

程希莹,于敏,杨瑞敏,等.JGN型耐高温建筑结构胶抗震加固性能研究[J].地震工程学报,2022,44(5):1059-1066.DOI:10.20000/j.1000-0844.20211124001

CHENG Xiying, YU Min, YANG Ruimin, et al. Seismic strengthening performance of JGN-type building structural adhesive with high temperature resistance [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(5): 1059-1066. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20211124001

JGN 型耐高温建筑结构胶抗震加固性能研究

程希莹, 于 敏, 杨瑞敏, 张 伟, 韩 意

(安徽科技学院 建筑学院, 安徽 蚌埠 233100)

摘要: 为有效增强建筑结构的抗震性能、提高建筑抗震水平,对 JGN 型耐高温建筑结构胶抗震加固性能展开研究。将高活性酚醛胺(T-31)作为主固化剂、聚酰胺树脂(PA)为辅助固化剂,结合气相白炭黑、超细石英砂、石棉纤维、纳米材料、环氧树脂等材料,制备 JGN 型耐高温建筑结构胶。在高温环境下,使用万能试验机分析不同配比条件对结构胶抗震加固性能的影响。测试主要以拉伸强度、压缩强度以及压缩弹性模量为指标。测试结果表明:当固化剂质量比为 45:15、气相白炭黑掺量为 4.5%、超细石英砂掺量为 10%、石棉纤维掺量为 10.5%、纳米 SiO₂ 掺量为 3.5%、纳米 CaCO₃ 掺量为 2.5%时,JGN 型耐高温建筑结构胶的拉伸强度和压缩强度更大,压缩弹性模量得到优化,结构胶的抗震加固性能达到最佳状态。

关键词: JGN 型; 耐高温; 建筑结构胶; 抗震加固性能; 万能试验机

中图分类号: TU436.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)05-1059-08

DOI:10.20000/j.1000-0844.20211124001

Seismic strengthening performance of JGN-type building structural adhesive with high temperature resistance

CHENG Xiying, YU Min, YANG Ruimin, ZHANG Wei, HAN Yi

(College of Architecture, Anhui Science and Technology University, Bengbu 233100, Anhui, China)

Abstract: To effectively enhance the seismic performance and seismic levels of building structures, the seismic reinforcement performance of JGN-type building structural adhesive with high temperature resistance was studied in this paper. A JGN-type building structural adhesive with high temperature resistance was prepared by using highly active phenolic amine (T-31) as the main curing agent and polyamide resin as the auxiliary curing agent, combined with gas phase silica black, ultrafine quartz sand, asbestos fiber, nanomaterial, and epoxy resin. The effect of different proportions on the seismic performance of JGN-type structural adhesive under high temperature environment was analyzed by using a universal testing machine. The tensile strength, compressive strength, and compressive elastic modulus were taken as the tested indexes. Test results show the following: When the mass ratio of the curing agent is 45:15,

收稿日期: 2021-11-24

基金项目: 安徽省教育厅高校自然科学重点研究项目(KJ2021A0862);安徽省凤阳县“十四五”消防救援事业发展规划项目(880672);

安徽省蚌埠市胜利东路片区工业工地测量及数据建库项目(880635)

第一作者简介: 程希莹(1989—),女,安徽黄山人,硕士,讲师,研究方向:建筑结构及抗震效果研究。

E-mail:chengxiying54545@yeah.net。

the content of fumed silica is 4.5%, ultrafine quartz sand is 10%, asbestos fiber is 10.5%, nano-SiO₂ is 3.5%, nano-CaCO₃ is 2.5%, the tensile strength and compressive strength of JGN-type high temperature-resistant building structural adhesive will be higher, and the compressive elastic modulus can be optimized. With this proportion, the best seismic strengthening performance of the structural adhesive is achieved.

Keywords: JGN-type; high temperature resistance; building structural adhesive; seismic reinforcement performance; universal testing machine

0 引言

现代建筑主要根据相关标准化的要求,根据设计规格预先制成,并通过机器操作完成组装^[1-2]。经济和社会的发展不断加快,促使建筑业施工技术得到进一步的提高^[3]。深入研究建筑结构加固性能,有利于持续提高建筑结构抗震水平,其已成为目前建筑业设计的必然要求^[4-5]。建筑结构抗震属于建筑业设计中的一个重要环节,若要提高建筑结构自身抗震性能,必须做好抗震工作^[6-7]。

20 世纪 90 年代以来,国内外对建筑胶黏剂的应用非常普遍。比如日本阪神大地震后,损坏桥梁等建筑的钢筋混凝土柱及梁等均大量使用结构胶(乳液双组分型)进行加固和修复。在对建筑结构胶普遍应用的基础上,相关学者一方面加强了对粘接构件承载性能与行为的研究,另一方面不断建立更完善的施工规范化标准^[8]。

