

● 建筑节能低碳最新技术丛书

BUILDING

可再生能源在建筑中的应用集成

Building-Integrated Applications of Renewable Energies

北京无源建筑规划设计院

刘令湘 编译



中国建筑工程出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

可再生能源在建筑中的应用集成/刘令湘编译. —北京:
中国建筑工业出版社, 2012. 7

(建筑节能低碳最新技术丛书)

ISBN 978-7-112-14302-3

I. 可… II. ①刘… III. 再生能源—应用—建筑
工程 IV. ①TU18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 105268 号

本书为《建筑节能低碳最新技术丛书》的第五分册, 主要介绍了建筑材料可持续发展、智能材料、建筑光照变革、可再生能源在建筑中的应用集成、热电联产和可再生能源、可持续发展的建筑和社区、区域供热制冷、零能耗建筑探索、可持续建筑电力系统的集成控制、建筑能量消耗与降低温室气体排放的前景等相关知识。

本书可供建筑师、建筑业主、居者和直接参与建筑业、物业运行管理、维护保养的专业人士, 以及大专院校师生、研究人员参考。

责任编辑: 于 莉

责任设计: 李志立

责任校对: 陈晶晶 王雪竹

建筑节能低碳最新技术丛书 可再生能源在建筑中的应用集成

北京无源建筑规划设计院

刘令湘 编译

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

华鲁印联(北京)科贸有限公司制版

北京世知印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15 $\frac{3}{4}$ 字数: 393 千字

2012 年 9 月第一版 2012 年 9 月第一次印刷

定价: 56.00 元

ISBN 978-7-112-14302-3

(22373)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

编 译 者 序

建筑节能低碳最新技术丛书已出版到第五册——可再生能源在建筑中的应用集成。

本册前面三章分别从建筑材料、建筑智能材料和建筑照明三个方面讨论了建筑节能低碳的措施及其最新进展。

建筑中采用可持续发展最新技术的一个重要方面在于建筑材料的改造更新。从全方位和全周期考量,建筑材料的生产几乎都是高耗能、高排放,如水泥、玻璃、隔热材料。现今,中国在上述建筑材料的产量方面几乎都居世界首位。再加上建筑行业不可或缺的钢材(我们的钢铁产量大于第二到第九位生产国产量的总和),高耗能、高排放则不言而喻。建筑材料从生产就采用可持续发展技术在建筑领域节能低碳日显关键,这包括:混凝土、玻璃、隔热材料以及建筑聚合材料各个方面。这便是本册第1章“建筑材料可持续发展”的重要内容。

近些年来问世的智能建筑材料、发光二极管及纤维光度学器件日益对于建筑节能低碳贡献良多,第2章“智能材料”和第3章“建筑光照变革”分别予以报告并评估。

从第4章起,集中介绍可再生能源在建筑中的应用集成。可再生能源在建筑中的应用集成实质上就是结合可再生能源的特点;充分、合理地融入建筑的能源供应使之与自然环境和諧相处;建立通往全球气候验证建筑的可行之路。

如本丛书前几册所述,可再生能源的特点是:能量密度低(如利用太阳能和生物能)、往往与地域(如利用潮汐、地热资源、风力和太阳热电等)以及季节和时间(如利用太阳热能发电、水力、潮汐和风力等)密切相关。显然,可再生能源在建筑中的应用集成必须考虑这些因素。和燃烧化石能源排放温室气体污染环境不同,利用可再生能源对于减少温室气体排放,缓和地球气候变暖意义重大。但是,从另外的视角,也应当关注应用可再生能源对于环境和人类健康可能的影响。这在本丛书前四册已有讨论。

应用可再生能源目前实现的气候验证建筑首推在本丛书第一册《无源房屋——能量效益最佳建筑》专门介绍的无源房屋。此外,独立式、零排放、零能耗等建筑已经有一些可再生能源实际应用的案例。第4章在归纳介绍这些已实现气候验证的建筑的同时,讨论将来的气候验证建筑。然后,分别探讨建筑物集成太阳光-光伏发电、太阳能热、小型风力、燃料电池、斯特林引擎、微水力和生物燃料在建筑物的集成。另外,还给出可再生能源在建筑物中集成的一个综合安排图示。

作为一幢住宅建筑物的典型,在第4章结尾集中描绘了太阳能在建筑物中的利用集成。然而,更广义范围的可再生能源在建筑中的集成,必然与居住社区、建筑物群和住宅以外其他用途的建筑物、建筑物群相联系在一起。特别应提及的还有:热电联产技术;区域供热制冷系统;建筑电力系统的集成控制以及降低建筑能量消耗与温室气体排放甚至关于更广泛地实现零能耗和零碳排放建筑的探索。

