

无废城市

——固体废物资源化利用丛书

城市固废 路用材料资源化

UTILIZATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE
AS ROAD MATERIALS

主 编 / 过震文

副主编 / 徐 斌 苏 凯 何昌轩



上海科学技术出版社

无废城市——固体废物资源化利用丛书

城市固废路用材料资源化

主 编 过震文

副主编 徐 斌 苏 凯 何昌轩

上海科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

城市固废路用材料资源化 / 过震文主编. -- 上海 :
上海科学技术出版社, 2021.3
(无废城市 : 固体废物资源化利用丛书)
ISBN 978-7-5478-5197-5

I. ①城… II. ①过… III. ①城市—固体废物利用—
研究 IV. ①X705

中国版本图书馆CIP数据核字 (2020) 第272510号

城市固废路用材料资源化

主编 过震文

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 14.75

字数 300 千字

2021 年 3 月第 1 版 2021 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-5197-5/X·58

定价: 150.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内容提要

我国每天都会产生数量可观的城市固体废弃物,其管理和处置问题刻不容缓;同时,城市道路的高速建设消耗了大量天然矿山资源,需要寻找合适的替代品以减缓对自然资源的消耗。通过技术手段将固体废弃物用作道路材料,既减少了城市固体废弃物(简称固废)的环境污染,又为道路建设找到了新的原料来源,可谓一举两得。

本书从固废资源化利用的矿物学研究入手,将固废视为矿物资源,阐述了典型固废的成分及选矿技术;同时对固废资源化利用的材料用途和性能、环境问题、变异性等方面的研究成果进行了系统介绍。关于固废材料性能,本书主要介绍了它与传统路用材料性能上的差异,并对其有利特性和不利特性分别进行了分析。关于固废材料潜在的环境问题,本书对其资源化利用过程中各环节可能产生的环境问题进行详细剖析,阐述相关的评价指标,并提出相应的污染预防及控制措施。同时,本书还介绍了固废变异性的表征,并分析了在固废资源化的取样、选矿、产品设计与应用等环节控制变异性的技术。

本书后半部分详细介绍了多个固废资源化的应用和研究案例,包括旧沥青路面厂拌热再生、废旧轮胎用于沥青改性、生活垃圾焚烧炉渣资源化利用、工程废弃泥浆资源化利用、建筑装修垃圾资源化处置技术等,通过实践来验证相关理论和技术的可行性。

本书理论与实践相结合,既可供城市固废相关领域从业者使用,也可作为高等院校道桥和环境专业师生或研究人员的参考用书。

前言

本书为“无废城市——固体废物资源化利用丛书”系列丛书的第二本。在上一本《生活垃圾焚烧炉渣资源化理论与实践》中,笔者将生活垃圾焚烧炉渣作为具有代表性的城市固体废弃物进行分析,对其材料特性、选矿方法、金属回收、环境影响、资源化利用等相关研究成果进行了详细阐述。而本书将从新的视角出发,将研究对象拓展到各类生活和工业废弃物,而将它们的资源化应用领域重点放在城市道路工程上。

近年来,城市道路的原材料需求量逐年攀升,而各地环保政策对石料开采的限制又导致从自然山体获取原材料变得困难。但这样的限制也促使我们开始转变思路,将部分原材料的获取来源由“自然”变为“城市自身”。2018年,习近平总书记指出,要推动形成绿色发展方式和生活方式,全面促进资源集约利用。2019年,国务院办公厅印发《“无废城市”建设试点工作方案》。这些指导性思想和文件都为我们解决道路工程原材料问题指明了方向。

2017年,我国城市固体废弃物年产量达到14亿t,并且还在以每年7%~9%的速度递增,其处理处置刻不容缓。事实上,固体废弃物是“放错位置的资源”。如此庞大的固废数量同时也可看作是丰富的材料来源。面向道路工程进行城市固废资源化利用,既可化解道路建设中存在的供需矛盾,又解决了城市固体废弃物的处理处置问题,一举多得。