目前,国内外的建筑结构胶制备技术正向着高水平系列化发展,如混凝土修补胶、接缝专用胶、可用于金属预制件拉伸的高强胶、快速锚固胶等。而国内学者针对建筑结构胶的研究则是向着多样化发展。这其中,以环氧乙烯基酯结构胶、环氧结构胶的应用效果更为显著。环氧乙烯基酯结构胶以丙烯酸、环氧树脂为主要原料,在合成环氧乙烯基酯树脂后,通过乙烯基丙基 MT 硅树脂完成改性处理,经固化后完成制备^[9]。材料中的乙烯基丙基 MT 硅树脂能够提高环氧乙烯基酯树脂的拉伸强度和断裂伸长率,使其具有较好的耐老化性能。但高温环境会对环氧乙烯基酯结构胶的弹性压缩能力产生破坏,导致其易产生压缩弹性变形,降低了其抗震和抗冲击能力。环氧结构胶是在真空灌胶环境下,以环氧树脂和改性芳胺固化剂为主要原料,配合填料、偶联剂、触变剂及碳纤维完成制备^[10]。但由于在制备环氧结构胶的过程中加入了较多的改性组分,导致固化后环氧结构胶的均匀性和致密性受到影响,降低了其拉伸强度、压缩强度以及耐久性,在地震力、剪力等强冲击力的作用下,环氧结构胶的粘接性能

失效。

针对目前常用结构在抗震加固性能方面存在的不足,以上述传统的制备方法为基础,将提高结构胶的拉伸强度、压缩强度和压缩弹性作为研究目标,本研究以 JGN 型耐高温建筑结构胶为研究对象,在制备的基础上,重点分析了其抗震加固性能。

在本文的研究中,分别以高活性酚醛胺(T-31)、聚酰胺树脂(PA)作为主、辅固化剂,利用气相白炭黑、超细石英砂、石棉纤维、纳米材料、环氧树脂等材料,完成对 JGN 型耐高温建筑结构胶的制备,并在高温环境下分析材料掺量变化的情况及结构胶拉伸强度、压缩强度的变化趋势,从而确定材料的最佳配比如下:固化剂质量比为 45:15、气相白炭黑掺量为 4.5%、超细石英砂掺量为 10%、石棉纤维掺量为 10.5%、纳米 SiO₂ 掺量为 3.5%、纳米 CaCO₃ 掺量为 2.5%,并通过试验对比结果突出了研究成果的抗震加固有效性。

1 材料方法

1.1 试验材料设计

环氧树脂:工业级,来自无锡博瑞宇化工科技有限公司;

聚酰胺树脂(固化剂 PA、T-31):工业级,来自湖北鑫润德化工有限公司;

硅烷偶联剂:工业级,来自南京全希化工厂;

气相白炭黑:工业级,来自湖北汇富纳米材料股份有限公司;

水泥:工业级,来自珠海市华润水泥厂家;

超细石英砂:工业级,来自灵寿县黑山石英砂厂;

石棉纤维:工业级,来自瓜州县柳园学校化工厂;

高活性酚醛胺:工业级,来自山东德源环氧科技有限公司。

纳米材料:纳米 SiO₂、纳米 CaCO₃,工业级,来自南京先丰纳米材料科技有限公司。

具体试验材料的优点如表 1 所列。

表 1 试验材料优点
Table 1 Advantages of test materials

材料	优点
环氧树脂	黏结力强,机械强度高,固化时收缩率低,固化成型方便,耐腐蚀性良好,耐热性较好,良好的电绝缘性,耐水性好,能耐大多数霉菌 ^[11] 。
聚酰胺树脂	软化点的范围特别窄,具有较好的耐药性,能抵抗酸碱和植物油、矿物油等,对于木材、陶器、纸、布、黄铜、铝和酚醛树脂、聚酯树脂、聚乙烯等塑料都具有良好的胶合性能。
硅烷偶联剂	能够完成表面处理,能改善玻璃纤维和树脂的黏合性能,大大提高玻璃纤维增强复合材料的强度、电气、抗水、抗气候等性能,即使在湿态时,其在提高复合材料机械性能方面的效果也十分显著。硅烷偶联剂通常用作密封剂、黏接剂和涂料的增黏剂,能提高材料的粘接强度、耐水、耐气候等性能。
气相白炭黑	由于粒径很小,因此气相白炭黑的表面积大、表面吸附力强、化学纯度高、分散性能好,在热阻、电阻等方面具有优异的性能,以优越的稳定性、补强性、增稠性和触变性在众多学科及领域中得到应用。
水泥	强度高,在 10℃ 以下的低温环境下凝结硬化快,耐冰性好。
超细石英砂	具有提高抗压、抗折、抗渗、防腐、抗冲击及耐磨性的能力;能起到保水、防止离析、泌水、大幅降低砼泵送阻力的作用;能够提高浇注型耐火材料的致密性。
石棉纤维	最大的优点就是可纺性,天然转曲使棉纤维具有一定的抱合力,有利于纺纱工艺。
高活性酚醛胶	因分子结构中含有酚羟基、伯氨基及仲胺基,具有反应活性高、固化速度快等特点,可在低温、潮湿环境下固化,固化物的物理力学性能较好。
纳米材料	粒子的尺寸可减小到纳米量级,可使声、光、电、磁、热性能呈现出新的特性。

1.2 JGN 型耐高温建筑结构胶制作

使用合适的环氧树脂、气相白炭黑在玻璃烧杯中进行搅拌,搅拌速度是 1 100~1 350 r/min;导进固化剂、硅烷偶联剂进行搅拌,搅拌速度是 550~650 r/min;导进水泥、超细石英砂、石棉纤维进行搅拌^[12-13]。把混合料放在密闭环境中,去除气泡后放在模具里,12 小时后脱模,获取 JGN 型耐高温建筑结构胶试样。