上述作为可再生能源在建筑中应用集成的重点方面分别在如下几章讨论:

- 第5章 热电联产和可再生能源；
- 第6章 可持续发展的建筑和社区；
- 第7章 区域供热制冷；
- 第8章 零能耗建筑探索；
- 第9章 可持续建筑电力系统的集成控制。

最后，第10章展望了建筑能量消耗与降低温室气体排放的前景，以结束本册的讨论。

正值本册丛书编译接近尾声，共有来自世界约200个国家和机构的代表参加的《联合国气候变化框架公约》第17次缔约方会议暨《京都议定书》第7次缔约方会议在南非德班于2011年12月11日当地时间凌晨闭幕。经过近两周“马拉松式”的谈判，大会通过决议：建立德班增强行动平台特设工作组，并将于2012年上半年投入工作，不晚于2015年制定一个适用于所有《公约》缔约方的法律工具或法律成果，降低温室气体排放。决定实施《京都议定书》第二承诺期并启动绿色气候基金。

国际气候谈判是一场错综复杂的国际经济和政治较量，其制度的变革无疑将是一个漫长而艰苦的过程。本册丛书第4章第4.2.3.1节“全球气候变化影响的4个场景”较详细地描绘了这4个场景（Scenario）。以国际社会现今应对气候变化营造环境的进展，进入场景3或者场景4的危险很大。即便这是太悲观的论调，考虑化石能源渐近枯竭的压力，提高能量利用效率已是必然。这一漫长而艰苦的历程就在我们脚下。

建筑节能低碳最新技术丛书已出到第五册，即最后一册。笔者特别感谢中国建筑工业出版社以深邃的远见和严谨的学风组织出版这套丛书。本丛书涉及世界范围几十个国家的案例贡献；编译出自英、德为主，涉及法、日、拉丁、意大利、荷兰、芬兰、瑞典、丹麦等近十种语言文字，可说是全球建筑节能低碳和应用可再生能源最新成果及经验的荟萃。和出版者一道，笔者愿将本书贡献给对建筑可再生能源利用和节能低碳有兴趣的建筑业主、居者和直接参与建筑业、物业运行管理、维护保养的专业人士。更对大专院校师生、研究生、相关研究设计院所领导、专家和工作人员寄予厚望。

如前四册所述，本书引用一些图片（均附有出处及作者）以飨读者，在此一并对作者致以诚挚谢意。

感谢CEO江丽女士和我们团队对编写本丛书的大力支持、协作和帮助。

北京无源建筑规划设计院 刘令湘 (Dr. Ing.)
2012. 1. 10 于北京

目 录

1 建筑材料可持续发展	1
1.1 混凝土	1
1.1.1 混凝土对环境可持续发展的痼疾	1
1.1.2 粉煤灰制水泥	1
1.1.3 地质聚合物	2
1.1.3.1 地质聚合物简述	2
1.1.3.2 地质聚合物的发展	3
1.1.3.3 地质聚合物的反应机理	3
1.1.3.4 地质聚合物的材料类别	4
1.1.3.5 地质聚合物的应用领域	4
1.1.3.6 硅酸盐水泥和地质聚合物水泥	5
1.1.3.7 地质聚合过程举例	6
1.1.4 生态水泥	9
1.1.4.1 生态水泥的节能低碳优势	9
1.1.4.2 生态水泥的 CO ₂ 封存	9
1.1.4.3 生态水泥的废物利用	10
1.1.4.4 生态水泥的其他优点	10
1.1.4.5 生态水泥生产实例	11
1.1.4.6 可持续发展的混凝土建筑——生态水泥和热质量	11
1.1.4.7 生态水泥的碳化过程	13
1.1.4.8 生态水泥制作步骤	13
1.2 玻璃	13
1.2.1 可持续发展建筑中的玻璃	14
1.2.2 可持续发展建筑中玻璃的热隔离	14
1.2.3 可持续发展建筑中玻璃的太阳光控制	14
1.2.4 可持续发展建筑中玻璃的防火性能	14
1.2.5 可自清洁玻璃镀膜	14
1.2.5.1 疏水性自清洁玻璃	15
1.2.5.2 亲水性自清洁玻璃	16
1.3 保温隔热材料	16
1.3.1 通常的保温隔热材料	16
1.3.2 天然保温隔热材料	17
1.3.2.1 羊毛	17
1.3.2.2 亚麻和大麻	17

