

武汉理工大学

(申请工学博士学位论文)

无机聚合物混凝土结构构件 受力性能试验研究

培养单位：土木工程与建筑学院

学科专业：土木工程

研 究 生：柳会红

指导老师：卢哲安 教授

彭自强 副教授

2014 年 12 月

独 创 性 声 明

本人声明，所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写的成果，也不包含为获得武汉理工大学或其它教育机构学位证书而使用过的材料。与我一起工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名：_____日 期：_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解武汉理工大学有关保留、使用学位论文的规定，即学校有权保留、送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签 名：_____导师签名：_____日 期：_____

分类号_____

密 级_____

UDC_____

学校代码 10497

武汉理工大学

学 位 论 文

题 目 无机聚合物混凝土结构构件受力性能试验研究

英 文 Test Research on Mechanical Performance for Structural
题 目 Member of Inorganic Polymer Concrete

研究生姓名 柳会红

姓名 卢哲安 职称 教授 学位 硕士

指导老师 姓名 彭自强 职称 副教授 学位 博士

单位名称 土木工程与建筑学院 邮编 430070

申请学位级别 工学博士 学科专业名称 土木工程

论文提交日期 2014 年 9 月 论文答辩日期 2014 年 12 月

学位授予单位 武汉理工大学 学位授予日期

答辩委员会主席 评阅人

2014 年 12 月

**A Dissertation Submitted to Wuhan University of Technology
for the Doctor's Degree in Engineering**

**Test Research on Mechanical Performance for
Structural Member of Inorganic Polymer Concrete**

Ph.D. Candidate: Liu Huihong

Supervisor: Prof. Lu Zhe-an

Vice Supervisor: Associate Prof. Peng Zi-Qiang

Major: Civil Engineering

Wuhan University of Technology

Wuhan 430070, Hubei, P.R.China

December, 2014

中文摘要

针对无机聚合物混凝土材料节能、环保，且具有快硬、早强，耐久性好等优点，选取该材料的结构构件作为研究对象，着重对其构件进行了相关试验和理论研究，为该材料在结构工程领域中的应用提供理论基础和试验数据。

采用试验与理论分析相结合的方法，从三个方面对该材料结构构件受力性能进行了研究：首先进行了该材料基本力学性能试验研究，提出了适合无机聚合物混凝土的单向损伤本构关系式；其次对其预应力梁构件进行了试验研究，构建了收缩徐变预测模型，在此基础上对其预应力损失进行了分析计算并与试验结果进行了比对；第三，考察该材料在动力下的性能，选用钢管无机聚合物混凝土柱进行了低周反复荷载试验研究，建立了该柱地震损伤评价模型。

通过研究，取得的主要成果有：

1. 根据无机聚合物混凝土材料强度上升段与下降段概率分布不同，采用分段引入基于概率分布定义的损伤变量来推导演化其本构关系，提出了适合其单向拉、压的统一本构关系式。

2. 基于对该损伤本构关系式的研究，定义门槛损伤值与临界损伤值分别为材料从弹性变形过渡到塑性变形的损伤状态和破坏状态，从宏观上可直接通过计算损伤值来判别材料所处损伤的状态。

3. 对无机聚合物混凝土预应力梁进行了全面系统的试验研究。研究显示，其主要破坏形态与普通混凝土预应力梁类似，均为受弯破坏；采用现有混凝土理论模式可对其受力进行计算，理论计算值与试验值基本吻合。

4. 针对无机聚合物预应力梁预应力摩擦损失，提出了考虑接触应力不均匀分布的简化计算式；针对反向摩擦长度大于构件总长的预应力锚固损失，采用分段逐点推导的方式，得到了梁两端锚固损失及各段应力计算式；其预应力损失与普通预应力梁相比，主要差别在于收缩徐变引起的损失。

5. 在对无机聚合物混凝土收缩、徐变影响因素分析的基础上，构建了收缩、徐变多参数预测模型；通过收缩徐变短期试验结果，对预测模型中的参数进行了非线性拟合回归，确定了相关影响参数取值，从而建立了其收缩徐变长期预测模型。

