

建筑垃圾资源化 与再生混凝土



JIANZHU LAJI ZIYUANHUA YU ZAISHENG HUNNINGTU

郭远臣 王雪〇著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

建筑垃圾资源化与再生混凝土

郭远臣 王雪 著

东南大学出版社

· 南京 ·

内 容 提 要

本书主要包括建筑垃圾资源化与再生混凝土的应用两大板块。其中第一板块介绍农村与城市建筑垃圾资源化应用与处理的问题,第二板块详细讨论再生混凝土的特性及工程应用问题。两个板块有机结合阐述综合应用建筑垃圾制备再生混凝土,并简要介绍再生混凝土的发展与应用进程,辅以国内外相关法律法规与笔者曾经参与的工程案例,为再生混凝土在工程应用方面提供科学系统的参考。

图书在版编目(CIP)数据

建筑垃圾资源化与再生混凝土 / 郭远臣,王雪著.

— 南京:东南大学出版社,2015.11

ISBN 978-7-5641-6177-4

I. ①建… II. ①郭… ②王… III. ①建筑施工—垃圾处理②建筑施工—垃圾—废物综合利用③再生混凝土—研究 IV. ①X799.1②TU528.59

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 284761 号

建筑垃圾资源化与再生混凝土

出版发行:东南大学出版社

社 址:南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出 版 人:江建中

责任编辑:戴坚敏 史建农

网 址:<http://www.seupress.com>

电子邮箱:press@seupress.com

经 销:全国各地新华书店

印 刷:南京玉河印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:13

字 数:333 千字

版 次:2015 年 11 月第 1 版

印 次:2015 年 11 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5641-6177-4

印 数:1-1000 册

定 价:35.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830

前 言

建筑学科是一门很古老的学科,至少从上古时期人类筑巢于树或掘穴而居的时候就形成了,但是因为与人类生活的息息相关使其历久弥新。虽然不同时期的建筑工程所依托的理论或者侧重点有所不同,但是它的本质是服务于人的生活。以水泥混凝土的出现为重要标志的近现代建筑不断刷新着建筑高度与强度的记录,可是自从进入 21 世纪以来,人们越来越认识到,建筑不仅要满足人类生活需要这一根本条件,还需要协调人与自然的的关系。在五个文明建设的时代主题下,建筑行业又面临新的挑战:建筑废弃物资源化的问题。

“十二五”规划即将完成,我国城镇化建设持续推进,城乡差距进一步缩小。城乡一体化进程中,市政建设和城乡改造是重要的组成部分,在此过程中产生的大量建筑垃圾一直得不到有效的利用。利用建筑垃圾制备再生混凝土的技术越来越受到行业内的重视,不少专家和学者也对此做了许多工作,一些高校和科研院所在这方面作出了不菲贡献,使得建筑垃圾资源化进程卓有成效地展开。可是值得注意的是,我们国家的建筑垃圾资源化利用率一直较低,在一些建筑垃圾产量巨大的中小城市,由于缺乏完善的管理体制和建筑垃圾资源化的意识,其利用更是举步维艰。不可否认的是,现在我国的建筑垃圾资源化技术不完善,建筑垃圾处理成本普遍较高,建筑垃圾再生产品质量参差不齐,行业标准和规范也不健全,建筑垃圾利用的经济性和可行性有待商榷,这些正是建筑行业和资源能源领域内亟待解决的问题,也是本书的写作契机之一。

笔者在求学期间有幸参与了国家财政部产业技术成果转化专项基金计划项目等项目,工作期间又获得了国家自然科学基金青年项目(51202304)、重庆市自然科学基金项目(cstc2012jjA50005)、中国博士后科学基金(2014M552320)及万州区科技攻关项目(WZ011R003)等项目和万州区科技人才专项基金的支持。这些项目的工作使得笔者积累了一定的基础知识和科研经验,得以顺利展开建筑垃圾资源化方面的研究和教学任务,本书也是这些成果和经验的阶段性总结。

本书的资料整理和写作过程历时一年多,笔者在教学和科研工作之余搜集了相关资料,并结合自身所领衔或参与的科研项目,系统介绍了建筑垃圾资源化利用和再生混凝土的应用方面的问题。本书共计 11 章,可以分两个板块:第 1~3 章主要介绍建筑垃圾资源化处理及应用方面的问题,即绪论、建筑垃圾概况、建筑垃圾应用与处理,重点在于综述我国建筑垃圾现状并提出问题,结合国外建筑垃圾资源化利用的经验以提出对策和建议。第 4~11 章主要介绍利用建筑垃圾制备再生混凝土的技术问题,即建筑垃圾与再生混凝土、再生混凝土制备主要流程与技术、再生混凝土主要性能、再生混凝土的工程应用、再生混凝土相关法规与规范、典型工程案例、再生骨料及其混凝土的强化与改性、改性再生混凝土,重点介绍与再生混凝土有关的技术问题和工程应用问题,并结合笔者所参与的工程实践为再生混凝土的工程应用提供范例。其中第 10、11 章为王雪所撰。在本书的附录部分单独列出

了所参考的最新规范;每章节都附有详细的参考文献,为读者检索方便,一律将中文文献列于前面,外文文献列于中文文献之后。为节约篇幅,文献作者超过两人的,一律只录前两位作者姓名。

在本书的编写过程中,承蒙重庆大学材料科学与工程学院钱觉时教授的指导与鼓励,在此特别致谢。

在项目研究与资料整理过程中,承蒙重庆三峡学院土木工程学院老师与科研团队中的学生大力相助,为参考文献的整理与书稿润色做了许多工作,在此一并致谢。

由于作者学识和水平有限,加之时间仓促,书中的不足甚至错误在所难免,恳请各位专家和读者不吝赐教,以期勘误本书,惠予之正!

