

# 活性粉末混凝土的制备与 物理力学性能

鞠 杨  
刘红彬 著  
孙华飞



科学出版社

# 活性粉末混凝土的制备与 物理力学性能

鞠 杨 刘红彬 孙华飞 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

活性粉末混凝土(RPC)是20世纪90年代研发的一种具有超高强度和  
高韧性的新型水泥基复合材料。本书系统总结作者团队10年来在RPC研  
究方面取得的主要进展。全书共10章,包括RPC的制备原理及配比、RPC  
的静力学性能、钢纤维RPC的黏结机理、RPC的断裂韧性及表征方法、RPC  
的尺寸效应、RPC的动态力学性能、RPC的热物理性质、RPC的内部温度  
场、蒸汽压分布及爆裂、高温下RPC内部温度应力的数值计算及爆裂机理  
等方面的内容。

本书为研究和了解RPC的制备工艺、性能以及推动其在相关工程领域  
中的应用提供参考,同时可供土木、矿业与交通等行业的科技工作者和高校  
师生参考和使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

活性粉末混凝土的制备与物理力学性能/鞠杨,刘红彬,孙华飞著. —北  
京:科学出版社,2017.5  
ISBN 978-7-03-052719-6

I. ①活… II. ①鞠…②刘…③孙… III. ①高强混凝土-制备②高强混  
凝土-力学性质 IV. ①TU528.31

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第099592号

责任编辑:刘宝莉 张晓娟 / 责任校对:桂伟利  
责任印制:张 倩 / 封面设计:熙 望

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年5月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年5月第一次印刷 印张:16 3/4 彩插:8

字数:357 000

定价:120.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

混凝土是当今土木建筑工程广泛使用的建筑材料,随着科学技术的进步和城市化规模的不断扩大,现代建筑日益向高层、大跨和地下发展,对建筑结构的安全性、适用性和耐久性提出越来越高的要求,高强、高性能混凝土的出现和发展适应了这一要求。高强和高性能混凝土由于具有强度高、承载力大、资源和能源消耗少、耐久性好等优点,满足了土木建筑工程轻质、高层、大跨、重载化及耐久性等方面的要求,从而得到迅速推广和应用。

活性粉末混凝土(reactive powder concrete, RPC)是法国 BOUYGUES 公司于 20 世纪 90 年代率先研发的新一代高强和高性能混凝土,具有超高强度、高韧性和良好的耐久性等,1994 年在 Richard 等发表的论文中公开提出。RPC 主要由水泥、石英砂、石英粉、硅灰、超塑化剂和钢纤维组成,在一定制备工艺下其抗压强度可达 200~800MPa(按强度分为 RPC200 和 RPC800 两级),抗折强度为 20~40MPa,断裂能达  $4 \times 10^4 \text{J/m}^2$ 。作为一种新型的高性能混凝土,RPC 自问世以来便受到了国内外学者的广泛重视与关注,并在道路、市政、桥梁、核电和军事工程等诸多领域得到了发展和应用。

本书系统总结了作者及团队成员近 10 年来在 RPC(强度为 200MPa 级)研究方面取得的成果,全书共 10 章,各章节的基本内容如下:

第 1 章回顾高强、高性能混凝土以及 RPC 的发展历史,介绍 RPC 的性能及国内外的研究现状,以及 RPC 在道路、桥梁等工程领域得到的推广和应用。

第 2 章介绍 RPC 的制备原理,并研究水胶比、减水剂掺量、砂级配等对 RPC 性能的影响,通过对比分析,确定 RPC 的配合比。

第 3 章介绍不同钢纤维掺量 RPC 的静力学性能。研究不同钢纤维掺量对 RPC 立方体和圆柱体的抗压强度、立方体劈裂强度、弯折强度的影响,确定钢纤维的最佳掺量,并给出 RPC 立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂强度、弯折强度和弹性模量等性能参数随钢纤维掺量变化的经验表达式。

