝材料-应用-结构工程-高等学校-教材 IV.

①TU528.2②TB321③TU74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 270530 号

策划编辑 王桂芝 任莹莹

责任编辑 刘 瑶 杨明蕾

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 787mm×960mm 1/16 印张 27.25 字数 459 千字

版 次 2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-5022-6

定 价 98.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

随着我国钢铁行业的迅猛发展,矿渣已成为产量巨大的一种工业副产品。我国每年矿渣产量约 2.4 亿 t, 占全球总产量的 50%。碱矿渣胶凝材料 (Alkali - Activated Slag Cementitious Material, AASCM) 是以工业副产品——粒化高炉矿渣为原料, 采用适当的碱激发剂激发, 经搅拌而成的胶凝材料。其抗压强度不低于 C50 的混凝土, 其黏结性能与环氧类有机胶基本持平, 且在历经最高温度不高于 600 ℃ 时, 其高温后抗压强度不降低。若用 AASCM 替代环氧类有机胶粘贴碳纤维布进行加固, 可有效提高加固结构的耐火性能; 若用 AASCM 制成耐高温砌块替代混凝土砌块和黏土砖, 同时用 AASCM 替代砌筑砂浆, 用于砌筑 AASCM 砌块墙, 可丰富现代砌体结构的内涵。由于 AASCM 每立方米约合 330 元, 价格与普通混凝土基本相当, 若用 AASCM 替代混凝土, 与受力筋一同制成配筋 AASCM 梁、板、柱、墙及节点等, 则既节能环保, 又耐高温, 还能提高实际工程的抗火能力。

本书是这一领域研究的阶段性成果, 共分 9 章: 第 1 章介绍 AASCM 的概念、研究概况和应用前景; 第 2 章介绍制备 AASCM 所用原材料的选择、配比试验与配比优化及 AASCM 的反应机理; 第 3 章介绍 AASCM 常温下的力学性能和 AASCM 的微观结构; 第 4 章介绍用 AASCM 在混凝土中植筋的锚固性能和锚固长度的取值; 第 5 章介绍常温下用 AASCM 粘贴的碳纤维布与混凝土间的黏结锚固性能和碳纤维布锚固长度的计算方法; 第 6 章介绍用 AASCM 粘贴碳纤维布加固钢筋混凝土梁的受弯性能和设计计算方法; 第 7 章介绍高温下和高温后 AASCM 的力学性能和 AASCM 高温后的微观结构; 第 8 章介绍高温下和高温后用 AASCM 粘贴的碳纤维布与混凝土间的黏结锚固性能和锚固长度的计算方法; 第 9 章介绍用 AASCM 粘贴碳纤维布加固混凝土梁板的抗火性能和抗火设计计算方法。

2005 年作者及其团队开始从事 AASCM 方面的研究工作, 我的研究生朱晶、陈伟宏、徐威、万夫雄、王明敏、张建华、肖超、李时光等协助我做了大量具体工作。各位前辈、老师及同仁的技术文献为我们开阔了视野, 启发了思路, 提供了参考, 在此一并表示感谢。

本书的相关工作得到了教育部长江学者奖励计划(2009-37)、国家自然科学基金(50678050、51478142)、教育部博士点基金(20092302110046)、黑龙江省自然科学基金(E200916)和哈尔滨工业大学“985 工程”优秀科技创新团队建设基金(2011)的资助。