1.3.2.3	赛璐珞	17
1.3.2.4	木纤维	17
1.3.2.5	膨胀黏土骨料	17
1.3.2.6	环境友好的保温隔热材料	17
1.3.2.7	天然保温隔热材料的局限及前景	18
1.3.3	保温隔热材料的最新进展	20
1.3.3.1	新的热屏蔽技术	20
1.3.3.2	Korund 产品	21
1.3.3.3	纳米孔超保温材料	22
1.3.3.4	隔热三明治墙板	23
1.3.3.5	透明隔热材料	23
1.3.3.6	泡沫玻璃	25
1.3.3.7	真空隔热材料板	26
1.4	可持续发展建筑聚合材料	31
1.4.1	再循环粉碎混凝土和沥青	31
1.4.2	透水混凝土	32
1.4.3	多孔沥青	32
1.4.4	温拌沥青混合料	32
1.4.5	搅拌成混凝土	33
1.4.6	蜂窝轻质混凝土	33
1.4.7	生物聚合基建筑材料	33
2	智能材料	35
2.1	智能材料简述	35
2.1.1	形状记忆合金	35
2.1.2	自修复材料	36
2.2	智能液体	37
2.2.1	电致流变液体	37
2.2.1.1	电致效应	37
2.2.1.2	电致流变液体的成分	37
2.2.1.3	电致流变液体的优点	37
2.2.1.4	电致流变液体的问题	38
2.2.2	磁致流变液体	38
2.3	建筑智能材料展望	40
3	建筑光照变革	41
3.1	发光二极管	41
3.1.1	发光二极管的原理	41
3.1.2	白光发光二极管	41
3.1.3	发光二极管在建筑中的应用展望	42

3.2 纤维光度学	43
3.2.1 纤维光学简述	43
3.2.2 光纤通信	43
3.2.3 光纤传感器	44
3.2.4 光纤的其他应用	45
3.2.4.1 光纤照明简述	45
3.2.4.2 光纤照明的特点	45
3.2.4.3 光纤照明的应用	45
4 可再生能源在建筑中的应用集成	47
4.1 可再生能源在建筑中应用集成的概述	47
4.2 通往全球气候验证建筑之路	48
4.2.1 已实现的气候验证建筑	48
4.2.1.1 无源房屋	48
4.2.1.2 独立式建筑	48
4.2.1.3 无源太阳能房屋	49
4.2.1.4 德国弗赖堡太阳房	51
4.2.2 业已实现的绿色居住社区	52
4.2.3 将来的气候验证建筑	53
4.2.3.1 全球气候变化影响的4个场景	53
4.2.3.2 对设计将来气候验证建筑的要求	54
4.3 建筑物集成太阳能光伏发电	55
4.3.1 建筑物集成光伏发电的发展	55
4.3.2 建筑物集成光伏发电单元的结构	56
4.3.3 建筑物集成光伏发电设计的基本考量	56
4.3.4 建筑物集成光伏发电的几种形式	57
4.3.5 太阳能光伏喷涂	59
4.3.6 建筑物集成太阳能光伏发电与城区规划设计	61
4.3.7 建筑物集成太阳能光伏发电的改进	61
4.4 建筑物集成风力发电	63
4.4.1 建筑物集成风力发电的发展	63
4.4.2 建筑物集成风力发电所面临的挑战	63
4.4.2.1 空气湍流	63
4.4.2.2 空气噪声和振荡	63
4.4.2.3 安全	65
4.4.2.4 难于测试	65
4.4.2.5 花费的有效性	65
4.4.2.6 用风力透平机作广告	66
4.4.3 建筑物集成风力发电的改进	66
4.4.4 建筑物集成风力发电举例	69

