

超临界碳化对水泥基材料性能和孔径结构的影响

查晓雄¹, 王海洋², 冯甘霖¹

(1. 哈尔滨工业大学深圳研究生院 土木与环境工程学院, 518055 广东 深圳;
2. 深圳市聚硅酸盐复合环保材料工程实验室(北京大学深圳研究生院), 518055 广东 深圳)

摘要: 为了考察超临界碳化技术在水泥基材料改性方面的应用, 研究超临界碳化对水泥基材料微观和宏观性能的影响, 基于此设计了超临界二氧化碳碳化试验研究水泥砂浆、水泥净浆和混凝土试件的碳化深度、强度、孔径分布以及二氧化碳吸收量的变化. 试验分析表明, 超临界碳化可以快速实现水泥基材料的碳化, 大幅提高试件强度, 改善材料的孔径分布, 使材料的中细孔径大幅降低, 提高材料的抗渗透能力, 为改善重金属等危害废物的水泥基固化效果提供了依据. 同时超临界碳化可以将大量二氧化碳转化为碳酸钙中沉淀吸收, 具有重要的环境保护意义.

关键词: 超临界碳化; 二氧化碳; 材料改性; 水泥基材料; 孔径分布

中图分类号: TU528.57 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2014)11-0052-06

Effects of supercritical carbonation on the property and pore structure of cement-based materials

ZHA Xiaoxiong¹, WANG Haiyang², FENG Ganlin¹

(1. School of Civil and Environment Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, 518055 Shenzhen, Guangdong, China; 2. Shenzhen Engineering Laboratory for Eco-efficient Polysilicate Materials (Peking University Shenzhen Graduate School), 518055 Shenzhen, Guangdong, China)

Abstract: To investigate the application of supercritical carbonation technology on cement-based material modification, and to study the effects of supercritical carbonation on microscopic and macroscopic properties of cement-based materials, in this paper, the supercritical carbonation tests have been done to study the change of carbonation depth, strength, pore structure and carbon dioxide absorption of the cement paste, mortar and concrete. It is shown that supercritical carbonation is a powerful tool to achieve the fast carbonation, improve the pore structure, enhance the strength and leach resistance of the material, and absorb a large number of CO₂, which is significant meaningful for optimizing the hazard waste cement solidify and the environmental protection.

Keywords: supercritical carbonization; carbon dioxide; material modified; cement-base material; pore distribution

碳化是一种常见的影 响水泥基材料性能的现象, 其中碳化反应(以下简称“碳化”)产生的碳酸钙在孔隙内沉淀填充, 可以使材料密实度、抗压强度和抗渗性能得到提高. 水泥基材料在建筑工程和废物固化处理中使用广泛, 研究碳化尤其是超临界碳化对水泥基材料性能的影响, 具有重要的工程实用价值. 二氧化碳的临界温度 ($\theta_c = 31\text{ }^\circ\text{C}$)

和临界压力 ($p_c = 7.39\text{ MPa}$) 较容易实现, 超临界状态的二氧化碳同时具有气体特性和液体特性, 既有气体的低黏度、高扩散性, 又有类似于液体的高密度、低表面张力. 这些独特性质保证了超临界二氧化碳进入微孔结构的质量传输效率, 能更有效的加速水泥基材料的碳化. 美国的 Rubin 等^[1-2] 在 1997 年首次将超临界二氧化碳技术应用于水泥固化放射性废料方面, 试验结果表明, 经过超临界碳化后的水泥固化体孔隙率结构发生变化, 游离液体减少, 放射性核素抗浸出性得到提高. 开展超临界碳化对水泥基材料性能影响的研究, 将为

收稿日期: 2014-01-24.

基金项目: 深圳市战略新兴产业发展专项资金(CXZZ20120830150537489).

作者简介: 查晓雄(1968—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 查晓雄, zhahero@126.com.

