

学校编码: 10384
学号: 33120141151712

密级_____

廈門大學

硕士学位论文

**超重力程序进行湿法碳酸化
及转炉钢渣再利用**

**Carbonation and Utilization of Basic Oxygen Furnace Slag
Coupled with Concentrated Water from Electrodeionization**

李焯媚

指导教师姓名: 欧阳通 教授
蒋本基 教授
卢昌义 教授

专业名称: 环境工程
论文提交日期: 2017年04月
论文答辩时间: 2017年05月

2017年05月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录	
摘 要.....	I
英文摘要.....	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 加速碳酸化	2
1.2.1 自然界中的矿物碳酸化.....	2
1.2.2 加速碳酸化的途径.....	2
1.2.3 碱性固体废物的直接湿法碳酸化.....	5
1.2.4 直接湿法碳酸化的影响因素.....	6
1.2.5 碳酸化去除水中的污染物.....	8
1.3 原料与反应器介绍	10
1.3.1 转炉钢渣.....	10
1.3.2 电去离子技术.....	15
1.3.3 超重力旋转填料床.....	18
1.4 水泥化学	23
1.4.1 水泥的组成.....	23
1.4.2 水化反应.....	23
1.4.3 辅助凝胶材料.....	25
1.5 选题思路、研究目的、研究内容与技术路线	26
1.5.1 选题思路.....	26
1.5.2 研究目的、研究内容与技术路线.....	27
第 2 章 实验材料与实验方法	29
2.1 实验材料	29
2.2 实验试剂与仪器	29
2.2.1 主要试剂.....	29

2.2.2 主要仪器与设备.....	29
2.3 主要表征方法.....	30
2.3.1 X 射线荧光光谱分析.....	30
2.3.2 扫描电镜分析.....	30
2.3.3 热重分析.....	31
2.4 静态浸出试验.....	31
2.5 碳酸化实验与产物分析.....	31
2.5.1 批次碳酸化实验.....	31
2.5.2 二氧化碳分析方法.....	33
2.6 水泥取代实验.....	34
2.6.1 水泥取代实验与产品性能分析.....	34
2.6.2 水泥成分计算方法.....	35
第 3 章 转炉钢渣的物化性质及浸出行为.....	36
3.1 转炉钢渣的物化性质.....	36
3.1.1 X 射线荧光光谱分析.....	36
3.1.2 热重分析.....	37
3.1.3 扫描电镜分析.....	38
3.1.4 粒度分析.....	38
3.2 转炉钢渣中钙离子的浸出行为.....	39
3.2.1 初始钙离子浓度的影响.....	39
3.2.2 溶液 pH 的影响.....	40
3.2.3 浸出动力学.....	41
3.3 转炉钢渣浸出时液相的其他变化.....	46
3.3.1 pH 及氢氧根变化情况.....	46
3.3.2 钠离子变化情况.....	49
3.4 本章小结.....	50
第 4 章 超重力碳酸化的影响因素及动力学研究.....	52
4.1 碳酸化产物的物化性质.....	52

4.1.1 X 射线荧光光谱.....	52
4.1.2 热重分析.....	52
4.1.3 扫描电镜分析.....	53
4.1.4 粒度分析.....	54
4.2 操作条件对超重力碳酸化的影响.....	56
4.2.1 旋转填料床转速的影响.....	56
4.2.2 液固比的影响.....	57
4.2.3 混合液流速的影响.....	58
4.2.4 气体流速的影响.....	59
4.3 碳酸化动力学.....	60
4.3.1 动力学模型介绍.....	60
4.3.2 动力学分析.....	62
4.4 碳酸化中液相的变化情况.....	66
4.4.1 pH 变化情况.....	66
4.4.2 钙离子变化情况.....	67
4.4.3 钠离子变化情况.....	69
4.5 本章小结.....	70
第 5 章 转炉钢渣用于水泥取代的性能评估.....	71
5.1 可行性分析.....	71
5.1.1 X 射线荧光分析.....	71
5.1.2 毒性浸出测试.....	72
5.2 水泥成分分析.....	73
5.2.1 X 射线荧光光谱分析.....	73
5.2.2 矿物相组成.....	74
5.3 机械性能评估.....	75
5.3.1 蒸压膨胀测试结果.....	75
5.3.2 抗压强度测试结果.....	76
5.4 本章小结.....	79