4.4.4.1	美国俄克拉何马医疗研究基金会大厦	69
4.4.4.2	美国旧金山 SFPUC 大厦	72
4.4.4.3	风能高速公路	72
4.4.4.4	纽约奥林匹克体育场	72
4.5	建筑物太阳热能集成	73
4.5.1	建筑物集成太阳热能	73
4.5.2	建筑物集成太阳能集热器能力	74
4.5.3	带跨季节存储器的建筑物群中央太阳能热厂能量利用	74
4.5.4	热泵	75
4.5.5	光伏/热混合式模板	75
4.5.6	国际能源局建筑物集成太阳热能项目	76
4.6	建筑物集成其他可再生能源	83
4.6.1	建筑物集成微燃料电池	83
4.6.2	建筑物集成斯特林引擎	84
4.6.3	建筑物集成微水电	85
4.6.4	建筑物集成生物能	86
4.7	可再生能源在建筑物中集成的综合安排	86
5	热电联产和可再生能源	88
5.1	引言	88
5.2	热电联产与可再生能量——低碳热能和电能的高效供应	89
5.2.1	热电联产技术与可再生能量技术	89
5.2.2	可持续发展的蓝图	89
5.2.3	减少 CO ₂ 排放的关键技术	90
5.2.4	热电联产技术的经济和环境惠益	90
5.2.5	可再生能源技术的经济和环境惠益	91
5.2.6	聚焦“热能”	92
5.2.6.1	热的燃料组成	92
5.2.6.2	可再生能源的商业供热	93
5.2.6.3	热能消耗按部门所占比例	93
5.2.6.4	建筑物吸收制冷	95
5.2.7	可再生热电联产技术	95
5.2.7.1	生物质燃料热电联产	95
5.2.7.2	地热资源热电联产	99
5.2.7.3	汇聚太阳能热电联产	103
5.2.8	热电联产产生的热用于海水淡化	104
5.3	热电联产与变化的可再生能源电力生产	109
5.3.1	变化的可再生能源	109
5.3.2	可再生能源发电的展望	109
5.3.3	通过热存储来平衡可变可再生能源发电	110

5.3.3.1	电力系统保持动态供需平衡的基本考量	110
5.3.3.2	热存储帮助电力系统保持动态供需平衡	110
5.3.3.3	热电联产对可变可再生能源发电保持动态供需平衡的附加应用	112
5.4	小结	114
6	可持续发展的建筑和社区	115
6.1	国际能源局推荐可持续发展的建筑和社区研究课题	115
6.2	能量利用高效建筑的设计战略	115
6.2.1	建筑物能量利用高效的设计	115
6.2.2	IEA 研究项目举例——挪威 Kvernhuset 中学	117
6.3	现存非住宅建筑节能改造措施	118
6.3.1	非住宅建筑的能量损失	118
6.3.2	现有建筑能量改造措施	119
6.3.2.1	气溶胶管密封剂技术	119
6.3.2.2	冷金属屋顶技术	119
6.3.2.3	利用日光技术	120
6.3.2.4	专用室外空气系统技术	122
6.3.2.5	需求控制通风技术	123
6.3.2.6	无油磁悬浮轴承制冷压缩机技术	124
6.3.2.7	远红外线采暖技术	124
6.3.2.8	大规模太阳墙空气采暖技术	124
6.3.2.9	无源建筑技术	125
6.3.2.10	去除热层理技术	128
6.3.2.11	采用膜生物反应器技术的节水改造工程	128
6.3.3	热泵和可逆空调	128
6.3.3.1	意大利研究应用热泵和可逆空调案例	130
6.3.3.2	德国研究应用热泵和可逆空调案例	130
6.3.3.3	法国研究应用热泵和可逆空调的案例	134
6.3.3.4	比利时研究应用热泵和可逆空调的案例	136
6.4	高效能建筑和社区的低有效能系统	141
6.4.1	目前建筑物空间采暖和制冷的能量供应链	141
6.4.2	有效能的概念	141
6.4.3	低有效能系统	144
6.4.4	建筑和社区的高效低有效能系统	144
6.4.5	建筑物和社区应用低有效能系统案例	144
6.4.5.1	加拿大达特茅斯市 Alderney Gate 建筑群	146
6.4.5.2	荷兰海尔伦 (Heerlen) 市建筑群利用冷热井制冷供热	148
6.4.5.3	德国卡塞尔市建筑群利用冷热井制冷供热	150
6.4.5.4	美国明尼苏达州双城社区低有效能利用案例	152
6.4.5.5	丹麦 Ullerrød-byen 区域热网低有效能利用案例	154
6.4.6	建筑物和社区应用低有效能系统小结	156