本书介绍了固体废弃物材料与其相对应的天然材料具有的一些不同特性。诸如自黏结特性和火山灰特性等有助于促进固废材料的力学性能,是固废材料的有利特性;而固废使用过程中体积的潜在变化引起的不稳定性会导致产品的破坏或使用性能下降(如生活垃圾焚烧炉渣中由自由石灰、锈蚀铁、硅酸二钙、金属铝氧化、硫酸盐、碱氧化硅等成分引起的膨胀、开裂、性能下降等问题),属于固废材料的不利特性,这类特性在固废使用中需要引起额外重视。

环境问题一直以来都是固体废物资源化利用中不可避免的研究重点之一。相对于已经被长期研究和使用的传统路用原材料而言,大部分固体废弃物用于道路所带来的环境影响尚不十分明确,且由于种类繁多,不能一概而论。本书将典型固废在堆放、运输、加工、使用等过程中潜在的水、声、气污染情况及评价指标进行了系统阐述,可为相关固废材

料的设计和应用提供一定的理论参考。

此外,固体废弃物因组成差异、时空差异、加工工艺差异等,通常具有较大的变异性。而变异性又将影响其使用的稳定性和力学性能等评价指标的准确性。在固废资源化过程中,需理清固废变异性的来源和表征,分析固废在取样、选矿、资源化利用和结构使用上的变异性特点,并通过技术手段控制其变异性。

作为城市固废路用材料资源化的应用实例,本书介绍了生活垃圾焚烧炉渣和建拆垃圾在世界范围内的资源化加工厂现状,并介绍了旧沥青路面厂拌热再生、废旧轮胎用于沥青改性、生活垃圾焚烧炉渣资源化利用、工程废弃泥浆资源化利用、建筑装修垃圾资源化处置等五项技术在国内应用的具体案例,为面向道路的固废资源化利用落到实处提供了一些建议和启发。

目前国家对于固体废弃物资源化利用的全过程规范管理(包括对各类固体废弃物的原料市场、资源化处理、相关产品质量、污染防控等方面的标准、规范化和管控)尚处于起步阶段。而本书则是希望通过分享笔者与研究团队十余年在该领域的研究成果,抛砖引玉,激发行业内相关从业人员及学者对一些问题的思考与研究,促进相关标准、技术和规范化流程的形成,推动固废资源化在我国的健康可持续发展。

本书在写作过程中,得到了上海城投公路投资(集团)有限公司的大力支持,在此表示感谢;同时,黄少文、孙文州、宰正浩、阮仁勇、冀振龙、田海洋、张绪国、李逸翔等同事同仁也从各方面对本书的撰写提供了帮助,在此一并致以谢意!

作 者

第一章 绪论

1

- 1.1 城市固体废弃物简介 / 1
- 1.2 城市固废资源化的国内外现状 / 3
 - 1.2.1 欧洲 / 3
 - 1.2.2 美国 / 5
 - 1.2.3 日本 / 7
 - 1.2.4 中国 / 7
- 1.3 城市固废资源化面临的挑战 / 9
 - 1.3.1 城市固废在空间和时间上的变异性 / 9
 - 1.3.2 城市固废处理的成本 / 9
 - 1.3.3 城市固废处理的环境要求 / 9
 - 1.3.4 城市固废资源化的质量要求 / 9
 - 1.3.5 城市固废资源化的技术挑战 / 10
 - 1.3.6 固废资源化后工程应用的挑战 / 10
 - 1.3.7 固废资源化利用的文化心理因素 / 11
 - 1.3.8 固废资源化利用的政策驱动与政策保护 / 11
- 1.4 固废资源化产业的政策扶持 / 12
 - 1.4.1 经济政策上的支持 / 12
 - 1.4.2 法规政策的支持 / 15
 - 1.4.3 固废资源化产业的后续技术研究支持 / 15

第二章 固废资源化综合利用的矿物学研究

17

- 2.1 从矿物学角度对固废的认识 / 17
 - 2.1.1 固废的成矿过程与内蕴矿产 / 17
 - 2.1.2 矿山选矿与城市选矿的异同 / 18

- 2.2 固废的选矿技术 / 19
 - 2.2.1 固废选矿的附属作业 / 19
 - 2.2.2 面向固废的重力选矿 / 29
 - 2.2.3 面向固废的磁力选矿 / 33
 - 2.2.4 面向固废的化学选矿 / 37
 - 2.2.5 基于传感器的面向固废的自动选矿 / 40
- 2.3 针对固废分离的城市选矿技术研究展望 / 41