限于作者水平,书中疏漏及不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

哈尔滨工业大学 郑文忠

2015 年 7 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 碱矿渣胶凝材料的概念	1
1.2 碱矿渣胶凝材料研究概况	2
1.3 碱矿渣胶凝材料应用前景	7
第2章 AASCM 的制备及反应机理	8
2.1 试验原料	8
2.1.1 矿渣	8
2.1.2 粉煤灰	10
2.1.3 水玻璃	10
2.1.4 氢氧化钠	12
2.1.5 水泥	12
2.1.6 碳酸钠	12
2.1.7 水	12
2.2 AASCM 配合比试验	13
2.2.1 试验设备	13
2.2.2 搅拌成型	13
2.2.3 抗压强度测试方法	14
2.3 优化配比影响因素	15
2.3.1 原材料种类的影响	15
2.3.2 水玻璃模数的影响	17
2.3.3 水玻璃用量的影响	19
2.3.4 用水量的影响	20
2.3.5 矿渣比表面积的影响	21
2.3.6 养护条件的影响	22
2.4 AASCM 的反应机理	23
2.4.1 矿渣玻璃体结构	23
2.4.2 水玻璃胶粒结构	23

2.4.3	反应机理分析	25
2.5	小结	26
第3章	AASCM 常温下的力学性能	27
3.1	试验方案	27
3.1.1	试件尺寸确定	27
3.1.2	试件制作与养护	29
3.1.3	试件强度测定公式	29
3.2	AASCM 强度随龄期变化规律	34
3.2.1	胶砂件抗压强度	34
3.2.2	立方体抗压强度	36
3.2.3	轴心抗压强度	37
3.2.4	试件抗压强度的关系	38
3.2.5	抗折强度	41
3.2.6	轴心抗拉强度	42
3.2.7	劈拉强度	44
3.2.8	折拉比	45
3.3	AASCM 受压应力-应变关系	46
3.3.1	上升段方程	46
3.3.2	下降段方程	51
3.4	常温下 AASCM 的微观结构	53
3.4.1	SEM 扫描电镜分析	53
3.4.2	XRD 射线衍射分析	55
3.5	小结	55
第4章	用 AASCM 在混凝土中植筋的锚固性能	57
4.1	试验概况	57
4.1.1	植筋试件设计	57
4.1.2	材料性能	58
4.1.3	加载及量测方案	58
4.2	试验现象与数据	59
4.2.1	试验现象	59
4.2.2	试验数据	61
4.3	锚固承载力计算	66
4.3.1	平均黏结应力的计算	66
4.3.2	发生锥体黏结破坏锚固承载力的计算	67

4.4 基于可靠度分析的锚固深度取值建议	70
4.4.1 黏结锚固性能的影响因素	70
4.4.2 基于可靠度分析的锚固深度取值建议	72
4.5 小结	77
第5章 常温下用 AASCM 粘贴的碳纤维布与混凝土间的黏结锚固性能	78
5.1 双剪试验概况	78
5.1.1 试验方案	78
5.1.2 材料性能	80
5.1.3 试验流程	81
5.1.4 破坏形式	84
5.2 界面黏结性能的影响因素	85
5.2.1 用水量的影响	85
5.2.2 纤维布种类的影响	88
5.2.3 混凝土强度的影响	91
5.2.4 胶黏剂类型的影响	94
5.3 碳纤维布黏结锚固性能的试验概况	96
5.3.1 试件设计	96
5.3.2 试验方案	98
5.3.3 试验流程	100
5.4 碳纤维布黏结锚固性能的试验结果及分析	102
5.4.1 试件破坏形态	102
5.4.2 试验结果	104
5.4.3 有效黏结长度计算公式	110
5.4.4 锚固长度计算公式	114
5.4.5 界面黏结应力-滑移关系	116
5.5 小结	120
第6章 用 AASCM 粘贴碳纤维布加固钢筋混凝土梁受弯性能	122
6.1 加固未破损钢筋混凝土梁的试验概况	122
6.1.1 试件设计	122
6.1.2 材料性能	123
6.1.3 施工工艺	124
6.1.4 加载及量测方案	126
6.2 加固未破损钢筋混凝土梁的试验结果及分析	127