6.5	低能耗预制件系统	157
6.5.1	低能耗预制系统概述	157
6.5.2	低能耗预制件系统特点	158
6.5.3	低能耗预制系统的发展	159
6.5.4	低能耗预制系统的挑战	160
6.5.5	低能耗预制系统的节能效果	161
6.5.6	低能耗预制系统举例	161
6.5.6.1	丹麦哥本哈根 Velux 低能耗预制系统	161
6.5.6.2	奥地利示范项目	163
6.5.6.3	瑞士示范项目	163
6.6	建筑中的微型热电联产	164
6.6.1	建筑中的微型热电联产概述	164
6.6.2	小型燃料电池和基于燃烧的微型热电联产用于住宅建筑的研究	165
6.6.2.1	住宅建筑电负荷	165
6.6.2.2	燃料电池微型热电联产设施硬件和软件模型	165
6.6.2.3	燃料电池微型热电联产设施在建筑中的集成	167
6.6.3	微型热电联产用于住宅建筑的研究小结	167
7	区域供热制冷	169
7.1	区域供热系统简介	169
7.2	区域供热系统的组成	169
7.2.1	热量的产生	169
7.2.2	热量的分配	170
7.2.3	热量的计量	171
7.3	区域供热系统规模	171
7.4	区域供热系统的优缺点	172
7.4.1	区域供热系统的优点	172
7.4.2	区域供热系统的缺点	172
7.5	区域供热系统的应用	172
7.5.1	区域供热系统的多样性	172
7.5.2	欧洲区域供热系统举例	172
7.5.2.1	法国里昂 (Lyon) ——为 416000 个居民供热制冷	172
7.5.2.2	匈牙利最大的热电联产厂	172
7.5.2.3	英国伦敦 Pimlico 热电联产厂	173
7.5.2.4	英国沃里克大学 (University of Warwick) 区域热电联产厂	174
7.5.2.5	丹麦 Copenhagen 中心区域供热	174
7.5.3	北美区域供热系统	175
7.5.3.1	加拿大 Drake Landing 中央太阳能供热系统	175
7.5.3.2	加拿大多伦多 Enwave 深湖制冷技术	177
7.5.3.3	美国圣保罗市区域供热和制冷系统	177

7.6 区域制冷系统.....	178
7.6.1 区域制冷系统简介	178
7.6.2 区域制冷系统举例	178
7.6.2.1 加拿大多伦多 (Toronto) Enwave 深湖制冷	178
7.6.2.2 瑞典松兹瓦尔 (Sundsvall) 雪制冷系统	178
8 零能耗建筑探索.....	180
8.1 零能耗建筑简介	180
8.1.1 零能耗建筑概述.....	180
8.1.2 零能耗建筑的现代进展	180
8.1.3 零能耗建筑的定义	180
8.2 设计和建造零能耗建筑.....	181
8.2.1 零能耗建筑的设计	181
8.2.1.1 零能耗建筑设计要旨	181
8.2.1.2 零能耗建筑设计的计算机模拟	181
8.2.1.3 零能耗建筑设计采用的主要措施	181
8.2.2 零能耗建筑成功 5 步骤	182
8.2.3 零能耗建筑的能量收获	183
8.2.4 零能耗建筑中能量收获与节能的关系	183
8.2.5 零能耗建筑中使用者的行为	183
8.3 零能耗建筑的优缺点	183
8.3.1 零能耗建筑的优点	183
8.3.2 零能耗建筑的缺点	184
8.4 零能耗建筑与绿色建筑.....	184
8.4.1 零能耗建筑和绿色建筑的定义比较	184
8.4.2 相比绿色建筑而言零能耗建筑的特性	184
8.4.3 认证	184
8.5 零能耗建筑举例	185
8.5.1 英国伦敦贝丁顿零能耗开发项目	185
8.5.1.1 BedZED 概述.....	185
8.5.1.2 BedZED 建筑物理.....	185
8.5.1.3 BedZED 能量效益	186
8.5.1.4 BedZED 生态建设全貌	186
8.5.2 中国零能耗建筑开发项目	188
8.5.2.1 中国广州珠江大厦	188
8.5.2.2 中国上海东滩生态城	188
8.5.3 美国加利福尼亚州 IDeAs Z2 零能耗建筑开发项目	189
8.5.3.1 IDeAs Z2 项目简介	189
8.5.3.2 IDeAs Z2 设计措施要点	189