第三章 固废资源化综合利用的材料性能研究

43

- 3.1 固废资源化材料主要用途 / 43
- 3.2 固废资源化利用对产品性能表征的挑战 / 45
 - 3.2.1 固废材料磨耗性能的试验 / 46
 - 3.2.2 橡胶沥青的表征与玛蹄脂黏度的概念 / 48
 - 3.2.3 沥青混合料面向固废的矿物填料标准再认识 / 50
- 3.3 固废额外的材料特性 / 51
 - 3.3.1 自黏结特性 / 51
 - 3.3.2 火山灰特性 / 53
- 3.4 固废使用过程中的安定性 / 54
 - 3.4.1 自由石灰引发的膨胀 / 54
 - 3.4.2 铁锈蚀引发的膨胀 / 55
 - 3.4.3 硅酸二钙转换引发的膨胀 / 55
 - 3.4.4 金属铝氧化的凝胶膨胀与产氢爆裂 / 56
 - 3.4.5 硫酸盐产生的膨胀 / 57
 - 3.4.6 碱氧化硅反应(ASR)引发的膨胀 / 58
 - 3.4.7 冻融与冻胀 / 59

第四章 固废资源化综合利用的环境问题研究

61

- 4.1 固废堆放的环境问题 / 61
- 4.2 固废运输的环境问题 / 62
- 4.3 固废加工的环境问题 / 63
 - 4.3.1 扬尘问题 / 64
 - 4.3.2 噪声问题 / 67

- 4.3.3 气味问题 / 69
- 4.3.4 工艺水问题 / 70
- 4.4 固废使用寿命期间的环境问题 / 73
 - 4.4.1 公路工程的环境特点与环境影响评价的目标 / 74
 - 4.4.2 公路工程中使用的固废的源头环境特征 / 75
 - 4.4.3 室内评价固废产品在公路环境中污染物浸出的试验方法 / 76
 - 4.4.4 公路环境中固废产品污染物浸出与迁移的数字模拟 / 77
 - 4.4.5 公路工程固废资源化利用环境影响评价的标准 / 79
 - 4.4.6 公路工程固废产品环境污染的预防措施 / 80

第五章 固废变异性的控制

82

- 5.1 固废变异性的影响和来源 / 82
 - 5.1.1 固废变异性的影响 / 82
 - 5.1.2 固废变异性的来源 / 83
 - 5.1.3 固废变异性的研究目标 / 83
- 5.2 固废变异性的表征 / 84
 - 5.2.1 元素存在形态的变异 / 84
 - 5.2.2 矿物相对组成的变异 / 86
 - 5.2.3 固废混合体相关性质的变异 / 87
- 5.3 固废取样技术研究 / 88
 - 5.3.1 问题的引出 / 88
 - 5.3.2 Gy 取样理论向固废的应用 / 89
 - 5.3.3 关于固废取样使用 Gy 理论的一些讨论 / 91
- 5.4 利用城市选矿技术控制材料变异性 / 92
 - 5.4.1 选矿的分离判据与目标 / 92
 - 5.4.2 减小固废选矿变异性的途径——多级串联选矿 / 92
 - 5.4.3 减小固废选矿变异性的途径——敏感性分析与自动控制技术 / 93
 - 5.4.4 减小固废选矿变异性的途径——后续产品的再加工 / 94
- 5.5 目标应用产品中,通过材料组成设计控制固废变异性 / 95
- 5.6 面向变异性的固废资源化利用目标 / 98
 - 5.6.1 含固废产品实现过程中变异性的控制 / 98
 - 5.6.2 面向应用的产品异质性分析 / 99
 - 5.6.3 目标应用面向固废材料的变异性分析 / 100

第六章 固废资源化实施案例

102

- 6.1 生活垃圾焚烧炉渣 / 102
 - 6.1.1 新加坡大士海运中转站生活垃圾焚烧炉渣厂 / 102
 - 6.1.2 荷兰阿尔克马尔生活垃圾焚烧炉渣全集成水洗工厂 / 105
 - 6.1.3 英国布伦特福德生活垃圾焚烧炉渣加工厂 / 108
- 6.2 建拆垃圾 / 109
 - 6.2.1 穆扎法拉巴德建筑废墟再生工程 / 109
 - 6.2.2 印度布拉里建拆垃圾再生工厂 / 111
 - 6.2.3 荷兰建拆垃圾高质量再生体系 / 112