第 6 章 结论与展望	80
6.1 结论	80
6.2 创新点	80
6.3 不足与展望	81
参考文献	83
攻读硕士学位期间的主要科研成果	91
致 谢	92

厦门大学博硕士论文摘要库

CONTENTS

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research background	1
1.2 Accelerated carbonation	2
1.2.1 Mineral carbonation in nature.....	2
1.2.2 Process routes of accelerated carbonation.	2
1.2.3 Direct aqueous carbonation using alkaline solid wastes.	5
1.2.4 Factors influenced direct aqueous carbonation.....	6
1.2.5 Removal of pollutants from water via carbonation process.	8
1.3 Introduction of feedstocks and reactor	10
1.3.1 Basic oxygen furnace slag.....	10
1.3.2 Electrodeionization technology.....	15
1.3.3 Rotating packed bed reactor.....	18
1.4 Cement chemistry	23
1.4.1 Composition of cement.....	23
1.4.2 Hydration reaction.....	23
1.4.3 Supplementary cementitious materials.....	25
1.5 Research purpose, significance, objectives and approaches	26
1.5.1 Research purpose and significance.	26
1.5.2 Research objectives, main contents and approaches.....	27
Chapter 2 Materials and methods	29
2.1 Experiment materials	29
2.2 Reagents and instruments	29
2.2.1 Main reagents.....	29
2.2.2 Main instruments and equipments.	29
2.3 Main characterization methods	30

2.3.1 X-ray fluorescence analysis.....	30
2.3.2 Scanning electron microscope analysis.....	30
2.3.3 Thermo-gravimetric analysis.....	31
2.4 Static leaching Test.....	31
2.5 Carbonation process and products analysis.....	31
2.5.1 Batch carbonation experiments.....	31
2.5.2 Carbon dioxide analysis method.....	33
2.6 Cement replacement procedure.....	34
2.6.1 Cement replacement experiments and performance evaluation.....	34
2.6.2 Calculation method of cement composition.....	35
Chapter 3 Characterization and leaching behaviors of basic oxygen furnace slag.....	36
3.1 Physical and chemical properties of basic oxygen furnace slag.....	36
3.1.1 X-ray fluorescence analysis.....	36
3.1.2 Thermo-gravimetric analysis.....	37
3.1.3 Scanning electron microscope analysis.....	38
3.1.4 Size distribution analysis.....	38
3.2 Calcium ion leaching from basic oxygen furnace slag.....	39
3.2.1 Effect of initial calcium level.....	39
3.2.2 Effect of initial pH level.....	40
3.2.3 Leaching kinetics of calcium ion.....	41
3.3 Other changes of concentrated water from electrodeionization during the leaching process.....	46
3.3.1 Changes of pH and hydroxyl level.....	46
3.3.2 Changes of sodium level.....	49
3.4 Chapter summary.....	50

Chapter 4 Influencing factors and kinetics analysis of carbonation**process via rotating packed bed reactor52****4.1 Physical and chemical properties of carbonated oxygen furnace slag52**

4.1.1 X-ray fluorescence analysis52

4.1.2 Thermo-gravimetric analysis52

4.1.3 Scanning electron microscope analysis53

4.1.4 Size distribution analysis54

4.2 Effect of operating conditions on carbonation process56

4.2.1 Effect of rotation speed of rotating packed bed56

4.2.2 Effect of liquid to solid ratio57

4.2.3 Effect of slurry flow rate.58

4.2.4 Effect of gas flow rate.59

4.3 Carbonation kinetics60

4.3.1 Introduction of kinetics model60

4.3.2 Kinetics analysis.62

4.4 Changes of concentrated water from electrodeionization during the carbonation process66

4.4.1 Changes of pH level.66

4.4.2 Changes of calcium level67

4.4.3 Changes of sodium level.69

4.5 Chapter summary70**Chapter 5 Performance evaluation of basic oxygen furnace slag used****as supplementary cementitious materials71****5.1 Feasibility analysis71**