有害重金属离子等危害废物的水泥基固化的优化提供借鉴,同时碳化过程将气态二氧化碳转化为材料组分封存,具有重要的工程 and 环境保护价值。

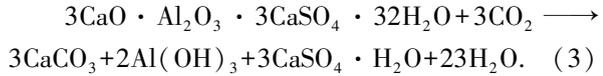
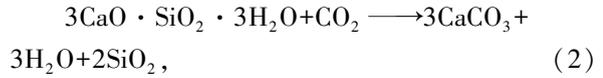
目前,国内外在超临界碳化对水泥基材料性能影响方面已有不少成果.文献[3]研究了水泥砂浆材料碳化后孔隙结构的改变,认为氢氧化钙的碳化,导致内部固体密度和体积的增加,从而改善了材料的孔隙结构.文献[4]对加速碳化技术的研究和应用进行了总结,认为加速碳化技术在废物固化方面有很大的应用前景,同时是一种有效的吸收二氧化碳这一温室气体的途径.文献[5-6]对玻璃纤维增强水泥材料进行了超临界二氧化碳碳化处理,发现孔隙中的水分对碳化效率影响较大.试验证明超临界碳化显著提高了材料的设计强度,韧性、纤维黏结性能和材料的耐久性.文献[7-8]将超临界二氧化碳处理技术应用于放射性废物水泥固化处理.试验结果表明经过超临界碳化处理的水泥固化体孔隙结构发生较大变化,游离液体减少,放射性核素抗浸出性提高,并经过不同压力的试验发现在 8.4 MPa 和 35 °C 条件下处理的性价比最高.文献[9]通过对铝酸盐水泥(CAC)进行超临界二氧化碳碳化试验发现,在 25 °C (相对湿度 99.9%) 条件下养护得到的 CAC 试件经过超临界碳化后碳化深度最高,拥有良好的力学性能.文献[10-11]进行的超临界碳化试验表明超临界碳化加速了自然碳化过程,但与自然碳化的扩散控制不同.一次性通入的超临界二氧化碳气流在极短时间内改变水泥浆体的化学组成性质,同时减少自由水和结合水,中和了孔隙水的碱性,同时大幅降低了材料透水性.超临界具有很好的应用前景,而国内对水泥基材料的碳化研究绝大部分集中在碳化对钢筋混凝土结构耐久性的损害上,碳化反应理论模型的研究也主要用于混凝土自然碳化深度的预测,而在超临界碳化对水泥基材料的内部结构和强度等性能的影响方面研究还很少.文献[12-13]已在超临界碳化方面进行了探索性研究,为后续的研究积累了宝贵的经验。

本文将针对工程中常用的水泥净浆、水泥砂浆和混凝土等水泥基材料,研究其在不同超临界碳化条件下的碳化深度、强度以及孔径结构分布变化,同时还将分析不同条件时超临界试块对二氧化碳吸收的影响,为超临界二氧化碳技术的进一步研究和应用提供宝贵经验和数据参考。

1 超临界碳化试验

在水泥材料中,碳化过程主要涉及的化学反

应如



水化产物中的钙矾石同样能与二氧化碳反应生成石膏 ($\text{CaSO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 和碳酸钙,但由于反应式(1)、(2)的自由焓最小,因此氢氧化钙和水化硅酸钙凝胶的反应最容易进行^[11, 14]。

与自然碳化相比,超临界碳化主要改变了反应压力和温度.超临界碳化中压力变化最直接影响材料孔隙内气液二相流的传输动力;而温度的影响较复杂,若温度升高,二氧化碳的表面张力将降低,流动性能提高,并且碳化化学反应速率将会提高.但温度升高亦有不利影响,首先温度升高二氧化碳和氢氧化钙的溶解度会降低,其次保持压力不变,二氧化碳的密度也较低.这些因素的影响程度还难以准确预测,因此需要通过试验来研究温度对超临界碳化的影响.基于此,本文试验选取反应压力、温度和碳化时间为变化参数。

1.1 超临界碳化试验设备

超临界碳化试验设备主要包括高压反应釜、气动增压泵及配套的空气压缩机和空气干燥机,冷水机和二氧化碳气瓶等.设备和试验操作具体见文献[3],试验使用高纯度商用二氧化碳。

