

废弃电路板非金属粉末作为水泥 增强材料的试验研究

谢俊¹, 刘卫东¹, 杨琴华², 霍晓凡¹

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 伟翔环保科技发展(上海)有限公司, 上海 201821)

摘要: 针对废弃电路板非金属粉末难以处理的问题,在分析了废弃电路板非金属粉末组成成分的基础上,提出了将其作为一种增强材料掺入到混凝土和砂浆中以增强混凝土和砂浆的强度。结果表明:废弃电路板非金属粉末对混凝土以及砂浆的早期抗压强度提高明显,A种细粉末状废弃电路板非金属粉末在掺量为16.5%时,3 d早期强度提高22%。对砂浆28 d抗压强度也有所提高,故非金属粉末可以作为水泥增强材料。

关键词: 废弃电路板; 非金属粉末; 水泥增强材料; 抗压强度

中图分类号:TV431.9

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)05-0155-05

Experiment on taking waste circuit board nonmetallic powder as cement augmentation material

XIE Jun¹, LIU Weidong¹, YANG Qinhua², HUO Xiaofan¹

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Weixiang Environmental Technology Development Co., Ltd., Shanghai 201821, China)

Abstract: In view of the problem that waste circuit board nonmetallic powder is difficult to deal with, based on the analysis of composition of waste circuit board nonmetal powder, the paper proposed to take it as a kind of reinforced material which is mixed into concrete and mortar. The experiment results show that the circuit board nonmetallic powder can increase obviously the early compressive strength of concrete and mortar, when non-metallic powder of one kind of fine powdery waste printed circuit boards is mixed at 16.5%, the early compressive strength after three days increased by 22%. The compressive strength of mortar after also inhence after 28 days, so the nonmetallic powder can be used as a kind of cement reinforced material.

Key words: waste circuit board; nonmetallic powder; cement reinforced material; compressive strength

电路板作为最活跃的电子元件,几乎包含在大部分电子产品中,并且在电脑、大型通讯设备、军工产品中所占的比例很高,废弃电路板来源于报废的电子产品和印制电路板在生产加工过程中产生的边角料和瑕疵产品^[1]。根据2010年联合国环境署数据,全球电子废物产生量约4 000万t/a,中国已成为世界第二大电子废弃物产生国,仅次于美国。根据工信部数据:2009年我国手机、电脑、彩电、家用空调、家用电冰箱、家用洗衣机的总产量已达11.8亿台之多,增长幅度明显^[2]。根据现有的技术,我们已经能将废弃电路板上的贵金属进行回收利用

用,而废弃电路板非金属部分由热固性塑料组成,主要成分为树脂和各类纤维的混合物,由于它们稳定性高、不易软化,并且热值低,焚烧存在二次污染,堆积或填埋会占用大量的土地资源,无法自然降解,并对环境形成了威胁,这无疑是令人头痛和亟待解决的难题^[3-5]。因此,本文提出了将废弃电路板非金属粉末掺入混凝土和砂浆中以增强混凝土和砂浆的强度。目前,国内外已有学者在研究如何利用好这些废弃电路板非金属材料。在对废弃电路板非金属粉末的挥发性和浸出毒性及浸出规律的研究表明,物理填充法以实现非金属粉的资源化是安全环保的

收稿日期:2014-02-25; 修回日期:2014-06-17

基金项目:上海教育发展基金联盟计划(LM201235)

作者简介:谢俊(1993-),男,湖南邵阳人,硕士研究生,研究方向:新型建材。

通讯作者:刘卫东(1961-),男,山东济南人,硕士生导师,教授,从事新型建材方面的教学与研究工作。

处置方法^[6]。将废弃电路板非金属粉末作为原料配制水泥砂浆,水泥砂浆中的重金属离子浸出量很低,不会对环境产生不良影响^[7]。非金属粉末与钢筋、水泥、砂子等传统建筑材料相比具有质轻、高强的优点,并且粉末的颗粒度均匀,含有大量杂乱的 GF 使得它具有很好的增强效果^[8]。本文试验在混凝土和砂浆以及聚合物水泥浆中添加 2 种废弃电路板非金属粉末,研究其对混凝土以及砂浆强度的影响,将废弃电路板非金属粉末用于混凝土以及砂浆,既提高混凝土以及砂浆的性能,同时也提供了废弃电路板非金属粉末处理难题的解决之道,获取良好的社会与经济效益。