5.1.1 X-ray fluorescence analysis71

5.1.2 Toxic concentrated leaching procedure72

5.2 Composition analysis of cement73

5.2.1 X-ray fluorescence analysis.74

5.2.2 Mineral composition	75
5.3 Performance evaluation	75
5.3.1 Autoclave expansion test	76
5.3.2 Compressive strength test	79
5.4 Chapter summary	80
Chapter 6 Conclusions and prospects	80
6.1 Conclusions	80
6.2 Innovatives	80
6.3 Shortages and prospects	81
Reference	83
Research achievements	91
Acknowledgements	92

摘 要

CO₂是人类可控的对地表暖化影响最大的温室气体。矿物碳酸化是目前唯一永久储存 CO₂ 的方法。转炉钢渣 (Basic Oxygen Furnace Slag, BOFS) 是一种炼钢副产物, 因其含有不稳定组分影响其在建材方向的再利用, 而这些不稳定成分可作为 CO₂ 固定的原料。电去离子浓缩液 (Concentrated Water from Electrodeionization, CW-EDI) 是电去离子过程中产生的含有高浓度 Na⁺和 Ca²⁺的水体, 再利用途径少。

本研究首次将 CW-EDI 引入 BOFS 的 CO₂ 固定过程, 探讨 BOFS 在 CW-EDI 中的浸出行为、操作条件对 BOFS 和 CW-EDI 碳酸化的影响及碳酸化处理 CW-EDI 的可行性, 同时评估 BOFS 用于水泥取代的性能。主要研究成果如下:

(1) BOFS 在 CW-EDI 中的浸出过程基本可以在 10 min 内完成。BOFS 中 Ca²⁺的浸出动力学及 CW-EDI 中 OH⁻的浓度变化皆符合一级质量损失模型。CW-EDI 中过高的初始 Ca²⁺浓度和 pH 会阻碍 BOFS 中 Ca²⁺的浸出。溶液 pH 为 7, 初始 Ca²⁺浓度为 803 mg L⁻¹时, Ca²⁺的浸出速率最高, 为 1.797 min⁻¹。在 BOFS 的浸出过程中, 没有 Na⁺从 BOFS 中浸出。在高钠水体中, BOFS 可以去除水体中的 Na⁺, 并在短时间内达到平衡。

(2) 反应时间、旋转填料床转速、液固比、混合液流速对 BOFS 的碳酸化影响较大, 且其作用效果与具体的操作有关。气体流速产生的影响较小。表面包覆模型可以用于描述 BOFS 和 CW-EDI 在旋转填料床中的碳酸化动力学。BOFS 可得最大碳酸化转换率为 60.9%。在碳酸化过程中, 液相 pH 随着反应的进行呈先下降后不变的趋势; 液相中的 Ca²⁺浓度呈先下降后上升的趋势; Na⁺呈先下降后不变的趋势。

(3) 添加 BOFS 可以降低 OPC 的蒸压膨胀率。同时, 碳酸化具有稳定 BOFS 的作用。10%和 15%的未碳酸化 BOFS 及 10%的碳酸化后 BOFS 取代 OPC 后的水泥砂浆具有比纯 OPC 砂浆更优越的抗压性能。综合考虑工程性能、经济环境效益, 碳酸化前、后 BOFS 取代 OPC 的推荐取代比例分别为 15%和 10%。

关键词: 湿法碳酸化; 转炉钢渣; 电去离子浓缩液; 辅助凝胶材料

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库