第七章 旧沥青路面厂拌热再生应用

116

- 7.1 旧沥青路面材料资源化利用概述 / 116
- 7.2 旧沥青路面材料厂拌热再生工程应用选矿技术 / 117
 - 7.2.1 从原路面获得回收的混合料 / 117
 - 7.2.2 对间歇式拌和楼的改造 / 118
- 7.3 旧沥青路面材料厂拌热再生工程应用材料特性 / 120
 - 7.3.1 沥青老化与再生机理分析 / 120
 - 7.3.2 再生沥青和沥青混合料的设计指标要求 / 126
 - 7.3.3 AC-25 型再生沥青混合料(RAP 掺量 30%)性能 / 127
 - 7.3.4 AC-25 型再生沥青混合料(RAP 掺量 50%)性能 / 128
- 7.4 旧沥青路面材料厂拌热再生工程应用变异性控制 / 129
 - 7.4.1 旧沥青路面材料厂拌热再生工程应用变异性事例概述 / 129
 - 7.4.2 旧沥青路面材料厂拌热再生工程应用变异性原因分析 / 130
 - 7.4.3 旧沥青路面再生料的分档 / 132
 - 7.4.4 旧沥青路面再生料矿料级配的优化 / 134
 - 7.4.5 现场试验段验证 / 136
 - 7.4.6 预防施工变形性控制 / 139

第八章 废旧轮胎用于沥青改性应用

144

- 8.1 废旧轮胎资源化利用概述 / 144

- 8.1.1 废旧轮胎的环境问题 / 144
- 8.1.2 废旧轮胎再利用途径 / 145
- 8.1.3 废旧轮胎用于道路工程的优势 / 146
- 8.2 路用废轮胎胶粉选矿技术 / 146
 - 8.2.1 废胎胶粉的分类 / 146
 - 8.2.2 废胎胶粉生产工艺 / 146
 - 8.2.3 路用废胎胶粉技术要求研究 / 147
- 8.3 路用废轮胎胶粉材料特性 / 148
 - 8.3.1 橡胶沥青的作用机理分析 / 149
 - 8.3.2 橡胶沥青技术指标体系 / 153
 - 8.3.3 橡胶沥青性能影响研究 / 155

第九章 生活垃圾焚烧炉渣应用

161

- 9.1 生活垃圾焚烧炉渣资源化应用概述 / 161
 - 9.1.1 生活垃圾焚烧处置现状分析 / 161
 - 9.1.2 生活垃圾焚烧炉渣存在问题分析 / 162
- 9.2 焚烧炉渣选矿技术 / 162
 - 9.2.1 按物料粒度大小差异的分选技术 / 162
 - 9.2.2 按物料密度差异的分选技术 / 165
 - 9.2.3 按物料光、电、磁效应差异的金属分选技术 / 167
 - 9.2.4 物理分选工艺介绍 / 169
 - 9.2.5 干式选矿与湿式选矿技术对比 / 169
- 9.3 焚烧炉渣集料材料特性 / 171
 - 9.3.1 焚烧炉渣物理性质 / 171
 - 9.3.2 焚烧炉渣化学性质 / 172
 - 9.3.3 焚烧炉渣集料材料性质 / 173
 - 9.3.4 炉渣集料粗粒径二灰碎石基层材料性能 / 174
 - 9.3.5 炉渣集料细粒径二灰碎石基层材料性能 / 180

第十章 工程废弃泥浆资源化利用

185

- 10.1 工程废弃泥浆概述 / 185
 - 10.1.1 工程废弃泥浆的定义 / 185

- 10.1.2 废弃泥浆的环境影响 / 186
- 10.1.3 国内外废弃泥浆处理现状 / 186
- 10.2 工程废弃泥浆选矿技术 / 187
 - 10.2.1 泥浆脱水技术研究 / 187
 - 10.2.2 泥浆脱水机械研究 / 188
 - 10.2.3 日本 YS 工法固化泥浆 / 189
 - 10.2.4 钻孔灌注桩压滤泥 / 189
- 10.3 工程废弃泥浆资源化材料特性 / 190
 - 10.3.1 盾构泥浆固化材料特性 / 190
 - 10.3.2 钻孔灌注桩压滤泥浆材料特性 / 193
- 10.4 工程废弃泥浆资源化材料用途 / 196
- 10.5 固化废弃泥浆资源化应用案例 / 198

