

活性粉末混凝土

—— 配制、性能与微结构

刘娟红 宋少民 编著



化学工业出版社

TU528.31/6

2013

活性粉末混凝土 ——配制、性能与微结构

刘娟红 宋少民 编著

北方工业大学图书馆



C00347996



化学工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

活性粉末混凝土: 配制、性能与微结构/刘娟红, 宋少民编著. —北京: 化学工业出版社, 2013. 6

ISBN 978-7-122-17105-4

I. ①活… II. ①刘…②宋… III. ①高强混凝土-配制②高强混凝土-性能③高强混凝土-复合材料结构
IV. ①TU528.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 081574 号

责任编辑: 常 青

文字编辑: 冯国庆

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 14½ 字数 267 千字 2013 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

序

活性粉末混凝土是一种超高强纤维增强混凝土材料，具有优异的力学性能和耐久性能。目前实际能够制造的是 200MPa 级活性粉末混凝土。人们梦想着能够制造更高强度等级的混凝土，但从实际应用效果看，200MPa 以下的活性粉末混凝土与我国当前的材料制造技术水平和使用目的吻合较好。

活性粉末混凝土自 20 世纪 80 年代末在欧洲发明以来，历经二十多年的研究，形成了完整的理论基础和制备技术，现在已经在实际工程中广泛应用。十多年前清华大学覃维祖教授将活性粉末混凝土介绍进中国，许多研究者做了大量深入系统的研究工作，形成了具有中国特色的配合比和原材料体系，推进了这种新型工程材料的应用。我国已实现了活性粉末混凝土的工业化生产，采用活性粉末混凝土批量制造高速铁路的电缆沟盖板和人行道板，其实际用量居世界之首。我国现已开始编制活性粉末混凝土国家标准，预计 2014 年可以颁布施行，这将为规范活性粉末混凝土的生产，促进活性粉末混凝土的应用提供依据。

刘娟红、宋少民多年从事活性粉末混凝土的研究，特别是在大掺量矿物掺合料活性粉末混凝土的制备技术方面有独到的研究成果。他们收集了现有的相关研究成果，结合自己的研究心得，编写了我国第一本关于活性粉末混凝土的著作，该书全面系统地介绍了活性粉末混凝土的相关基础理论知识、国内外的相关研究成果和工程应用案例，是一本信息量大、非常有参考价值的专著，值得水泥混凝土科学界的同仁仔细阅读。

陶培渝

2013 年 6 月于清华园

前言

水泥混凝土技术从 19 世纪中期开始起步,经历了 100 多年的不断积累、发展和完善,在 20 世纪 70 年代后由于化学外加剂的发展和应用,混凝土的世界迎来了一个具有革命性的新时期。首先由于高效减水剂技术取得长足进步,大流态混凝土成为混凝土材料的主体,与此同时应用于土木工程中的混凝土强度不断提高,使用 C60 以上的高强混凝土建造了大量的现代建筑物。矿物掺合料在混凝土中的应用越来越普遍,现代多组分混凝土向着获得更高性能的目标迅速迈进。

20 世纪 80 年代,法国路桥试验中心使用聚羧酸减水剂在很低的水胶比下研究高掺硅灰水泥混凝土,当时可以实现 24h 抗压强度超过 100MPa,但是这种混凝土后期抗压强度增长很小,劈裂抗拉强度却随时间不断下降。当然主要原因是低水胶比和高硅灰掺量条件下发生了较大的自生收缩,造成混凝土内部微缺陷不断增多。此后,为克服这种超高强混凝土的缺陷及其在工程中高开裂的风险,法国学者采用去除粗骨料,掺加钢纤维,消除了粗骨料界面影响,利用钢纤维阻止混凝土收缩和开裂,在这样的技术路线指导下,20 世纪 90 年代初,活性粉末混凝土专利技术问世。

1997 年清华大学覃维祖教授向国内介绍了活性粉末混凝土,1999 年建筑技术杂志发表了覃维祖教授的论文“一种高性能混凝土——活性粉末混凝土”。此后国内清华大学、北京交通大学、湖南大学、东南大学、北京科技大学、北京建筑工程学院等高校与相关科研机构开展了活性粉末混凝土技术的广泛研究。