作 者

2015 年 8 月于万州

目 录

1 绪论	1
1.1 浅谈混凝土发展史	1
1.2 我国混凝土的工程应用发展史	3
1.3 建筑垃圾资源化总体趋势	5
1.4 再生混凝土综合应用	6
1.5 本书主要内容	8
参考文献	9
2 建筑垃圾概况	11
2.1 建筑垃圾概述	11
2.2 城市建筑垃圾	16
2.3 农村建筑垃圾	21
参考文献	23
3 建筑垃圾应用与处理	26
3.1 建筑垃圾应用	26
3.2 建筑垃圾处理	29
3.3 建筑垃圾应用与处理设备和技术	32
3.4 国外建筑垃圾应用与处理概况	37
参考文献	39
4 建筑垃圾与再生混凝土	42
4.1 再生混凝土原材料来源	42
4.2 再生混凝土概述	43
4.3 世界各国再生混凝土发展状况	45
4.4 建筑垃圾用作再生骨料可行性分析	48
参考文献	52
5 再生混凝土制备主要流程与技术	55
5.1 再生骨料的筛选	55
5.2 再生骨料的强化处理	61
5.3 再生骨料的基本性能	63
5.4 再生混凝土的配合比设计原则	67
5.5 再生混凝土主要设计参数	68
5.6 再生混凝土外加剂	76
5.7 再生微粉在再生混凝土中的应用	80

参考文献	82
6 再生混凝土主要性能	85
6.1 再生混凝土强度	85
6.2 再生混凝土的干燥收缩	89
6.3 再生混凝土抗渗性能	95
6.4 再生混凝土抗氯离子侵蚀性能	99
6.5 再生混凝土抗冻性及抗碳化性能	104
6.6 再生混凝土抗碳化性能	106
参考文献	108
7 再生混凝土的工程应用	112
7.1 道路用再生混凝土的可行性分析	112
7.2 道路用再生混凝土设计技术选择	114
7.3 混凝土路面再生利用技术集料要求	117
7.4 几种重要的再生利用技术	121
7.5 再生混凝土砌体	124
参考文献	127
8 再生混凝土相关法规与规范	131
8.1 再生骨料及再生混凝土的相关技术标准	131
8.2 我国再生骨料相关标准	137
参考文献	140
9 典型工程案例	142
9.1 上海虹桥综合交通枢纽工程	142
9.2 汶川地震灾后重建工程	150
9.3 上海世博园区建筑垃圾资源化项目	160
9.4 昆明理工大学呈贡校区入口道路工程	170
参考文献	172
10 再生骨料及其混凝土的强化与改性	174
10.1 物理强化方法	174
10.2 化学强化方法	179
10.3 其他强化方法	181
参考文献	185
11 改性再生混凝土	188
11.1 沥青改性再生混凝土	188
11.2 橡胶改性再生混凝土	191
11.3 纤维改性再生混凝土	195
参考文献	199
本书参考标准	202

1 绪论

1.1 浅谈混凝土发展史

早在两千年前的古罗马时期,人们已经利用早期混凝土技术,建造了古罗马时期最著名的万神殿(公元前 27—前 25 年)。万神殿圆屋顶跨度为 43.43 m,为浇注的浮石和火山灰轻质混凝土结构,神殿墙体结构为 6 m 厚的凝灰岩和火山灰混凝土。经测试,其抗压强度在 5~40 MPa。石灰浆在古希腊和中东地区的使用则更早。而近代混凝土的发展史是随着工业革命的推进以及大体积、高强度建筑的产生而发展的。1824 年,一位英国利兹市的泥瓦匠约瑟夫·阿斯普丁(J. Aspdin)发明了波特兰水泥,其主要成分为水硬性硅酸钙类,由此引发了建筑材料行业的一场革命。这个里程碑式的发明,使未来长达两百年的时间里,建筑材料行业都无法摆脱对水泥的依赖,而且即使是在以后相当长的时间里也是如此。1843 年,世界上第一条水底隧道——泰晤士河底隧道建成,该项工程的设计者、盾构技术的创始人,法国工程师马克·布津内尔被当时的维多利亚女王授予爵士爵位,以表彰他对建筑工程行业所做出的巨大贡献。该隧道全长 1 300 英尺(约为 396 m),深度为 75 英尺(约为 23 m),该项工程中大规模应用了波兰特水泥,由此开启了波兰特水泥在全世界范围内广泛应用的历程。

1847 年,法国人兰波特(Lambot)用钢丝作骨架制成了混凝土小船和花盆,发现这种钢丝骨架混凝土结构物强度很高,不易摔碎。1855 年,在法国巴黎举行的第一届万国博览会上,兰波特展示了他的钢筋混凝土小船,宣告了钢筋混凝土结构制品的诞生。1861 年,钢筋混凝土结构首先在水坝中得到应用,而后在楼板、管道等预制构件中逐渐应用。1874 年,美国人在混凝土中加入废钢片,发现其强度和韧度都有所提高,这也是钢纤维混凝土的最早应用。1875 年,法国园艺师蒙耶建成了世界上第一座钢筋混凝土桥,钢筋混凝土结构在桥梁工程中的应用由此开始。

