

用于纤维片材加固混凝土结构的 无机粘结材料——地聚物*

王 旻 冯 鹏 叶列平 覃维祖

(清华大学土木工程系 北京 100084)

摘 要:本文提出了一种用于纤维片材粘贴加固混凝土结构的无机基体材料——地聚物(Geopolymer),它具有耐高温、隔热性能好的特点,解决了普通树脂粘结材料耐火性差的缺点;且它与混凝土界面的粘结强度更大,具有耐腐蚀性好、耐久性好等优点。文中介绍了地聚物材料制备的基本原理,并通过改性使地聚物能够在常温下用于纤维片材粘贴加固混凝土结构的施工,还建议了地聚物粘贴纤维布加固混凝土的施工方法和步骤。通过清华大学的试验研究和文献中的试验结果充分证明了地聚物是一种理想的纤维加固混凝土结构的基体材料。

关键词:地聚物(Geopolymer) 结构加固 纤维增强复合材料 无机粘结材料 耐火

INORGANIC ADHESIVE MATRIX: GEOPOLYMER FOR FIBER FABRICS STRENGTHENING OF CONCRETE STRUCTURES

WANG Min FENG Peng YE Lieping QIN Weizu

(Department of Civil Engineering Tsinghua University Beijing 100084)

Abstract: Geopolymer, an inorganic matrix material for adhesive fiber fabrics strengthening of concrete structures, is presented in this paper. Geopolymer has many favorable properties such as high strength, strong corrosion resistance, good durability, especially its fire resistance and heat insulation. The material composition of geopolymer is introduced and its properties are indicated. An innovated modified geopolymer is developed, which can cure rapidly in room temperature in the construction of strengthening for concrete structures. The construction method and steps are suggested also. By the tests in Tsinghua University and the results in literatures, it is proven that geopolymer is an ideal adhesive matrix for fiber fabrics strengthening of concrete structures.

Keywords: geopolymer; strengthening structures; carbon fiber; inorganic adhesive; fire resistance

1 引言

纤维增强复合材料(FRP)片材加固混凝土结构近年来已得到广泛应用,但目前采用的粘贴树脂都为高分子有机材料,其热稳定性、长期化学稳定性比混凝土等传统结构材料差,特别是其耐高温的上限还不到80℃,且耐火性能很差,这成为FRP加固技术在工程应用中的最大缺陷,对推广该项技术造成很大障碍。此外,普通粘贴树脂的耐老化性能和耐久性也一直未能得到充分证明。因此,寻找一种具有较好耐火性和耐老化性的粘接材料,将会使FRP加固混凝土结构新技术得到重大发展。2000年,清华大学FRP加固混凝土结构研究课题组从国外有关文献中了解到一种新型无机粘结材料——地聚物(Geopolymer),并开始着手自主研制。经过3年多的探索,基本研制成功。

地聚物是由碱激发剂、烧粘土和工业废渣或者矿渣等原料制成,具有早强高强、耐腐蚀性好、耐久性好、耐高温、隔热性能好、生产能耗低等优点,是一种低成本、高性能的绿色建材。用于粘贴纤维片材的

*国家自然科学基金重点项目(50238030)资助。

第一作者:王旻 男 1978年9月出生 博士研究生。

地聚物材料比目前采用的普通环氧树脂的生产成本还要低，而施工比普通树脂粘贴纤维片材要简单，且加固后的外观与普通混凝土的效果相同，无需再涂专门的防护层。本文将介绍地聚物的基本性能及其改性，并介绍其用于粘贴纤维片材加固混凝土结构的探索性试验研究。

2 地聚物的基本性能

2.1 材料组成

20 世纪 70 年代末，法国的 Davidovits 在研究古代建筑材料的基础上研制发明了地聚物无机材料：以铝硅酸盐基矿物及碱激发剂为主要原料，在适当条件下形成一种与陶瓷性能类似的胶凝材料^[1]。地聚物具有类似高分子有机化合物的键接结构，主要由硅 - 氧四面体和铝 - 氧四面体组成长链，有三种基本形式，如图 1 所示。在空间里还可能构成更为复杂的化学结构^[1]。