核心设备高压反应釜(如图 1)设计压力 9.9 MPa,设计容积 50 L.配套有电接点压力表,防爆装置,热电偶接口,夹套(用于给内壁提供水循环温控)等设置。



图 1 高压反应釜

1.2 试验方案

为了研究压力,温度和碳化时间对超临界碳化的影响,本文设计了 4 组试验,具体试验相关信息如表 1 所示.试件包括水泥净浆、水泥砂浆、混凝土材料,尺寸均为 100 mm×100 mm×100 mm.其中:水泥净浆试块配合比为,水泥:水=1.0:0.5;水泥砂浆试块配合比为,水泥:砂:水=1.0:3.0:0.5;混凝土按 C30 标准配合比为,水

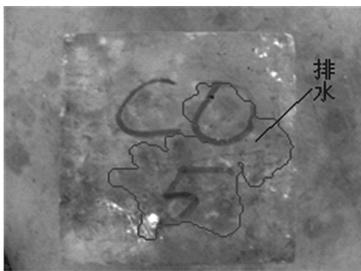
泥 : 水 : 砂 : 碎石 = 1.000 : 0.490 : 1.467 : 2.785, 碎石最大粒径 20 mm. 所有材料使用水泥均为 42.5R 普通硅酸盐水泥, 普通河砂. 试件在实验室内使用小型搅拌机拌合, 工程塑料试模成型, 脱模后在标准养护室内标准养护 28 d 后取出进行后续试验. 水泥砂浆、水泥净浆、混凝土试块分别标记为 CM、CP、CO.

表 1 试验相关信息

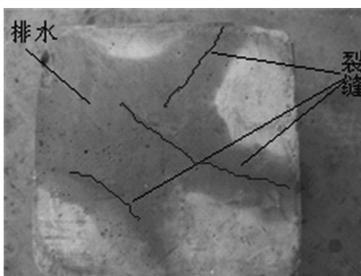
保压条件			组别	试件编号
压力/MPa	维持温度/℃	持续时间/h		
8	40	1	第 1 组	CM ₁ , CP ₁ , CO ₁
8	40	2	第 2 组	CM ₂ , CP ₂ , CO ₂
8	35	3	第 3 组	CM ₃ , CM ₄ , CO ₃
8	35	3	第 4 组	CP ₃ , CP ₄ , CP ₅

1.3 超临界试验排水现象

碳化试验前, 先将反应釜中空气抽空, 再注入 CO₂ 至设计的保压条件, 以确保 CO₂ 的纯度. 超临界碳化后, 各组试件表面均出现显著的排水. 带有表面裂缝的水泥净浆试件, 排水则集中分布在裂缝的两侧, 表明该水分来自试块内部, 如图 2 所示. 根据反应式(1)~(3)可以看出, 碳化反应过程中有水产生, 同时材料内部也有自由水存在, 在超临界二氧化碳的萃取作用下, 带至材料表面凝聚. 另一方面, 水泥净浆试块排水明显比同条件的混凝土多, 原因应该是排水多少与碳化反应量直接相关, 而水泥净浆试块中水泥质量分数相对较高(水泥净浆水泥质量分数约 0.67, 而混凝土中水泥质量分数约 0.17), 水泥净浆碳化反应量更大, 吸收二氧化碳量和生成水量更多所致.



(a) 混凝土试块



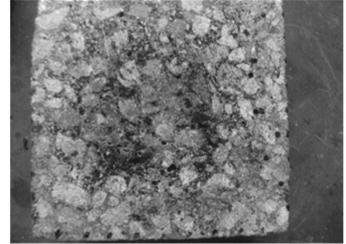
(b) 水泥净浆试块

图 2 碳化后试件表面排水

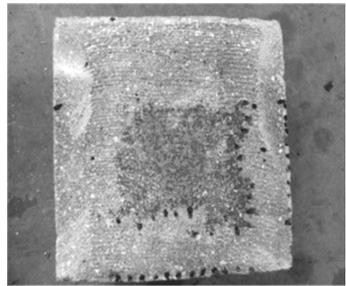
1.4 超临界试验结果及分析

1.4.1 碳化深度

对碳化反应后的试件进行切割, 清理浮屑后再使用体积浓度 0.01 的酚酞试剂检测并量取各试块的碳化深度. 其中非紫色范围为碳化区, 如图 3、4 所示.