6.2.1	试验现象	127
6.2.2	试验数据	131
6.2.3	正截面抗弯承载力的计算方法	137
6.2.4	承载力计算值与试验值比较	138
6.2.5	试验梁刚度计算	138
6.2.6	刚度计算值与试验值比较	141
6.2.7	试验梁裂缝计算分析	141
6.3	加固经历极限荷载混凝土梁的试验概况	143
6.3.1	原梁设计	144
6.3.2	材料性能	149
6.3.3	加固方案	150
6.3.4	加载及量测方案	154
6.4	加固经历极限荷载混凝土梁的试验结果及分析	155
6.4.1	试验现象	155
6.4.2	试验数据	168
6.4.3	抗弯承载力的分析方法	181
6.4.4	承载力计算值与试验值比较	186
6.4.5	基于试验结果的塑性铰分析	186
6.4.6	基于试验结果的弯矩调幅系数分析	190
6.4.7	基于试验结果的抗弯刚度分析	191
6.4.8	抗弯刚度公式	192
6.4.9	裂缝间距分析	194
6.5	小结	196
第7章	AASCM 在高温下和高温后的力学性能	197
7.1	高温下 AASCM 的力学性能	197
7.1.1	试验方案	197
7.1.2	试件升温过程中的试验现象	204
7.1.3	高温下 AASCM 强度随温度变化规律	208
7.2	高温后 AASCM 的力学性能	222
7.2.1	试验方案	222
7.2.2	试验现象与试件质量损失	223
7.2.3	高温后 AASCM 强度随温度变化规律	224
7.3	高温下与高温后力学性能的比较	237
7.3.1	胶砂件抗压强度的比较	237

7.3.2	立方体抗压强度的比较	239
7.3.3	抗折强度的比较	241
7.3.4	抗拉强度的比较	243
7.4	高温后 AASCM 的微观结构	244
7.4.1	SEM 扫描电镜分析	244
7.4.2	XRD 射线衍射分析	246
7.5	小结	247
第 8 章	高温下和高温后用 AASCM 粘贴的碳纤维布与混凝土间的黏结锚固性能	249
8.1	高温下碳纤维布黏结锚固性能的试验概况	249
8.1.1	试件设计	249
8.1.2	施工流程	250
8.1.3	试验方案	252
8.1.4	试验方法	254
8.2	高温下碳纤维布黏结锚固性能的试验结果及分析	257
8.2.1	试件破坏形态	257
8.2.2	试验结果	259
8.2.3	锚固长度随温度变化规律	261
8.3	高温后碳纤维布黏结锚固性能的试验概况	262
8.3.1	试件设计	262
8.3.2	施工流程	263
8.3.3	试验方案	265
8.3.4	试验方法	266
8.4	高温后碳纤维布黏结锚固性能的试验结果及分析	271
8.4.1	试件破坏形态	271
8.4.2	试验结果	278
8.4.3	高温后碳纤维布有效黏结长度计算公式	282
8.4.4	高温后碳纤维布锚固长度随温度变化规律	286
8.4.5	高温后界面黏结应力-滑移关系	288
8.5	小结	293
第 9 章	用 AASCM 粘贴碳纤维布加固混凝土梁板抗火性能	294
9.1	火灾下加固混凝土板抗火性能试验	294
9.1.1	试验概况	294
9.1.2	试验数据测量及加载	303