9 可持续建筑电力系统的集成控制	190
9.1 微网简介	190
9.1.1 微网概述	190
9.1.2 可持续能源微系统	190
9.1.2.1 可持续能源微系统的概念	190
9.1.2.2 可持续能源微系统的特点	191
9.2 微网应用实例	191
9.2.1 美国微网应用	191
9.2.1.1 燃料电池微网	192
9.2.1.2 小电网整合绿色能源技术	193
9.2.1.3 智能光伏小电网技术	193
9.2.1.4 可再生能源微网综合检测	194
9.2.2 欧洲微网应用	196
9.2.2.1 德国 Mannheim-Wallstadt 住宅区微网项目	196
9.2.2.2 希腊基斯诺斯 (Kythnos) 岛新一代模式化混合电力微网项目	197
9.2.2.3 德国 ISET 电力微网实验室	198
9.2.2.4 英国曼彻斯特大学惯性储能	199
9.2.3 澳大利亚微网应用	200
9.2.4 日本微网应用	202
9.2.4.1 八户 (HACHINOHE) 青森 (Aomori) 微网项目	202
9.2.4.2 仙台 (SENTAI) 微网示范项目	202
10 建筑能量消耗与降低温室气体排放的前景	204
10.1 能量消耗与碳排放	204
10.1.1 全球二氧化碳排放最新数据	204
10.1.2 发电产热——全球最大二氧化碳排放源	205
10.1.3 国际能源局关于建筑节能低碳技术路线图	205
10.2 建筑能耗与碳排放前景	206
10.2.1 影响建筑能量利用效益的因素及发展趋势	206
10.2.2 面对能量和环境挑战的技术措施	206
10.3 能量消耗与碳排放最佳化	207
10.3.1 现存建筑节能改造使能量消耗与碳排放最佳化	207
10.3.2 社区能量消耗与碳排放最佳化	208
10.4 建设可持续发展的家园	209
10.4.1 可持续发展的 3 元素汇聚	209
10.4.2 影响建筑和社区可持续发展的 3 个方面	210
11 有关可持续建筑材料、可再生能源在建筑和社区集成的书籍	211

1 建筑材料可持续发展

建筑中采用可持续发展尖端技术的一个重要方面在于建筑材料的改造更新。从全方位全周期考量，建筑材料的生产几乎都是高耗能、高排放，如水泥、玻璃、隔热材料。

1.1 混凝土

混凝土的主体——水泥，是位列在水之后，最为广泛应用的建筑原料。

1.1.1 混凝土对环境可持续发展的痼疾

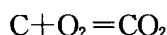
作为最广泛应用的建筑材料，混凝土饱受环境学者的非议：

- 1) 高碳的生产技术；
- 2) 利用自然资源——石灰石仅一次。

作为混凝土的主体，水泥生产排放 CO_2 主要包括两部分：

第一，黏土和石灰在 1450°C 旋转窑燃烧生成。

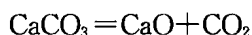
如燃煤发热量为 22MJ/kg ，含 C 65%



燃烧 1t 煤产 CO_2 量 2.38t。

生产 1t 水泥熟料需 0.16~0.296t 煤，产生 CO_2 释放 0.381~0.704t。

第二，碳酸钙变氧化钙反应：



普通硅酸盐水泥熟料含氧化钙 65% 左右，每生产 1t 水泥熟料生成 0.511t 的 CO_2 。仅这两项，每生产 1t 水泥熟料排放 CO_2 0.892~1.215t。

如若再考虑采矿、成品运输以及其他相关能耗释放的 CO_2 ，混凝土对于可持续发展而言，乏善可陈。

1.1.2 粉煤灰制水泥

《英国气候变化应对课税条例》(UK Climate Change Levy) 提供生产厂家减少二氧化碳排放，减免税额 80% 优惠的回报政策。粉煤灰 (Pulverized fuel ash, PVA) 制水泥就是全方位混凝土生产过程的减碳方法之一。这种混合水泥含有 30% 的 PVA——燃煤发电厂的副产品。

采用 PVA 还有另一个优点——避免土地回填花费；同时减少对采石场如砾石的自然开采。这里必须注意的是：PVA 是高碳燃煤发电厂的废料，依然含有一些有毒化学物质。目前，PVA 可提供性渐少，因为高碳燃煤发电厂往往被关门停产。

威尔士西北部盛产石板闻名于世的小镇 Blaenau Ffestiniog 被石板废料山所环绕。石

板废料山会对周围环境产生粉尘侵扰。此时采用 PVA 具有双重优势：

- 1) 避免过度开采自然资源；
- 2) 大大改善散落在这一地区历经几个世纪石板矿区的景观价值。

图 1-1 所示为小镇 Blaenau Ffestiniog 鸟瞰和景观。



图 1-1 威尔士西北部盛产石板的小镇 Blaenau Ffestiniog

(来源: Snowdonia)

1.1.3 地质聚合物

1.1.3.1 地质聚合物简述

地质聚合物 (Geopolymer) 是近年来国际上研究非常活跃的非金属材料之一。它是 以黏土、工业废渣或矿渣为主要原料, 在较低温度条件下, 经适当的工艺处理, 通过化学 反应得到的一类新型无机聚合物材料。