1.3 检测方法

根据 GB/T2567—2019 标准^[14],使用万能试验机检测所制备 JGN 型耐高温建筑结构胶抗震加固性能,采用日本日立公司的 S-3400N 型扫描电子显微镜和型号为 JEM-1200EXII 的透射电子显微镜进行观察。

JGN 型耐高温建筑结构胶抗震加固性能主要通过力学性能指标体现。在本研究中,性能测试主要通过拉伸强度、压缩强度以及压缩弹性模量指标体现。

2 检测方案与结果分析

2.1 固化剂质量比测试与结果分析

通常来说,固化剂配比越低,相应的成本就会越低。但是为了保证材料制备质量,固化剂不能过少,否则结构胶的脆性将有所提高。结合相关经验,将聚酰胺树脂(固化剂 PA、T-31)的比例设定在 1~3 之间,即达到 21:21、29:19、33:18、41:16、45:15。其余材料的用量如下:气相白炭黑掺量是 4.5%,超细石英砂掺量是 40%、石棉纤维掺量是

10.5%,纳米 SiO₂ 掺量是 3.5%,纳米 CaCO₃ 掺量是 2.5%。在此条件下分析固化剂质量比对 JGN 型耐高温建筑结构胶抗震加固性能的影响。

测试结果如图 1 所示。

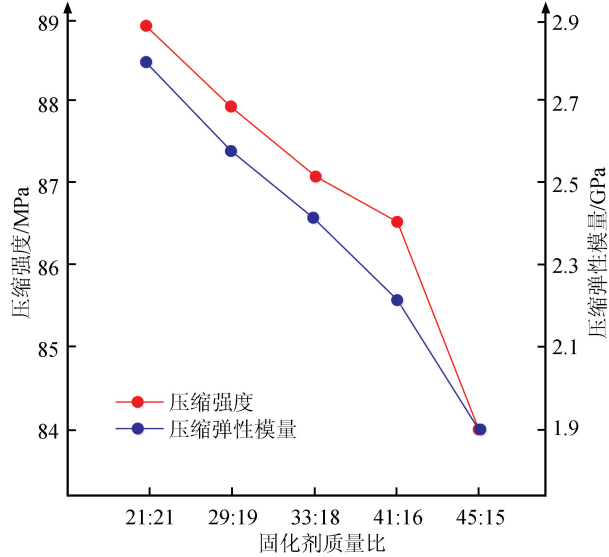


图 1 固化剂质量比变化下的压缩强度与压缩弹性模量的测试结果

Fig.1 Test results of compressive strength and compressive elastic modulus with varying curing agent mass ratio

通过分析图 1 可以发现,在固化剂质量比由 21:21 变化至 45:15 的逐渐增加的过程中,JGN 型耐高温建筑结构胶的压缩强度与压缩弹性均呈现出下降的态势,且二者的下降幅度相当,最终分别下降至 70.0 MPa、1.6 GPa。

PA:T-31 固化剂质量比变大会使得 JGN 型耐

高温建筑结构胶压缩强度和压缩弹性模量变小,此时结构胶的韧性伴随固化剂掺量变大而变大。产生这种情况的原因在于,T-31 固化剂分子结构是一种短链模式,和环氧树脂交联后衍生的交联点距离不大,交联键进行内旋转运动时受到约束。PA 属于大分子固化剂,与环氧树脂固化后交联点距离变大,交联键内旋转运动的空间越大。此时,交联键运动的自由度增加,使材料的压缩弹性模量变小、韧性加强。因此,把固化剂 T-31 和 PA 结合后,不仅可以使 JGN 型耐高温建筑结构胶的使用寿命变长,还可以优化其韧性,此时 JGN 型耐高温建筑结构胶的抗震加固性能也得以优化。因此,为了是 JGN 型耐高温建筑结构胶具有线性组合的抗震加固性能,固化剂配比需要设成 45 : 15。

2.2 气相白炭黑掺量测试与结果分析

经相关学者研究发现,橡胶类材料的耐高温老化性能会随着气相法白炭黑用量的增加先升后降,且以用量为 4%~45% 为宜^[15]。因此,借鉴相关学者的研究成果,为分析气相白炭黑掺量变化下的压缩强度与压缩弹性模量,本研究将测试过程中的气相白炭黑掺量依次设成 0%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%。其余材料的用量如下:固化剂质量比设成 45 : 15,超细石英砂掺量是 40%、石棉纤维掺量是 10.5%,纳米 SiO₂ 掺量是 3.5%,纳米 CaCO₃ 掺量是 2.5%。在此条件下,分析气相白炭黑掺量对 JGN 型耐高温建筑结构胶抗震加固性能的影响。