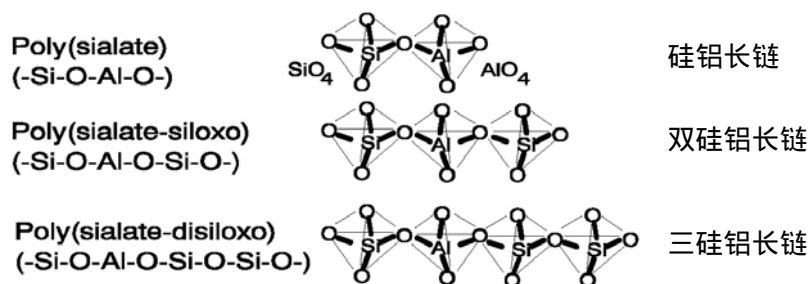


图 1 地聚物的长链结构示意图

偏高岭土是典型的铝硅酸盐基矿物，它是由高岭土经 600 ~ 900 °C 煅烧而形成的无定形物质，其中的原子排列是不规则的，呈现热力学介稳状态，在合成时需要碱激发。常用的碱激发剂为碱金属化合物，如 KOH、NaOH 和碱金属硅酸盐以及它们的混合物等。在激发作用下，处于介稳状态的偏高岭土等无定形硅铝化合物中的硅铝链经历了一个由解聚到再聚合的过程，形成具有三维空间网格结构的胶凝体系。在反应中，通常需要加入水作为介质，这就使其反应过程在物理上表现为浆体的凝固的过程，类似于水泥砂浆、环氧树脂等常用的结构材料，可以方便的在结构中应用。

2.2 力学性能

由于在地聚物中以离子键和共价键为主要结合方式，范德华键为辅助结合方式，因此具有很好化学稳定性和力学性能。表 1 中对比了地聚物与环氧树脂、水泥、玻璃、陶瓷以及铝合金的力学性能^[2]，可见地聚物的弹性模量比环氧树脂高一个数量级，强度相当；而与水泥石和玻璃相比，强度高一个数量级。

表 1 地聚物与其它材料力学性能的比较

性能参数	地聚物	环氧树脂	水泥	玻璃	陶瓷	铝合金
密度(g/cm ³)	2.2~2.7	1.2	2.3	2.5	3.0	2.7
弹性模量(GPa)	50	2.1	20	70	200	70
抗拉强度(MPa)	30~190	98~210	1.6~3.3	60	100	30
抗弯强度(MPa)	40~210	140~210	5~10	70	150~200	150~400
断裂功 (J/m ²)	50~1500		20	10	300	10000

2.3 耐火和隔热性能

由于地聚物具有稳定的化学结构，并且在生产过程中就经过了煅烧，因此具有很好的耐火性能。清华大学对制备的地聚物材料进行了耐火试验，并与普通硅酸盐水泥的耐火性能进行了对比。试验方法如下：将地聚物试块和普通硅酸盐水泥试块在室内空气养护 28 天，再将它们放在电炉中自然升温到规定的温度并保温 120min，然后自然降温到室温，再按《水泥胶砂强度检验方法》^[3]测试其剩余抗压强度。试验获得的煅烧温度与剩余强度的关系曲线如图 2 所示，可见随着温度的升高，地聚物的强度不仅没有降低，反而有所提高。