1879 年,出现了世界上最早的石棉纤维水泥。到了 1900 年,奥地利人哈谢克(Hatschek)采用圆网抄取机制造石棉水泥板,使石棉纤维水泥走向工业化生产。但是到了 20 世纪 70 年代,人们发现石棉粉尘具有很强的致癌作用,世界各地开始逐渐禁止石棉纤维水泥的应用,由此推动了无石棉纤维增强水泥制品的研制和开发,其代用品主要为玻璃纤维,此外还有木浆纤维、聚丙烯腈纤维、聚乙烯醇纤维和聚丙烯纤维等。从 20 世纪 80 年代起,钢纤维混凝土已在道路、桥梁、隧道等多项混凝土工程中获得了广泛的应用。钢筋混凝土和纤维混凝土的应用,极大地扩展了混凝土材料在建筑行业的应用范围。1907 年,德国开始研究混凝土泵,泵送混凝土的设想逐渐被付诸实施。1913 年,美国有人取得了混凝土泵的专利权,并制造出第一台混凝土泵,但未得到应用。1927 年,德国的弗利茨·海尔

(Fritz. Hell)设计制造了第一次获得成功应用的混凝土泵。

1910年,美国的 H. F. Porter 最早提出了“钢纤维”混凝土的概念,并建议把短纤维均匀分散在混凝土中用以强化基体材料。1911年,美国的 Graham 正式将钢纤维掺合到混凝土中,并初步验证了它的优越性,使这一技术逐渐得到了认可和推广。1913年,美国首先发明用回转窑烧制页岩陶粒轻集料,解决了混凝土自重大的缺点。1926年,丹麦的雅各布森(Jacobsen)教授发明了多孔混凝土,其建造费用比普通混凝土减少 50%,建造时间也明显缩短。

在混凝土设计理论方面,1836年首先在德国进行了系统的抗拉和抗压强度试验。波特兰水泥的凝结和硬化理论首先由法国科学家雷霞特利(Le Chatelier)在 1883 年提出,他还鉴别出水泥中的主要矿物,开创了水泥混凝土科学研究的先河。1887年,科伦(M. Koenen)首次发表了钢筋混凝土结构的计算方法。1918年,艾布拉姆斯(Duff. Abrams)发表了计算混凝土自身强度的水灰比理论。1925年,利兹(Lyse)发表了灰水比学说、恒定用水量学说,从而奠定了现代混凝土理论的基础。1928年,法国的弗列新涅(E. Freyssinet)提出了混凝土干燥收缩和徐变理论,为预应力混凝土技术在工程上的应用提供了理论支持。1940年,意大利 L. Nervi 提出了钢丝网水泥,使得配筋混凝土具有了某些均质材料的性质,为大跨度建筑和薄壳结构建筑的发展提供了契机。

在混凝土外加剂方面,早在 1873 年就有混凝土中应用氯化钙的记载。1885年,英国发表了第一个氯化钙的专利。1935年,美国人斯克利普切(E. W. Scripture)首先研制成功了以木质素磺酸盐为主要成分的混凝土塑化剂,1937年他取得了木质素磺酸盐的专利权,由此开始了木质磺酸盐在混凝土工程中的应用。1963年,日本人服部健一在完成 B-萘磺酸盐甲醛缩合物的基础研究后,开发了商品麦地-150(Mighty-150)超塑化剂。1967年,德国埃格纳斯伯格取得了密胺磺酸盐甲醛缩合物的第一个专利,开发了商品梅尔门特 L-10(Melment L-10)超塑化剂,用于制造流动混凝土,得到了广泛的应用。1974年,德国研制成功水下混凝土外加剂,使得混凝土拌合物具有高度粘聚性能,使水下混凝土施工发展到新的阶段。而后为了改善混凝土性能的各种外加剂相继被研发出来。

1931年,当时世界第一高楼——美国纽约州帝国大厦在经济大萧条时期,仅用 410 天就建成,创造了当时建筑史上高度与速度的奇迹,并在高度上称霸半个多世纪。在该项工程中,钢筋混凝土结构再次显示了它在建筑行业的优越性。第二次世界大战以后,世界局势逐渐稳定,建筑行业也开启了跨国、跨区域式的发展,比如跨海大桥、海底隧道、大陆桥等举世瞩目的工程相继问世。如位于波斯湾的巴林-沙特阿拉伯跨海大桥(全长 25 km,1986 年建成)、连接英伦三岛和欧洲大陆法国的英吉利海峡隧道(由 3 条长度为 51 km 的平行隧道组成,全长 153 km,1994 年建成)、连接日本本州青森地区和北海道函馆的青函海底隧道(全长 54 km,其中海底部分 23 km,1987 年建成)、四大大陆桥(北美大陆桥、南美大陆桥、新欧亚大陆桥和南亚大陆桥)。