9.2	火灾下加固混凝土板的试验结果与分析	305
9.2.1	试验现象与分析	306
9.2.2	截面温度场分析	312
9.2.3	试件变形分析	314
9.2.4	温度场有限元分析	315
9.2.5	变形有限元分析	323
9.3	火灾下加固混凝土梁抗火性能试验	331
9.3.1	试验概况	332
9.3.2	试验现象	337
9.4	火灾下加固混凝土梁的试验结果与分析	345
9.4.1	截面温度场分析	345
9.4.2	试件变形分析	346
9.4.3	温度场有限元分析	347
9.4.4	变形有限元分析	351
9.5	火灾后加固混凝土梁板抗火性能试验	353
9.5.1	试验方案	353
9.5.2	试验现象	254
9.6	火灾后加固混凝土梁板的试验结果与分析	363
9.6.1	荷载-跨中位移曲线	363
9.6.2	裂缝开展与分布	365
9.6.3	承载力计算	368
9.6.4	刚度与裂缝宽度计算	378
9.7	用 AASCM 粘贴碳纤维布加固混凝土梁板防火涂料 保护层厚度取值	388
9.7.1	影响梁板底面温度的关键因素分析	389
9.7.2	控制温度的确定	395
9.7.3	用 AASCM 粘贴碳纤维布加固混凝土梁板防火 涂料厚度	402
9.7.4	用 AASCM 粘贴碳纤维布加固混凝土梁板防火 涂料的选择与设置	404
9.8	小结	406
	参考文献	408
	名词索引	421

第1章 绪 论

1.1 碱矿渣胶凝材料的概念

粒化高炉矿渣(Ground Granulated Blast-furnace Slag, GGBFS),简称矿渣,是在高炉冶炼生铁时,得到的以硅铝酸盐为主要成分的熔融物,经淬冷成粒后具有潜在水硬活性的材料。高炉淬冷过程中,矿渣由熔融态向无定型玻璃态发生转变。我国每年矿渣产量约2.4亿t,全球每年矿渣产量约4.8亿t。一般条件下,矿渣-水浆体并不具有水硬性,只有处于碱性环境下,矿渣才具有水硬活性。随着我国钢铁行业的迅猛发展,矿渣已成为产量巨大的一种工业副产品。依据《用于水泥中的粒化高炉矿渣》(GB/T 203—2008),矿渣活性可通过质量系数、碱性系数和活度因子3个指标来衡量。矿渣活性随各系数的增大而增加,为保证矿渣活性质量系数不应小于1.2;矿渣根据碱性系数可将矿渣分为酸性、中性和碱性3种类别;《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》(GB/T 18046—2008)指出矿渣根据活性系数可分为3个质量等级,即S105,S95,S75。由于矿渣玻璃态具有一定的活性,处于介稳状态,因此在建筑行业中已得到广泛的应用。

水玻璃是一种黏稠的矿物胶,无杂质时无色透明,含杂质时呈青灰色或淡黄色,其俗称泡花碱,可溶于水,水解形成的溶胶具有良好的胶结能力。根据碱金属氧化物种类不同,可分为钠水玻璃($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$)、钾水玻璃($\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$)和钾钠水玻璃($\text{K} \cdot \text{Na} \cdot \text{O} \cdot n\text{SiO}_2$)等。水玻璃有两个重要参数,分别为模数和波美度。水玻璃模数是影响水玻璃物理和化学性质的重要因素,也反映水玻璃的组分比例。水玻璃在水中的溶解能力随水玻璃模数值的增大而降低。密度和波美度则表征了水玻璃溶液中溶质的含量(或称浓度)。密度 $1.36 \sim 1.50 \text{ g/cm}^3$ 和波美度 $38.4 \sim 48.3$ 的水玻璃在土木工程中应用最为普遍,水玻璃的黏度随密度的增加而增大。根据国标《建筑防腐蚀工程施工及验收规范》(GB 50212—2002),当钾水玻璃模数不符合规范规定时,可通过加入氧化钾或氢氧化钾以及硅胶粉来调整模数。我们经试验研究表明3种碱性激发剂的激发效果依次为:钾水玻璃>NaOH>P. O42.5水泥(Ordinary Portland Cement, OPC),主要原因在于:

①水玻璃和 NaOH 比 OPC 的碱性更高,而强碱环境是保证水化反应顺利进行的基础;②水玻璃激发矿渣生成的水化产物——水化硅酸钙凝胶、水滑石和水化铝酸四钙等比 NaOH 的水化产物—— $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水化铝酸钙的结构更致密,强度也更高。