第十一章 建筑装饰垃圾资源化处置技术

201

- 11.1 建筑装饰垃圾资源化处置概述 / 201
 - 11.1.1 装修垃圾定义 / 201
 - 11.1.2 建筑装饰垃圾的产生与分类 / 201
 - 11.1.3 建筑装饰垃圾的特征 / 203
 - 11.1.4 建筑装饰垃圾资源化必要性分析 / 203
- 11.2 建筑装饰垃圾选矿技术 / 204
 - 11.2.1 国内外分选技术简介 / 204
 - 11.2.2 浦东新区曹路试验基地分选技术 / 205
- 11.3 建筑装饰垃圾材料特性 / 210
 - 11.3.1 装修垃圾分选物 / 210
 - 11.3.2 第一道工序粉料(粗粉) / 211
 - 11.3.3 第二道工序细集料(石屑) / 214
 - 11.3.4 粗集料试验 / 215

参考文献

220

第一章

绪 论

1.1 城市固体废弃物简介

废弃物,也就是不能按预定用途继续使用或目标产品之外产生的材料,有制造工艺过程中产生的废弃物,如废钢渣;有使用过程中产生的废弃物,如生活垃圾;也有使用寿命结束时的废弃产品,如建筑垃圾。城市固体废弃物(以下简称“固废”)产生于城市,因此摒弃农业废弃物或矿山废弃物等类型。生活垃圾、建筑垃圾(包括市政垃圾)是其主要来源,如城市中的工业,则对应工业废弃物,其类型和数量依照城市的具体工业布局而变化。还有绿化垃圾、电子垃圾、汽车垃圾等,其数量随着人们物质生活水平的提高与整体社会科技水平的发展,处于不断地增长之中。固废研究也离不开对空气、水及噪声等因素的研究。譬如,对泥浆的研究,就涉及水和泥的分离,而飞灰正是对生活垃圾焚烧后废气排放处理的产物,固废的处理工艺,也需要对空气、水及噪声的排放加以控制。

在以上的城市固废概念中,通常是按照垃圾产生的源头进行分类,这有利于垃圾的集中收集,但对资源化利用来说,有时并不方便。比如上海市把建筑垃圾划分为五类,即工程垃圾、工程渣土、装修垃圾、工程泥浆、拆房垃圾。但拆房垃圾与装修垃圾在资源化时,通常会混用,而工程垃圾的概念相当模糊。这种按用途而不是按成分的划分,对固废资源化利用技术的开发是不利的。国外有些划分一定程度上可以借鉴,如“活性垃圾”与“惰性垃圾”(有些国家规定,惰性垃圾不得填埋)、“有机垃圾”与“无机垃圾”,甚至按照主要成分,将建筑垃圾分为“废旧混凝土垃圾”“砖混垃圾”等。

城市固废产生于城市运行的各项活动,在时间上和空间上存在明显的不均匀性。譬如,上海早期的房子是石砌房子,后来发展为砖砌房子,现在大量的都是混凝土房子,这体现在拆房垃圾的成分上,有着明显的时代痕迹。又如,我们在对生活垃圾焚烧炉渣的研究过程中,发现昆山焚烧炉渣中的有色金属含量比上海更高,这与昆山电子器件生产厂家密集有很大关系。另外,2016年上海加大了“拆违”的力度,拆房垃圾数量爆发式增长,给政府废弃物管理部门造成了极大的处置压力。

随着城市人口和居住人口密集度的增加,城市固废的数量不断增加,而城市容纳固废

的填埋场数量在不断萎缩,还有国家从政策上禁止垃圾的跨省界流动,这些都加大了城市固废对于城市管理者的压力。在此背景下,对于某些具有一定经济利益的固废,地下市场涌动,如废轮胎被拉到深山土法炼油,废旧混凝土用风镐打碎取钢筋,煤渣直接掺入道路材料,生活垃圾湿法提取贵金属等。这些做法有的以环保为名破坏环境,有的使材料生产与应用失去质量控制。

