

橡胶混凝土研究进展

焦楚杰, 张传镁, 张文华

(广州大学 土木工程学院, 广州 510006)

摘要: 为了有效减轻急剧增加的废旧橡胶带来的环保压力, 建议将橡胶粉掺入混凝土中制成橡胶混凝土, 使废旧橡胶由黑色废物和环境公害变成土木工程领域的绿色资源。从工作性能、强度、变形性能、耐久性能、抗冲击、阻尼和隔声性能等方面介绍了橡胶混凝土在国内外的研究进展, 从材料、结构、施工技术、社会和经济等方面分析了橡胶混凝土的研究存在的问题, 指出了需进一步深入研究的方向, 为橡胶混凝土这种新型土木工程材料的科研与工程应用提供了参考意见。

关键词: 橡胶混凝土; 工作性能; 强度; 变形; 耐久性; 抗冲击; 阻尼; 隔声

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7329(2008)02-0138-08

An Overview of the Study on Rubcrete

JIAO Chu-jie, ZHANG Chuan-mei, ZHANG Wen-hua

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006)

Abstract: In order to effectively alleviate the increasingly serious environment problem of waste rubbers, an advice of adding the recycled ground rubbers into concrete to produce the rubcrete was put forward which aimed at change of the waste rubbers from the black rubbish and hazards of environment into green resource. An overview of some papers published in China and other countries regarding the performance of rubcretes were presented, such as workability, strength, deformation, durability, resistance to impact, damping and sound insulation. And the problems of the study and application of the rubcrete in such fields as material science, construction structure, construction technique, society and economy were analyzed. In addition, the future research directions were brought forward for the research and application of this new civil engineering material.

Key words: rubcrete; workability; strength; deformation; durability; resistance to impact; damping; sound insulation

1 橡胶混凝土具有的资源循环利用和环保意义

随着汽车工业的迅猛发展, 废旧轮胎急剧增加。全世界汽车轮胎年报废量有 10 亿条以上, 中国每年有 5 000~6 000 万条, 并且以每年 15% 左右的速度在递增^[1]。轮胎橡胶在自然条件下难降解, 填埋和堆放地易成为蚊子的孳生场所, 污染环境, 传染疾病, 并有可能引起火灾^[2]。日益增加的废橡胶的处理已成为全球性环境及资源难题, 其合理回收与利用, 对于环保问题突出、资源相对缺乏的我国尤其具有重要意义。

废胶粉是回收利用废橡胶的主要途径。橡胶可以加工成各种不同细度的粉状颗粒, 粒径小于 1.5 mm

的谓之胶粉。我国现有胶粉生产厂 60 多家, 年产量约为 20 多万 t^[3]。

2006 年 6 月 13 日至 7 月 28 日, 中国环保产业协会、中国橡胶工业协会组成联合调研组, 对全国部分省市废旧橡胶(含废旧轮胎)综合利用和环境保护情况进行了调研。形成的调研报告有以下内容^[4]:

“我国废旧橡胶(主要是废旧轮胎)带来的环境压力越来越大, 搞好废旧橡胶综合利用是我们面临的一项重要而紧迫的战略任务, 必须从资源、环境、经济的可持续发展以及建设和谐社会的战略高度来看待。”

“废旧橡胶综合利用的重点是要加快胶粉的发展, 努力培育和拓展胶粉在非橡胶制品领域。”

* 收稿日期: 2007-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(50708022); 广东省自然科学基金项目(06301038); 建设部科研开发项目(06-K1-37, 07-K4-5, 07-K4-13); 广州市属高校科技计划项目(62064)。

作者简介: 焦楚杰(1974-), 男, 湖南浏阳人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事高强及高性能混凝土研究, (E-mail) jiaochujie@sina.com。

在非橡胶制品领域中,混凝土建筑工程可以消耗大量的胶粉。据报道^[5],美国胶粉 70% 以上用于建筑工程。

胶粉具有较好的韧性、抗渗性、抗疲劳、保温隔热、隔声等特点,将橡胶粉掺入混凝土中,能够填充空隙,约束混凝土内微裂缝的产生和发展,并形成吸收应变能的结构变形中心,以提高混凝土的抗冲击和抗震性能。通过掺胶粉配制出橡胶混凝土,一方面,改善了混凝土材料的多种性能,另一方面,拓展了胶粉的应用领域,使废旧橡胶由黑色废物和环境公害变成土木工程领域的绿色资源,甚至“黑色黄金”。这将完全符合我国可持续发展策略,将具有极其重大的资源循环利用和环保意义。

2 橡胶混凝土的工作性能

橡胶粉的颗粒形状、表面粗糙度和颗粒尺寸对新拌混凝土的工作性能影响显著,目前研究结果也差别较大。

哈佛大学 Raghvan D 和 Huynh H 等(1998)认为含有橡胶粉的水泥砂浆流动度与普通砂浆基本相当或略好^[6]。

武汉大学刘刚和方坤河等(2004)发现橡胶粉对混凝土的流动性影响不大,对混凝土具有较好的保水作用,使混凝土的泌水性减小^[7]。

更多的研究表明,橡胶粉吸水率较大,且吸水较快,在拌和过程中将吸收较大部分的拌和水,降低混凝土的水灰比,从而使得混凝土拌和物的和易性变差。

美国爱达荷州(Idaho)大学 Zaher K Khatib (1999)研究发现^[8],随着胶粉掺量增加,混凝土的坍落度降低,当胶粉掺量比例达到集料 40% 时,混凝土的坍落度几乎为 0,细橡胶颗粒对混凝土坍落度降低的影响要大于粗橡胶颗粒。