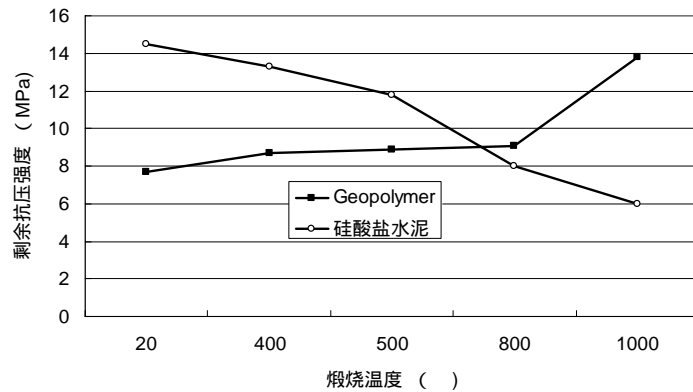


图2 地聚物的耐火试验结果

此外，地聚物的导热系数为 $0.24\sim 0.38\text{W/mK}$ ，接近轻质耐火粘土砖^[2]。而且地聚物在高温下无烟气等有害物质散发，可以作为耐火保温材料。清华大学对制备的地聚物材料进行了耐火保温试验：涂刷在钢板的单侧表面 $1\sim 2\text{mm}$ 的地聚物，待其固化后，用酒精喷灯灼烧有涂层一面 40min 后，向火面与被火面温度分别为 490°C 和 200°C ，而且表面无裂纹，冷却后也不开裂；而对比的无涂层钢板，两侧温度分别为 520°C 和 500°C 。

2.4 耐腐蚀性和耐久性

地聚物具有稳定的网络结构，具有与生俱来的化学稳定性，能够抵抗很强的酸碱腐蚀，好于普通水泥。图3为地聚物与波特兰水泥（Portland）、矿渣水泥（Slag）、铝酸盐水泥（Ca-aluminate）在5%的酸环境下的质量损失比例的对照^[1]。可以看到，地聚物的质量损失不到10%，远远小于水泥的质量损失。图4为地聚物与波特兰水泥（Portland）在碱骨料标准试验方法下（ASTM C227）的膨胀率的对比^[1]。可以看到，地聚物基本没有膨胀。可见，地聚物在酸碱环境下都非常稳定，几乎没有腐蚀发生。Davidovits 等人在调查了罗马古竞技场、希腊古混凝土墙、埃及金字塔等古建筑后，发现这些古建筑物材料具有与地聚物类似分子结构，并认为这是使那些古建筑能够屹立几千年的主要原因^[4]。

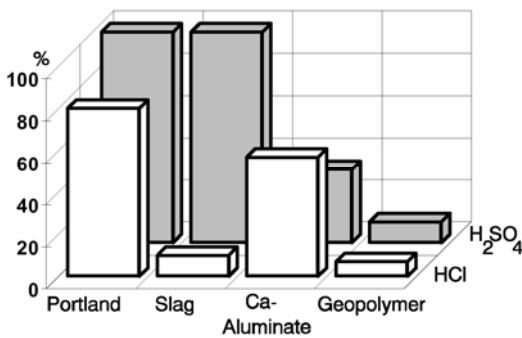


图3 地聚物与水泥在酸性环境下的质量损失比例^[1]

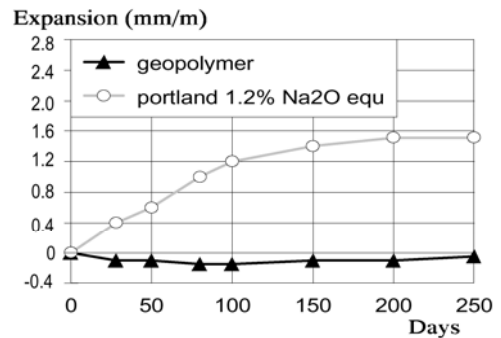


图4 地聚物与水泥在碱骨料标准试验的膨胀率的对比^[1]

2.5 改性地聚物材料

目前，普通的地聚物材料需经过特殊的工艺处理才可以在 $50\sim 180^\circ\text{C}$ 的温度条件下发生反应而快速固化，这大大制约了地聚物材料的工程应用。清华大学研发成功了可在常温（ $5\sim 30^\circ\text{C}$ ）下实现固化反应的改性地聚物，具有与普通地聚物基本相同的物理化学性质，大大扩展了地聚物材料的应用领域。

改性地聚物材料由固相和液相两部分组成。固相为固态反应物、微颗粒惰性填料和改性添加料的混合粉末；液相为碱激发剂和改性剂的溶液。两者按照一定比例混合搅拌后，形成均匀的浆体。在室温下，静置的浆体在2小时内可达到指触干燥，24小时可达到28天强度的60%。根据两相材料配比的不同，可配置成用于不同功能的两种粘结材料：基底渗透料和面层粘结料。