6. 通过该预测模型对本配比无机聚合物混凝土长期收缩与徐变进行了计算，其终极收缩量为 5.10×10^{-4} ，相比同条件下普通混凝土最终收缩量 3.13×10^{-4} 要大；终极徐变系数为 0.9，相比同条件下普通混凝土最终徐变系数 1.69 要小；

从长期性能来看，其整体变形稳定性较好。

7. 通过钢管无机聚合物混凝土柱低周反复荷载试验，绘制了各构件滞回曲线、骨架曲线、恢复力特性曲线，计算了位移延性系数、能量耗散系数等抗震性能指标。本配比钢管无机聚合物混凝土柱滞回曲线基本呈现梭形，局部出现捏缩效应，从总体上来看外形饱满，呈现出较好的抗震性能。与同条件普通钢管混凝土柱相比，二者抗震性能基本相当。本配比各构件位移延性系数均达 3.0 以上，配钢率大的构件可达 6.0 以上；极限滞回环能量耗散系数均大于 2.0，配钢率大的构件则大于 3.0；构件在地震动下延性和耗能性能均很好。

8. 在确定屈服滞回环刚度 k_y 和极限滞回环刚度 k_u 下，提出了钢管无机聚合物混凝土柱抗震刚度退化规律计算式。选取基于刚度退化的损伤变量对钢管无机聚合物混凝土柱进行地震损伤评价，建立了震害等级与损伤值对应关系准则。

关键词：无机聚合物混凝土，损伤本构关系，收缩与徐变，预应力梁，抗震性能与损伤评价

Abstract

Since the inorganic polymer concrete has the advantages of lower energy consumption, less pollution, rapid hardening, early strength and durability, the structural members made by inorganic polymer concrete were chose as the research object. The related tests and theoretical studies had emphatically been carried on these members for the application of the material in the field of structural engineering to provide theoretical basis and experimental data.

By adopting the method of combination experiment and theory analysis, the mechanical properties of structural members were studied from follow aspects: Firstly, the experimental study on the basic mechanical properties of materials was proceeding, and the unidirectional damage constitutive relation of materials was put forward. Secondly, the prestressed beams were studied, and the prediction models of materials for creep and shrinkage were constructed. On the basis of these researches, the losses of prestress were calculated and compared with experimental results. Thirdly, for investigating the seismic performance of materials, the low frequency cyclic loading experiments for inorganic polymer concrete filled steel tube column were evaluated, and the damage assessment model of column was established.

Main research work and important results are as follows:

1. Based on the probability distribution of strength for inorganic polymer concrete in rising and falling period, the damage variable defined by probability distribution was introduced to deduce the evolution of the unidirectional damage constitutive relation. The unidirectional damage constitutive relation is unified relation formula in tension and compression state.

2. Through the damage constitutive relation, it is put forward to use the damage threshold value and the critical damage value to distinguish the elastic, plastic state and failure state of inorganic polymer concrete.

3. The experimental studies for prestressed beams were carried out. Studies show that the main failure pattern, similar to that of ordinary concrete prestressed beam, is destroyed by bend and that the calculation formula suggested by the existing theoretical model of ordinary concrete is suit for that of inorganic polymer concrete.

4. The loss of prestress was also analyzed. Considering the nonuniform distribution of contact stress, the formulas were put forward to calculate the friction loss at the turning point. In the condition that the setting length is greater than the total

length of member, the prestress loss was deduced and calculated. Compared with prestressed beam of ordinary concrete, the main difference of prestress loss lies in the loss caused by shrinkage and creep.

5. According to the influence factors for shrinkage and creep of inorganic polymer concrete, the multi parameters prediction model for shrinkage and creep is created. And using the short-term test data to fit related parameters, the prediction model is obtained.

6. The long-term shrinkage and creep were calculated by prediction model. Its ultimate shrinkage is 5.10×10^{-4} , and it is larger than the final shrinkage 3.13×10^{-4} of ordinary concrete. Its ultimate creep coefficient is 0.9, and it is smaller than that of ordinary concrete for 1.69. From the point of long-term performance, the overall deformation stability is good for inorganic polymer concrete.