活性粉末混凝土是现代先进水泥基材料,具有超高强度、高韧性、低渗透、体积稳定等优异性能。笔者从 1999 年开始研究活性粉末混凝土,受到覃维祖、孙伟等学者学术思想的影响,将研究重点放在了大掺量矿物掺合料活性粉末混凝土的制备和机理研究方面,经过多年的研究、思考,笔者感悟到研究活性粉末混凝土不仅对于新型高性能混凝土构件开发很重要,同时对于水泥基材料在低水胶比下水化和微结构理论的学术创新具有重要意义。

在大掺量活性粉末混凝土的研究过程中,笔者不断思考现代低水胶比高性能水泥基材料的机理、本质和特征。例如,吴中伟先生的“中心质假说”可以很好

地解释大掺量活性粉末混凝土超高强度的形成机理；再如，在活性粉末混凝土微结构中很难发现氢氧化钙和钙矾石晶体；又如石灰石超细粉可以明显降低拌和物黏度，在浓分散体系中达到良好的分散作用。

目前我国基础设施建设规模大、水平快速提高，说中国是世界先进混凝土技术研究和工程应用的中心并不为过。在国防工程、海港建设、地下工程、桥梁工程、铁道工程、结构抗震等众多领域，活性粉末混凝土都具有应用前景。让学术界和工程界更多地了解这种高性能混凝土材料，将其高效利用于土木工程中，造福国家、造福人民，同时推动现代水泥基材料及理论的研究、应用和创新，这就是笔者撰写此书的初衷和期望。

过去十余年的研究和开发过程中，孙伟院士、覃维祖教授、阎培渝教授、安明喆教授、黄政宇教授等学者在活性粉末混凝土领域的许多研究成果和学术观点，丰富了本书的内容，应该说正是热衷于活性粉末混凝土的研究者以及工程界技术人员的共同努力，为本书的撰写和出版奠定了坚实的基础。

本书对活性粉末混凝土进行了较为系统的论述，内容包括活性粉末混凝土的技术基础、活性粉末混凝土的配制、活性粉末混凝土的性能和增强机理及微结构、大掺量矿物细粉活性粉末混凝土、活性粉末混凝土构件的制备与性能、活性粉末混凝土在工程中的应用与思考等。活性粉末混凝土的国家标准正在编制，预计2014年正式颁布。愿本书和该标准一起为推进活性粉末混凝土在我国工程中的广泛应用发挥积极的作用。

本书的出版得到北京市绿色建筑与节能技术重点实验室的资助，在此表示感谢！

由于笔者学术水平有限，书中难免有遗漏与不妥之处，敬请广大读者批评指正。

刘娟红、宋少民于北京

2013年6月

目 录

1

第 1 章

概述

1

1.1 活性粉末混凝土的定义及国内外发展概况	3
1.1.1 活性粉末混凝土的定义	3
1.1.2 活性粉末混凝土的超高力学性能	3
1.1.3 活性粉末混凝土优异的耐久性	4
1.1.4 活性粉末混凝土良好的生态效应	5
1.1.5 活性粉末混凝土开发与应用概况	6
1.1.6 活性粉末混凝土的应用前景	9
1.2 活性粉末混凝土的配制原理与技术途径	10
1.2.1 配制原理	10
1.2.2 技术途径	13
参考文献	13

2

第 2 章

活性粉末混凝土的技术基础

17

2.1 高效减水剂的技术进展	17
2.1.1 聚羧酸系高性能减水剂概述	18
2.1.2 聚羧酸系高性能减水剂的定义	19
2.1.3 聚羧酸系高性能减水剂的结构特性和性能优点	19
2.1.4 聚羧酸系高性能减水剂的作用机理	20
2.1.5 聚羧酸系高性能减水剂的相容性	21
2.2 矿物掺合料的研究与应用	23
2.2.1 粉煤灰	23
2.2.2 水淬磨细矿渣粉	24