另一个突出的标志就是世界各地摩天大楼的发展。从 1885 年美国芝加哥家庭保险大厦(高度为 54.9 m,已于 1931 年被拆除)到 2010 年竣工的阿拉伯联合酋长国哈利法塔(又称迪拜塔,高度为 828 m,为世界之最),钢筋混凝土结构都发挥着重要的作用。由此催生的混凝土结构施工技术如泵送混凝土技术,以及各种混凝土材料外加剂等产品,促进了混凝土结构的应用。在 130 年的摩天大楼建设过程中,除了法国埃菲尔铁塔(高度为 324 m,

1889 年建成)和美国撒尔南大拱门(高度为 192 m,1966 年建成,不锈钢悬链线结构)等少数高层建筑为钢结构之外,其余几乎所有的高层建筑都是钢筋混凝土结构。钢筋混凝土结构的应用已经覆盖了建筑工程、道路桥梁、隧道、涵洞、水坝、电站等几乎所有的人工构筑物中。混凝土也朝着高强度、流态化的方向发展,对施工和易性的要求也逐渐提高。比如,在 20 世纪 30 年代左右,混凝土的平均强度等级只有 C10,50 年代平均强度为 C20,到了 60 年代为 C30,70 年代到 80 年代已经提高到了 C40,而目前的高层建筑的受压构件普遍使用了 C60~C70 级混凝土,甚至某些特殊构筑物强度等级高达 C100 以上。

预拌混凝土(Ready Mixed Concrete)又称商品混凝土,欧洲和日本从 20 世纪 50 年代开始采用,20 世纪 80 年代以来,商品混凝土得到了迅速发展。90 年代,出现了以耐久性为主要设计指标的高性能混凝土。1990 年 5 月,美国国家标准与技术研究所(NIST)和美国混凝土协会在会议上正式提出高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC)。1986 年,日本人发明了免振捣、自密实的高性能混凝土(Self-compacting Concrete, SCC),并在本国得到了应用与推广。1994 年,在旧金山召开的美国混凝土学会春季会议上,法国人皮埃尔·里查德(P. Pichard)公开了他的活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC),该混凝土是仿效“高致密水泥基均匀体系”(DSP)材料,将粗骨料剔除,根据密实堆积原理,用最大粒径 400 μm 的石英砂为骨料制备出来的。20 世纪 90 年代以后,随着对资源、环境与材料关系的认识的不断发展,具有环境协调性和自适应特性的绿色混凝土应运而生,随后各个国家和地区先后对混凝土的强度、耐久性、流动性、经济性等提出了要求并制定了相关标准,也由此奠定了现在混凝土发展的新方向。

1.2 我国混凝土的工程应用发展史

我国混凝土应用的历史最早可以追溯到距今 5 000~8 000 年的新石器时代。在甘肃秦安大地湾遗址中,发现了用白灰夯土做的地基,这种地基具有较好的防水性,这也是我国混凝土应用的最早雏形。我国春秋战国时期修建的长城,一部分应用的是版筑夯土墙,即以木板作模,内填粘土或灰石,层层夯实而成;也有的用粘土和砂,夹以柳条或芦苇夯筑而成;在西北地区,一部分长城遗址中的城墙,是用粘土、砂、石灰、碎石夯筑而成。这些都是我国古代混凝土技术的工程应用范例。但是我国传统建筑大部分还是以砖、木、石结构建造的。近代以来,我国混凝土技术的发展与工程上的应用是紧随着西方国家而发展的,但是整体上发展缓慢。

1949 年,我国水泥总产量只有 66 万 t,混凝土施工也是凭经验操作,没有技术标准和科学的配合比设计理论。50 年代初建立起来的配合比设计标准和有关的试验研究,使混凝土技术逐渐步入科学化轨道。但是,由于受到前苏联经验的影响,曾一度侧重于发展装配式结构和混凝土预制构件,现浇混凝土技术与泵送混凝土技术仍十分落后。在预应力混凝土结构方面,1955 年,铁路部门研制成功我国第一片跨度 12 m 的预应力混凝土铁路桥梁。1957 年,公路部门在北京周口店建成第一座预应力混凝土公路试验桥,为单跨 20 m 简支梁桥。1959 年在兰州建成七里河黄河桥,为 7 孔主跨 37.5 m 悬臂梁桥。后又建成新城黄河桥,桥型为 5 孔 33 m T 形简支梁和 66 m 系杆拱桥,奠定了我国建造预应力混凝土桥的基础。

1959年,我国混凝土科学奠基人吴中伟提出了“中心质效应假说”,对水泥基复合材料进行了分析。该假说认为:水泥基复合材料的每一层次包容了下一个层次,各级中心质是分散相,分散在介质(连续相)中,形成上一级的介质,各个层次之间通过界面联系成整体,各层次的行为是相互影响的。比如,混凝土的行为(干缩、徐变等)受到水泥行为的影响,但水泥的行为是在混凝土中产生的,因此应该把水泥放在混凝土中进行研究,把混凝土放在钢筋混凝土中研究,钢筋混凝土构件应当放在工程中研究。这种多层次的研究分析理论奠定了我国现代混凝土的理论基础。