碱矿渣胶凝材料(Alkali-activated Slag Cementitious Material, AASCM)是一种新型的胶凝材料。它是以磨细的高炉矿渣工业废弃物为主要原料,采用适当的碱性激发剂(如水玻璃)激发,经搅拌而成的胶凝材料。

AASCM 的抗压强度随水玻璃用量的增加经历一个先增加后降低的过程,水玻璃用量存在一个最佳区间。在水化过程中,当水玻璃用量偏少时,反应不能进行彻底,矿渣的潜在活性未能被完全激发。用量过多时由于过量的碱与空气中的 CO_2 发生反应生成碳酸盐,导致胶凝材料强度降低;当 OH^- 离子的浓度过高时,在矿渣颗粒表面快速反应产生的水化物形成一层保护膜,阻止了反应的进一步进行,导致后期强度发展缓慢。另外,部分学者认为矿渣颗粒越细,比表面积越大,表面能也越大,从而使矿渣的活性得到显著的提高,胶凝材料的强度得到提高且凝结更快。我们通过大量的试验研究得到结论:① 矿渣比表面积较大,即增大水玻璃和矿渣水化反应的表面积,随比表面积的增加,AASCM 的早期强度增长较快;② 胶凝材料的需水量随比表面积的增加而增大,致使 AASCM 浆液的和易性变差、浆液中的气泡难以排净;③ 比表面积过大,矿渣颗粒表面会过早地生成一层保护膜,将影响后期强度的增长,因此矿渣并非比表面积越大越好。AASCM 不含有水泥,省去了水泥“两磨一烧”的繁琐工艺,是一种绿色环保的材料。AASCM 的 28 d 边长为 150 mm 立方体抗压强度不低于 50 MPa。AASCM 单方造价约 330 元,比混凝土不高。

用 AASCM 替代环氧类有机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构。试验结果表明用二者在混凝土表面粘贴碳纤维布,常温下面内剪切强度基本持平。

1.2 碱矿渣胶凝材料研究概况

为考察 AASCM 的力学性能,参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—1999),用尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的试件进行 AASCM 抗折强度和胶砂件抗压强度试验;参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009),用尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的试件

进行 AASCM 立方体抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验;用尺寸为 $70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm} \times 228\text{ mm}$ 的棱柱体试件进行 AASCM 轴心抗压强度试验,获得单轴抗压应力-应变曲线。AASCM 的轴心抗拉试验所用的试件尚无特定标准,笔者用自行设计的哑铃型试模制成哑铃型试件,进行轴心抗拉强度试验,所用试模如图 1.1 所示。通过对配合比为 W35 和 W42(用水量分别占矿渣质量的

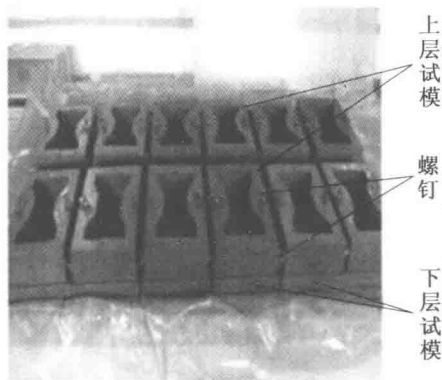


图 1.1 哑铃型试模

35%和42%)的 AASCM 与水灰比为 0.5 的 P. O42.5 级普通硅酸盐水泥制得的水泥石 OPC 的抗压强度对比,得到在相同养护条件下,AASCM 的胶砂件抗压强度明显优于 P. O42.5 制备的水泥石 OPC 抗压强度,通过对常温下强度试验数据分析,得到立方体试件与棱柱体试件抗压强度的关系公式: $f_c = 2.27 (f_{cu,70.7})^{0.716}$ 。