对于地质聚合物, 国内有学者建议称为“矿物聚合物”似更贴切。在尚无正式中文命 名之前, 本书暂称“地质聚合物”。所谓“地质聚合”(geopolymerization) 指的是自然矿 物: 硅氧四面体、铝氧六面体组合成三维链或网格结构的过程。

地质聚合物水泥具有强度高、硬化快、耐酸碱腐蚀等优于普通硅酸盐水泥的性能, 同

时具有材料丰富、工艺简单、价格低廉、节约能源等优点，并以此引起了世界广泛关注。

鉴于地质聚合物水泥可以在较低温度生产，用其代替普通水泥，避免了高温煅烧，不仅可以节省大量不可再生的化石能源；比起传统硅酸盐水泥生产这一碳排放大户，还可以减少 80%~90% 的 CO_2 排放。

1.1.3.2 地质聚合物的发展

据称，公元前，秘鲁和埃及辉煌的建筑中就有采用类似地质聚合物的胶凝材料。

近代地质聚合物，特别是地质聚合物水泥的发展和应用当归功于法国科学家 J. Davidovits 的贡献。在研究建筑物有机聚合物阻燃性能的过程中，他发现与有机聚合类似，长石和沸石的合成需要相似的水热条件：高 pH、碱性、 150°C 。1972 年，Davidovits 申请了地质聚合物历史上的第一篇关于用高岭土通过碱激活反应制备建筑板材的专利。1983 年他协助美国 Lone Star 公司完成了地质聚合物水泥的商业化生产。

此后世界上许多国家的专门机构都在致力于地质聚合物材料内部结构和反应机理的研究，并对其优异性能的应用前景进行了乐观的估计。

20 世纪 90 年代末期，Van Jaarsveld 和 Van Deventer 等致力于由粉煤灰等工业固体废物制备地质聚合物及其应用的研究，包括 16 种天然硅酸盐矿物制备地质聚合物，证明了粉煤灰中较高的 CaO 含量和含有的超细颗粒是合成高强度地质聚合物的有利条件。

图 1-2 展示了近年来全世界地质聚合物及其应用的研究机构雨后春笋一般的成长。

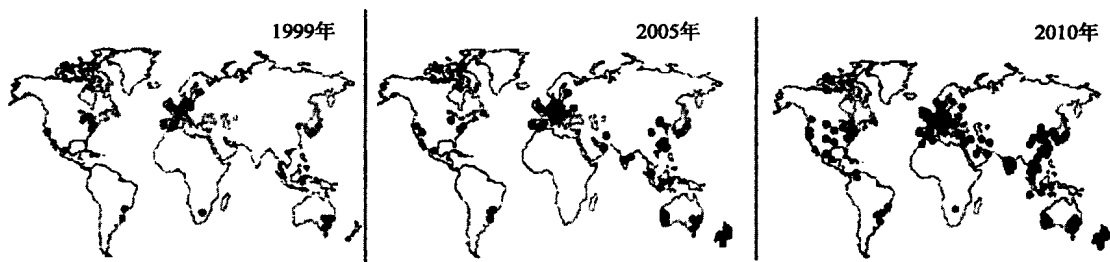


图 1-2 近年来全世界地质聚合物及其应用的研究机构雨后春笋

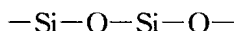
(来源: Davidovits, 2010)

全球范围内关于地质聚合物及其应用的研究论文发表数量也依照指数曲线上升，特别是在中国。

1.1.3.3 地质聚合物的反应机理

现在大多数的研究者都以 J. Davidovits 的理论作为地质聚合物反应机理的基础。J. Davidovits 提出的“解聚-聚合”机理：铝硅酸盐聚合反应是一个放热脱水的过程，在碱性催化剂的作用下铝硅酸盐矿物的硅氧键和铝氧键断裂，发生断裂-重组反应；形成一系列的低聚硅（铝）四面体单元，聚合后又将大部分水排除，最终生成 Si-O-Al 的网格结构。聚合作用过程即各种铝硅酸盐与强碱性硅酸盐溶液之间的化学反应，最终形成石状体。地质聚合物水泥的这一作用可用作胶凝材料。