1 试验材料及仪器

水泥采用海螺牌 32.5 号普通硅酸盐水泥;粒径 20~40 mm 人工碎石;细黄砂;聚合物为天然乳胶;废弃电路板非金属粉末(以下简称 PCB 非金属粉末)由伟翔环保科技发展(上海)有限公司提供,其中 A 种 PCB 非金属粉末为研磨成细粉状的非金属粉末,B 种 PCB 非金属粉末为研磨成 1~5 mm 长度不等的纤维状非金属粉末,分别见图 1、2。



图 1 A 种 PCB 细粉末



图 2 B 种 PCB 纤维状粉末

根据国家计算测试中心的检测报告,废弃电路板非金属材料详细化学元素组成如表 1 所示,由表 1 可知,PCB 非金属粉末具有较高含量的硅元素,达 10.36%,而活性硅有利于水泥的水化反应。同时,PCB 非金属粉末中残留的重金属含量较低,处于安全范围内,这进一步证实了将 PCB 非金属粉末用于

混凝土和砂浆的安全可行性。
使用微机控制电液伺服万能试验机进行单轴抗压强度试验,试验机型号为 SHT4106。

表 1 非金属粉末化学元素组成 %

元素	C	Ca	O	Cu	Al	Mg	Si	Fe
含量	44.74	4.76	30.84	1.02	6.99	0.60	10.36	0.54

2 试验方案及方法

分别制作 100 mm×100 mm×100 mm 混凝土立方体试件和 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 砂浆立方体试件,每组试件掺入不同掺量的两种 PCB 非金属粉末;制作掺聚合物的水泥 PCB 非金属粉末混合浆体试件,亦采用 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 规格的试模。混凝土和砂浆分别制作 3 d 和 28 d 两组试件,添加聚合物的水泥 PCB 非金属粉末试件制作一组 28 d 的试件。

制作方法:先将细骨料拌合干拌 2 min,拌合均匀,再加入相应量的非金属粉再搅拌 2min 直至均匀,然后加水拌匀。浇筑在涂有润滑油的试模内,分两层浇筑,每层用振捣棒自容器边缘开始向中心振捣 25 次,两次振捣完成后,然后轻轻将容器摇动或敲击 5~6 次,使试件表面平整。然后在自然条件下放置 1 d 后拆模,放置在水池中养护。混凝土和砂浆的配合比以及实验详细分组情况分别见表 2 和 3,其中粉末的掺量值为粉末与水泥的质量比,掺聚合物的水泥 PCB 非金属粉末混合浆体试件配合比及分组情况见表 4。

表 2 掺 PCB 非金属粉末的混凝土试件分组方案 %

编号	水:水泥:砂:石	A 种 PCB 粉末
A ₁	0.44: 1 : 1.42 : 3.17	5.5
A ₂	0.44: 1 : 1.42 : 3.17	16.5
A ₃	0.44: 1 : 1.42 : 3.17	27.5
A ₄	0.44: 1 : 1.42 : 3.17	38.5
A ₅	0.44: 1 : 1.42 : 3.17	49.5
A ₀	0.44: 1 : 1.42 : 3.17	0

编号	水:水泥:砂:石	B 种 PCB 粉末
B ₁	0.44: 1 : 1.42 : 3.17	5.5
B ₂	0.44: 1 : 1.42 : 3.17	16.5
B ₃	0.44: 1 : 1.42 : 3.17	27.5
B ₄	0.44: 1 : 1.42 : 3.17	38.5
B ₅	0.44: 1 : 1.42 : 3.17	49.5
B ₀	0.44: 1 : 1.42 : 3.17	0

表 3 掺 PCB 非金属粉末的砂浆试件分组方案			%
编号	水:水泥:砂:石	A 种 PCB 粉末	
S _{A1}	1.08 : 1: 5.93	5.5	
S _{A2}	1.08 : 1: 5.93	11.0	
S _{A3}	1.08 : 1: 5.93	16.5	
S _{A4}	1.08 : 1: 5.93	22.0	
S _{A5}	1.08 : 1: 5.93	27.5	
S _{A0}	1.08 : 1: 5.93	0	
编号	水:水泥:砂:石	B 种 PCB 粉末	
S _{B1}	1.08 : 1: 5.93	5.5	
S _{B2}	1.08 : 1: 5.93	11.0	
S _{B3}	1.08 : 1: 5.93	16.5	
S _{B4}	1.08 : 1: 5.93	22.0	
S _{B5}	1.08 : 1: 5.93	27.5	
S _{B0}	1.08 : 1: 5.93	0	