笔者获得了 AASCM 的受压应力-应变关系,测定配合比为 W35 和 W42 的 AASCM 受压应力-应变曲线和横向变形,在 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 棱柱体试件的侧面粘贴横竖两个应变片,由 DH-3818 静态应变测试仪采集所有数据,在 YA-2000 型电液式压力试验机上进行试验,加荷速度控制在 0.3 MPa/s 。试验数据显示,AASCM 受压应力-应变曲线只测出近似直线的上升段,未测出下降段,峰值应变在 1 800 微应变右。为得到前述 AASCM 受压应力-应变曲线的下降段,对 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 试件底面沿长度方向粘贴 UT70-30 型碳纤维布,并进行受弯试验。在进行受弯试验时,通过在试件的顶面、侧面以及碳纤维布底面粘贴应变片,测得试件受压边缘极限压应变均为 3 000 微应变左右。先假设 AASCM 受压应力-应变曲线下降段为一条向右下方倾斜的直线段。参考 Hognestad 建议的本构模型,并结合试件受弯试验的结果,取 3 000 微应变作为 AASCM 的极限压应变 ε_u ,取 σ_u 作为与 ε_u 相对应的应力。通过应用平截面假定和假定的 AASCM 本构关系曲线方程,采用条带积分法对加固试件受压区 AASCM 进行积分得到合力 T_u ;再取碳纤维布拉应力 $E_f \cdot \varepsilon_f$ 与试件底部抗拉碳纤维布截面面积 A_{df} 的乘积为合力 U_f ,然后令 $T_u = U_f$,便可得到加固试件受

压边缘 AASCM 的压应力 σ_u , 进而获得 AASCM 受压应力-应变全曲线。

取应力比(即应力 σ 与轴心抗压强度 f_c 之比)为 0.5 时的横向变形系数为泊松比 μ , 根据试验数据, 计算得到 AASCM 的泊松比平均值为 0.14 ~ 0.15, 比混凝土的泊松比 0.2 偏小。

另外, 笔者还采用 Scanning Electron Microscope (SEM) 扫描电镜, 分析常温 AASCM 的微观形貌, 随着龄期的增加, AASCM 的微观结构更加致密, 水化产物主要呈现颗粒状、团块状、棱锥状等形态, 而 OPC 非常松散, 水化产物主要呈现针状、草状、片状的水化产物相互交织; 此外李学英等也通过 SEM 观察到掺有矿渣的粉煤灰地质聚合物生成了含钙较高的反应产物、大量的水化硅酸钙和水化铝硅酸钙, 这些产物及地质聚合物凝胶填充了大量的孔隙, 使结构更加密实。采用 X-ray Diffractometer (XRD) 衍射技术, 分析了常温 AASCM 的物相组成, 确定 AASCM 的终产物为水化硅酸钙凝胶, 水滑石和水化铝酸四钙等非晶质物相, 进一步验证了 AASCM 的反应机理, 为分析 AASCM 的高温力学性能提供参考。

众所周知, 火灾是高频灾种。研发耐高温的无机胶凝材料成为行业的一种迫切需求, 同时也可考虑耐高温无机胶凝材料替代混凝土, 用于高温环境的工程建设。从国内外相关文献了解到地聚物具有良好的耐高温性能, 定性判断碱矿渣胶凝材料应具有与地聚物类似的性能。AASCM 的主要用途包括: ① AASCM 既可作为胶黏剂, 又可作为密封绝氧层, 用于粘贴碳纤维布加固结构更为有效; ② 可将 AASCM 制成耐高温砌块和耐高温砌筑浆体; ③ 可将 AASCM 作为建筑材料替代混凝土, 用于高温环境的工程建设; ④ 用 AASCM 固化有毒金属和有毒核废物, 应有广阔的发展前景。