第 4 章介绍钢纤维对 RPC 的增强增韧机理。通过 RPC 轴向拉伸细观试验,观测钢纤维黏结拔出破坏的全过程、RPC 细观结构变化和物理力学特征,分析基体钢纤维掺量对单根钢纤维拔出时的表面形态、初裂荷载、极限荷载、界面黏结强度以及拔出功的影响,给出各物理量随基体纤维含量变化关系的统一表达形式。分析界面黏结力的构成和钢纤维对 RPC 的增强增韧作用。

第 5 章通过不同钢纤维掺量 RPC 的三点弯曲和断裂试验,研究 RPC 的韧性



机制与韧性特征,分析梁不同变形方式下钢纤维对提高 RPC 抗裂能力、耗能能力和韧性所起的作用。在分析 RPC 初裂变形、峰值变形及其增幅随钢纤维含量的变化规律,以及梁变形方式对初裂和峰值行为影响的基础上,提出用素 RPC 峰值变形作为初始参考变形来计算 RPC 韧性,定义 RPC 的韧性表征方法。

第 6 章通过三点弯曲试验研究不同尺寸下 RPC 的极限强度、断裂能和断裂韧性。获得弯曲荷载作用下的初裂荷载、峰值荷载、裂纹口张开位移 CMOD 等参数,分析不同纤维率 RPC 弯曲初裂强度、弯曲极限强度、断裂能、延性指数、弯曲断裂韧性等指标随试件尺寸变化的规律。采用数字散斑技术观测不同尺寸和纤维率 RPC 试件预制裂纹尖端断裂过程区的演化,测定断裂过程区长度等参数,基于局部断裂能的双线性模型计算 RPC 真实断裂能。

第 7 章利用 SHPB 冲击压缩试验研究高应变率下 RPC 的动态力学性能。分析不同应变率和钢纤维掺量下 RPC 的应力波动特征、破坏模式、强度及耗能能力的变化规律以及应变率和钢纤维掺量的影响,提出不同应变率和钢纤维掺量条件下 RPC 动态应力-应变响应的基本模式与本构模型。

第 8 章通过高温试验获得不同钢纤维掺量下 RPC 的热传导、热扩散、比热容和热膨胀等热物理性质,分析 RPC 热物理性质随温度和钢纤维掺量变化的规律,并与普通高强和高性能混凝土的热物理性质进行对比。建立 RPC 热物理性质参数随温度和钢纤维掺量变化的经验关系。利用传热学和固体物理方法分析 RPC 传热过程与热传导性质变化的微观物理机制,推导 RPC 的比热容和热膨胀系数的理论表达式,利用理论模型定量地分析温度和钢纤维对 RPC 比热容和热膨胀性质的不同影响。

第 9 章采用在 RPC 内部不同部位和深度布置热电偶的方法,通过自主设计的高温防爆装置,观测 RPC 的爆裂并测试其内部温度场的变化,分析 RPC 温度场随时间和空间的变化规律,建立爆裂临界温度和时间、空间的计算模型。采用压汞法研究不同温度水平下 RPC 的孔隙特征,得到 RPC 的孔隙率、孔体积、平均孔径、最可几孔径等孔隙参数随温度的变化规律,建立孔隙率、孔体积等参数随温度变化的关系方程,计算分析不同温度下的孔径分布特征及其随温度的变化规律。通过自主设计的蒸汽压测试装置,研究高温下 RPC 内部的蒸汽压分布规律。

第 10 章通过数值计算方法进一步分析 RPC 内部温度场和温度应力的变化规律,分析温度应力对 RPC 爆裂破坏的影响,结合破坏失效准则提出高温作用下 RPC 的热爆裂机理。

本书是作者及团队 10 年来在 RPC 研究方面所做工作的成果总结,在此,作者对团队成员在试验和数值计算等方面所做的工作表示感谢,他们是陈健、贾玉丹、王磊、盛国华、叶光莉、冯磊、李康乐、田开培、刘金慧、王里、葛志顺,同时,感谢田开培、王里、刘金慧等在书稿排版和校对中提供的帮助。