东南大学李红燕(2004)试验发现^[9],掺加不同种类和不同掺量橡胶粉(颗粒)后,混凝土的坍落度均变小,用 100 目橡胶粉等量代水泥时,坍落度值减小最多,100 目橡胶粉等量代砂次之,3~4 mm 橡胶颗粒等量代砂时,坍落度值减小最少。

南昌大学郭灿贤(2006)将胶粉以不同的水平的重量比代替砂子掺入混凝土中,橡胶粉、砂子和水泥先混合均匀后,再与碎石一起干拌,最后加入水湿搅拌,随着胶粉掺量的增加,维勃稠度值从 6 s 增大到 14 s,而且增大的速率越来越大,混凝土和易性越来越差^[10]。

3 橡胶混凝土的强度和变形性能

国内外对橡胶混凝土的研究大部分涉及其强度和变形性能。基本一致的研究结论是,随着橡胶粉掺量的增加,混凝土强度会显著降低,韧性有所增加,通过

橡胶粉颗粒表面的预处理的方法可以减少橡胶混凝土的强度降低程度。

3.1 国外对橡胶混凝土的强度和变形性能的研究

美国俄勒冈州大学 Neil N Eldin 和 Ahmed B Senouci(1993)发现^[11],用水浸泡橡胶去除其表面污物,可使橡胶混凝土强度比不处理前提高 16%,当粗集料而不是细集料被橡胶粉代替时,抗压强度降低更多。

美国宾夕法尼亚大学 Rostami H 和 Lepore J 等(1993)用水、四氯化碳溶剂、胶乳清洗剂对胶粉进行处理,掺入混凝土中,分别比较其抗压强度,结果显示,用水清洗的胶粉所制的混凝土与未清洗胶粉所制的混凝土相比,抗压强度提高了 16%,当用四氯化碳溶剂处理过的胶粉掺入混凝土中,抗压强度得到了更大改善(约提高 57%)^[12]。

土耳其 Eskisehir Osmangazi 大学 Ilker Bekir Topcu(1995)用橡胶粉取代 15%~45% 集料掺到混凝土中,成型 $\phi 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的圆柱体及边长为 150 mm 的立方试件进行抗压实验,按 ASTM C 496 试验标准测定应力-应变曲线,结果表明:混凝土抗压强度降低程度达 50%,拉伸强度降低程度达 64%,塑性增加,弹性能降低,说明橡胶粉的加入,增加了混凝土的变形能,使得混凝土断裂时需要吸收更多的能量^[13]。Ilker Bekir Topcu(1997)在另一篇文章中指出,掺加 15% 片状橡胶的混凝土具有很高的脆性指数值,同时有较低的抗压强度和韧性值^[14]。Ilker Bekir Topcu 还和合作者 Nuri Avcular(1997)用复合材料经典规则分析橡胶混凝土,将橡胶混凝土看作由砂浆、集料和橡胶组成的三相复合材料,其实验结果与用复合材料理论公式推导出的结果非常符合,说明分析复合材料的方法适用于橡胶混凝土^[15]。

英国伯明翰大学 N L fattuhi 和 L A Clark (1996)研究了水泥净浆、砂浆和混凝土在掺入胶粒和低等级胶粉后的物理力学性能,包括密度、抗压强度、冲击韧性和耐久性,试验结果表明:水泥净浆、砂浆和混凝土的密度随着胶粉加入而减小,抗压强度也随之降低,其原因在于橡胶是柔性材料,相对于水泥石来说,只能承受轻微的荷载,随着荷载增加,引起水泥石结构破坏。对掺 11% 低等级胶粉的混凝土板和普通混凝土(水灰比 0.44)板进行摆锤冲击测试结果表明,掺低等级胶粉的混凝土出现的裂纹更宽^[16]。

美国波多黎各大学 H A Toutanji (1996)分别按照 ASTM C 39 和 ASTM C 78 试验标准制做 $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 圆柱体进行混凝土抗压实验、制做 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ 试件进行弯曲实验,结果表明:随着橡胶粉加入量的增加,混凝土的抗压强度和弯曲强度均降低,且抗压强度降低程度大于抗拉强度,掺加胶粉的试件呈现延性破坏形态,可以产生较大变

形,而不像普通混凝土试件突然断裂^[17]。

美国哈佛大学 Huynh H 和 Raghavan D 等(1996)的研究表明:2 mm 粒径橡胶加入砂浆中使得抗压、抗折强度均降低,而 10.8 mm× ϕ 1.8 mm 的橡胶纤维可以提高砂浆的抗拉强度,使砂浆试件的裂纹宽度和长度均减小^[18]。

哈佛大学 Huynh H 和 Raghavan D(1997)将 10.8 mm× ϕ 1.8 mm 的纤维状橡胶浸泡于 206 g 水泥和 100 水混合得到的水泥水化悬浮液(pH=13.64)、氢氧化钙溶液(pH=9.94)及氢氧化钠溶液(pH=13.69)中,4 个月后测试橡胶试件的重量、膨胀值、抗拉强度及微观结构变化,结果表明:橡胶试件的重量由于其中的碳黑被吸收而使重量有所降低,其它方面与未用碱性溶液浸过的橡胶试件进行比较,未出现明显变化,可见橡胶适用于混凝土中的碱性环境^[19]。

哈佛大学 Raghavan D 和 Huynh H(1998)对废轮胎橡胶粉水泥砂浆力学性能研究发现^[20],加入橡胶粉,砂浆塑性收缩裂纹减少,裂纹的长度、宽度也减小。