2.2.3	石灰石粉	25
2.2.4	硅灰	26
2.2.5	研究现状与存在问题	26
2.2.6	矿物掺合料的发展方向	27
2.3	低水胶比与活性粉末混凝土的高强度	28
2.3.1	低水胶比与匀质性	28
2.3.2	低水胶比与界面过渡区	29
2.3.3	低水胶比与强度	29
2.4	超细粉与活性粉末混凝土的高强度	29
2.4.1	超细粉的填充效应与高强度	30
2.4.2	超细粉的强度效应与高强度	30
2.4.3	超细粉的优化结构作用与高强度	30
2.5	超高强混凝土的相关理论	31
2.5.1	中心质假说	31
2.5.2	孔结构与强度关系的理论	33
2.5.3	多元复合体系的颗粒级配与最紧密堆积理论	35
	参考文献	39

3

第3章

活性粉末混凝土的配制技术

42

3.1	原材料的技术要求	42
3.1.1	原材料的基本特性	42
3.1.2	粉体材料的颗粒级配	45
3.1.3	砂子颗粒级配和空隙	45
3.2	活性粉末混凝土配合比计算模型	47
3.3	活性粉末混凝土配合比参数的选择	48
3.3.1	性能与参数	48
3.3.2	致密堆积的原则	49
3.3.3	胶凝材料浆体体积	50
3.3.4	骨料体积	50
3.3.5	胶凝材料用量和用水量	50
3.4	基于最小需水量法的配合比设计	50
3.4.1	达到最大颗粒堆积密度与浆体最小需水量的胶凝材料 粉体比例	51
3.4.2	各颗粒级配砂子比例和用量的确定	54

3.4.3	各胶凝材料用量和水用量的确定	56
3.5	活性粉末混凝土的制备设备与搅拌工艺	56
3.5.1	制备设备	56
3.5.2	搅拌工艺	57
3.6	活性粉末混凝土的振捣、成型与养护制度	57
3.6.1	振捣、成型	57
3.6.2	养护制度	57
	参考文献	59

4

第4章

活性粉末混凝土的性能

60

4.1	活性粉末混凝土的工作性	60
4.1.1	活性粉末混凝土的流变性	61
4.1.2	活性粉末混凝土新拌浆体流变性的经时变化	63
4.1.3	活性粉末混凝土的黏度	64
4.1.4	活性粉末混凝土的流动度	65
4.2	活性粉末混凝土的强度	67
4.2.1	活性粉末混凝土的强度	67
4.2.2	活性粉末混凝土受压破坏过程	67
4.2.3	影响活性粉末混凝土抗压强度的因素	69
4.2.4	影响活性粉末混凝土抗弯拉强度的因素	74
4.2.5	活性粉末混凝土抗压强度与抗拉强度的关系	77
4.2.6	活性粉末混凝土的强度发展与开裂	78
4.3	活性粉末混凝土的断裂性能	80
4.3.1	断裂的定义	80
4.3.2	活性粉末混凝土的基本断裂机理	80
4.3.3	影响活性粉末混凝土断裂性能的因素	81
4.3.4	活性粉末混凝土的断裂与普通混凝土断裂的区别	82
4.4	活性粉末混凝土的疲劳性能	83
4.4.1	钢纤维含量对活性粉末混凝土抗疲劳性能的影响	83
4.4.2	活性粉末混凝土疲劳后剩余抗压强度试验研究	84
4.5	活性粉末混凝土的变形	87
4.5.1	活性粉末混凝土变形分类	87
4.5.2	活性粉末混凝土收缩的主要因素	87
4.6	活性粉末混凝土的耐久性	88

4.6.1	活性粉末混凝土的抗渗性	88
4.6.2	活性粉末混凝土的抗冻性	89
4.6.3	活性粉末混凝土的碳化性能	90
4.6.4	活性粉末混凝土的抗侵蚀性	90
4.6.5	活性粉末混凝土的耐磨性	91
4.7	活性粉末混凝土的耐火性	91
4.7.1	活性粉末混凝土高温后静力学特性	92
4.7.2	含湿度及钢纤维掺量对活性粉末混凝土高温爆裂性能的影响	96
4.7.3	聚丙烯纤维对活性粉末混凝土高温后抗压强度的影响	97
4.8	生态型活性粉末混凝土	97
4.8.1	生态型活性粉末混凝土配合比优选	97
4.8.2	生态型活性粉末混凝土的静载力学行为	98
4.8.3	生态型活性粉末混凝土的动态力学性能	98
4.8.4	生态型活性粉末混凝土的耐久性能	99
4.8.5	RPC200 与 ECO-RPC200 的性能对比	100
	参考文献	100