7. Through low frequency cyclic loading tests of inorganic polymer concrete filled steel tube column, the seismic performance parameters about hysteresis curves, skeleton curves, restoring force model, displacement ductility coefficient, and coefficient of energy dissipation were obtained. The hysteresis curves for all specimens present the spindle, and show local rheostriktion. As a whole, the hysteresis curve is full, and presents a better seismic performance. Compared with ordinary concrete member at the same conditions, the seismic performance is consistent. The displacement ductility coefficient is all above 3.0, and is above 6.0 for member of high steel ratio. The energy dissipation coefficient in ultimate hysteresis loop is all above 2.0, and is above 3.0 for member of high steel ratio. These suggest that the seismic performance of member is very good.

8. Under the condition of determining the yield hysteresis ring stiffness k_y and ultimate hysteresis ring stiffness k_u , the stiffness degradation rule is proposed. Based on damage variables for stiffness degradation, the earthquake damage of inorganic polymer concrete filled steel tube column is evaluated, and the relationship criterion between earthquake damage level and the damage value is established.

Keywords: Inorganic polymer concrete; Damage constitutive relation; Shrinkage and creep; Prestressed beam; Seismic performance and damage evaluation

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 课题来源	2
1.3 问题提出的背景	3
1.4 国内外发展与研究现状	4
1.4.1 无机聚合物混凝土制备	5
1.4.2 无机聚合物混凝土性能研究	8
1.4.3 无机聚合物混凝土应用	12
1.5 课题研究的目的及意义	13
1.5.1 研究目的	13
1.5.2 研究意义	14
1.6 本文的主要工作	14
1.6.1 研究内容	14
1.6.2 创新点	15
第 2 章 无机聚合物混凝土基本力学性能及本构关系研究	16
2.1 引言	16
2.2 原材料及配合比	17
2.3 抗压强度试验及结果	18
2.4 弹性模量与泊松比试验及结果	19
2.5 劈裂抗拉强度试验及结果	23
2.6 无机聚合物混凝土损伤本构关系演化方程推导	25
2.6.1 损伤变量 D 的确定	25
2.6.2 上升段损伤演化方程推导	29
2.6.3 下降段损伤演化方程推导	30
2.7 无机聚合物混凝土单向损伤本构关系	31
2.7.1 单向损伤本构关系及应力-应变全过程曲线	31
2.7.2 无机聚合物混凝土门槛损伤值	32
2.7.3 无机聚合物混凝土临界损伤值	33

2.8 无机聚合物混凝土单向损伤本构关系验证与分析	34
2.8.1 混凝土单轴受压应力-应变关系验证	34
2.8.2 混凝土单轴受拉应力-应变关系验证	36
2.8.3 无机聚合物混凝土单轴受压应力-应变关系验证	37
2.9 本章小结	38
第 3 章 无机聚合物混凝土预应力梁试验研究	40
3.1 引言	40
3.2 预应力梁构件设计	40
3.3 预应力梁构件制作及预应力施加	41
3.4 预应力梁构件测点布置	42
3.5 预应力梁试验加载方式及试验方法	43
3.6 预应力梁构件材料试验结果	44
3.7 预应力施加过程梁应力和变形以及预应力损失	44
3.8 预应力梁加载下破坏形态	46
3.9 预应力梁承载力及变形	50
3.10 本章小结	53
第 4 章 无机聚合物混凝土预应力梁预应力损失研究	54
4.1 引言	54
4.2 预应力筋与孔道壁之间摩擦引起的预应力损失 σ_{l1}	55
4.2.1 摩擦引起的预应力损失 σ_{l1} 计算	55
4.2.2 摩擦引起的预应力损失 σ_{l1} 计算修正	57
4.2.3 摩擦引起的预应力损失 σ_{l1} 计算式比较	58
4.3 锚具变形与钢筋回缩引起的预应力损失 σ_{l2}	59
4.3.1 直线预应力筋锚固损失 σ_{l2} 计算	60
4.3.2 曲线或折线预应力筋锚固损失 σ_{l2} 计算	60
4.3.3 无机聚合物混凝土预应力梁摩擦损失与锚固损失计算	63
4.4 无机聚合物混凝土弹性压缩引起的预应力损失 σ_{l3}	66
4.5 预应力筋松弛引起的预应力损失 σ_{l4}	66
4.6 无机聚合物混凝土收缩和徐变引起的预应力损失 σ_{l5}	67
4.7 预应力损失控制措施	69