美国加利福尼亚大学 Segre N 和 Joekes I(2000)用氢氧化钠饱和水溶液浸泡 20 min 的橡胶粉掺入水泥净浆中,研究其力学性能及微观结构,结果显示橡胶粉水泥净浆多项力学性能诸如耐磨性、抗压、抗折强度、断裂能都得到不同程度的提高,SEM 图像显示氢氧化钠表面处理增强了橡胶粉—浆体界面的粘结强度^[21]。Segre N 和 Monteiro PJ(2002)还发现^[22],饱和氢氧化钠溶液浸渍处理可显著提高胶粉和水泥基材粘结强度,造成这一结果是因为氢氧化钠溶液使胶粉中硬脂酸锌的含量降低,而硬脂酸锌是橡胶产品制作过程中的一种添加剂,经常扩散迁移到橡胶表面,造成橡胶与其他材料粘结不良。二位学位通过对改性胶粉进行红外光谱分析、电势滴定和接触角测量,都发现硬脂酸锌有明显减少。

美国北德克萨斯大学 Palos A 和 D Souza N A 等(2001)发现^[23],将马来酸酐(maleic anhydride)处理的橡胶粉掺入水泥砂浆,提高了砂浆与钢筋的粘结强度。

法国皮卡底大学(Université de Picardie Jules Verne)A Benazzouk 和 K Mezreb 等(2003)对水泥—橡胶颗粒复合材料多项物理力学性能进行了研究^[24],结果表明:带锯齿状和弹性系数大的橡胶颗粒可提高复合材料的抗折强度和变形能力,橡胶颗粒掺量在 15%~35%(体积比)之间变化时,抗折强度有不同程度的提高,而抗压强度却降低,橡胶颗粒掺量大于 10%时,试件由脆性破坏转变为延性破坏。

美国威斯康星—密尔沃基大学 Rafat Siddique 和 Tarun R Naik(2004)发现氧氯化镁水泥做粘结料可以增强橡胶的粘结活性,提高橡胶混凝土多项力学性能,可制成高强度橡胶混凝土^[25]。

西班牙马德里技术大学 F Hernandez Olivares 和

G Barluenga(2004)进行了掺胶粉的高强混凝土的耐火性研究^[26],实验发现:未掺胶粉的高强混凝土发生了粉碎性破坏,且其温度—时间曲线曲率很大,而掺胶粉的高强混凝土未发生粉碎性破坏,且其温度—时间曲线曲率随着胶粉掺量增加越来越小。热解重量分析测试结果显示,随着胶粉含量的增加,在相同深度,试样温度越低,说明耐火性得以提高。此外,低容积密度胶粉会降低高强混凝土粉碎性破坏的风险,原因在于胶粉粒子燃烧后留下的孔隙成为了蒸汽可以迅速排出的通道,这样也就降低了混凝土内部压力。

水泥基材料一般都是脆性的,而且对裂纹很敏感,特别是收缩裂纹,而在水泥基材料中掺入胶粉后,能抑制裂缝扩大。法国图卢兹建筑材料耐久性实验室(Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions)A Turatsinze 和 S Bonnet(2005)着重对这一方面进行了研究^[27]。他们使用 52.5 硅酸盐水泥、河砂和胶粉平均粒径都为 4 mm,比重分别为 2.7 和 1.2,并加入防止胶粉分离沉降的稳定剂和提高工作度的密胺脂型塑化剂,砂浆配合比为:水泥 500 kg、砂 1 600 kg、水 250 kg、稳定剂 0.8 kg、塑化剂 3 kg。胶粉取代砂子的比例分别为 20% 和 30%,制成 ϕ 11.8 mm×23.6 mm 的试件,在 20℃、相对湿度为 100% 条件下硬化,测量 28 d 抗压强度。结果显示,胶粉取代率为 20% 的试样抗压强度下降 50%,而取代率为 30% 试样抗压强度下降 80%。冲击测试所用试件为 500 mm×100 mm×100 mm 棱柱体,结果显示未掺胶粉的水泥砂浆可耐 2.5 MPa 的冲击力,裂纹稍宽,可承受的冲击力迅速降低;而掺胶粉取代率为 20% 试件只能承受 1.3 MPa 冲击力,裂纹尺寸增大到 0.03 mm 时,依然可承受 1.3 MPa 冲击力,胶粉取代率为 30% 试样可承受冲击力更低,不足 1 MPa,但其抗冲击力变化更平缓,裂纹尺寸达到 0.05 mm 时,还能承受同等强度的冲击力,而此时未掺胶粉试样可承受的冲击力不足 0.3 MPa。出现这一结果之原因在于胶粉集料是软弱区,其与水泥浆接触界面非常薄弱,难以承受较大冲击力,另一方面,胶粉较好的能量吸收能力可阻止裂纹进一步扩大。

3.2 国内对橡胶混凝土的强度和变形性能的研究

石家庄铁道学院宋少民和刘娟红等(1997)研究结果表明^[28],橡胶混凝土的抗折、抗压强度较基准混凝土变化不大,抗冲击强度则明显提高,采用适当粘结剂可以改善橡胶粉与混凝土的界面状况,大幅度提高混凝土的抗冲击性能。

兰州军区陈卫星、赵文奇等(1999)通过室内试验和实际应用发现^[29],废橡胶粉可提高沥青混凝土的高温稳定性和低温抗裂性,可以避免道面出现龟裂、松散和坑槽等破坏现象,最佳废橡胶粉掺入量为 2%~4%