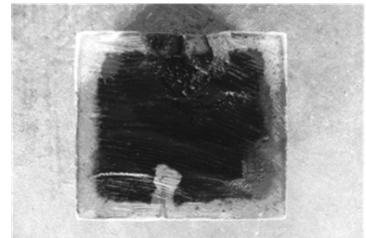


(a) 混凝土试块



(b) 水泥砂浆试块

图 3 混凝土和水泥砂浆碳化深度



(a) 深度分布



(b) 裂缝影响

图 4 水泥净浆碳化深度

由于本实验未对试块表面作密封处理, 截面各侧碳化深度应均匀分布, 因此沿各边每隔 10 mm 等距测碳化深度, 再取平均值. 对于混凝土试块, 由于碎石的阻挡而不规律, 当测点遇到碎石时, 以相邻两测点连线与该测点处交点的位置为近似碳化深度, 碳化深度结果如表 2 所示. 第 4 组中 3 个试件结果均值为 10.17 mm, 均方差为 1.02 mm, 相对于反应条件改变的第 1 组、第 2 组

结果产生的变化幅度 19.7% 和 35.6%, 单个试件的结果基本可以反映条件变化的影响. 水泥净浆碳化界限明显且分布均匀, 当存在裂缝时, 裂缝两侧与侧边接近. 而与水泥石砂浆相比, 水泥净浆的碳化深度低许多, 这是由于二者碳化反应相同, 试件的碳化深度主要与二氧化碳进入的深度直接相关. 影响二氧化碳进入试件的因素有渗透性、含水度等, 而水泥净浆试块孔隙内含水较少 (从收缩裂缝反映出, 养护后内部水化反应持续大量进行, 含水不断降低), 限制了超临界碳化反应的速度和碳化深度^[5].

表 2 试块平均碳化深度试验结果 mm

编号	碳化深度	编号	碳化深度	编号	碳化深度
CP ₁	7.5	CO ₁	7.5	CM ₁	19.5
CP ₂	12.0	CO ₂	12.0	CM ₂	25.0
CP ₃	10.0	CO ₃	10.5	CM ₃	21.0
CP ₄	11.5	CP ₅	9.0	CM ₄	26.0

1.4.2 二氧化碳的吸收量

这里认为试块增重由转化为碳酸钙沉淀的二氧化碳引起. 对超临界碳化前后的试件进行称量, 得到试块的增重结果如表 3 所示.

将试验条件相同的第 3、4 组结果进行加权平均, 并同第 1、2 组试验结果作图, 如图 5、6 所示. 从图 5、6 中可以看出, 吸收二氧化碳总质量和质量分数均是水泥净浆试块最大, 水泥砂浆试块次之, 混凝土试块最小. 这主要因为吸收的二氧化碳质量取决于碳化反应进行的总量, 根据反应式 (1)~(3) 而碳化反应进行程度与材料中水泥质量分数密切相关, 取决于可脱离的钙离子质量分数. 因此单位质量水泥质量分数最高的水泥净浆试块吸收二氧化碳最多, 达试件原质量的 13% 以上, 而混凝土水泥质量分数最少, 故吸收二氧化碳质量相应最小.

表 3 超临界碳化吸收二氧化碳质量

组别	试块编号	CO ₂ 吸收质量/kg	质量分数/%
第 1 组	CM ₁	0.14	7.00
	CP ₁	0.15	8.57
	CO ₁	0.07	3.06
第 2 组	CM ₂	0.16	8.10
	CP ₂	0.23	13.16
	CO ₂	0.09	3.90
第 3 组	CM ₃	0.15	7.54
	CM ₄	0.12	6.06
	CO ₃	0.09	3.67
第 4 组	CP ₃	0.21	11.95
	CP ₄	0.16	9.41
	CP ₅	0.20	11.63