4.8 本章小结	70
第 5 章 无机聚合物混凝土收缩徐变试验及预测模型研究	71
5.1 引言	71
5.2 无机聚合物混凝土收缩徐变预测模型	74
5.2.1 收缩影响因素	74
5.2.2 收缩预测模型	75
5.2.3 徐变影响因素	76
5.2.4 徐变预测模型	77
5.3 无机聚合物混凝土收缩徐变试验及结果	79
5.3.1 收缩试验及结果	79
5.3.2 徐变试验及结果	81
5.4 无机聚合物混凝土收缩徐变预测模型参数确定及长期预测	82
5.4.1 收缩预测模型参数确定	83
5.4.2 徐变预测模型参数确定	84
5.4.3 收缩预测模型长期预测	85
5.4.4 徐变预测模型长期预测	86
5.5 本章小结	87
第 6 章 钢管无机聚合物混凝土柱低周反复荷载试验研究	88
6.1 引言	88
6.2 钢管无机聚合物混凝土柱低周反复荷载试验	89
6.2.1 试件设计及试验参数	90
6.2.2 试验装置及加载制度	91
6.3 钢管无机聚合物混凝土柱低周反复荷载试验结果	92
6.3.1 破坏形态	93
6.3.2 承载力、变形及延性系数	94
6.3.3 滞回曲线	95
6.4 钢管无机聚合物混凝土柱抗震性能分析	98
6.4.1 滞回环及耗能分析	98
6.4.2 骨架曲线及刚度退化规律	101
6.4.3 恢复力模型	104

6.5 钢管无机聚合物混凝土柱地震损伤评价模型	105
6.5.1 地震损伤评价模型	106
6.5.2 损伤评价模型验证	110
6.6 本章小结	111
第 7 章 结论与展望	112
7.1 结论	112
7.2 展望	114
参考文献	115
致 谢	122
攻读博士学位期间所发表的学术论文目录	123

第 1 章 绪论

1.1 引言

对新型无机Si-Al质胶凝材料的研发自硅酸盐水泥诞生以来就没有停止过，1930年代，通过对普通硅酸盐水泥硬化过程及机理研究，美国学者Purdon提出了“碱激活”理论^[1]。在水泥凝固硬化过程中，少量的碱液NaOH能对该过程起到循环催化作用，即碱激活。在碱液的作用下，水泥中的硅、铝化合物水化平衡向促进溶解方向进行移动并形成硅酸钠和偏铝酸钠。该产物再与Ca(OH)₂发生反应形成使水泥产生硬化的新产物硅酸钙和铝酸钙矿物，并重新生成下轮反应所需的碱液NaOH。

1950~1960年代，前苏联科学家Glukhovski对能产生激活作用的碱性材料及其硬化固结产物进行了全面系统的研究。发现能作为碱激发剂的材料除NaOH外，碱金属类的各种盐类基本均可作为反应的激发材料，如碱金属的氢氧化物类、氟化物类以及碳酸、硫酸、磷酸、硅酸和铝硅酸盐类等，相应固结硬化的产物为水合硅酸钙与沸石结构物质水合铝硅酸盐等。在碱激活理论上，前苏联科学家进一步发展并提出了“碱液反应”及其固化机理^[2]。激发材料较前理论有了较大的突破，同时其最终固化产物也有了一定的变化，为类沸石结构物质与傅硅钙石(forshargite)。