(按重量计)。

同济大学孙家瑛和高先芳等(2001)研究结果表明^[30]:橡胶混凝土具有硬度高、延伸率大、抗磨损和抗老化性能佳等特点,并将之应用于桥梁伸缩缝等工程中。

同济大学熊杰和郑磊等(2004)将废轮胎橡胶粉取代部分粗骨料制备成橡胶混凝土,发现橡胶混凝土的密度和抗压强度均随橡胶掺量的增加而降低,橡胶粉种类对橡胶混凝土抗压强度影响较大,但并非颗粒越大,强度降低越多^[31]。

北京工业大学李锐(2005)通过试验发现^[32],橡胶粉表面用 PVA 和硅烷偶联剂处理能够显著提高橡胶混凝土的抗压强度、韧性和抗疲劳性能。李锐还用 SEM 观测橡胶混凝土的微观结构,证实了偶联剂处理橡胶粉能够提高水泥基体与胶粉的界面粘结强度。

广东省建筑材料研究院于利刚和华南理工大学刘岚、余其俊(2006)研究表明^[33],在混凝土中掺加废橡胶粉可以有效改善收缩性能,提高韧性、抗冲击性能、抗疲劳性能,通过对橡胶粉进行预处理或表面改性,可以大幅降低其对混凝土强度的影响。

华侨大学何政和严捍东(2006)试验结果表明:废胶粒(粉)种类对轻质水泥砂浆强度无较大影响。在相同掺量下,胶粉越细,砂浆强度越高。但随胶粒(粉)掺量增加,砂浆抗压强度呈下降趋势^[34]。

天津大学亢景付和张平祖(2006)研究发现,在水泥净浆中掺入橡胶粒,可延迟试件的开裂时间,提高抗裂性,当橡胶粒的掺量在 20%~50%时,延迟开裂效果最显著;在砂浆试件中掺入橡胶粒,可显著提高其弯曲变形性能,试件破坏形式为延性破坏,破坏时的极限变形值比基准试件大得多,并且随着橡胶粒掺量的增加而增大^[35]。

4 橡胶混凝土的耐久性能

从上世纪中叶开始,混凝土的耐久性越来越受到人们的广泛关注。研究橡胶混凝土,同样离不开耐久性问题。

哈佛大学 Huynh H 和 Raghavan D(1997)将橡胶置于高碱溶液中 4 个月,发现其密度、体积、和抗拉强度未有改变,认为橡胶粉不会明显影响混凝土的耐久性^[19]。

美国北卡罗来纳州立大学 Savas B Z(1995)将水泥重量的 10%、15%、20%和 30%的橡胶颗粒掺入混凝土中,结果表明:掺加 10%和 15%的橡胶混凝土的耐久性系数在 300 个冻融循环后比空白混凝土提高了 60%,但当橡胶掺量为 20%和 30%时,耐久性不能满足 ASTM 标准要求^[36]。

英国丹迪大学(University of Dundee) Paine K A 和 Dhir R K 等(2002)试验研究发现橡胶混凝土的抗冻性优于普通混凝土,与掺入引气剂的混凝土相当,认

为橡胶粉可以作为固体引气剂而存在,且能保证其在混凝土中分布的稳定性及均匀性,从而提高了混凝土抗冻性^[37]。

北京工业大学张金喜(2004)通过室内实验结果发现^[38],掺有废橡胶粉的沥青混凝土的沥青用量可以减少,同时弹性增加,耐水性、抗飞散剥离和抗滑等性能均得到改善,当废橡胶粉掺量达到 9.4% (质量分数)时,沥青混凝土具有更优的抗冻性能。

东南大学张亚梅和陈波、陈胜霞等(2004~2005)对橡胶混凝土的耐久性进行了较多研究,取得以下结论^[9, 39, 40]:

1) 与掺引气剂的混凝土相比,掺橡胶粉能够避免混凝土在搅拌、振动、运输、浇灌和捣实过程中,产生气泡而导致混凝土的不稳定性,可以代替引气剂以改善混凝土的抗冻性。掺量在 10%以下时,掺橡胶粉比掺橡胶颗粒对改善混凝土抗冻性能的效果要好,140 μm 橡胶粉优于引气剂,3~4 mm 橡胶颗粒则与引气剂效果相当。

2) 当橡胶粉(颗粒)的掺量控制在 10%以下时,可以改善混凝土的抗渗性能,但当橡胶粉(颗粒)掺量再增加时,抗渗性能会逐渐降低,橡胶粉与橡胶颗粒对抗渗性能的改善效果差别不大。

3) 橡胶混凝土长期浸泡在水或复合盐溶液中的性能与普通混凝土相当,但在浸一烘循环作用下,橡胶混凝土的性能随循环次数的增加逐渐劣化,复合盐溶液的作用又进一步加剧了橡胶混凝土性能的劣化,因此认为橡胶混凝土不宜应用于长期处于干湿交替、干热或有硫酸盐腐蚀的环境中。

4) 橡胶粉加入到混凝土后,减少氯离子渗透,使得混凝土的抗氯离子渗透性增强。掺加碱后,改善了橡胶的界面情况,从而改善了橡胶与混凝土基体之间的粘结,与混凝土结合成一个比较稳定的结构整体,界面变得比较牢固,使混凝土结构比较密实,从而进一步提高了混凝土的抗氯离子渗透性。

天津大学朱涵、胡鹏、欧兴进、王开惠等(2003~2006 年)进行了不同橡胶粉型号和掺量的橡胶混凝土的耐久性试验,结果表明^[41~44]:

(1) 橡胶混凝土的抗渗性能较普通混凝土有较大的提高。通过测试浸泡溶液的 pH 值发现,随着橡胶掺量的增加,盐溶液中氢氧化钙的溶出量减少,可见掺入橡胶集料改善了混凝土试件的抗渗性、密实性,当掺量为 50 kg/m^3 时,其抗渗性能最好,掺量低于或高于 50 kg/m^3 ,渗水高度或渗透系数都将增大。