气相白炭黑的 FS 电镜照片如图 2 所示。

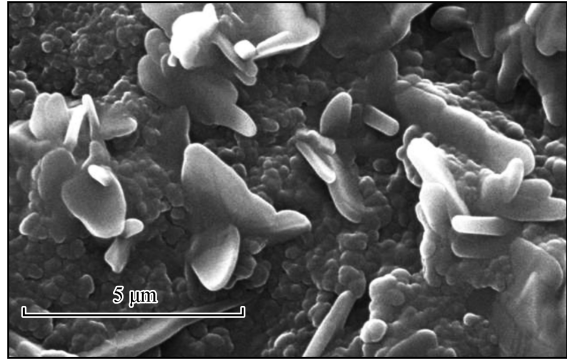


图 2 气相白炭黑的 FS 电镜照片

Fig.2 FS electron microscope image of fumed silica

分析图 2 可知,气相白炭黑的团聚物由许多原生粒子构成,粒径在 7~16 nm 之间,原生粒子的相互作用构成一次团聚物,正是这种聚合物,会与分子发生氢键作用,生成氢键结构,抑制了交联键的运动,使 JGN 型耐高温建筑结构胶的固化性能得到

增强。

测试结果如图 3 所示。

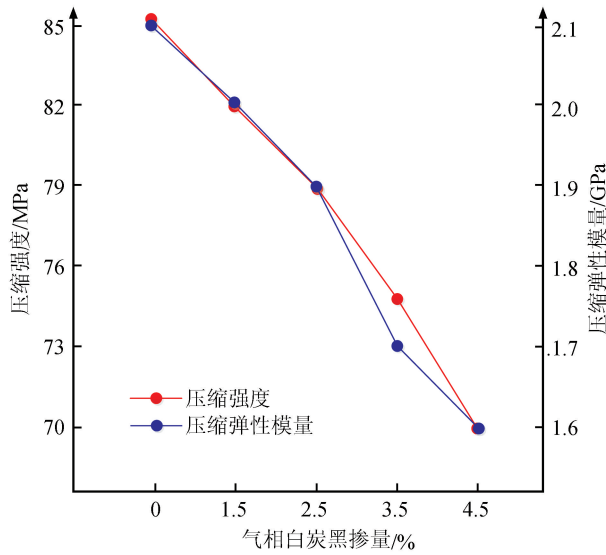


图 3 气相白炭黑掺量变化下的压缩强度与压缩弹性模量的测试结果

Fig.3 Test results of compressive strength and compressive elastic modulus with varying content of fumed silica

通过分析图 3 可以发现,在气相白炭黑掺量由 0% 增加至 4.5% 的过程中,JGN 型耐高温建筑结构胶的压缩强度与压缩弹性均呈现出下降的态势,最终分别下降至 70.0 MPa、1.6 GPa。

产生上述结果的原因在于,JGN 型耐高温建筑结构胶的压缩强度和压缩弹性模量会随着气相白炭黑掺量增大而变小,增加了 JGN 型耐高温建筑结构胶的韧性。当气相白炭黑加入环氧树脂中,会与分子发生氢键作用,生成氢键结构,抑制了交联键的运动,使交联聚合物里面交联键数量变少,降低交联密度,交联网络的均匀性变差。气相白炭黑虽然对 JGN 型耐高温建筑结构胶的触变性 with 韧性进行优化,但是对 JGN 型耐高温建筑结构胶的压缩强度存在负面影响,所以在制作 JGN 型耐高温建筑结构胶时,气相白炭黑的掺量可设成 4.5%,此时 JGN 型耐高温建筑结构胶的固化性能最佳。

2.3 超细石英砂掺量测试与结果分析

为分析超细石英砂掺量对 JGN 型耐高温建筑结构胶抗震加固性能的影响,将 JGN 型耐高温建筑结构胶中的超细石英砂掺量依次是 0%、10%、20%、30%、40%,固化剂质量比设成 45 : 15,气相白炭黑掺量是 4.5%,石棉纤维掺量是 10.5%,纳米 SiO₂ 掺量是 3.5%,纳米 CaCO₃ 掺量是 2.5%。在

此条件下,分析超细石英砂掺量对 JGN 型耐高温建筑结构胶抗震加固性能的影响。

测试结果如图 4 所示。

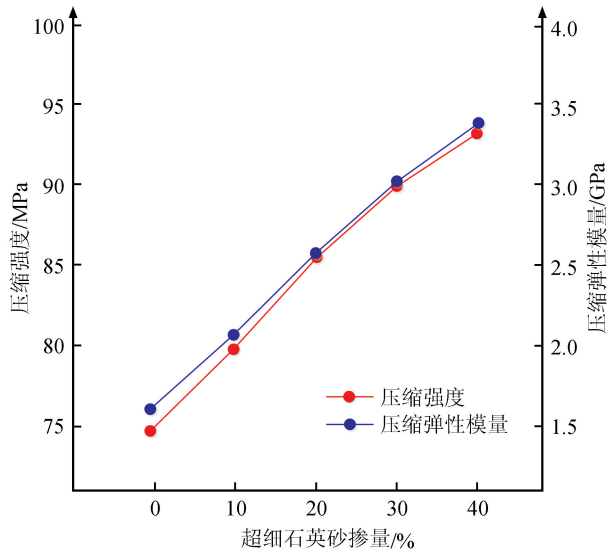


图 4 超细石英砂掺量变化下的压缩强度与压缩弹性模量的测试结果

Fig.4 Test results of compressive strength and compressive elastic modulus with varying content of ultrafine quartz sand