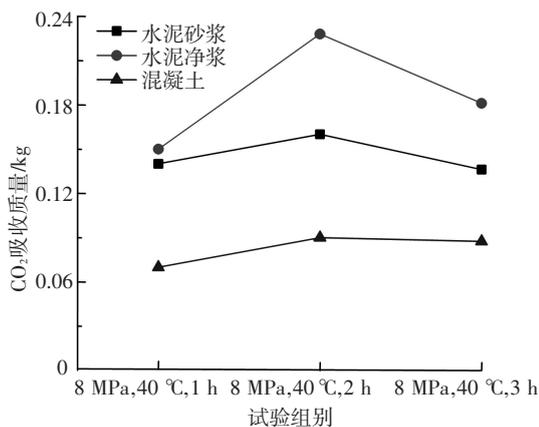


图 5 超临界碳化吸收二氧化碳质量

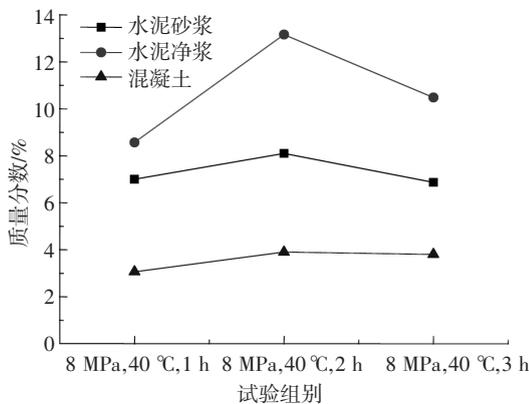


图 6 超临界碳化质量分数

1.4.3 材料强度的提高

对超临界碳化后的混凝土试件进行强度试验, 并做了亚临界碳化对比试验 (反应温度达到临界点, 压力略低于临界值). 试验使用 YAS-5000 型电液伺服万能压力机, 各试件制作和养护与表 1 中相同, 养护 28 d 龄期后取出进行碳化试验, 试件信息与结果如表 4 所示.

表 4 混凝土试块强度检测

试块编号	反应条件	抗压强度/MPa	增强百分比/%	试块增重/kg	质量分数/%
CO ₉	未碳化	42.30	—	—	—
CO ₄	4 MPa, 33 °C, 24 h	44.46	5.28	0.095	4.10
CO ₅	6 MPa, 33 °C, 15 h	55.59	31.63	0.095	4.09
CO ₆	6 MPa, 33 °C, 15 h	53.07	25.67	0.16	6.97
CO ₇	8 MPa, 40 °C, 1 h	49.69	17.67	0.07	3.06
CO ₈	8 MPa, 35 °C, 3 h	35.90	-15.20	0.09	3.93

CO₉ 作为对比试块未进行碳化反应. 总体而言, 超临界碳化对混凝土抗压强度具有明显的提高作用. 本文试验反应条件下最大提高 31.6%, 而混凝土试块 CO₈ 的抗压强度出现了降低, 首先主要因为本组碳化试验后泄压速度比其他各组快, 一方面造成反应釜内部温度快速降低, 试件表面

受冷收缩;另一方面试件孔隙内高压二氧化碳形成较大内压,对试件产生较大拉应力,造成试件的损伤;其次也与试件数量较少,结果有一定离散有关;但整体并不掩盖各组数据结果体现出的强度提高。

混凝土试块 CO_4 在 4 MPa 下反应 24 h,抗压强度提高 5.28%; CO_5 和 CO_6 在 6 MPa 的亚临界,反应时间缩为 15 h,而抗压强度提高 31.63% 和 25.67%,这表明亚临界时压力对抗压强度的影响很明显。而 CO_7 在超临界 8 MPa 的环境下反应 1 h,抗压强度提高 17.67%,表明超临界二氧化碳下反应速度更快,达到相同碳化效果所需要的时间更短,效果更显著。