3 纤维增强地聚物材料加固混凝土结构

3.1 施工过程

地聚物材料粘贴纤维片材加固混凝土结构的施工过程，如图 5 所示：

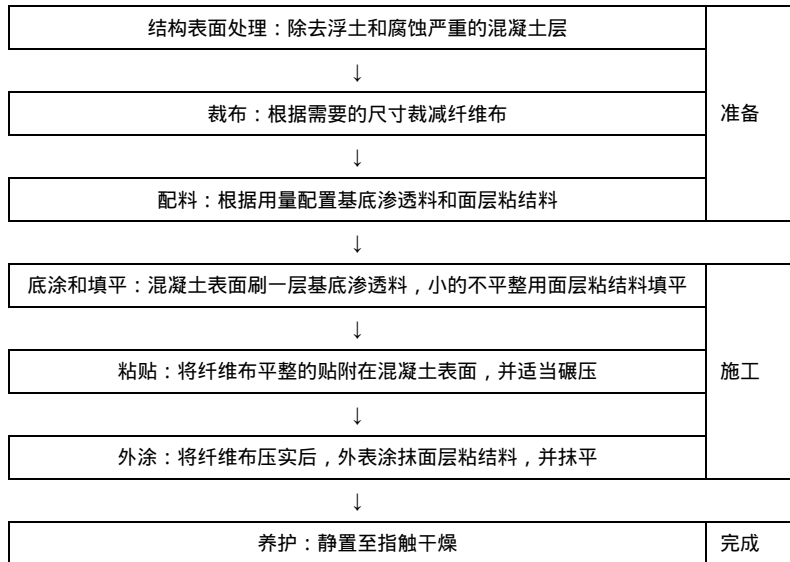
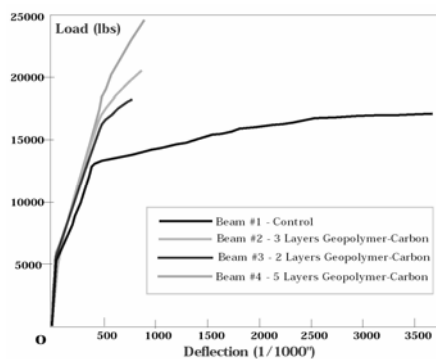


图 5 纤维增强地聚物加固混凝土结构施工程序框图

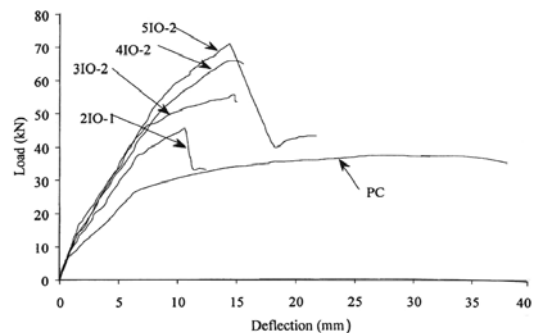
施工过程与普通环氧树脂粘贴纤维片材的工艺流程类似，不同点主要有：(1) 混凝土表面不需要过多的打磨，只需除去表面浮土和腐蚀严重的混凝土即可；(2) 不需专门进行填补表面孔洞的找平处理，因为地聚物本身即可填补孔洞；(3) 粘结构料为固液拌合，两种粘结构料只需采用不同的固液比例；(4) 粘贴完成后不需做表面处理，直接将外涂料抹平即可获得与混凝土表面相同的效果。

3.2 面内剪切试验

为了研究改性地聚物加固混凝土的效果，清华大学首先进行了改性地聚物粘贴纤维布的面内剪切试验，试验装置如图 6 所示，粘接长度为 70mm。试验结果：针对碳纤维布的配方，1 天的平均剪切强度为 1.00MPa，7 天的平均剪切强度为 1.20MPa；针对玻璃纤维布的配方，1 天的平均剪切强度为 1.51MPa，7 天的平均剪切强度为 1.88MPa。与普通树脂粘接纤维布加固的平均剪切强度 1.5MPa(包括 130mm、100mm 和 70mm 三种粘接长度)基本持平^[5]。