通过分析图 4 可以发现,在气相白炭黑掺量由 0%增加至 40%的过程中,JGN 型耐高温建筑结构胶的压缩强度与压缩弹性均呈现出上升的态势。其中,压缩强度由 75 MPa 上升至 93 MPa,压缩弹性模量由 1.6 GPa 上升至 3.4 GPa。

JGN 型耐高温建筑结构胶的压缩强度和压缩弹性模量会随着超细石英砂掺量变多而变大。产生这一结果的原因在于超细石英砂是刚性材料,其压缩强度与压缩弹性模量很大,将超细石英砂加入环氧树脂中,可以帮助环氧树脂稳固自身,从而增加 JGN 型耐高温建筑结构胶的压缩强度和压缩弹性模量,JGN 型耐高温建筑结构胶得到优化。而超细石英砂颗粒分布于环氧树脂基体中,超细石英砂颗粒与环氧树脂发生作用,环氧树脂表面会形成了大量环氧树脂分子链,组合成无机-有机复合界面。当受到外力作用时,外力会沿着复合界面产生作用,此时界面将出现小裂缝,耗损很多能量。JGN 型耐高温建筑结构胶的压缩强度因超细石英砂掺量的变多而变大,JGN 型耐高温建筑结构胶的弹性模量也变大,结构胶和基材的粘接性能将会变差。因此,在实际应用中需要将超细石英砂掺量设成 10%。

2.4 石棉纤维掺量测试与结果分析

为分析石棉纤维掺量对 JGN 型耐高温建筑结构胶抗震加固性能的影响,将 JGN 型耐高温建筑结构胶中的石棉纤维掺量依次是 0%、5.5%、10.5%、15.5%,固化剂质量比设成 45:15,气相白炭黑掺量是 4.5%,超细石英砂掺量是 40%、纳米 SiO₂ 掺量是 3.5%,纳米 CaCO₃ 掺量是 2.5%。在此条件下,分析石棉纤维掺量对 JGN 型耐高温建筑结构胶抗震加固性能的影响。

石棉纤维在扫描电镜下放大 10 000 倍的 SEM 如图 5 所示。

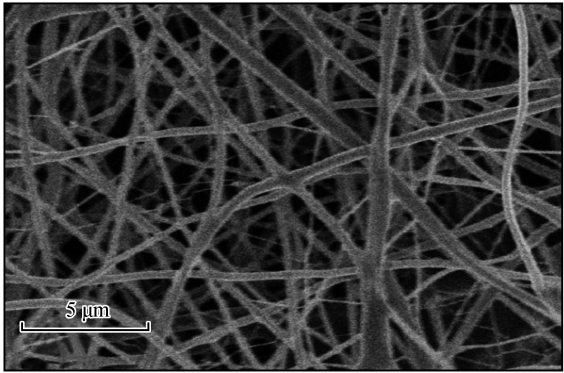


图 5 石棉纤维的 SEM 图像

Fig.5 SEM image of asbestos fiber

图 5 中,石棉纤维呈现出长宽较大、表面光滑、没有明显的分丝帚化现象,拥有大量的活性基团,可以平均分散于环氧树脂基体中,增强树脂拉伸强度,防止环氧树脂基体产生应变。

测试结果如表 2 所列。

表 2 高温环境下石棉纤维掺量变化对结构胶抗震加固性能的影响

Table 2 Effect of the variation of asbestos fiber content on seismic performance of structural adhesive at high temperature

石棉纤维掺量/%	拉伸强度/MPa
0	28
5.5	32
10.5	35
15.5	33

分析表 2 可知,随着石棉纤维的掺量增加,JGN 型耐高温建筑结构胶的抗拉强度增加。如果其掺量为 10.5%,那么其抗拉强度将达到最大值。

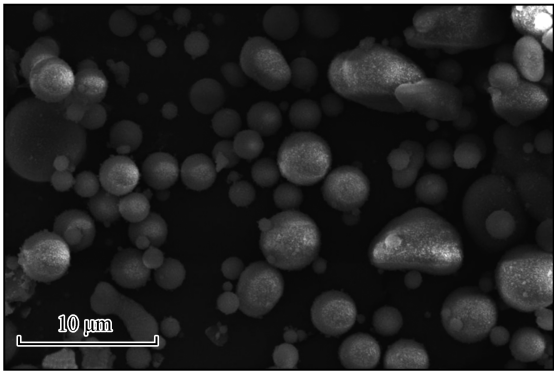
产生上述结果的原因在于,在石棉纤维量较少的情况下,将石棉纤维加入环氧树脂基体中时,石棉纤维会分散于环氧树脂基体中,产生分散相、连续相,从而增加树脂拉伸强度,在增强体系承受外力

时,外力主要作用于纤维中,在一定程度上能够防止环氧树脂基体产生应变。石棉纤维能够使作用于环氧树脂上的力分布得更均匀,并随着树脂/纤维的应力减小,从而使结构胶的抗拉强度得到优化。若石棉纤维掺量过多,JGN 型耐高温建筑结构胶的黏度变大,则大量纤维在 JGN 型耐高温建筑结构胶中伸展度变差,团聚力变强,拉伸强度将变差。为此,石棉纤维掺量的最佳值是 10.5%,此时 JGN 型耐高温建筑结构胶的拉伸强度为最大值,其抗震加固性能最佳。