本书的出版得到国家杰出青年科学基金项目(51125017)、国家重点研发计划项目(2016YFC0600705)、国家自然科学基金面上项目(51374213、51674251)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110023110015)、北京市教委共建项目、江苏省双创团队项目(2014-27)和江苏省优势学科建设项目(PAPD-2014)的资助,在此作者一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不当之处,敬请读者批评指正。

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 国内外研究现状	5
1.1.1 RPC 的配合比和基本性能	5
1.1.2 RPC 的增韧及断裂性能	6
1.1.3 RPC 的动态力学性能	6
1.1.4 RPC 的高温性能及爆裂	7
1.1.5 RPC 的耐久性	8
1.2 RPC 的优越性及工程应用	9
1.3 本章小结	14
参考文献	14
第 2 章 RPC 的制备原理及配比	20
2.1 制备原理	20
2.2 原材料对 RPC 性能的影响	21
2.3 RPC 的制备技术	25
2.3.1 搅拌工艺	25
2.3.2 养护方法	26
2.4 配合比试验	26
2.4.1 水胶比对 RPC 抗压强度的影响	27
2.4.2 砂的级配对 RPC 抗压强度的影响	28
2.4.3 减水剂掺量对 RPC 抗压强度的影响	29
2.4.4 养护方式对 RPC 抗压强度的影响	30
2.5 本章小结	32
参考文献	33
第 3 章 RPC 的静力学性能	34
3.1 试验概况	34
3.1.1 立方体抗压强度	35
3.1.2 圆柱体抗压强度	37
3.1.3 立方体劈裂强度	41
3.1.4 弹性模量	43

3.2	试验结果与分析	45
3.3	本章小结	49
	参考文献	50
<b>第4章</b>	<b>钢纤维RPC的黏结机理</b>	<b>51</b>
4.1	纤维增强混凝土的基本理论	51
4.1.1	复合力学理论	53
4.1.2	纤维间距理论	54
4.2	RPC黏结-拔出试验	55
4.2.1	钢纤维拔出破坏模型	55
4.2.2	试验概况	56
4.3	试验结果与分析	57
4.4	纤维-基体黏结破坏机理	61
4.5	纤维-基体黏结强度和耗散能	66
4.5.1	黏结强度	66
4.5.2	纤维拔出功或耗散功	68
4.6	本章小结	70
	参考文献	70
<b>第5章</b>	<b>RPC的断裂韧性及表征方法</b>	<b>72</b>
5.1	试验概况	74
5.2	无预制裂纹梁的变形与韧性特征	75
5.3	预制裂纹梁的变形与韧性特征	83
5.4	RPC韧性与韧性指标	88
5.4.1	基于荷载-挠度曲线的韧性与韧性指标	89
5.4.2	基于P-CMOD曲线的韧性与韧性指标	90
5.5	本章小结	94
	参考文献	95
<b>第6章</b>	<b>RPC的尺寸效应</b>	<b>98</b>
6.1	试验概况	99
6.2	极限强度及尺寸效应	100
6.2.1	名义极限强度的试验值及尺寸效应	100
6.2.2	名义极限强度的理论值	104
6.3	断裂能的尺寸效应	121
6.3.1	RILEM标准方法的断裂能	121
6.3.2	Abdalla的断裂能	122
6.3.3	软化曲线计算的断裂能	124