改革开放以来,我国加快了基础设施的建设进程,建设规模持续扩大,高层建筑和大体积、大跨度建筑相继涌现,其中98%以上高层建筑采用的是钢筋混凝土结构,使混凝土技术与工程应用得到了飞速发展。根据欧洲水泥协会(CEMBUREAU)的最新调查数据显示,截至2013年,全球水泥总产量为40亿t,其中中国水泥产量为24.2亿t,占到全球总产量的58.6%。混凝土结构的平均强度也从20世纪80年代的C20~C30级逐步提高到了C40及以上。C50以上的高强混凝土也在高层建筑、大跨度桥梁和预制构件中得到了广泛应用。应用当地砂石资源和企业的技术、设备条件,配制和应用C60混凝土的技术,已为多数大中型企业所掌握。而管桩、轨枕等预应力混凝土制品或构件,还应用了C80强度等级的高强混凝土。在工程应用技术方面,高强、早强、抗冻、缓凝、微膨胀(或补偿收缩)、泵送等混凝土新品种随之产生,使混凝土的材性和施工性能得到显著改善。钢纤维、碳纤维和尼龙纤维等各种纤维混凝土已在工程中应用,也拓展了混凝土材料的应用范围。预拌混凝土的发展和现代科技的应用,使混凝土工程质量得到提高。在现浇混凝土结构中,无粘结预应力楼盖和曲线张拉的预应力桥面板也得到了迅速发展。

20世纪90年代美国国家标准与技术研究所(NIST)和美国混凝土协会在会议上提出的高性能混凝土,也传入了我国。一般来说,高性能混凝土是一种新型高技术混凝土,在大幅度提高常规混凝土性能基础上,采用现代混凝土技术,选用优质材料,在严格的质量控制下制成的。除采用优质水泥、集料和水外,必须采用低的水胶比和掺加适量的超塑化剂和超细活性掺合料。由于国内外对高性能混凝土尚无统一定义,所以根据一般理解,高性能混凝土应具有以下特点:

(1) 高性能混凝土的使用寿命要足够长。一般混凝土建筑的服役寿命都要求大于50年,个别重点工程和公共工程(如桥梁、水坝等)设计寿命则要求100年及其以上。因此,高性能混凝土的使用寿命是现代混凝土技术的当然要求。

(2) 混凝土应具有较高的体积稳定性。混凝土在施工过程中的水化热如果不加以控制,会显著增加混凝土结构干缩形成裂缝的风险,高性能混凝土在硬化早期应具有较低的水化热,硬化后应具有较小的收缩变形。

(3) 高性能混凝土应具有良好的施工和易性。高层建筑应用的泵送混凝土,应具有较好的流动性,同时不分层、不离析,以保持良好的可泵性。

(4) 高性能混凝土应具有较好的强度、密实度和抗渗能力。强度是混凝土的首要条件,作为高性能混凝土,其强度应当不低于普通混凝土,且其密实度甚至应达到自密实混凝土的标准。

我国的大跨度桥梁工程居于世界前列。迄今为止,我国已经建成跨度32m以下桥梁3万多座,桥梁跨度不断突破,大跨度桥梁不断涌现。在跨海大桥的建设中,我国先后建成

了:港珠澳跨海大桥(全长 49.968 km,2009 年建成通车)、舟山跨海大桥(又称舟山大陆连岛工程,全长 48.16 km,2009 年建成通车)、胶州湾跨海大桥(又称青岛海湾大桥,全长 36.48 km,2011 年建成通车)、杭州湾大桥(全长 35.673 km,2008 年建成通车)、东海大桥(全长 32.5 km,2005 年建成通车)、嘉绍大桥(全长 10.137 km,2013 年建成通车)。在这些大桥的建设过程中,钢筋混凝土起着至关重要的作用。

我国的摩天大楼建设也进入高潮期,其中仅在建或新建的就包括:深圳平安国际金融中心(高度 648 m,2011 年开工,2015 年封顶)、上海中心大厦(高度 632 m,2008 年开工,2014 年封顶)、广州新电视塔(高度 600 m,2010 年投入使用)、天津高银金融大厦(高度 597 m,2008 年开工,2015 年封顶)、天津 CTF 摩天大楼(高度 530 m,在建)、中国尊(高度 528 m,2011 年开工,在建)、大连绿地中心(高度 518 m,2011 年开工,在建)。

1.3 建筑垃圾资源化总体趋势

1) 我国建筑垃圾总量庞大且逐年增长,但是综合利用率较低

在城市建设规划过程中,建筑垃圾的处理一直是市政工程的重大问题。在我国城市化进程中,建筑垃圾的总量持续增高,而且大部分得不到合理利用。据统计,2010 年,我国建筑垃圾总产量为 8 亿 t;2013 年,我国建筑垃圾产生量约为 10 亿 t,其中拆除建筑产生的建筑垃圾约 7.4 亿 t,建筑施工产生的建筑垃圾约为 2.6 亿 t,建筑垃圾综合利用量 5 000 万 t,利用建筑垃圾年生产再生骨料等建材制品约 3 000 万 t,其他用途约 2 000 万 t,但是我国建筑垃圾资源化利用率仅为 5%。截至 2014 年,我国建筑垃圾总产量已经超过 15 亿 t。预计到 2020 年,建筑垃圾总量将会达到峰值。针对此现状,中国建筑垃圾产业资源化战略联盟于 1 月 29 日在北京发布了《中国建筑垃圾资源产业化(2014 年度)发展报告》,要求解决迅速制约我国建筑垃圾资源化产业技术主要瓶颈问题,整合产业内优势资源,提升建筑垃圾资源化利用,以加快我国建筑垃圾资源化利用产业发展速度,增强我国建筑垃圾资源化利用产业技术创新及成果应用的国际竞争力。