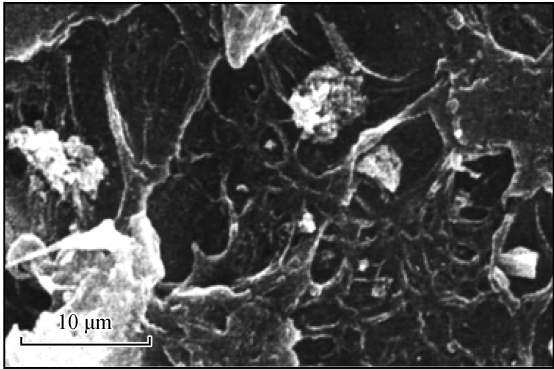
2.5 纳米材料测试与结果分析

为分析石棉纤维掺量对 JGN 型耐高温建筑结构胶抗震加固性能的影响,将 JGN 型耐高温建筑结构胶中的纳米 SiO₂ 掺量依次是 0%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%、5.5%,纳米 CaCO₃ 掺量依次是 0%、2.5%、4.5%、6.5%、8.5%、10.5%,固化剂质量比设成 45:15,气相白炭黑掺量是 4.5%,超细石英砂掺量是 40%、石棉纤维掺量是 10.5%。在此条件下,依次分析纳米 SiO₂ 掺量、纳米 CaCO₃ 掺量对 JGN 型耐高温建筑结构胶抗震加固性能的影响。

纳米 SiO₂ 和纳米 CaCO₃ 的 SEM 图像如图 6 所示。



(a) 纳米SiO₂



(b) 纳米CaCO₃

通过观察 6 中的纳米 SiO₂ 和纳米 CaCO₃ 的结构可以发现,纳米 SiO₂ 和纳米 CaCO₃ 不是分散为单颗粒形式存在,而是多个颗粒聚合形式存在,能够优化结构胶基体。

测试结果如表 3 所列。

表 3 纳米材料掺量对结构胶抗震加固性能的影响分析

Table 3 Influence of nanomaterials content on seismic strengthening performance of structural adhesive

纳米材料	掺量 /%	拉伸强度 /MPa	压缩强度 /MPa	压缩弹性模量/MPa
SiO ₂	0	51.13	19.03	2.68
	1.5	50.97	21.77	2.78
	2.5	50.68	20.75	2.84
	3.5	55.74	24.44	2.91
	4.5	52.93	23.77	2.99
	5.5	52.86	18.31	2.93
CaCO ₃	0	51.13	89.49	2.68
	2.5	50.95	96.56	2.98
	4.5	45.34	99.78	2.86
	6.5	44.65	98.39	2.95
	8.5	44.41	97.69	3.06
	10.5	35.31	98.16	3.22

分析表 3 结果可知,在 JGN 型耐高温建筑结构胶中逐渐增加纳米 SiO₂,其拉伸强度、压缩强度先变大后变小,整体变动幅度较小。如果纳米 SiO₂ 掺量是 3.5%,其拉伸强度为 55.74 MPa,此时为最大值,压缩强度也为最大值。原因是纳米 SiO₂ 粒子自身的强度与模量较为显著,纳米 SiO₂ 掺量变多,结构胶基体的强度便得以优化。纳米 SiO₂ 掺量较少,纳米 SiO₂ 粒子在结构胶基体树脂里分布均匀性较好,特别是纳米 SiO₂ 掺量为 3.5%时,纳米 SiO₂ 粒子在结构胶基体树脂里分布均匀,拉伸强度最显著。当纳米 SiO₂ 掺量为 5.5%时,纳米 SiO₂ 粒子将会优化 JGN 型耐高温建筑结构胶的触变性、黏度,气泡将不便处理,拉伸强度、压缩强度便会变小。纳米 SiO₂ 掺量变多,JGN 型耐高温建筑结构胶的压缩弹性模量变大。原因是纳米 SiO₂ 粒子的自身模量显著,可以优化 JGN 型耐高温建筑结构胶的弹性模量。弹性模量变大,JGN 型耐高温建筑结构胶抵抗拉伸变形的性能被优化。

分析表 3 结果还可知,纳米 CaCO₃ 掺量较多时,JGN 型耐高温建筑结构胶的拉伸强度变小,当纳米 CaCO₃ 掺量不大于 8.5%时,拉伸强度变小的幅度不大,如果纳米 CaCO₃ 掺量为 10.5%,拉伸强度为 35.31 MPa。此时拉伸强度变小的原因是 JGN 型耐高温建筑结构胶中气泡和纳米钙分散后聚合于