1.4.4 材料孔径结构的变化

超临界碳化前后试块的孔径分布试验采用压汞法,使用美国康塔仪器公司生产的 Poremaster 系列压汞仪。试样有 4 种,即未碳化水泥净浆、完全碳化水泥净浆、未碳化水泥砂浆和完全碳化水泥砂浆。测试参数为:汞表面张力,0.485 N/m;汞前进与后退接触角,130°;汞 20 °C 密度,13.544 g/mL;自动运行类型,运行方式为平衡。累计进汞体积和孔径分布的曲线如图 7 所示。

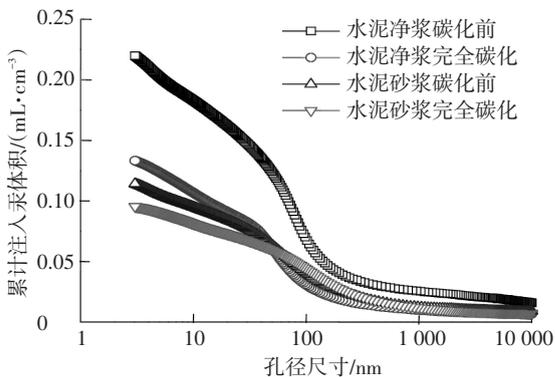


图 7 孔径分布曲线

从图 7 中可看出碳化前水泥净浆试块初始孔隙进入直径量级约为 10 μm ,其他 3 种试样进入直径约为 1 μm ,说明碳化后水泥净浆试块中大孔的数量降低明显。碳化前水泥净浆和水泥砂浆,碳化后水泥净浆和水泥砂浆的总孔隙率分别为 0.220,0.114,0.133 和 0.095 mL/g。水泥净浆和水泥砂浆试块的总孔隙率分别降低了 35.94% 和 16.7%。图 7 中水泥砂浆在 100 nm 附近出现了碳化后入汞体积比碳化前大得现象,主要原因应该是水泥砂浆试件水泥质量分数较少,试样局部超临界碳化反应消耗完游离氢氧化钙后,继续从其他组分上获取钙离子反应,即进行反应式(2)、(3)的反应,重组了微观结构,进而引起局部孔径

的变大。总体而言,超临界碳化可以减小水泥净浆、水泥砂浆的孔径,显著降低中细径孔,而使中大径孔数量维持在较低幅度。从而将降低材料总体的孔隙率,改善孔径结构,达到了对水泥基材料改性的效果,也能提高材料的抗渗透性能^[15-16],对阻止有害物质的迁移有利。

2 结 论

1) 本文对超临界碳化条件下的水泥砂浆、水泥净浆和混凝土试块进行了试验研究,对压力、温度、反应时间等变化时试件碳化深度、强度、孔径分布以及二氧化碳吸收进行了分析,试验表明超临界超临界碳化可以显著的提高水泥基材料的强度,本试验条件下混凝土抗压强度最大增幅高达 31.63%。

2) 超临界碳化反应后,试块孔径分布发生了显著变化,中细径孔大幅减少,中大径孔也有所降低,试件孔隙率大幅降低,对提高材料抗渗透性能和水泥基材料的固化效果有利。

3) 超临界碳化反应中,水泥净浆碳化反应中吸收二氧化碳最多,可达原重的 13%,为进一步的研究超临界碳化试验和理论研究提供了基础。

参考文献

- [1] RUBIN J B, CAREY J W, TAYLOR C M V. Enhancement of cemented waste forms by supercritical CO_2 carbonation of standard Portland cements [C]// Proceedings of the American Nuclear Society 1st Topical Meeting on Decommissioning. Knoxville, TN: Decommissioning, Decontamination & Reutilization of Commercial & Government Facilities, 1997: 7-12.
- [2] RUBIN J B, TAYLOR C M V, SIVILS L D, et al. Radioactive wastes dispersed in stabilized ash cements [C]// Proceedings of the International Ash Utilization Symposium. Lexington, KY: Los Alamos, 1997.
- [3] JOHANNESSON B, UTGENANNT P. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(6): 925-931.
- [4] BERTOS F B M, SIMONS S J R, HILLS C D, et al. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO_2 [J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 112 (3): 193-205.
- [5] PURNELL P, SHORT N R, PAGE C L. Super-critical carbonation of glass-fibre reinforced cement. Part 1: mechanical testing and chemical analysis [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001, 32(12): 1777-1787.