对城市固废的处置,国际通用的策略分为五个层次:

第一个层次是减量(reduction),譬如通过纸张的双面打印,减少对纸张的消耗;通过永久性路面的开发,减少每年产生的道路废弃物数量。

第二个层次是再利用(reuse),仅仅通过位置的移动或降低等级,将废弃物用于相同的目标。比如废旧混凝土中的钢筋被完整取出后,直接作为钢筋的再利用;建筑垃圾中,将砖砌结构加热至500℃以上,使砖体与灰浆完全分离,得到的完整烧结砖再被用于新建建筑的砌筑等。

第三个层次是再循环(recycle),将固废经过一定的处理,形成可在某方面使用的原材料或产品。比如,将生活垃圾焚烧炉渣经过破碎、筛分、金属分离、熟化等工艺,作为集料用于道路材料的生产。又如,废旧沥青经过破碎、筛分、加入再生剂,并与一定的新沥青和新集料组合,生产再生沥青混合料。

第四个层次是焚烧(incineration),是对热值较高的废弃物回收能量的一种策略,可用于生活垃圾、绿化垃圾、医疗垃圾、危险化学品等。不过,焚烧并没有根本性解决固废,还有焚烧余留的灰渣需要进一步处理。

第五个层次是填埋(landfill),是对一切用当前的手段无法解决或无法经济地解决的固废的终极解决方案,是优先级最低的解决方案。所谓固废资源化策略,就是希望废弃物的处置越过填埋,尽可能采取靠上面层次的措施。

城市固废资源化的必要性体现在以下三个方面:

一是固废本身就是资源,即俗话说“垃圾是放错位置的资源”。当然,这种资源,有的是一眼就看得到的,譬如固废焚烧炉渣中的金属、废旧混凝土中的钢筋;有的则需要一定的加工处理和材料设计后才能明确的。不过,资源本身的价值与处理的成本存在着制衡关系。由于天然资源的日益枯竭和处理技术的不断发展,这种制衡关系也会随着时代的发展而不断变化。

二是固废处置的压力。固废如果不资源化,势必要寻找容纳它的填埋场地,而这样的填埋场地短时间内很难获得有效利用,在日益紧张的城市用地面前,填埋场愈来愈成为一种奢望。

三是城市建设本身对自然资源的巨大消耗。一座金茂大厦,“搬走”了湖州半座青山。一条浦东南干线,“消灭”了湖州的金盖山。在“金山银山,不如绿水青山”的现代生态文明理念下,上海周边的浙江、江苏等地关闭了大量采石场。建设仍在继续,可用资源却大幅度减少,或可用资源的成本愈来愈高,这在一定程度上也寄希望于城市固废替代天然石矿。

1.2 城市固废资源化的国内外现状

1.2.1 欧洲

发达国家将污染物转移到发展中国家的发展方式,受到了全世界的批评。1987年,以挪威前首相布伦特兰夫人为主席的世界环境与发展委员会(WCED),向联合国提交了一份报告《我们共同的未来》(文件名为《布伦特兰报告》),其中提到了“可持续发展”:既满足当代人的需要,又不对后代人满足其自身需求的能力构成危害的发展;应把生态利益、社会利益和经济利益增长一起考虑。

《布伦特兰报告》中的有些概念,已经成为欧盟1991年3月正式采纳的有关垃圾的指令91/156/EEC的一部分。这一指令意在迫使欧盟成员国规定:通过清洁技术、可被再利用或再生的产品的开发,预防和减少废弃物;垃圾的再生与回收,以及它向次级材料的转化;垃圾的回收与处置,起到不危及人体健康或环境。