图 6 纳米 SiO₂ 及 CaCO₃ 的 SEM 图像
Fig.6 SEM images of nano-SiO₂ and nano -CaCO₃

一体,当掺量较少时,JGN 型耐高温建筑结构胶的气泡处理难度小,同时纳米粒子聚集的条件不多,JGN 型耐高温建筑结构胶强度较高。如果纳米 CaCO_3 掺量是 10.5%,JGN 型耐高温建筑结构胶的黏度变大,气泡处理难度变大,留在结构胶里的气泡很多,这时纳米粒子聚集性较好,JGN 型耐高温建筑结构胶的韧性则较差、易开裂,抗震加固性能下降。纳米 CaCO_3 掺量增多后,JGN 型耐高温建筑结构胶抗震加固性能指标中压缩弹性模量变大。因为纳米 CaCO_3 自身属于刚性粒子,模量显著,可优化 JGN 型耐高温建筑结构胶的压缩弹性模量,抗震加固性能得以优化。因此,综合考虑,纳米 CaCO_3 掺量最优值应为 2.5%。

3 抗震加固性能对比

为进一步验证本研究设计的 JGN 型耐高温建筑结构胶的抗震加固性能,将其与目前常用的环氧乙烯基酯结构胶、环氧结构胶展开对比。

试验试件为 3 组相同的隐式混凝土幕墙结构,分别将本研究设计的 JGN 型耐高温建筑结构胶、环氧乙烯基酯结构胶、环氧结构胶作为试验对象。隐式混凝土幕墙结构参数如表 4 所列。

表 5 不同结构胶的测试结果

Table 5 Test results of different structural adhesive

	JGN 型耐高温建筑结构胶	环氧乙烯基酯结构胶	环氧结构胶
胶体抗拉强度	≥50 MPa	≥30 MPa	≥25 MPa
胶体抗弯强度	≥47 MPa	≥40 MPa	≥38 MPa
结构胶连接处发生弯折变形时的地震强度	6.7 级	5.5 级	5.1 级
结构胶连接处发生折断时的地震强度	7.5 级	6.3 级	5.8 级
抗倒塌安全储备系数	4.75	4.50	3.25

分析表 5 可知,在高温环境地震作用下,应用 JGN 型耐高温建筑结构胶的隐式混凝土幕墙结构的抗倒塌安全储备系数为 4.75,与应用环氧乙烯基酯结构胶、环氧结构胶的幕墙结构的抗倒塌安全储备系数相比更高,说明其地震作用需求更高。应用 JGN 型耐高温建筑结构胶后,隐式混凝土幕墙结构分别在地震强度为 6.7 级和 7.5 级时发生弯折变形和折断,说明 JGN 型耐高温建筑结构胶可以有效加固建筑幕墙连接处。此外,JGN 型耐高温建筑结构胶胶体的抗拉强度和抗弯强度均处于较高的水平,说明其抗震、抗倒塌性能更强,有利于对建筑结构的加固。

4 结论

本文在制备 JGN 型耐高温建筑结构胶的基础

表 4 试验试件结构参数

Table 4 Structural parameters of test specimen

项目	参数
隐式幕墙骨架材料	8.8 级碳素结构钢
骨架型材断面尺寸	120 mm×85 mm
横梁断面尺寸	85 mm×85 mm
埋板	250 mm×250 mm×10 mm 后置热镀锌钢板、4 根 $\phi 12$ 化学螺栓
夹持件	100 mm×65 mm×8 mm 热浸镀锌角钢
连接螺栓	M12×110
混凝土等级	C35
外观	混凝土表面应平整且无裂缝

试验在伺服系统中完成,在 37 ℃ 环境下,沿水平方向输入人工地震波,地震强度变化为 3~8 级。对照检验结果以结构胶连接处发生弯折或倒塌为验证标准,并测试不同实验组混凝土幕墙的抗倒塌安全储备系数。

抗倒塌安全储备系数 ν 的计算方式如下:

$$\nu = \frac{\kappa}{\sigma}$$

(1)

式中: κ 表示建筑结构出现倒塌的临界地震强度; σ 表示建筑结构在罕见地震作用下的相应地震强度。

测试结果如表 5 所列。

上,测试了不同固化剂、气相白炭黑、超细石英砂、石棉纤维、纳米材料配比下,结构胶的抗震加固性能。

经测试发现:(1)固化剂质量比变大会使得 JGN 型耐高温建筑结构胶压缩强度和压缩弹性模量变小,此时结构胶的韧性伴随固化剂掺量变大而变大;(2)JGN 型耐高温建筑结构胶的压缩强度和压缩弹性模量会随着气相白炭黑掺量增大而变小,从而增加了 JGN 型耐高温建筑结构胶的韧性;(3)JGN 型耐高温建筑结构胶的压缩强度和压缩弹性模量会随着超细石英砂掺量变多而变大;(4)石棉纤维的掺量不应过多,否则会导致 JGN 型耐高温建筑结构胶的黏度变大,则大量纤维在 JGN 型耐高温建筑结构胶中伸展度变差,削弱拉伸强度;(5)纳米 SiO_2 粒子的自身模量显著,使用在环氧树脂基体里,两相符合将会优化 JGN 型耐高温建筑结构胶的

弹性模量;(5)纳米 CaCO_3 掺量增多,JGN 型耐高温建筑结构胶抗震加固性能指标中的压缩弹性模量会在一定程度内变大。

因此,在经过测试后发现,当固化剂质量比为 45:15、气相白炭黑掺量为 4.5%、超细石英砂掺量为 10%、石棉纤维掺量为 10.5%、纳米 SiO_2 掺量为 3.5%、纳米 CaCO_3 掺量为 2.5%时,JGN 型耐高温建筑结构胶性能最好,其抗震加固性能可得以优化。本研究结果可作为建筑结构胶抗震加固性能优化、建筑结构胶应用方案中的参考资料,具有一定的参考价值。

参考文献(References)

[1] 徐楨,李国平,席强敏,等.北京市建筑设计产业空间分布与区位选择[J].地理科学,2021,41(5):804-814.
XU Zhen,LI Guoping,XI Qiangmin,et al.Spatial distribution and location selection of architectural design industry in Beijing [J].Scientia Geographica Sinica,2021,41(5):804-814.