笔者对高温下 AASCM 力学性能进行了试验。针对胶砂件 (40 mm × 40 mm × 160 mm) 抗压强度试验数据, 随着温度的升高, 两种较优配比抗压强度均经历了降低、回升再下降的过程。在 20 ~ 200 °C 时, AASCM 试件内部因自由水蒸发而形成空隙和裂缝, 裂缝尖端因试件加载而产生应力集中和裂缝扩展现象, 导致 AASCM 的抗压强度有所降低; 200 ~ 500 °C 时, 自由水已蒸发殆尽, 结合水受高温影响陆续脱出, 矿渣的胶合作用得以增强, 应力集中现象得到了缓解, 促使 500 °C 时的抗压强度比 200 °C 时有所提高; 500 ~ 700 °C 时, 矿渣水化生成的水化硅酸钙凝胶开始分解, 原有的体系被破坏, 导致 AASCM 试件裂缝继续延伸, 抗压强度有所下降; 700 ~ 800 °C 时, AASCM 的抗压强度明显下降, 此时水化硅酸钙凝胶分解殆尽, 大量网格状镁黄长石晶相产生, 致使体积膨胀, 裂缝扩展, 抗压强度明显下降。

通过对抗折强度与抗拉强度随温度变化的数据分析, 抗折强度与抗拉

强度均是随温度的升高而逐渐降低。在 200 ℃ 以内, AASCM 的抗拉强度曲线下降速率较大; 在 200 ~ 800 ℃, 与抗折强度相比, 抗拉强度曲线的斜率更大, 说明抗拉强度对温度作用更为敏感, 退化比抗折强度高。Foden 将增强纤维添加到无机胶凝材料中, 得到碳纤维增强地聚物材料抗折强度可达 245 MPa, 抗拉强度达 327 MPa, 抗剪强度达 14 MPa。升温至 800 ℃ 时, 可保持 63% 的原始抗折强度, 其力学性能得到极大的改善。另外, Cheng 等研究了碱激发高炉矿渣的耐火性能, 指出提高碱溶液的浓度能增强其耐火性能。

为了真正模拟火灾情况, 我们对 AASCM 的高温下与高温后的力学性能均做了研究。对养护龄期为 28 d 的 AASCM 试件进行了 100 ~ 800 ℃ 作用后的力学性能试验, 得出了随着温度的升高, AASCM 的质量损失逐渐加重的结论, 20 ~ 200 ℃ 作用后, 质量损失主要归结于毛细水的蒸发, 200 ~ 400 ℃ 作用后, 质量损失主要归结于凝胶水的蒸发, 400 ~ 600 ℃ 后, 质量损失主要归结于结晶水的散失, 600 ~ 800 ℃ 作用后, 质量损失主要归结于水化硅酸钙凝胶和碳酸钙的分解, 以及新产物镁黄长石 ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) 的生成。

通过对比高温后 AASCM 胶砂件抗压强度与常温抗压强度比随温度变化情况可知, 在 200 ℃ 以前, AASCM 和 OPC 的抗压强度均随温度升高而增加, 二者相当于经历了“高温养护”作用, 结构均更加密实。200 ~ 400 ℃ 作用后, AASCM 胶砂件抗压强度随温度升高逐渐增大, 而 OPC 强度开始降低; 400 ℃ 作用后, AASCM 的胶砂件抗压强度较常温时提高 13% 左右; 600 ℃ 作用后, AASCM 胶砂件抗压强度不断减小, 但仍高于常温时的强度, 而 OPC 的强度有大幅降低; 可见, AASCM 高温后抗压强度随着温度的升高, 经历了一个先增加后减小的过程, 其临界温度为 400 ℃; AASCM 物相组成发生变化的温度段为 600 ~ 800 ℃; 800 ℃ 作用后, AASCM 的高温后抗压强度为峰值强度的 40% ~ 50%。作为环氧树脂胶的替代产品, AASCM 的耐高温性能明显增强。