图1-1是欧洲各国城市垃圾再生率的分布情况,保加利亚几乎为零,而德国已经接近45%。表1-1是人均生活垃圾和建拆垃圾的再生情况。由于缺乏建拆垃圾的恰当定

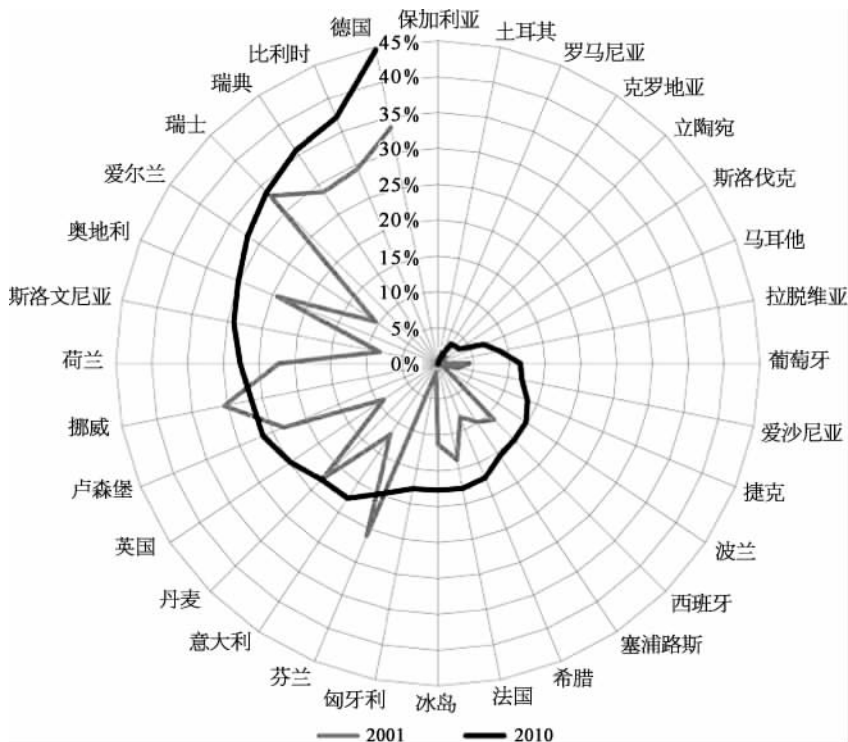


图 1-1 欧洲各国垃圾再生占城市固废总量的比率(%)

义,也缺乏可靠的欧盟监测计划,这些数据并不完全准确。其结论是,人口较密集的国家,如比利时、丹麦、荷兰,建拆垃圾再生的进展相对较好;其次是芬兰、法国、德国、英国;另一些国家,建拆垃圾再生似乎局限于城市群中。

表 1-1 欧盟国家建拆垃圾量和再生率

欧盟国家	人口 (百万人)	建拆垃圾 ($\times 10^6$ t)	建拆垃圾/ [kg/(人·年)]	再生率/%	生活垃圾/ [kg/(人·年)]
比利时	10	7.5~8	700~800	87	350
丹 麦	5.2	2.3~5	460~1 000	81	460
芬 兰	5	1.6	320	45	620
法 国	56	20~25	340~450	15	460
希 腊	10	2	500	<5	300
荷 兰	15	13~14	870~930	>90	500
爱尔兰	3.5	2.5	710	<5	310
意大利	58	35~40	600~690	9	350
卢森堡	0.4	2.7	6 670	—	450
葡萄牙	10	3	330	<5	300
西班牙	39	11~22	280~560	<5	320
英 国	57	50~70	880~1 220	45	350
瑞 典	8.5	1.2	140	21	370
德 国	79	52~120	840~1 900	17	360
奥地利	7.7	22	2 860	41	430
欧盟合计(估)	364	221~334	607~918	28	390

总体而言,欧洲的固废再生存在以下特点:

(1) 大量固废经加工后作为再生集料或次级集料被用于道路工程中,这一方面说明了道路工程有着巨大的材料需求,另一方面是因为道路建设的普遍性,所以总能找到运距相对短的工程项目。不过,有些欧洲国家(最有名的是荷兰)已经开始研究石质建材再生回其最初所在材料中的可能性(从“垃圾管理”转向“链管理”)。其内涵就是混凝土应优先再生回新混凝土中,灰砂砖再生回新灰砂砖中。不过,建材的再生仅当再生产品与天然资源相比在成本、质量和数量方面有竞争优势时才有吸引力。由于制造良好质量再生集料混凝土必需的若干额外程序,以及可能略微复杂的加工,混凝土生产再生集料的成本将比道路建设中水平更高。即便在荷兰,填埋建拆垃圾存在着禁令,混凝土中的应用迄今也还未大规模启动。这里主要的理由也是道路建设仍具有充足的能力。不过,普遍的预期是,将来混凝土的应用将增加,尤其是由于拆除混凝土的数量快速增长。