1978年法国材料科学家J. Davidovits利用活性低钙Si-Al质材料与高碱溶液反应首次制备出一种具有有机高分子聚合物空间三维网状键接结构的新型无机Si-Al质胶凝材料，取名为地聚合物(Geopolymer)^[3]。当时这种无机Si-Al质胶凝材料的制备过程是首先将某种高活性Si-Al质材料与高碱溶液按一定比例进行混合、搅拌，获得一种塑性的、粘着的混合物，接着将该混合物浇注到模具中，然后在适合的高温、高压下进行养护一定时间。

1987年美国宾夕法尼亚大学教授Della. M. Roy对当时碱激发胶凝材料的研究成果进行了归纳总结，在与水泥胶凝材料对比下对其优异的性能进行了详细的描述，并在科学杂志上以新型强粘结胶凝材料—化学键合陶瓷为题发表了综合论述性科技论文。该论文在对碱激活聚铝硅酸盐胶凝材料研究成果介绍的基础上，对该新型胶凝材料研究发展方向和应用前景也进行了预测，为当时该材料的研究和应用指明了方向。随着碱激活胶凝材料研究的深入，其优异性能不断被发现并

扩展，其应用领域也日渐清晰明朗。随后，各国均有相关研究团队加入碱激活胶凝材料的研究，并不断有相关成果及专利问世。

在碱激活胶凝材料研究过程中，针对不同的碱激发材料及固化产物不同的研究者给出了不同的名称，如陶瓷类名称的化学键合陶瓷、非烧结低温陶瓷等，还有聚合物类名称如土聚水泥等。在国外Geopolymer一词使用最为广泛，我国在早期介绍该材料的一些学者将其命名为地质聚合物或地聚合物，相应由此材料制作的混凝土被称为地质聚合物混凝土等。1975年国际上正式成立国际聚合物混凝土委员会，并规定每3年举行一次聚合物混凝土会议（International Congress on Polymers in concrete简称ICPIC）。而此聚合物混凝土按品种主要指：聚合物树脂混凝土，简称PC；聚合物水泥混凝土，简称PCC；聚合物浸渍混凝土，简称PIC。PC是仅以树脂为粘结料的一种聚合物混凝土；PCC是以聚合物和水泥共同作为胶凝材料的一种聚合物混凝土；PIC是对已硬化的混凝土用液体有机单体浸渍，然后再使单体固化，使混凝土孔隙得到填充的一种聚合物混凝土复合材料^[4]。此聚合物属有机聚合物范畴。为区别起见，本文将地聚合物材料通称为无机聚合物材料，将其制作的混凝土通称为无机聚合物混凝土。

作为一种新型的胶凝材料，无机聚合物材料（IPGM, Inorganic Polymer Gel Materials）近年来在建筑工程、环境工程领域受到极大关注。随着研究的逐步深入，应用领域的范围也在逐步扩大。目前，无机聚合物胶凝材料主要指采用粉煤灰或偏高岭土等无机矿物质为主要原料，以碱料作为激发剂。无机聚合材料的原材料以工业废渣为主，原料价格低廉，储量丰富，且制备工艺简单。试验证明，与水泥相对，该材料具有快硬，早强，耐久性好等优点。无机聚合物混凝土（IPC, Inorganic Polymer Concrete）是以无机聚合物胶凝材料替代水泥胶凝材料制备的混凝土。

1.2 课题来源

本文以横向课题：“无机聚合物混凝土研制及在机场抢建抢修中的应用”项目扩大试验项目“无机聚合物混凝土预应力梁试验研究”（编号：201206HX01）为背景开展研究。

1.3 问题提出的背景

无机聚合物胶凝材料微观上呈现出非晶质相到半晶质相基体，空间上为 $[AlO_4]$ 、 $[SiO_4]$ 及二者组合的四面体单元结构随机组成的三维结构。 $[SiO_4]$ 和 $[AlO_4]$ 四面体脱羟基后形成如硅铝硅氧链($-Si-O-Al-O-Si-O-$)和硅铝氧链($-Si-O-Al-O-$)以及硅铝二硅氧链($-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-$)等更稳定的分子结构，该分子结构间形成具有强烈相互作用的离子键、共价键等化学键，故而造就该材料强度比较高，凝结固化速度较快。采用无机聚合物材料制备的混凝土抗压强度可达32~60 MPa。无机矿物聚合材料是一种新型胶凝材料，其性能与水泥相似。由于无机矿物聚合材料的原材料以工业废渣为主，原料价格低廉，储量丰富，且制备工艺简单，无需像水泥生产那样经历高温烧制过程，能耗低，污染少，因此是一种具有广泛发展前景的新型绿色节能建筑材料^[5,6]。