(2) 橡胶混凝土具有很低的氯离子渗透性。28 d 电量值均小于 1 000 C,且导电量随橡胶掺量增加而减少。

(3) 10%和 12%橡胶粉掺量的混凝土试件较基准

混凝土试件的抗折抗腐蚀系数均有所提高,10%橡胶掺量的抗压抗腐蚀系数较基准混凝土也有所提高。

5 橡胶混凝土的其他性能

5.1 抗冲击性能

许多研究都报道了橡胶混凝土的抗冲击性能增加。土耳其 Eskişehir Osmangazi 大学 Ilker Bekir Topcu 和 N Avcular(1997)采用粒径为 1.7 mm 和 2.2 mm 的橡胶颗粒,取代粗集料的百分率为 15%、30%和 45%,制成 $\phi 150 \times 300$ 的橡胶混凝土试件,进行落锤试验,发现掺橡胶有利于提高混凝土的抗冲击性能,尤其是掺入较大的橡胶颗粒,对混凝土抗冲击性能提高更多^[45]。文献[11、13、15、28]也有类似结论,认为橡胶混凝土抗冲击性能提高之主要原因在于材料吸收能量的能力提高。

5.2 阻尼性能

材料的阻尼是衡量材料减振性能的主要指标。橡胶混凝土的阻尼性能如何,目前研究结论并不一致。美国马里兰大学帕克分校 Dimitrios G. Goulias 和 Al-Hosain Ali(1997)认为随着橡胶掺量的增加,混凝土的阻尼比、动弹性模量和刚度降低^[46]。南华大学陈振富和柯国军等(2004)的研究结果则与文献[46]的结论相反^[47],他们采用自由振动法测试得到了橡胶混凝土小变形阻尼比的基础性数据,试验结果表明:混凝土的阻尼比随橡胶掺量的增加而增大,橡胶粉重量掺量在 0.5%~2.5%时,混凝土阻尼系数可提高 50%~60%,但是提高幅度随橡胶粉掺量变化不大,当橡胶粉掺量超过 2.5%后,混凝土阻尼系数随橡胶粉掺量增大而快速增大,提高了 1.3~2.3 倍,橡胶粉掺量在 4.5%左右时,可获得阻尼比较高的混凝土。天津大学许静和朱涵等(2005)采用自由衰减法对两组橡胶混凝土及普通混凝土小型悬臂梁的阻尼比进行了测定^[48],试验结果显示:测出的橡胶混凝土阻尼比较普通混凝土提高了很多,表明在混凝土掺入橡胶粉可增加阻尼值。

5.3 隔声性能

固体声能在传统建筑材料中的衰减很小,且传播速度很快,它可以传到离声源很远的地方。连续、厚重而又坚硬的混凝土楼板隔空气噪声好,隔撞击声(固体噪声)的效能却很差。研究建筑隔声功能材料是发展生态建筑之需求,国内外学者将橡胶粉掺入到混凝土中,研制出了新型的生态环境材料—具有建筑隔声功能的混凝土。

英国伯明翰大学 N L fattuhi 和 L A Clark(1996)研究还发现,低密度的橡胶改性水泥材料在制造隔热和隔音材料方面很有优势^[16]。同济大学史巍和张雄等(2005)试验发现^[49],随着橡胶粉掺量的增加,水泥砂浆的动弹性模量和固有频率降低,超声波在其中的传播速

度减小,即水泥砂浆的隔声功能随橡胶粉掺量的提高而增强,当橡胶粉掺量为 25%(体积分数)时,水泥砂浆的隔声功能最佳,其固有频率与普通水泥砂浆相比降低了 17%,而动弹性模量则降低了 40%,用氢氧化钠饱和溶液处理的橡胶粉,其对水泥砂浆隔声功能的影响基本与未处理橡胶粉一样。中南大学龙广成和谢友均等(2005)分析研究也表明,与传统水泥混凝土相比,橡胶混凝土在吸音方面具有明显的优越性^[50]。

6 存在的问题

上述国内外文献报道以及其他相关研究成果增进了人们对橡胶混凝土的认识,但是,作为一种新型的混凝土材料,尚处于探索性研究初期,如果要像普通混凝土一样推广应用,还有以下问题亟待解决:

6.1 材料方面

1) 橡胶粉与水泥浆体界面粘结。橡胶混凝土是由水泥浆体、集料和橡胶粉组成的多相复合材料,复合材料各相是通过界面结合成整体,橡胶粉、集料和水泥浆体之间的界面区是复合材料内部结构中的薄弱环节,决定着复合材料的诸多性能。橡胶粉是有机高分子材料,而集料和水泥浆是无机材料,两者之间表面能相差比较大,故结合面较脆弱。要改善橡胶混凝土的整体性能,必须改善橡胶粉与浆体之间的粘结力。

如前述,较多研究人员采用偶联剂、有机硅烷、酸碱或其他改性剂处理界面问题,但又衍生出改性剂品种和掺量控制非常严格、工艺复杂或成本很高等新问题。

2) 耐久性。虽然有些学者对橡胶混凝土耐久性进行了研究,但耐久性涉及的范围确实太广阔,即使对于诞生已 100 多年的普通混凝土,其耐久性依然是国内外的研究热点和难点,所以混凝土家族的年轻成员—橡胶混凝土的抗渗性、抗冻性、抗碳化性能、耐磨性、环境介质侵蚀、碱骨料反应、钢筋锈蚀、以及上述多重破坏因素耦合作用下材料劣化特性的分析方法等耐久性问题更需全面深入研究。