表 4 掺聚合物的水泥 PCB 非金属粉末混合浆体试件分组			
编号	水泥:A 种 PCB 粉末: 聚合物(质量比)	编号	水泥:B 种 PCB 粉末: 聚合物(质量比)
T _{A1}	2: 2: 1	T _{B1}	2: 2: 1
T _{A2}	2: 1: 1	T _{B2}	2: 1: 1

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

掺 PCB 非金属粉末的混凝土和砂浆立方体试件 3 d 和 28 d 抗压强度测试结果见表 5 和 6,掺聚合物的水泥 PCB 粉末试件抗压强度结果见表 7,不同掺量等级的 A、B 两种 PCB 非金属粉末试件强度变化折线图见图 3 ~6 所示。

表 5 掺 PCB 非金属粉末的混凝土试件抗压强度值								MPa
编号	3 d 抗压强度			强度取值	28 d 抗压强度			强度取值
	1	2	3		1	2	3	
A ₀ (B ₀)	6.80	5.91	5.94	5.94	21.68	21.07	20.89	21.21
A ₁	6.23	6.42	5.68	6.23	21.81	21.21	20.35	21.12
A ₂	7.33	7.35	7.09	7.26	21.01	21.53	21.78	21.44
A ₃	6.16	5.63	6.42	6.07	22.73	22.69	22.65	22.69
B ₁	7.24	6.83	6.77	6.95	21.88	22.76	22.21	22.28
B ₂	6.75	8.73	6.89	6.75	23.76	22.34	22.25	22.79
B ₃	6.08	6.52	6.66	6.42	18.11	19.67	20.46	19.41

表 6 掺 PCB 非金属粉末的砂浆试件抗压强度值								MPa
编号	3 d 抗压强度			强度取值	28 d 抗压强度			强度取值
	1	2	3		1	2	3	
S _{A0} (S _{B0})	1.17	1.11	1.12	1.13	2.56	2.61	2.53	2.56
S _{A1}	1.04	0.93	1.12	1.03	2.76	2.55	2.73	2.68
S _{A1}	1.18	1.21	1.20	1.20	2.88	2.77	2.83	2.83
S _{A1}	1.45	1.32	1.36	1.37	2.11	2.18	2.21	2.18
S _{A1}	1.25	1.32	1.20	1.25	2.04	2.07	1.66	2.04
S _{A1}	0.75	0.78	0.65	0.73	1.26	1.32	1.42	1.32
S _{B1}	1.38	1.34	1.57	1.38	2.60	2.78	2.66	2.67
S _{B2}	1.24	1.22	1.23	1.23	2.58	2.53	2.31	2.47
S _{B3}	1.32	1.20	1.17	1.22	2.64	2.66	2.94	2.74
S _{B4}	1.20	1.00	1.18	1.18	2.41	2.49	2.52	2.47
S _{B5}	1.05	1.04	0.94	1.02	2.28	1.75	2.03	2.02

表 7 掺聚合物的水泥 PCB 非金属粉末混合浆体试件强度值 MPa

编号	3 d 抗压强度			强度 取值	编号	28 d 抗压强度			强度 取值
	1	2	3			1	2	3	
T _{A1}	14.14	13.83	13.72	13.89	T _{B1}	11.45	10.90	11.22	11.19
T _{A2}	33.23	33.88	32.67	33.26	T _{B2}	23.10	22.58	22.48	22.72

当掺量为 38.5% 和 49.5% 时,混凝土立方体试件在搅拌过程中发现粉末和水泥浆团结,混凝土和易性变差,试件最终呈蜂窝状,不能成型,因此在此种试验配合比下,38.5% 的掺量已达到最大值。

3.2 试验数据分析

掺聚合物的水泥 PCB 非金属粉末混合浆体强度结果(表 7),从数据变化分析可知,对于两种 PCB 非金属粉末,在聚合物掺量一定的条件下,当水泥和 PCB 非金属粉末混合质量比为 1: 1 时,试件抗压强度明显低于掺量比为 2: 1,这是由于试件中水泥含量的急剧减少所致。掺 A 种粉末的试件强度高于掺 B 种粉末的试件,分析主要可能有两个原因,首先 A 种粉末为细粉状,B 种粉末为纤维状,当粉末掺量过大时,纤维状的 B 种粉末容易引起微小裂缝和空隙,降低试件强度。另一方面,由于 PCB 非金属粉末中硅元素含量较高,其活性成分可以促进水泥的水化反应,研磨成细粉状的 A 种粉末,其与水泥颗粒接触更充分,效果较明显。