目前，关于无机聚合物胶凝材料的研究已取得了实质性的进展，研发出了矿渣、粉煤灰、偏高岭土以及锰渣等为原料加碱激发的产品。在无机聚合物胶凝材料研究的基础上，对由其制备的无机聚合物混凝土材料工作性能的研究也取得了较为丰富的成果。通过对无机聚合物混凝土吸水率、空隙率及耐久系数的试验研究显示其作为一种潜在的耐久性混凝土^[7]。其吸水率总体低于5%，能被定义为低吸水率。其透水率在 $2.46 \times 10^{-11} \sim 4.67 \times 10^{-11}$ m/s之间，为一般透水性。其空隙率在8.2%~13%之间变化^[8]。与普通混凝土相比，蒸压养护的无机聚合物混凝土有较强的抗酸及硫酸盐腐蚀的能力^[9]。相比普通波特兰水泥混凝土，蒸压养护的无机聚合物混凝土干缩较小^[10]。在养护温度为60℃时，对其早期强度影响超过了其后期的强度^[11]。研究显示，无机聚合物混凝土有较好的工作性能和环境适应性，能满足工程实际应用条件。

目前，国内关于无机聚合物胶凝材料的研究取得了较多成果，如空军工程大学以碱-矿渣制备高性能无机聚合物混凝土^[12,13]；湖南大学以碱-偏高岭土制备了无机聚合物胶凝材料^[14]；北京科技大学以矿渣、粉煤灰加碱激发制备了无机聚合物胶凝材料^[15,16]；桂林工学院用锰渣制备无机聚合物胶凝材料^[17]等。西安建筑科技大学发明地质聚合物与有机高分子复合胶凝材料，并已获国家发明专利授权(ZL2009100221 12.6)。该材料是以钢渣、粉煤灰、矿渣等与苯乙烯/丙烯酸丁酯共聚物乳液在激发剂硅酸钠的作用下，生成地质聚合物与有机高分子复合胶凝材料。该复合材料具有高的抗折抗压强度，并具有耐腐蚀、耐海水冲蚀、耐高温、结构致密、抗压抗折强度可依据用途调变等特点。可用于水下建筑、油井、道路

修补、耐高温建筑、固化有害有毒的重金属以及固化核废料等领域。可见，国内对无机聚合物胶凝材料的研究已比较深入，并生产出了可应于实际的相关产品。

尽管无机聚合物胶凝材料具有较大的发展前景，但由于各研究者采用原料不同，配比不一，性能也各异，主要应用于特殊用途方面，如道路修补，抢修抢建，以及耐磨，耐腐蚀方面。目前已知大面积成功应用于实际工程的为深圳航天科技创新研究院开发用于抢修抢建的无机聚合物胶凝材料。该材料具有早期强度高、凝结时间可调的特点；并且耐久性、抗腐蚀性能、抗疲劳特性和原混凝土的粘结性均明显优于其它同类材料；利用现有机械和工艺即可进行施工，无需特殊养护；骨科可就地取用戈壁料、天然沙砾石、海砂等非标骨科；保存期达3年以上。该材料已被成功应用于乌鲁木齐、新疆、成都等机场跑道的抢修抢建中。使用该材料铺设的路面在1小时后即可通车，2小时后重载车可通行，3小时后可通行装载机，4小时后可起降飞机。可见该材料技术先进，优势明显。但目前尚无该材料应用于结构工程承载力构件的实例，也无相关研究成果可供借鉴应用。