3) 隔热和隔声性能。开展橡胶混凝土的隔热和隔声性能的研究,以推广该材料在建筑节能材料和吸声材料领域的应用,满足生态建筑发展之需求。

4) 橡胶混凝土砌块的研究。橡胶混凝土砌块制备技术、物理化学性能及环保性能方面暂未见公开文献报道。近几年来,我国混凝土砌块应用得到了飞速发展,每年全国砌块总产量近亿 m^3 。如前述,橡胶混凝土具有轻质、保温隔热、隔音等特点,如果做成橡胶混凝土砌块,不仅仅大量消耗废旧轮胎这种环境公害,更加重要的是产生了一种新型生态功能墙体材料。

6.2 结构方面

已有文献从材料层面对橡胶混凝土研究相对较多,而从结构层面对其研究较少,橡胶混凝土如果用作

结构混凝土材料,则需研究其梁、板、柱、墙构件、节点、框架结构的多种性能,建立其本构关系模型、多轴强度理论、以及一系列的结构设计方法。

6.3 施工技术方面

由于橡胶细集料具有体积压缩性,而传统的单位体积法等配合比设计方法对橡胶混凝土不一定适用,急需建立适合于橡胶混凝土的配合比设计方法。

在施工实践中,由于橡胶粉比重较轻,导致在振动成型时,橡胶粉上浮,使得试件内部橡胶粉分布不均匀。另外,橡胶混凝土的坍落度与橡胶粉的粒径、种类等关系复杂,其工作性能难以稳定控制,这也需要进一步研究。

6.4 社会和经济方面

我国每年废旧轮胎退役量约 100 万 t,混凝土年使用量达数亿 m³,理论上讲,只要在每 m³ 混凝土里加入 1 kg 橡胶粉,就可以消耗大部分旧轮胎。但实际上问题没有那么简单,混凝土中是否加入橡胶粉,不仅仅取决于如何解决旧轮胎的废弃堆置难题,更取决于合理的社会政策引导和客观的市场经济准则。作为一种新型的土木工程材料,从研发到技术成熟需要较长时间,如何制定出可操作性的政策来加速该材料的研发与应用,以及让业主和设计单位接受该材料,这是需政府决策部门和科学研究、工程技术人员共同努力的问题。

7 结束语

进入 21 世纪,保护地球环境,寻求与自然的和谐,走可持续之路成为全世界共同关心的课题。混凝土今后的发展方向必然是既要满足现代人的需求,又要考虑环保因素。经过国内外学者 10 多年的初步研究,橡胶混凝土在环境保护与土木工程应用方面已呈现诸多优点,它不仅能够满足作为结构材料和功能材料之要求,还可以减少废旧橡胶给地球环境带来的负荷和不良影响,能够与自然协调,与环境共生。诚然,该材料还存在一些欠缺,但正如普通混凝土经历了 100 多年的发展,橡胶混凝土也急需有社会责任感的广大科研和工程技术人员共同密切关注,使其工程特性日益完善,尽早推广应用,以利于资源、环境、经济可持续发展以及建设和谐社会的战略目标之成功实现。

参考文献:

- [1] 何永峰,刘玉强. 胶粉生产及其应用——废旧橡胶资源化新技术[M]. 北京:中国石化出版社,2001.
- [2] PIETER J H VAN BEUKERING, MARCO A JANSSEN. Trade and recycling of used tyres in western and eastern europe [J]. Resources Conservation and Recycling, 2001 (33): 235-265.
- [3] 孟晶. 以新技术开发贯穿废橡胶利用始终[EB/OL]. <http://www.xiangjiaow.com/Article/Print.asp?>

ArticleID = 6723, 2006-09-05.

- [4] 中国环保产业协会,中国橡胶工业协会联合调研组. 废旧橡胶综合利用和环保调研报告[N]. 中国化工报,2006-09-06.
- [5] 李如林. 我国橡胶粉生产应用现状及发展[J]. 中国橡胶, 2000 (15):15-18.
LI Ru-lin. Production and application status and development of grinded rubbers in China [J]. China Rubber, 2000 (15):15-18(in Chinese).
- [6] RAGHVAN D, HUYNH H, FERRARIS C F. Workability, mechanical properties and chemical stability of a recycled tire rubber-filled cementitious composite [J]. Journal of Materials Science, 1998,33 (7):1 745-1 752.
- [7] 刘刚,方坤河,高钟伟. 高强混凝土的增韧减脆措施研究[J]. 混凝土,2004(5):46-48.
LIU Gang, FANG Kun-he, GAO Zhong-wei. The test to Improve the toughness of high strength concrete [J]. Concrete, 2004(5):46-48(in Chinese).
- [8] ZAHER K, KHATIH and FOUAD M BAYOMY. Rubberized portland cement concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering,1999,11(3):206-213.
- [9] 李红燕. 橡胶改性水泥基材料的性能研究[D]. 南京:东南大学,2004.
- [10] 郭灿贤. 废旧轮胎胶粉改性水泥混凝土及其路用性能研究[D]. 南昌:南昌大学,2006.
- [11] NEIL N ELDIN, AHMED B SENOUCI. Rubber tire particles as concrete aggregate[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1993 5(4):478-496.
- [12] ROSTAMI H, LEPPRE J, SILVERSTRAIM T, et al. Use of recycled rubber tires in concrete[C]. In: Dhir, R. K. (Ed.), Proceedings of the International Conference on Concrete 2000, University of Dundee, Scotland, UK, 1993, 391-399.
- [13] ILKER BEKIR TOPCU. The properties of rubberized concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25 (2):304-310.
- [14] ILKER BEKIR TOPCU. Assessment of the brittleness index of rubberized concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(2): 177-183.
- [15] ILKER BEKIR TOPCU, NURI AVCULAR. Analysis of rubberized concrete as a composite material [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27 (8): 1 135-1 139.
- [16] FATTUHI N L, CLARK L A. Cement-based materials containing shredded scra Ptruck tyre rubber [J]. Construction and building materials, 1996, 10 (4): 229-236.
- [17] TOUTANJI H A. The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates [J]. Cement and Concrete Composites, 1996, 18(2):135-139.
- [18] HUYNH H, RAGHAVAN D, FERRARIS C F. Rubber particles from recycled tires in cementitious