(a) 第一组试验^[6]



(b) 第二组试验^[7]

图 6 面内剪切试验

图 7 受弯加固梁试验

3.3 梁受弯加固试验

美国新泽西州立大学进行了一般的地聚物加固钢筋混凝土梁的试验研究^[6,7]。试验前加固梁在 80 下完成固化。共进行了 2 组：第一组有 4 根梁^[6]，其中 1 根为不加固，其它 3 根分别粘贴了 2 层、3 层和 5

层碳纤维布，荷载 - 位移曲线如图 7(a)所示；第二组有 9 根梁^[7]，其中 2 根为不加固，加固 2 层碳纤维布（强度为 3838MPa）的 1 根，3、4、5 层的各 2 根，部分构件的荷载 - 位移曲线如图 7(b)所示。可以看到，构件的极限承载力提高很多，这主要是构件的截面尺寸较小。从试验现象上看，大多数构件的破坏模式为纤维断裂，而当加固层数很多时，也会出现剥离破坏。

如果用普通树脂粘贴加固的方法对这些梁进行计算，可获得它们的极限承载弯矩，表 2 对比了第二组构件的试验结果和计算结果^[7]。从加固效果上看，地聚物粘贴加固与普通树脂粘接加固的混凝土梁类似，达到了提高承载力的效果。

表 2 地聚物加固试验极限弯矩与计算结果的比较

构件编号	加固纤维层数	试验(kN·m)	计算(kN·m)	差别
PC-1	0	10.4	-	-
PC-2	0	10.2	-	-
2IO-1	2	12.7	14.7	15.6%
3IO-1	3	15.7	16.7	6.7%
3IO-2	3	15.6	16.7	7.3%
4IO-1	4	15.4	18.4	19.5%
4IO-2	4	18.1	18.4	1.4%
5IO-1	5	18.1	19.9	10.0%
5IO-2	5	19.7	19.9	1.0%

4 结论与展望

地聚物材料的主要原材料为我国特产矿物，储量非常丰富。而且生产加工工序简单，成本低廉，并能大量消耗工业废料，非常有利于建材工业的可持续发展。

地聚物具有良好的力学性能、耐高温性能和耐久性，并具有良好的施工性能和经济性，将其与目前的纤维粘贴加固技术结合，将成为今后 FRP 加固技术的重要发展趋势。清华大学研制的改性地聚物材料克服了一般地聚物固化温度高的缺陷，可以在纤维加固混凝土结构中大量应用，有望大大提高纤维片材加固技术的适用范围，并能替代现有的树脂粘贴材料。

地聚物材料粘贴纤维片材在面内剪切试验、梁受弯加固试验以及柱的加固中，表现出与树脂粘贴材料类似的性能，初步证明了地聚物粘贴纤维片材加固混凝土结构的有效性。

目前改性地聚物粘贴纤维片材加固混凝土结构的研究还在继续深入，相应的产品也将很快推出。

参考文献

- 1 Davidovits J. Properties of Geopolymer cements. Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, 1994: 131~149
- 2 袁鸿昌,江尧忠. 地聚合物材料的发展及其在我国的应用前景. 硅酸盐通报, 1998, (2):46~51
- 3 中华人民共和国国家标准. 水泥胶砂强度检验方法(GB/T17671-1999), 1999
- 4 吴浩,管学茂. 土聚水泥的研究现状及应用发展前景. 水泥工程, 2004, (2): 27~32
- 5 谭壮. GFRP 布加固混凝土梁受力性能的试验研究. 清华大学硕士论文, 2002
- 6 Balaguru P, Kurtz S, Rudolph J. Geopolymer for Repair and Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams. Project: Geo-Structure Fire-Proof. Geopolymer Institute, 1997
- 7 Toutanji H, Deng Y, Zhang Y, et al. Static and Fatigue Performances of RC Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets Bonded by Inorganic Matrix. Proceedings of 47th International SAMPE Symposium, 2002: 1354~1367