- [6] PURNELL P, SHORT N R, PAGE C.L. Super-critical carbonation of glass-fibre reinforced cement. Part 2: microstructural observations [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2003, 34(11): 1105-1112.
- [7] LIU L, HA J, HASHIDA T, et al. Development of a CO_2 solidification method for recycling autoclaved lightweight concrete waste [J]. Journal of Materials Science Letters, 2001, 20(19): 1791-1794.
- [8] HARTMANN T, PAVIET-HARTMANN P, RUBIN J B, et al. The effect of supercritical carbon dioxide treatment on the leachability and structure of cemented radioactive waste-forms-the synthetic groundwater leaching method, North Dakota [J]. Waste Management, 1999, 19(5): 355-361.
- [9] FERNÁNDEZ-CARRASCO L, RIUS J, MIRAVITLLES C. Supercritical carbonation of calcium aluminate cement [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(8/9): 1033-1037.
- [10] GARCÍA-GONZÁLEZ C A, HIDALGO A, GROUH N, et al. New insights on the use of supercritical carbon dioxide for the accelerated carbonation of cement pastes [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2008, 43(3): 500-509.
- [11] GARCÍA-GONZÁLEZ C A, HIDALGO A, FRAILE J, et al. Porosity and water permeability study of supercritically carbonated cement pastes involving mineral additions [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(8): 2488-2496.
- [12] 成闪闪. 超临界二氧化碳改造建材和在煤炭地下气化填埋中应用的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [13] 李勇. 用超临界二氧化碳改造水泥基建材的理论和试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [14] 柳俊哲. 混凝土碳化研究与进展 (1)——碳化机理及碳化程度评价 [J]. 混凝土, 2005(11): 11-14.
- [15] 赵铁军. 混凝土的渗透性 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 29, 30.
- [16] STEICHER P E, ALEXANDER M G. A chloride conduction test for concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(6): 1284-1294.

(编辑 张 红)

(上接第 51 页)

- [5] TURNER M T, CHEW J W, LONG C A. Experimental investigation and mathematical modeling of clearance brush seals [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1998, 120: 573-589.
- [6] CHEW J W, LAPWORTH B L, MILLENER P J. Mathematical modeling of brush seals [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1995, 16(6): 493-500.
- [7] CHEW J W, GUARDINO C. Simulation of flow and heat transfer in the tip region of a brush seal [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2004, 25: 649-658.
- [8] DOGU Y, AKIST M F, DEMIROGLU M, et al. Evaluation of flow behavior for clearance brush seals [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130: 012507-1-012507-9.
- [9] DOGU Y, AKSIT M F. Effects of geometry on brush seal pressure and flow fields - I: front plate configurations [J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128: 367-378.
- [10] DOGU Y, AKSIT M F. Effects of geometry on brush seal pressure and flow fields - II: backing plate configurations [J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128: 379-389.
- [11] LI Jun, OBI S, FENG Zhenping. The effects of clearance sizes on labyrinth brush seal leakage performance using a reynolds-averaged navier-stokes solver and non-darcian porous medium model [J]. Journal of Power and Energy, 2009, 223: 953-964.
- [12] 邱波, 李军, 冯增国, 等. 两级刷式密封泄漏特性的实验与数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(7): 7-12.
- [13] ASLAN-ZADA F E, MAMMADOV V A, DOHNAL F. Brush seals and labyrinth seals in gas turbine applications [J]. Journal of Power and Energy, 2013, 227(2): 216-230.
- [14] 黄学民, 史伟, 王洪铭. 刷式密封中泄漏流动的多孔介质数值模型 [J]. 航空动力学报, 2000, 15(1): 55-58.
- [15] 王之栋, 梁小峰, 黄其武. 刷式密封二维模型数值计算 [J]. 航空动力学报, 2008, 23(8): 1461-1465.
- [16] PUGACHEV A O, HELM P. Calibration of porous medium models for brush seals [J]. Journal of Power and Energy, 2009, 223: 83-91.

(编辑 杨 波)