- composite materials [R]. In: National Institute of Standards and Technology Interagency Report (NISTIR) 5850R, 1996, 1-19.
- [19] Huynh H, Raghavan D. Durability of simulated shredded rubber tire in highly alkaline environments [J]. *Advanced Cement Based Materials*, 1997, 6(3): 138-143.
- [20] RAGHAVAN D, HUYNH H. Workability, mechanical properties and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite [J]. *Journal of Materials Science*, 1998, 33: 1 745-1 752.
- [21] SEGRE N, JOEKES I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(9): 1 421-1 425.
- [22] SEGRE N, MONTEIRO P J, SPOSITO G. Surface characterization of recycled tire rubber to be used in cement paste matrix [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, 248(2): 521-523.
- [23] PALOS A, D SOUZA N A, SNIVELY C T, et al. Modification of cement mortar with recycled ABS [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(7): 1 003-1 007.
- [24] A BENAZZOUK, K MEZRED, G DOYEN et al. Effect to rubber aggregates of physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25(7): 711-720.
- [25] RAFAT SIDDIQUE, TARUN R. NAIK. Properties of concrete containing scrap-tire rubber—an overview [J]. *Waste Management*, 2004, 24(6): 563-569.
- [26] F HERNANDEZ-OLIVARES, G BARLUENGA. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(1): 109-117.
- [27] A. TURATSINZE, S. BONNET, J L GRANJU. Mechanical characterizations of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres [J]. *Building and Environment*, 2005, 40(2): 221-226.
- [28] 宋少民, 刘娟红, 金树新. 橡胶粉改性的高韧性混凝土研究 [J]. *混凝土与水泥制品*, 1997(1): 10-12.
SONG Shao-min, LIU Juan-hong, JIN Shu-xin. Study on the rubber powder-modified high toughness concrete [J]. *China Concrete and Cement Products*, 1997(1): 10-12 (in Chinese).
- [29] 陈卫星, 赵文奇, 翁兴中. 废橡胶粉沥青混凝土在机场道面的应用研究 [J]. *空军工程学院学报*, 1999, 19(2): 38-40.
CHEN Wei-xing, ZHAO Wen-qi, WENG Xing-zhong. Application study of waste rubber asphalt concrete applied to airport pavement [J]. *Journal of the Air Force Institute of Engineering*, 1999, 19(2): 38-40 (in Chinese).
- [30] 孙家瑛, 高先芳, 朱武达. 橡胶混凝土研制及物理力学性能研究 [J]. *混凝土*, 2001(10): 30-32.
SUN Jia-ying, GAO Xian-fang, ZHU Wu-da. Development and study on physicomaterial properties of rubber concrete [J]. *Concrete*, 2001(10): 30-32 (in Chinese).
- [31] 熊杰, 郑磊, 袁勇. 废橡胶混凝土抗压强度试验研究 [J]. *混凝土*, 2004(12): 40-42.
XIONG Jie, ZHENG Lei, YUAN Yong. Experimental study on compressive strength of rubberized concrete [J]. *Concrete*, 2004(12): 40-42 (in Chinese).
- [32] 李锐, Yunping Xi. 废橡胶粉改性混凝土的研究 [C]. 第九届全国水泥和混凝土化学及应用技术年论文集, 广州, 2005. 444-449.
- [33] 于利刚, 刘岚, 余其俊. 废橡胶胶粉对砂浆混凝土性能的影响 [J]. *广东建材*, 2006(2): 9-11.
YU Li-gang, LIU Lan, YU Qi-jun. Influence of waste rubbers powder on the performances of concrete and cement mortar [J]. *Guangdong Building Materials*, 2006(2): 9-11 (in Chinese).
- [34] 何政, 严捍东, 王全凤. 废旧胶粒(粉)对轻骨料水泥砂浆强度的影响 [J]. *新型建筑材料*, 2006(2): 8-10.
HE Zheng, YAN Han-dong, WANG Quan-feng. Influence of waste rubbers particle (powder) on the strength of lightweight aggregate cement mortar [J]. *New Building Materials*, 2006(2): 8-10 (in Chinese).
- [35] 亢景付, 张平祖. 废旧轮胎橡胶颗粒对水泥浆和砂浆抗裂性能的影响 [J]. *天津大学学报*, 2006, 39(9): 1 026-1 030.
KANG Jing-fu, ZHANG Ping-zu. Effects of scrap tire rubber on the cracking properties of cement paste and mortar [J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, 39(9): 1026-1030 (in Chinese).
- [36] SAVAS B Z. Freeze-Thaw Durability of Concrete with Ground Waste Tire Rubber [D]. Master's Thesis, Raleigh: NC State University, Department of Civil Engineering, 1995.
- [37] PAINE K A, DHIR R K, MORONEY R, et al. Use of Crumb Rubber to Achieve Freeze/Thaw Resisting Concrete [C]. Proc. Int'l Congress Concrete for Extreme Conditions, (Eds R K Dhir, M J Mc Carthy and M D Newlands), 2002. 485-498.
- [38] 张金喜. 废橡胶作为弹性沥青混凝土路面材料的实验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2004, 7(4): 396-401.
ZHANG Jin-xi. Feasibility of waste rubber as aggregate of elastic asphalt concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2004, 7(4): 396-401 (in Chinese).
- [39] 陈波, 张亚梅, 陈胜霞, 等. 橡胶混凝土性能的初步研究 [J]. *混凝土*, 2004(12): 37-39.
CHEN Bo, ZHANG Ya-mei, CHEN Sheng-xia, et al. Fundamental research of properties of rubberized concretes [J]. *Concrete*, 2004(12): 37-39 (in Chinese).
- [40] 张亚梅, 陈胜霞, 高岳毅. 浸-烘循环作用下橡胶水泥混凝土