5

第5章

活性粉末混凝土的增强机理与微结构

104

5.1	界面过渡区与匀质性	104
5.1.1	活性粉末混凝土的界面过渡区	104
5.1.2	活性粉末混凝土的匀质性	105
5.2	活性粉末混凝土的增强机理	106
5.2.1	密实堆积	106
5.2.2	中心质效应	106
5.2.3	超细粉的作用	107
5.2.4	纤维增韧机理	107
5.3	活性粉末混凝土的微结构	107
5.3.1	X 射线衍射定性相分析	108
5.3.2	扫描电镜分析	110
5.3.3	红外光谱分析	112
5.3.4	孔结构	113
5.3.5	RPC 中水化石与骨料等界面过渡区的微结构变化	116

5.4	活性粉末混凝土微观结构的形成及其特点	119
5.4.1	水化硬化与结构形成过程	119
5.4.2	活性粉末混凝土微观结构特点	120
	参考文献	120

6

第6章

大掺量矿物细粉活性粉末混凝土

122

6.1	大掺量矿物细粉活性粉末混凝土的配制	122
6.1.1	配制思想	122
6.1.2	原材料和试验方法	123
6.2	砂子颗粒级配和比例的确定	126
6.2.1	各级石英砂堆积试验	126
6.2.2	空隙率校核	127
6.2.3	初步配比的确定	129
6.3	不同胶凝材料组成和配合比对活性粉末混凝土流动性与强度的影响	130
6.3.1	砂胶比变化的影响	130
6.3.2	粉煤灰和硅灰相对掺量的影响	133
6.3.3	石灰石粉的影响	135
6.3.4	粒化高炉矿渣粉的影响	137
6.3.5	炉渣粉的影响	139
6.3.6	钢渣粉的影响	141
6.4	大掺量矿物细粉活性粉末混凝土最优配合比与成型、养护工艺	142
6.5	大掺量矿物细粉活性粉末混凝土的力学性能	143
6.5.1	抗折强度	143
6.5.2	抗压强度	144
6.5.3	劈裂抗拉强度	146
6.5.4	轴心抗压强度	147
6.5.5	各项性能	149
6.5.6	静弹性模量	149
6.5.7	构件的抗弯性能	150
6.6	大掺量矿物细粉活性粉末混凝土的耐久性能	151
6.6.1	早期收缩性能	151
6.6.2	抗硫酸盐侵蚀性能	153

6.6.3	抗碳化性能研究	155
6.6.4	抗氯离子渗透性能研究	158
6.6.5	抗冻性能研究	159
6.7	大掺量矿物细粉活性粉末混凝土耐高温性能	162
6.7.1	试验配合比及试验方法	162
6.7.2	高温爆裂试验	164
6.7.3	高温前后抗压强度变化	174
6.8	大掺量矿物细粉活性粉末混凝土的高性能机理及其微观结构	178
6.8.1	扫描电镜与能谱分析	178
6.8.2	孔结构分析	183
6.9	小结	186
	参考文献	188

7

第7章

活性粉末混凝土构件的制备与性能

190

7.1	活性粉末混凝土构件概述	190
7.2	活性粉末混凝土构件的制备	193
7.2.1	搅拌工艺	193
7.2.2	浇筑工艺	193
7.2.3	养护工艺	193
7.3	活性粉末混凝土构件的性能	194
7.3.1	迁曹铁路滦柏干渠大桥 20m T 形 RPC 梁	194
7.3.2	蓟港铁路 32m T 形预应力 RPC 梁	198
7.4	活性粉末混凝土构件存在的问题	203
7.5	活性粉末混凝土构件的发展方向	204
	参考文献	205

8

第8章

活性粉末混凝土在工程中的应用

207

8.1	活性粉末混凝土在国外的工程应用	207
8.1.1	谢布洛克步行桥	207
8.1.2	巴卡尔桥	208
8.1.3	“Ductal” 产品性能及应用	209
8.1.4	首尔 RPC 桥	211