随着掺量的增加而降低。而掺 B 种粉的试件在掺量为 5.5% 时,强度增强 17%,达到峰值,当掺量继续增加,试件强度呈下降趋势。由数据可以看出,PCB 非金属粉末能提高混凝土早期强度。②图 4 为 28 d 龄期的混凝土抗压强度变化折线图,A 种粉掺量为 5.5% 时,试件强度有所下降,但掺量为 16.5% 和 27.5% 时逐渐上升,尤其当掺量为 27.5% 时,强度增强为 7%。B 种粉掺量为 16.5% 时,强度增强 7.4%,随后随着掺量增加试件强度降低,由数据可知 PCB 非金属粉末对混凝土 28d 龄期强度影响较小。

由图 3 和 4 曲线变化趋势可知,A 和 B 两种 PCB 非金属粉末对混凝土 3 d 早期强度影响比 28 d 强度影响大,这反映出 PCB 非金属粉末中硅元素活性成分对水泥水化反应的影响主要在早期,能够提高混凝土的早期强度。当掺量为 27.5% 时,掺 B 种 PCB 非金属粉的试件 28 d 强度下降,这是由于纤维状粉末掺量达到一定限值时,纤维状的 PCB 非金属粉末会在混凝土中形成的微小裂缝空隙,随着时间推移,裂缝中的积存的水与水泥继续反应,这样形成的空隙逐渐增大,这种不利影响大于 PCB 非金属粉中活性成分对水泥水化反应的增强作用,最终使试件强度降低。在试验过程中发现,当掺量为 38.5% 时,出现粉末与水泥浆团结现象,试件不能成型,这主要由于 PCB 非金属粉末在掺量过大的时候会吸附过多的水,导致混凝土和易性变差,因此在此种试验配合比下,38.5% 的掺量已达到最大值。

PCB 非金属粉末对砂浆强度影响分析:①图 5 为掺 PCB 非金属粉末的 3d 龄期的砂浆试件抗压强度折线图,掺 A 种粉末的试件在掺量为 5.5% 时试件强度有所下降,但之后强度逐渐上升,当粉末掺量达到 16.5% 时,强度达到峰值,提高 21%,然后随着掺量增加,强度逐步下降。掺 B 种粉末的试件在掺量为 5.5% 时,强度提高 22%。②图 6 为 28 d 龄期的砂浆试件强度变化趋势,其中掺 A 种粉末的试件在掺量为 11.0% 时强度提高 10%,但掺量为 16.5% 以后强度开始下降。掺 B 种粉末的试件,在掺量为 16.5% 时有所上升,但增强幅度较小,掺量为 22.0%

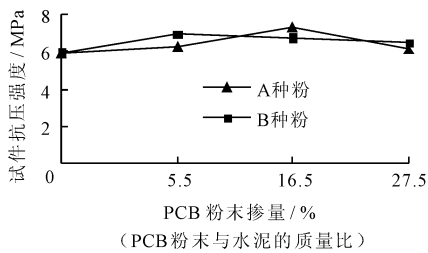


图 3 混凝土 3 d 抗压强度

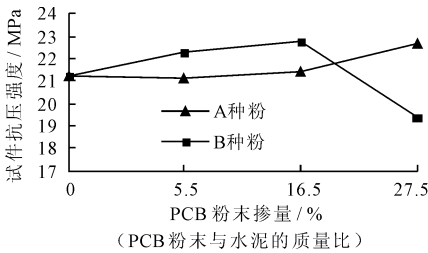


图 4 混凝土 28 d 抗压强度

PCB 非金属粉末对混凝土强度影响分析:①由图 3 曲线变化趋势和表 5 数据可知,当非金属粉掺量为 0 时,试件 3d 龄期强度为 5.94 MPa,当 A 种粉掺量为 5.5% 时,试件强度提高 5%,当掺量为 16.5% 时,强度提高 22%,达到峰值,随后试件强度