(2) 国情的不同,造成了欧洲各国再生水平的巨大差异。例如,挪威不是一个典型的“再生国家”,尤其在建拆垃圾再生方面,这类垃圾全国的再生水平在 10%~20%,远低于欧盟 25% 的平均值。挪威地多人少,自然资源丰富,岩石作为自然资源,储量巨大,砾石和碎石的年产量大致为 5 000 万 t(或 11.6 t/人)。优质岩石材料的易于获取,导致建设工

程中集料相对严格的技术要求。挪威气候表征为丰富的降水。由于从河流和湖泊中取水容易,因此全国只有不到 15% 的人口使用地下水作为饮用水(相比较,丹麦的饮用水主要由地下水供应)。这样挪威垃圾处置点的径流,没有受到太大的关注。由于可用空间、自然资源和地下水质量的优势,填埋仍是挪威建拆垃圾看似合理的解决方案。但这导致了挪威再生固废的动力不足。而人口密度高、国土面积小的荷兰,情况正好相反。荷兰石料矿产缺乏,优质石料依靠进口,这就使得再生集料具有很大的吸引力。为推动再生,荷兰政府颁布了可再生垃圾填埋的禁令,禁止如建拆垃圾等可再生垃圾进入填埋场,同时加大财政刺激,并引领技术开发,取得了极为有效的成果。

(3) 欧洲标准化委员会起草统一的标准,指导各国的固废再生工作。比如按照 CEN 154“再生集料特别小组”的建议,将石质集料分成了三大类,反映了欧洲建筑物由混凝土、黏土砖和天然石料组成的事实,内墙和内墙饰也有使用石膏灰浆和石膏块的情况。具体分类见表 1-2。

表 1-2 再生集料的分类标准

要 求	I 型	II 型	III 型	试 验 方 法
最小颗粒干密度/(kg/m ³)	1 500	2 000	2 400	prEN 1097-6
最大/(wt.%, SSD<2 200 kg/m ³)	—	10	10	prEN 1744-1, 13.2 节
最大/(wt.%, SSD<1 800 kg/m ³)	10	1	1	按 ASTM C123 改动
最大/(wt.%, SSD<1 000 kg/m ³)	1	0.5	0.5	
外来材料最大/(wt.%) (金属、玻璃、塑料、木材、纸张、焦油、破碎沥青等)	5	1	1	按 prEN 933-7 中的目视分离试验

注:按目前草拟的 prEN 1744-1 第 13.2 节,仅分离密度 2 000 kg/m³ 的材料;prEN 933-7 是一种分选方法,限于贝壳含量的测定。

I 型集料主要源于砌筑毛石,II 型集料源于混凝土毛石,III 型集料由再生集料(最大 20%)和天然集料(规定最低值 80%)的混合体组成。再生集料混凝土的性质可能与仅用天然集料的混凝土不同。因此,混凝土中仅部分集料由再生材料组成为宜。RILEM 认为,当混凝土中的再生混凝土集料占总质量的 20% 以内,或再生砌体集料占总质量的 10% 以内,其性质的变异可以忽略,而在特定的应用情况下,更高的再生集料替换率可能导致轻微的性质偏离。例如,代尔夫特理工大学的研究指出,再生混凝土与再生混合集料,粗组分 4/22 高达 100% 的替换率下,可被应用于设计强度 35 MPa、环境分类为 3 的混凝土。根据同一研究,由以上规范,再生细集料可被再生至混凝土中 50% 的替换率。再生混合集料的混凝土,非常适合于 28 d 强度达到 25~35 MPa、环境分类达到 2 的混凝土(W/C 比 0.55)。

1.2.2 美国

2013 年,美国产生了大约 2.54 亿 t 城市固体垃圾,再生和成为堆肥使用的是其中的 8 700 万 t,相当于 34.3% 的再生率。图 1-2 给出了美国 1960—2013 年城市固废的再生情况。