8.1.5	伊利诺斯州的圆形屋盖	211
8.1.6	近年来建成的 RPC 桥梁工程	212
8.2	活性粉末混凝土在国内的工程应用	212
8.3	关于活性粉末混凝土的哲学思考	213
8.3.1	活性粉末混凝土与科学革命同行	213
8.3.2	活性粉末混凝土也不是十全十美	214
8.3.3	活性粉末混凝土对传统混凝土理念的扬弃	215
8.3.4	活性粉末混凝土中的认识论	216
	参考文献	217

第1章

概 述

活性粉末混凝土是在现代材料科学和混凝土技术快速发展基础上出现的一种高性能土木工程材料,其发明、发展与应用过程中给学术界和工程界带来的不仅是其优异的材料性能和结构形式的革新,更重要的是对水泥基材料的理论创新、理念更新的启示和推动作用。

20世纪70年代高效减水剂的开发和广泛应用与90年代优质活性矿物细粉超细粉(如硅灰、沸石粉等)的掺加,促使混凝土可以在较低水胶比的条件下形成密实而具有高强度($>60\text{MPa}$)的水泥基复合材料,即高强混凝土(high strength concrete, HSC)^[1,2]。但任何事物都具有两面性,有优点就会有缺点。高强混凝土在早期时弹性模量随强度升高而增大,同时变形受约束产生的应力松弛作用(徐变)减小,因此导致它比中低强度的混凝土更易开裂^[3~6]。硅粉掺量越多、水胶比越低的高强混凝土,早期强度发展越迅速,开裂和强度倒缩现象也就越显著。而且,随着混凝土强度的不断提高,混凝土的固有弱点——抗拉强度低、韧性差等愈益突出。为此,在水泥基材料中掺加抗拉强度高、极限延伸率大、抗碱性好的各种纤维(金属纤维、无机纤维或有机纤维)作为增强材料而形成水泥基复合材料,即纤维混凝土(fiber reinforced concrete, FRC),其中纤维材料可以约束水泥基料中裂缝的扩展,使混凝土具有较高的抗拉和抗弯强度、良好的韧性及延性^[7,8]。当然,在粗骨料颗粒仍然较大的情况下,钢纤维的“架桥”作用受到限制,而且长纤维对拌和物的工作性影响又十分显著。

混凝土是一种非均质材料,其中骨料在水泥基体中形成骨架。当混凝土试件受到外加荷载时,在水泥基体和骨料界面处,由于应力集中,易形成微裂缝。这些微裂缝的尺寸和扩展与骨料的粒径有直接关系^[9~11]。

在提高水泥基材料匀质性的研究过程中,人们曾采用了两种途径:一种是无

宏观缺陷的水泥材料 (macro-defect free cements, MDF), 采用聚合物水泥基体, 使基体内无大孔隙, 使其抗压强度和抗拉强度都得到很大提高; 另一种是均匀分布超细颗粒的致密系统 (densified system containing homogeneously arranged ultra fine particles, DSP), 主要是通过高效减水剂和硅灰, 同时掺入超硬度的骨料, 使超细粒子排列紧密、合理, 并相互填充, 同时采用压制密实成型工艺^[12,13], 从而达到密实。

无宏观缺陷的水泥材料是 1979 年英国化学工业公司和牛津大学最早开始研究的。MDF 的抗压强度高达 300MPa, 抗弯强度为 150MPa, 高达抗压强度的 1/2, 弹性模量达 50GPa。这是传统的水泥胶凝材料无法比拟的^[14,15]。MDF 的原材料中 90%~99% 都是高强度等级的硅酸盐水泥或铝酸盐水泥; 4%~7% 的水溶性树脂; 水灰比一般在 0.20 以下; 由于低水灰比, 要使各种组成材料均匀混合, 必须采用强力式高效剪切搅拌机; 成型时则采用热压工艺。这种材料具有高强度的原因, 最原始的解释是: 由于强烈加工的能量使其缺陷降低。MDF 水泥的研制成功, 引起世界范围内材料科学界的极大兴趣, 但这种材料对水相当敏感, 水分侵入后, 体积发生膨胀, 强度迅速下降, 这些问题目前国内外还没有很好的解决办法。