- 土的性能研究[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(6): 665-671.
- [41] Han Zhu, Norasit Thong-On, Xiong Zhang. Adding crumb rubber into exterior wall materials[J]. Waste Management and Research, 2002, 20(5): 407-414 (in Chinese).
- [42] 胡鹏, 朱涵, 王旻. 橡胶集料混凝土渗透性能的研究[J]. 天津理工大学学报, 2006, 22(4): 8-12. HU Peng, ZHU Han, WANG Min. Experimental study on permeability of crumb rubber concrete [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2006, 22(4): 8-12 (in Chinese).
- [43] 欧兴进, 朱涵. 橡胶集料混凝土氯离子渗透性试验研究[J]. 混凝土, 2006(3): 46-49. OU Xing-jin, ZHU Han. Experimental study on chloride ion permeability of crumb rubber concrete [J]. Concrete, 2006(3): 46-49 (in Chinese).
- [44] 王开惠, 朱涵, 祝发珠. 氯盐侵蚀环境下橡胶集料混凝土的力学性能研究[J]. 长沙交通学院学报, 2006, 22(4): 38-42. WANG Kai-hui, ZHU Han, ZHU Fa-zhu. Investigation on mechanics performances of crumb rubber concrete under chlorine salt erosion [J]. Journal of Changsha Communications University, 2006, 22(4): 38-42 (in Chinese).
- [45] ILKER BEKIR TOPCU, N AVCULAR. Collision behaviors of rubberized concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(12): 1893-1898.
- [46] DIMITRION G. GOULIAS and Al-HOSAIN Ali. Non-Destructive Evaluation of Rubber Modified Concrete [C]. In: Proceedings of a Special Conference, ASCE, New York, 1997. 111-120.
- [47] 陈振富, 柯国军, 胡绍全, 等. 橡胶混凝土小变形阻尼研究[J]. 噪声与振动控制, 2004(3): 32-34. CHEN Zhen-fu, KE Guo-jun, HU Shao-quan, et al. Study on damping of rubber powder concrete in small deformation [J]. Noise and Vibration Control, 2004(3): 32-34 (in Chinese).
- [48] 许静, 朱涵, 刘春生, 等. 橡胶集料混凝土阻尼比的初步试验研究[J]. 混凝土, 2005(11): 40-42. XU Jing, ZHU Han, LIU Chun-sheng, et al. Preliminary experimental studies on damping ratio of crumb rubber concrete [J]. Concrete, 2005(11): 40-42 (in Chinese).
- [49] 史巍, 张雄, 陆沈磊. 橡胶粉水泥砂浆隔声功能研究[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5): 553-557. SHI Wei, ZHANG Xiong, LU Shen-lei. Sound insulation function of cement mortar modified with crumb rubber [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5): 553-557 (in Chinese).
- [50] 龙广成, 谢友均, 李建. 废旧橡胶颗粒改性水泥混凝土及其工程应用[J]. 粉煤灰, 2005(2): 3-4. LONG Guang-chen, XIE You-jun, LI Jian. Modified cement concrete mixed with waste rubber grain and its application in engineering [J]. Coal Ash China, 2005(2): 3-4 (in Chinese).

(编辑 王秀玲)

(上接第 123 页)

2) 由于微生物之间相互依赖的特性, 实验并不能将各微生物体系完全的分离开来。水解与酸化过程是相互作用, 由相同的微生物种群完成的, 所以这两个过程是不可以完全分割的; 而为了保持较低的氢分压, 产乙酸菌需要嗜氢甲烷菌的活动, 因此, 产乙酸过程与产甲烷过程也并不能完全分割开来。

参考文献:

- [1] G LETTINGA. Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future[J]. Wat Sci Technol, 1997, 35(10): 5-12.
- [2] 黄永恒, 王建龙. 折流板厌氧反应器的工艺特性及其应用[J]. 中国给水排水, 1999, 15(7): 18-20. HUANG Yong-heng, WANG Jian-long. The technological feature of ABR and its application [J]. China Water and Wastewater, 1999, 15(7): 18-20.
- [3] 吕炳南, 陈志强. 污水生物处理新技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [4] 束琴霞, 沈耀良, 陈坚. ABR 反应器运行稳定性的研究[J]. 环境工程, 2004, 22(5): 16-18. SHU Qing-xia, SHENG Yao-liang, CHENG Jian. Study on the operational stability of ABR [J]. environment engineering, 2004, 22(5): 16-18.
- [5] 任南琪, 马放. 产酸发酵微生物生理生态学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [6] PERTER N HOBSON, ANDREW D WHEATLEY. Anaerobic Digestion—Modern Theory and Practice[M]. 1994.
- [7] R. E. 斯皮思. 工业废水的厌氧生物技术[M]. 李亚新译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

(编辑 陈蓉)