为了进一步推广使用该先进技术于建筑工程领域，本课题在深圳航天科技创新研究院提供的无机聚合物胶凝材料的基础上将其应用于结构构件并进行试验研究。为充分利用该材料早强优势，明确将该材料用于预应力构件进行试验研究。在构件早期达到预应力施加强度后即可进行预应力施加，无需普通混凝土长的养护周期，可节约施工工期，产生较好的经济效益。同时，为验证其构件抗震效能，也对该材料的钢管填充柱进行了低周反复荷载抗震试验。

1.4 国内外发展与研究现状

无机聚合物胶凝材料早期研究主要以前苏联Glukhovsky教授对碱激活矿渣的研究工作为代表。到20世纪七八十年代，以Davidovits博士带领的研究组对无机聚合物胶凝材料展开了一系列的研究，从组成结构、合成方法及工艺以及材料的各种物理、化学性能进行了系统的研究，为该材料的进一步发展提供了许多有价值的成果。到20世纪90年代，该材料的研究成果受到了越来越多研究者的重视，纷纷加入该材料的研究，促成了该材料研究发展的繁荣期。比如西班牙的Palomo博士研究组主攻以粉煤灰为主原料来合成无机聚合物胶凝材料，并成功的研制出成本低廉性能优异的无机聚合物胶凝材料；新西兰MacKenzie博士研究队通过试验研究得到了无机聚合物材料的结构特征；来自澳大利亚墨尔本大学的Deventer教授引领的研究团队首创性的以无机聚合物胶凝材料作为粘结剂将有害的废弃

材料进行固化处理研究；翁履谦和Sageo-Crensil等则从材料组成和化学反应方面进行分析，对无机聚合物胶凝材料的合成机制、反应过程及反应物等进行系统的研究^[18]。

在以往工作的基础上，目前的研究主要包括制备无机聚合物胶凝材料的原材料、碱激发剂、配合比及工艺研究和原料及工业废料对材料性能影响的研究等。由于各原材料化学成分不一，碱料含量不同，配合比也不统一，制备的胶凝材料性能也各异。同时，由于各研究组侧重点不同，对各自制备的胶凝材料的性能研究方向也不一样，其应用也仅局限于其研究的优势方面，对其不利作用及控制研究不足，导致尚无一类可指导广泛应用的全面系统的研究及报告产生。

1.4.1 无机聚合物混凝土制备

无机聚合物混凝土的制备工艺与普通混凝土无异，只是用无机聚合物胶凝材料替代水泥。制备无机聚合物胶凝材料主要用无机矿物加碱激发生成。而无机矿物种类较多，且各类矿物化学组成也不一，同时由于矿物化学成分不一对碱激发的浓度要求也不同，故而对无机聚合物胶凝材料的配合比设计与控制尚无统一标准。目前各研究者均针对其特有原材料进行配合比设计与控制，并对各不同配合比下的性能及影响进行分析与比较，以期得到一些综合性的规律便于简化与统一无机聚合物胶凝材料的配合比设计与控制。

国内目前研究较多且较为成熟的无机聚合物混凝土主要有矿渣+粉煤灰基和矿渣+偏高岭土基两类。根据文献^[19]，矿渣+粉煤灰基聚合物混凝土的制备原材料、配合比及工艺流程为：

原材料：矿渣、粉煤灰、砂、碎石、自来水、激发剂（硅酸钠和氢氧化钠）。粉煤灰选用一级粉煤灰。矿渣选用活性指数在 1.5% 以上的水淬高炉矿渣，高于一般矿渣活性指数 $\text{CaO}+\text{MgO}/\text{SiO}_2+\text{MnO}+\text{TiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 1.2$ 的标准。将矿渣首先进行烘干，再放入研磨机中进行粉碎、研磨，将其制作成比表面积大于 $490\text{m}^2/\text{kg}$ ，密度达到 $2.97\text{g}/\text{cm}^3$ 的超细矿渣微粉。处理后的矿渣在碱激活下其活性大增，固化后产物的强度更高，耐腐蚀性也更强。所用矿渣化学成分详见表 1-1。

表 1-1 矿渣化学组成

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	Loss
含量(%)	38.55	29.44	19.57	2.77	10	3	0.01	0.36

碱激活剂采用液态硅酸钠和片状氢氧化钠，其中硅酸钠可调节 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比