DSP 材料在瑞典、挪威、冰岛与丹麦等得到应用开发。在实际应用中, 密实填充的颗粒是硅酸盐水泥与超细硅灰, 超细硅灰填充在水泥粒子的空隙中, 而水泥与超细硅灰又填充密实排列的纤维材料 (或骨料) 中。DSP 材料的基体由两方面组成: ①粒度为 0.5~100 μm 的密实填充颗粒; ②均匀排列的超细粒子, 其粒度为 0.5nm~0.5 μm , 排列在比较粗的粒子之间的空隙中。在 DSP 材料中, 硅灰所起的贡献是巨大的, 主要包括硅灰的水化反应和硅灰的粒子填充作用。硅灰按适当比例取代水泥, 可以填充新拌水泥浆结构的空隙, 而且能与水泥水化过程中放出的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应, 形成不溶性的 C-S-H 凝胶, 最终得到均匀密实的水泥石微结构。

MDF 材料和 DSP 材料等由于水灰比较低而需采用强制式拌和、强力高频振捣、振动加压等工艺成型, 常使其工作性大为恶化, 造价提升, 因此应用并不是很广泛。而且它们通常只用来制造制品, 不作为结构材料。

为了获得性能更加优异的混凝土, 法国人 Prierre Richard 和 Marcel Cheyreyzy 采用“高致密水泥基均匀体系”(DSP) 模型, 集高强混凝土和纤维混凝土的优势于一体, 将粗骨料剔除, 根据最紧密堆积原理, 用最大粒径为 400~600 μm 的石英砂为骨料, 掺入适量短纤维和活性矿物掺合料, 配以成型施压、热处理养护等制备方法, 得到新型的高性能混凝土——活性粉末混凝土 (reactive powder concrete, RPC)^[16,17]。

1.1 活性粉末混凝土的定义及国内外发展概况

1.1.1 活性粉末混凝土的定义

活性粉末混凝土 (reactive powder concrete, RPC) 是 20 世纪末由法国布伊格 (Bouygues) 公司研究成功的一种超高强、低脆性、耐久性优异并具有广阔应用前景的新型超高强混凝土。它是由水泥、粉煤灰、石英砂、硅粉、高效减水剂等组成, 为了提高 RPC 的韧性和延性加入钢纤维。在 RPC 的凝结、硬化过程中采取适当的加压、加热等成型养护工艺。由于活性细粉占有较大比例, 因此它被称为活性粉末混凝土。

1.1.2 活性粉末混凝土的超高力学性能

RPC 实现高强化的基本原理是: 通过提高材料组分的细度与活性, 减少材料内部的缺陷 (孔隙与微裂缝), 获得超高强度与高耐久性。RPC 是一种超高强的混凝土, 其立方体抗压强度可达 200~800MPa, 抗拉强度可达 25~150MPa, 断裂能可达 30kJ/m², 单位体积质量为 2.5~3.0t/m³。RPC 有 2 个强度等级: 一是经蒸汽养护处理后强度达 200MPa 的 RPC200; 二是经高温、高压处理后强度达 800MPa 的 RPC800。表 1.1 是 RPC200、RPC800、HSC (high strength concrete, 高强混凝土) 与 NSC (普通混凝土) 的主要力学性能比较^[18,19]。

表 1.1 RPC200、RPC800、HSC 与 NSC 的主要力学性能比较

主要力学性能	混凝土种类			
	RPC200	RPC800	HSC	NSC
抗压强度/MPa	170~230	500~800	60~100	15~55
抗折强度/MPa	30~60	45~140	6~10	2.0~4.5
断裂能/(J/m ²)	20000~40000	1200~2000	140	100
弹性模量/GPa	50~60	65~75	30~40	20~35

脆性是混凝土材料的一大缺陷, 而掺加了微细钢纤维的 RPC 断裂能达 30000J/m² (普通混凝土 NSC 的断裂能只有 103J/m²), 所以, PRC 具有优良的韧性。从图 1.1 中几种混凝土的应力-应变全曲线^[20]可以看出, 掺钢纤维的 RPC 受压构件的变形性能和强度要远远优于 NSC、HPC。而用钢管约束和预加压力的 RPC 更能提高其延性, 充分发挥 RPC 的抗压性能, 从而使 RPC 更加经济合理地得到利用。