以后,强度开始下降。

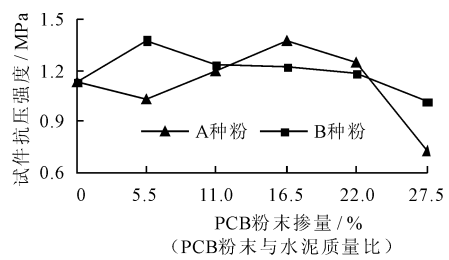


图 5 砂浆 3 d 抗压强度

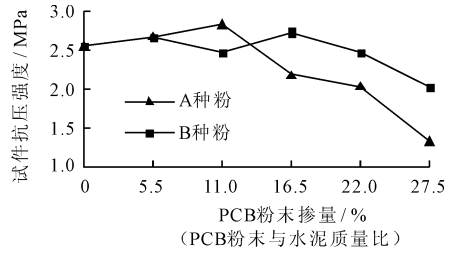


图 6 砂浆 28 d 抗压强度

由图 5 和 6 曲线趋势可知,两种 PCB 非金属粉末对砂浆试件 3d 早期强度的提高比 28d 龄期强度更为明显,这进一步证明了 PCB 非金属粉末中的硅元素活性成分对水泥水化反应的影响主要在早期,并且纤维状的 PCB 非金属粉末,其产生的空隙裂缝影响远小于砂浆自身的空隙影响,同时,由于其纤维状粉末起到加强筋作用,纤维乱向分布,能克服骨料的滑移,阻碍裂缝的产生与发展,所以在一定掺量限值下能提高试件强度。掺 A 种粉末时,在掺量为 5.5% 时,试件强度下降,根据试验数据综合比较分析,这可能由于试件制作的时候未能充分捣实所导致的误差。当掺量超过相应的限值时,试件强度均呈现下降状态,由于 PCB 非金属粉末及其所产生的孔隙在混凝土中所占有体积比率增大,破坏了水泥水化反应所形成的网络结构,使得试件强度降低。

4 结 语

通过试验结果可以得出:
(1)PCB 非金属粉末对混凝土强度影响:两种 PCB 非金属粉末对混凝土早期强度影响较大,当 A

种 PCB 非金属粉末掺量为 16.5% 时,试件早期强度提高 22%。B 种粉末在掺量为 5.5% 时,试件早期强度提高 17%。当两种粉末添加量达 38.5% 时,试件呈蜂窝状,不成型,因此在此种试验配合比下,38.5% 的掺量已达到最大值。

(2)PCB 非金属粉末对砂浆强度影响:两种 PCB 非金属粉末均能提高砂浆试件早期强度,A 种 PCB 非金属粉末在掺量为 16.5% 时,试件早期强度提高 21%。B 种 PCB 非金属粉末在掺量为 5.5% 时,试件早期强度提高 22%。两种 PCB 非金属粉末对砂浆 28 d 龄期影响相对较小,A 种 PCB 非金属粉末在掺量为 11.0% 时,试件强度提高 10%。

(3)掺聚合物的 PCB 非金属粉末和水泥的混合浆试件,其中掺 A 种 PCB 非金属粉的试件强度性能更优。

参考文献:

[1] 温雪峰,李金惠,朱雪梅,等.我国废弃电路板资源化现状及其对策[J].矿冶,2005,14(1):66-69.
[2] 张宇平.废旧电子电器产品资源化利用技术[J].中国环保产业,2010,27(9):26-28.
[3] 邱 军,李 娜,刘光富.废弃线路板中非金属材料再利用的研究进展[J].工程塑料应用,2011,39(2):91-95.
[4] 张宗科,周玉敬,吴国清等.废旧线路板粉末增强复合材料的制备与性能[J].玻璃钢/复合材料,2008(2):20-22+29.
[5] Hall W J, Williams P T. Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards[J]. Resources Conservation and Recycling,2007,51(3):691-709.
[6] 蒋 英.废弃电路板中非金属粉再利用的环境风险评价[D].上海:上海交通大学,2011.
[7] 杨佳俊,陆文雄,郑爱新,等.掺废电子线路板非金属残渣水泥砂浆安全性能的研究[J].新型建筑材料,37(6):64-65+68.
[8] Mou P, Xiang D, Duan G. Products made from nonmetallic materials reclaimed from waste printedcircuit boards [J]. Tsinghua Science And Technology, 2007, 12(3): 276-283.