[2] 吴宏磊,丁洁民,陈长嘉.高地震烈度区体育馆建筑隔震结构设计研究[J].建筑结构,2020,50(3):45-51,113.
WU Honglei,DING Jiemin,CHEN Changjia.Research on seismic isolation structure design of gymnasium building in high seismic intensity area[J].Building Structure,2020,50(3):45-51,113.

[3] 张岩.桥梁钢-混凝土组合结构抗震性能预测仿真[J].计算机仿真,2020,37(3):480-483.
ZHANG Yan.Seismic performance prediction simulation of bridge steel-concrete composite structure[J].Computer Simulation,2020,37(3):480-483.

[4] 周洲,吕大刚,于晓辉.基于文献调研的我国建筑结构地震倒塌风险概率评估[J].建筑结构学报,2020,41(8):1-18.
ZHOU Zhou,LU Dagang,YU Xiaohui.Probabilistic assessment of seismic collapse risk for building structures in China based on literature investigation[J].Journal of Building Structures,2020,41(8):1-18.

[5] 梁估,文兴红,杨铭钊,等.昆明某老建筑的隔震加固设计[J].工程抗震与加固改造,2019,41(1):132-136,131.
LIANG Ji,WEN Xinghong,YANG Mingzhao,et al.Applying isolated technology to enforce a old building in Kunming[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2019,41(1):132-136,131.

[6] 温世臣,杨涛.双向地震波作用下巨子型有控结构建筑的隔震设计[J].地震工程学报,2020,42(1):44-51.
WEN Shichen,YANG Tao.Seismic isolation design of mega-sub controlled structures under bidirectional seismic wave[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(1):44-51.

[7] 李光华,邓跃全,田晗旭,等.环保型磷酸酯化淀粉建筑胶黏剂的制备及应用[J].非金属矿,2017,40(4):12-15.
LI Guanghua,DENG Yuequan,TIAN Hanxu,et al.Preparation and application of environmentally sound phosphate starch adhesive[J].Non-Metallic Mines,2017,40(4):12-15.

[8] 武德涛,李盼盼,张乐.高强度高韧性环氧结构胶的研制[J].中国胶粘剂,2019,28(4):6-9,14.
WU Detao,LI Panpan,ZHANG Le.Preparation of epoxy structural adhesive with high strength and high toughness[J].China Adhesives,2019,28(4):6-9,14.

[9] 闫申.环氧乙烯基酯建筑结构胶的改性及老化性能研究[J].热固性树脂,2020,35(5):51-55,59.
YAN Shen.Study on the modification and aging properties of epoxy vinyl ester building structural adhesive[J].Thermosetting Resin,2020,35(5):51-55,59.

[10] 高振东,洪彬,高建业,等.酸性环境下环氧结构胶的老化寿命预测[J].热固性树脂,2018,33(6):47-50.
GAO Zhendong,HONG Bin,GAO Jianye,et al.Prediction of aging life of epoxy structural adhesives in acidic environment [J].Thermosetting Resin,2018,33(6):47-50.

[11] 肖元平.耐久性环氧建筑结构胶的制备与性能研究[J].新型建筑材料,2018,45(3):104-107.
XIAO Yuanping.Preparation and property research of the high durability epoxy building structural adhesive [J].New Building Materials,2018,45(3):104-107.

[12] 荆磊,尹世平,徐世焱.纤维编织网增强水泥基材料加固砌体结构研究进展[J].土木工程学报,2020,53(6):79-89.
JING Lei,YIN Shiping,XU Shilang.State-of-the-art review on strengthening masonry structures with fabric-reinforced cementitious matrix [J].China Civil Engineering Journal,2020,53(6):79-89.

[13] 王菲彬,张晓兰,阙泽利,等.轻型木结构墙面板用结构胶合板冲击性能试验[J].建筑结构,2017,47(2):81-83.
WANG Feibin,ZHANG Xiaolan,QUE Zeli,et al.Impact property experiment on structural plywood for wall panels in light wood frame structure [J].Building Structure,2017,47(2):81-83.

[14] 丁杰.GB/T 37910.2-2019 标准解析[J].无损检测,2020,42(2):38-41,47.
DING Jie.Analysis of contents of GB/T 37910.2-2019 [J].Nondestructive Testing,2020,42(2):38-41,47.

[15] 李陈,向靖宇,刘春霞,等.气相法白炭黑比表面积及用量对热硫化硅橡胶耐热性的影响[J].有机硅材料,2019,33(4):271-275.
LI Chen,XIANG Jingyu,LIU Chunxia,et al.Effect of surface area and amount of fumed silica on the thermal resistance of HTV silicone rubber[J].Silicone Material,2019,33(4):271-275.