普通混凝土是一种脆性材料, 高强混凝土的脆性缺点表现得更为突出, 掺加微细钢纤维能显著提高 RPC 的韧性和能量吸收能力。表 1.2 是几种不同材料的

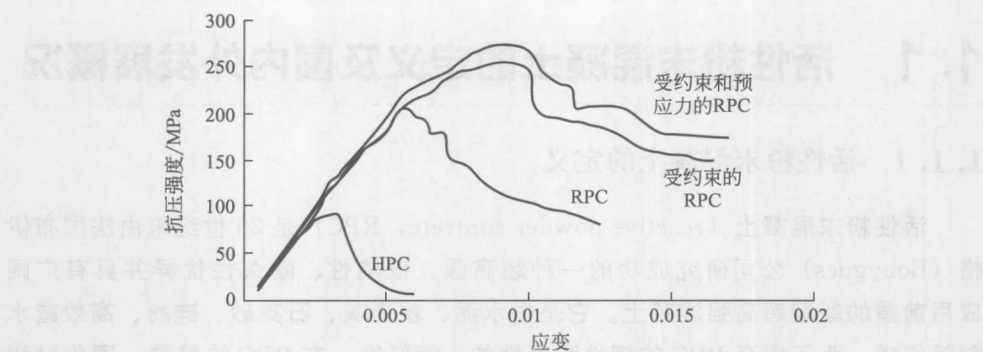


图 1.1 RPC 与 NSC、HPC 的抗压强度-应变曲线

断裂能，图 1.2 显示的是各种常用材料的断裂能和抗弯强度。可以看出，不同材料的断裂能具有很大的差别，RPC 的断裂能比普通水泥混凝土的断裂能高 2 个数量级以上，抗弯强度高 1 个数量级，其断裂能和抗弯强度接近金属铝，只比钢材低 1 个数量级，因此 RPC 属于高断裂能材料。受钢管约束或施加预应力后，RPC 的强度和韧性可得到进一步提高。

表 1.2 几种不同材料的断裂能

项 目	材 料 种 类					
	玻璃	陶瓷及岩石	金属	钢	普通混凝土	RPC
断裂能/(J/m ²)	5	<100	>10000	>100000	120	30000

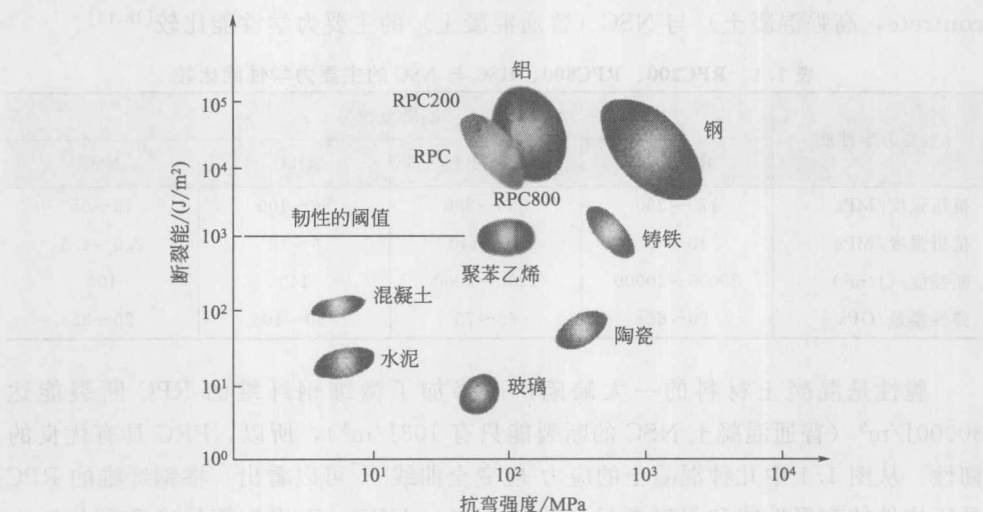


图 1.2 各种常用材料的断裂能和抗弯强度

1.1.3 活性粉末混凝土优异的耐久性

耐久性能是衡量 RPC 应用于严酷环境的一项重要指标，国内外已相继开展