2) 我国建筑垃圾综合利用量和资源化产值呈逐年增长的趋势

新建建筑对建筑材料的需求造成自然资源的严重消耗,旧建筑改造过程中产生的建筑垃圾如果不及时回收利用,将会加剧自然资源消耗量。根据国家发改委 2014 年度《中国资源综合利用年度报告》中的数据,2013 年,我国工业固体废物利用量达 20.59 亿 t,利用率达 62.3%;粉煤灰产生量约 5.8 亿 t,综合利用量 4.0 亿 t,综合利用率为 69%,这其中又有 1.76 亿 t 用于生产水泥,6 400 万 t 用于生产商品混凝土。2013 年,我国工业副产石膏产生量 1.84 亿 t,年综合利用量 8 830 万 t,综合利用率达到 48.1%,同比增长 9.4%。煤矸石产生量约 7.5 亿 t,综合利用量 4.8 亿 t,同比增长 7.6%,煤矸石综合利用率为 64%,这其中有 5 600 万 t 用于生产建材,用于填坑筑路、土地复垦和塌陷区回填等途径的煤矸石量达 2.6 亿 t,占利用总量的 56%。截至 2013 年,我国煤矸石累积堆放量已达到 45 亿 t、大规模煤矸石山 2 600 余座,单机 600 MW 超临界循环流化床发电机组的投入运行,为煤矸石的综合利用发电机组高参数、大型化奠定了基础,已经构建了煤矸石发电—高铝粉煤灰深度脱硅—莫来石设备—白炭黑生产等特色资源化产业链。近年来,粉煤灰的综合利用逐渐向精细化、高技术化发展,综合利用量和利用率稳步增长,在我国东部发达地区已经出现粉煤灰

供不应求的局面。

3) 我国建筑垃圾资源化朝着制度化、经济化、精细化和科学化的方向发展

2012年,先后颁布实施了《煤矸石分类》(GB/T 29162—2012)和《煤矸石利用技术导则》(GB/T 29163—2012),为煤矸石的综合利用提供了技术和制度支持。2013年,国家发展改革委等部门联合颁布的《粉煤灰综合利用管理办法》正式实施,明确了粉煤灰综合利用管理体制,清晰界定了粉煤灰的范围,对全过程的管理提出了具体的要求。相关行业发布了《磷石膏安全处置及综合利用“十二五”实施方案》,提出了“十二五”期间磷石膏综合利用率达到30%,安全处置率超过90%的总体目标。

2013年,我国资源综合利用产值达到1.3万亿元,通过开展资源利用减少固体废物堆存占地9333.3万 m^2 以上;水泥混凝土行业利用废渣量超过10亿t。在尾矿综合利用进程中,全尾矿废石骨料高性能混凝土预制件生产技术和全尾矿废石骨料预拌泵送混凝土生产技术取得关键突破并大范围推广应用。完善制度与推行规范标准是再生混凝土综合利用的保障。大部分建筑企业节能减排意识不强,片面追求施工进度和经济效益,忽视工程建设与自然环境的关系,在施工过程中没有做到节约集约资源,但是类似的问责制度又不健全,导致管理不善。我国虽然出台了一些行业标准和建筑法规,但是有关部门执行力度不够,使得建筑垃圾随意堆放或就近掩埋现象频发,不仅占用了空间还污染了环境。应鼓励建筑垃圾再利用企业进行技术创新,着力降低资源化成本。我国北京、上海等20多个省市均已开展建筑垃圾资源化工作。吉林省、广州市、青岛市、昆明市、许昌市等省市相继出台和完善了建筑垃圾综合利用的条例和规章,为建筑垃圾资源化提供了制度保障。

1.4 再生混凝土综合应用

再生混凝土的应用始于第二次世界大战以后,遭受战争重创的德国一片废墟,首都柏林超过90%的建筑毁于一旦,但是由于战后重建时大量应用建筑垃圾并尝试利用废旧混凝土,取得了很好的成果,使得战后重建进程大大加快。德国首都柏林在二战后的重建期间,对建筑垃圾进行循环利用,不仅降低了垃圾清运费,而且大大缓解了建材供需紧张的矛盾,至1955年末,德国共循环利用约1150万 m^3 的废砖集料,并用这些再生材料建造了17.5万套住房,自此,建筑垃圾的综合利用变成了城市化进程中的助推因素,这也对我国资源化利用有着重要的借鉴意义。

1) 循环经济理念是再生混凝土综合利用的整体方针

2005年,我国两会提出了“建设节能型社会,发展循环经济”的理念,在此指引下,循环经济理念在城市化进程中不断践行,妥善利用和处理建筑垃圾仍然是至关重要的环节。依据建筑垃圾处理手段和利用方式的不同,建筑垃圾资源化利用阶段可以分为两级:初级资源化一般是比较直接的利用,关键工艺是分选技术与设备;高级资源化主要是再生产建材原料,例如再生骨料,进一步用于生产建材产品,关键技术在于再生骨料的特性和改性,再生建材的性能和耐久性,生产工艺优化和自动化。占建筑垃圾体积总量85%的废弃块渣料,是建筑垃圾资源化考虑的重点,废弃块渣料的初级利用,是简单破碎后,作为回填材料直接应用。但是这种利用范围仅限于道路地基填筑、建筑物低洼地基回填等方面,因而总