地质聚合物是类似共价键的矿物分子三维链或网格结构。它们呈如下组成分子单元（或化学组别）：



硅氧构造，聚硅氧构造；

7) 利用废物：由粉煤灰、高炉矿渣和尾矿的地质聚合物产品。

8) 有毒物质封装固化：有害、具放射性废物和高污染的材料由一种非常防渗而且高强度的地质聚合物材料固化封装。

9) 其他：油漆、涂料、胶粘剂。

1.1.3.6 硅酸盐水泥和地质聚合物水泥

图 1-4 所示为硅酸盐水泥和地质聚合物水泥固化过程及砂浆微结构图。

普通硅酸盐水泥的固化过程是经过水化 (hydration) 完成的。

地质聚合物水泥的固化过程则通过聚合胶凝 (polycondensation)。

从图 1-4 所示砂浆微结构图中可以注意到：普通水泥的物质颗粒明显粗且堆叠，这会

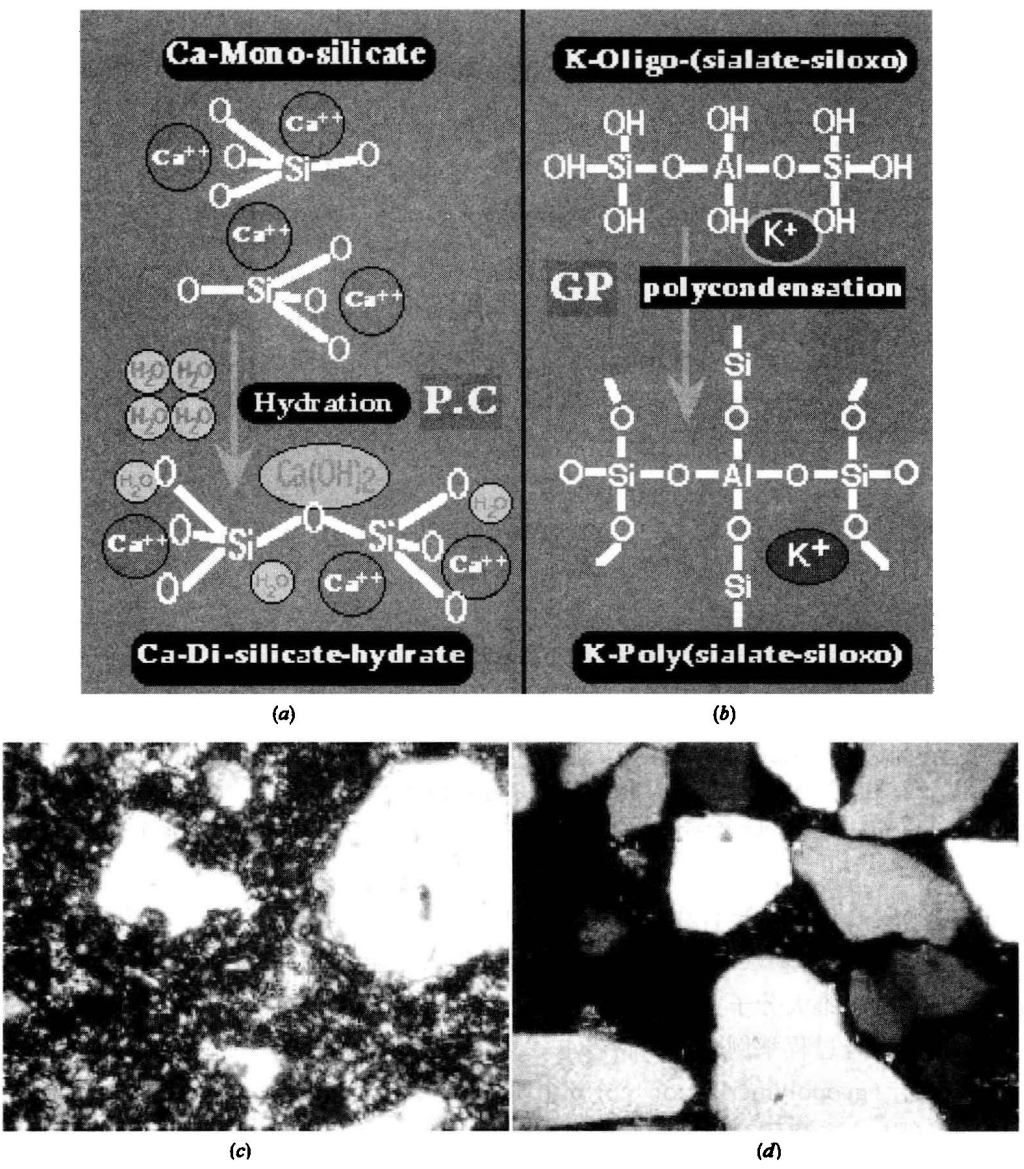


图 1-4 硅酸盐水泥 (a) 和地质聚合物水泥 (b) 的固化过程 (c) 及砂浆微结构 (d)
(来源: Geopolymer Institute)