笔者通过试验研究了用 AASCM 粘贴单层碳纤维布加固混凝土梁、板防火性能。为防止碳纤维丝高温氧化, 选取了两种防火涂料: ①厚型隧道防火涂料; ②厚型钢结构防火涂料对加固构件进行防火绝氧保护。4 根加固梁和 5 块加固板底部中心处的碳纤维布经历的最高温度分别为 320 ~ 470 ℃ 和 90 ~ 300 ℃, 跨中最大位移分别为 2.50 ~ 11.01 mm 和 7.99 ~ 36.82 mm。火灾后除去两种防火涂料, 发现碳纤维布及面胶均保持完好。试验结果表明: ①厚型钢结构防火涂料和厚型隧道防火涂料均对碳纤维布

起到了绝氧防护作用,但由于前者在火灾下严重开裂脱落,其保护效果劣于后者;②火灾下 AASCM 作为胶黏剂保证了碳纤维布与混凝土梁、板共同工作,可有效提高加固构件的抗火性能。

国内外学者在碱激发胶凝材料方面也开展了积极探索。史才军等的著作中对矿渣的胶凝性研究做了较为详细的总结,认为早在 1930 年德国的 Kuhl 就已经开始研究了氢氧化钾激发矿渣胶凝材料的性能;1937 年 Chassevent 用氢氧化钠和氢氧化钾溶液测试了矿渣的活性;1940 年 Purdon 研究了氢氧化钠激发矿渣以及碱性盐、碱激发矿渣无熟料水泥。乌克兰学者 Glukhovskij 于 1957 年用钠、钾、苛性钠(NaOH)、苛性钾(KOH)或水玻璃等碱性材料激发粒化高炉矿渣、生石灰和硅酸盐水泥,得到了稳定性良好且强度较高的碱矿渣水泥,其尺寸为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的立方体试件 28 d 抗压强度高达 120 MPa;1986 年 Malek 等研制了一些可用于固化放射性废弃物的碱-激发水泥,1989 年 Roy and Langton 发现这些碱-激发水泥与古代的混凝土有一定的相似之处。Antonio A 等的研究结果表明,硅酸钠激发剂的含量影响碱激发矿渣胶凝材料的干缩率,在水化的早期阶段影响最为明显,并且收缩率随着水玻璃中 Na 的含量的增加而增大。Vladimir Zivica 的研究结果表明,水玻璃对矿渣的激发效果要优于氢氧化钠、硫酸钠等,更有利于碱激发矿渣微粉体系中 C-S-H 凝胶的形成。J. Toman 总结了碱激发矿渣胶凝材料在高温领域中的应用,并对其在该领域中对水泥的替代性提出了合理的建议。西班牙、澳大利亚等国家对碱矿渣水泥的制备进行了深入研究,我国于 1980 年开始研究碱矿渣水泥和碱矿渣混凝土的水化性能。国内外学者大多致力于将碱矿渣胶凝材料作为常规建筑材料,Chen Jian-xiong 等研究了碱激发矿渣胶凝材料在长龄期下的性能变化,特别是对抗压性能的研究,证明了碱激发矿渣胶凝材料的抗压强度会随着时间的增长而增长,不存在较长龄期后强度下降等问题。闫文涛等研究了水玻璃在高温下对矿渣的激发效果,证明激发产物与常温相同,硬化时间随碱含量的增加而加速的结论,但高温下水化硅酸钙凝胶的结晶度变差。清华大学王旻等针对普通地聚物材料需高温养护($50\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$)的缺点,研制出一种可在常温环境下($5\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$)实现固化反应的地聚物,其 7 d 面内剪切强度达 1.43 MPa,与环氧树脂胶基本持平,且随着温度的升高($20\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$),地聚物的强度不仅没有降低,反而有所提高;南京化工大学和重庆建筑大学分别对矿渣的结构、碱矿渣水泥的水化机理和碱矿渣水泥及混凝土的制备、耐久性、缓凝技术、碱集料反应等问题进行了系统研究;武汉理工大学王兴肖进行了植物纤维增强砌块砌体的轴心抗压强度、