体利用率较低。人们早在 20 世纪 70 年代就提出了循环经济的 3R 指导原则,即减少(Reduce)、再利用(Reuse)和循环(Recycle)。

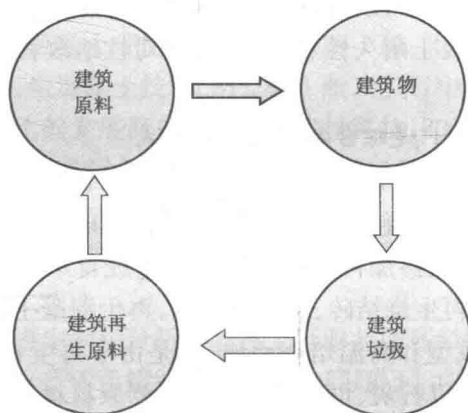


图 1.1 建筑垃圾 3R 循环模式

将生产过程中或使用阶段后被废弃的混凝土块经过分选、破碎、清洗与分级后,按一定的比例与级配加工混合形成再生骨料,应用再生骨料取代或部分取代天然骨料所制备的混凝土是再生混凝土。再生混凝土的应用既能缓解天然骨料对自然资源的过度消耗,又可以从根本上解决废弃混凝土的处理难题,并可实现建筑垃圾的减量化、无害化和资源化。

2) 对再生混凝土生产工艺和主要性能的深入研究是综合利用的前提

再生混凝土有别于普通混凝土,主要是因为再生骨料与天然骨料在物理特性上的差别,以及在混凝土内部的行为差别(如干缩、变形等),这些差别使得再生混凝土的性能指标普遍低于普通混凝土,比如强度小、干燥收缩变形大、吸水率较高、抗渗性较低,但是也有一些特性明显优于普通混凝土,如自重轻,保温隔热、隔声效果较好。目前对再生混凝土的研究主要有以下方面:

(1) 再生骨料取代率对再生混凝土性能的影响。再生骨料与天然骨料的差别对再生混凝土产生的影响,随着取代率的增加而累积。一般来说,再生骨料取代率在 30% 以内时,再生混凝土特性与普通混凝土差别不大。

(2) 再生骨料生产流程以及加工工艺。再生混凝土的经济性是其应用的基础,如果再生混凝土的生产流程复杂、价格高昂,建材行业不会选择使用它,只有降低再生骨料生产成本,同时提高再生骨料质量,才能扩大其市场占有率。

(3) 再生骨料配合比设计以及外加剂选用。配合比理论是混凝土设计的基础,也是保持混凝土施工和易性的要求。泵送混凝土技术的发展以及高层建筑、高强度建筑对再生混凝土的可泵性等要求较高。外加剂可以显著改善再生混凝土的性能,但是由于再生骨料本身的差异,也不能完全按照普通混凝土外加剂的选用方式和要求,需要根据施工条件和再生骨料特点灵活选用。

(4) 再生混凝土强度和变形性能。一般而言,再生混凝土的强度低于同配合比下的普通混凝土,干燥收缩变形也比普通混凝土大,因而在服役期间更容易产生强度破坏和裂缝,这也是制约再生混凝土应用的重要原因。而再生混凝土早期强度与水泥品种、再生骨料取

代率等关系复杂。

(5) 再生混凝土的耐久性。现代建筑服役寿命普遍较高,强度和耐久性也是高层建筑混凝土结构最基本的要求。抗渗性、抗冻性、抗腐蚀性等要求在不同建筑物的要求也不尽相同,这就使得提高再生混凝土耐久性和强度、有针对性地改善其特性成了高性能混凝土的必然要求。

3) 再生混凝土制品的推广是综合利用的重要方式

我国建材行业先后推出了再生砌体材料、再生混凝土预制构件、再生灰砂砖、再生多孔砖、再生透水砖等一系列再生混凝土制品,再生细骨料可以用于配制砌筑砂浆、抹灰砂浆、地面砂浆等。再生砌体材料是掺加再生骨料用于承重或自承重墙体的实(空)心或多孔正六面体的砖或砌块,可分为再生烧结砖、再生蒸养砖、再生混凝土砖。再生烧结砖是以再生微粉及煤矸石等为原料经成型和高温焙烧而成,但是由于再生骨料塑性指标低,一般需要加入塑性材料。再生蒸养砖以石灰、再生细骨料为主要原材料,加水压制成型后,在高压养护、常压养护或自然养护中发生热合反应,生成硅酸盐类胶凝物质,形成较强的结构强度,是一种强度高、性能稳定的免烧砖,适用于多层混合结构建筑的承重墙体,是一种优良的新型节能墙材产品。再生混凝土砖以水泥为胶结材料,再生骨料为集料,加入掺合料和某些外加剂,经料浆浇筑、振动成型、养护等简单工艺制成,具备混凝土产品的特质,强度较高,骨料利用面广。

但是,我国再生混凝土综合利用还存在一定的阻力,主要有以下几个方面:

- (1) 建筑垃圾来源复杂,工艺设备相对落后。
- (2) 生产成本较高,产品缺乏竞争力。
- (3) 监管力度不足,监督环节较少,企业缺乏自觉性。

这些问题在一定程度上阻碍了再生混凝土的利用率,也是我国建筑垃圾综合利用率远低于美国、日本、欧盟等发达国家和地区的重要原因。

1.5 本书主要内容

本书详细介绍我国现阶段建筑垃圾资源化情况以及对策,阐述再生混凝土的主要性能,对再生混凝土的制备和工程应用提供了参考。本书主要内容如下:

第1章:绪论。简述国内外混凝土和再生混凝土的发展史,分析我国建筑垃圾资源化总体趋势,提挈再生混凝土综合应用的主要问题。

第2、3章:简述我国建筑垃圾现状,介绍建筑垃圾利用和处理的主要流程与技术,结合外国建筑垃圾资源化现状为我国建材行业提供对照和借鉴。

第4章:简述建筑垃圾资源化过程中再生混凝土技术的具体应用。

第5~7章:介绍再生混凝土制备的主要流程与技术,谈论分析再生混凝土的主要性能和力学指标,分析再生混凝土工程应用现状以及应用范围。

第8章:介绍国内外再生混凝土的标准以及相关的法律法规。

第9章:介绍笔者参与过的有关再生混凝土的典型工程案例以资借鉴。

第10、11章:介绍再生骨料改性的方法以及几种重要的改性再生混凝土。

参考文献

- [1] 孙伟, 缪昌文. 现代混凝土理论与技术[M]. 第1版. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] 刘数华, 冷发光. 再生混凝土技术[M]. 第1版. 北京: 中国建材工业出版社, 2007.
- [3] 李显宇. 水泥混凝土的发展简史[J]. 国外建材科技, 2007, 28(5): 7-10.
- [4] 吴之乃, 郑念中. 我国混凝土工程技术的现状及发展[J]. 混凝土, 2000, 9: 3-7.
- [5] 陈家珑. 建筑垃圾资源化利用若干问题的再认识[J]. 建设科技, 2015, 7: 58-59.
- [6] 许元. 循环经济下建筑垃圾再生利用技术及适应性研究[J]. 上海节能, 2012, 12: 31-35.
- [7] 陈永生. 建筑垃圾再生利用分析[J]. 再生资源与循环经济, 2013, 6(5): 43-44.
- [8] 文梓芸. 我国混凝土产业可持续发展的基本问题[J]. 广东建材, 2014, 1: 60-68.
- [9] 朱红兵, 赵耀, 等. 再生混凝土研究现状及研究建议[J]. 公路工程, 2013, 38(1): 98-102.
- [10] 李秋义, 全洪珠, 等. 再生混凝土性能与应用技术[M]. 第1版. 北京: 中国建材工业出版社, 2010.
- [11] 王兴国, 李力, 等. 再生混凝土性能特点及应用前景[J]. 河南理工大学学报, 2012, 31(1): 95-99.
- [12] 李清海, 孙蓓. 国内外建筑垃圾再生利用的研究动态及发展趋势[J]. 中国建材科技, 2009, 4: 119-122.
- [13] 魏秀萍, 赖芑宇, 等. 建筑垃圾的管理与资源化[J]. 武汉工程大学学报, 2013, 35(3): 25-29.
- [14] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 第1版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [15] 李浩, 翟宝辉. 中国建筑垃圾资源化产业发展研究[J]. 城市发展研究, 2015, 3: 119-124.
- [16] 刘成林, 薛咏海, 等. 建筑垃圾循环利用实践[J]. 再生资源与循环经济, 2012, 5(8): 15-19.
- [17] 赵海英, 薛俭. 我国在建筑垃圾资源化中存在的问题及对策研究[J]. 施工技术, 2010, 39: 472-473.
- [18] 杜婷, 张勇, 等. 国外建筑垃圾的处理对我国的借鉴[J]. 湖南城建高等专科学校学报, 2002, 11(2): 35-36.
- [19] 薛海兵, 武永, 等. 建筑垃圾资源化利用存在的问题及对策研究[J]. 江西建材, 2015, 13: 296, 300.
- [20] 王瑞敏, 王林秀. 中国建筑垃圾现状分析及发展前景[J]. 中国城市经济, 2011, 5: 178-179.
- [21] Gaskin, Matt. Concrete and culture: a material history[J]. Planning Perspectives, 2013, 28(2): 329-331.
- [22] Liwu Mo, Min Deng. etc. . MgO expansive cement and concrete in China: Past, present and future[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 57: 1-12.

[23] G. Rodríguez, C. Medina. etc.. Assessment of Construction and Demolition Waste plant management in Spain; in pursuit of sustainability and eco-efficiency[J]. Journal of Cleaner Production, 2015,90:16-24.

[24] Florent S. Bourgeois, Nicholas R. Lippiatt. etc.. Introducing the concept of mechanical texture in comminution; The case of concrete recycling[J]. International Journal of Mineral Processing, 2015,136:7-14.

[25] Mohammed Zuhear Al-mulalia, Hanizam Awanga. etc.. The incorporation of oil palm ash in concrete as a means of recycling: A review[J]. Cement and Concrete Composites, 2015,55:129-138.

[26] Oualid Hamdaoui. Dynamic sorption of methylene blue by cedar sawdust and crushed brick in fixed bed columns. [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 138: 293-303.

[27] Farid Debieb, Said Kenai. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. [J]. Construction and Building Materials, 2008,22:886-893.

[28] S. Rokia, G. Séré. etc.. Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes. [J]. Waste Management, 2014,34(11):2155-2162.