---

6.4	断裂韧性的尺寸效应 .....	127
6.5	本章小结 .....	131
	参考文献 .....	132
<b>第7章</b>	<b>RPC 的动态力学性能 .....</b>	<b>134</b>
7.1	SHPB 装置及测试技术 .....	134
7.2	SHPB 试验的基本原理 .....	137
7.2.1	弹性杆中一维应力波的传播 .....	137
7.2.2	两弹性杆的相互撞击 .....	139
7.2.3	一维应力波理论在 Hopkinson 杆中的应用 .....	141
7.2.4	SHPB 试验中的几个重要问题 .....	142
7.3	RPC 动态冲击与结果分析 .....	146
7.3.1	试验概况 .....	146
7.3.2	结果与分析 .....	148
7.4	本章小结 .....	163
	参考文献 .....	164
<b>第8章</b>	<b>RPC 的热物理性质 .....</b>	<b>166</b>
8.1	热物性试验 .....	167
8.1.1	样品制备 .....	167
8.1.2	试验原理与方法 .....	167
8.2	结果与分析 .....	171
8.3	热物性的微观物理机制 .....	186
8.3.1	无机非金属固体的传热机理 .....	186
8.3.2	导热系数变化的热物理机制 .....	186
8.3.3	比热容变化的物理机制 .....	188
8.3.4	热扩散系数变化的物理机制 .....	191
8.3.5	热膨胀系数变化的物理机制 .....	191
8.4	本章小结 .....	194
	参考文献 .....	195
<b>第9章</b>	<b>RPC 的内部温度场、蒸汽压分布及爆裂 .....</b>	<b>201</b>
9.1	RPC 的高温爆裂 .....	202
9.1.1	试件制备 .....	202
9.1.2	试验装置 .....	202
9.1.3	爆裂结果 .....	203
9.2	温度场试验 .....	209
9.2.1	试验方法 .....	209

9.2.2	内部温度场分布	210
9.2.3	内部特征点温差	215
9.3	混凝土内部孔隙及测试方法	217
9.3.1	混凝土孔的分类	217
9.3.2	孔隙测试方法	218
9.4	RPC 孔隙试验及结果分析	220
9.4.1	试验概况	220
9.4.2	孔体积随汞压的变化	221
9.4.3	孔隙率、总孔体积随温度的变化	222
9.4.4	孔径分布积分和孔径分布微分曲线	225
9.4.5	不同孔径范围内的孔隙体积分布	226
9.5	RPC 蒸汽压试验	229
9.5.1	测试方法和装置	230
9.5.2	测试结果与分析	231
9.5.3	爆裂的“薄壁球模型”	233
9.6	本章小结	237
	参考文献	238
<b>第 10 章</b>	<b>高温下 RPC 内部温度应力的数值计算及爆裂机理的探究</b>	<b>240</b>
10.1	传热学基本理论	240
10.1.1	传热方式与热流速率公式	240
10.1.2	传热方程与材料热本构方程	241
10.1.3	材料破坏理论	242
10.2	温度场数值模拟	243
10.2.1	COMSOL Multiphysics 软件	243
10.2.2	数值计算结果	244
10.3	破坏分析	250
10.3.1	数值计算方法	250
10.3.2	计算与试验结果对比	254
10.3.3	热应力致爆机理	256
10.4	本章小结	257
	参考文献	258

# 第 1 章 绪 论

混凝土是当代广泛使用的建筑材料,也是现代最大宗的人造材料,已成为土木工程用材的主体。据不完全统计,2012 年世界水泥产量已超过 38.2 亿 t,折合成混凝土则大于 150 亿 m<sup>3</sup>,我国的水泥产量达 21.84 亿 t,商品混凝土产量 8.88 亿 m<sup>3</sup>,约为世界总产量的 1/2,居世界首位。

与其他建筑材料相比,混凝土具有抗压强度高、弹性模量大、耐久性好等特点,同时,生产原料广泛、成本低、生产工艺简便使它在土木工程领域得到了广泛应用。然而,一般的混凝土材料存在变形性能较差、脆性大、自重大、抗拉强度低等缺点,在一定范围内又限制了它的使用。因此,改善混凝土材料的性能便成为学术界和工程界坚持不懈的研究课题,人们期望混凝土材料具有更高的强度、更大的弹性模量和更好的变形能力<sup>[1,2]</sup>,其中,提高混凝土强度更是诸多国内外研究者百余年来努力的方向。

混凝土的强度和水灰比有关,水灰比越小,混凝土的强度越高,但仅靠减小水灰比提高混凝土强度也是不现实的,因为过小水灰比的混凝土工作性、流动性非常差,实际上成了干硬性混凝土,同时也使混凝土变得不密实,强度反而降低。

减水剂的发明与应用,以及硅灰、粉煤灰、沸石粉等优质矿物掺料的使用,是混凝土技术的重大发展。掺入减水剂可以大幅降低水灰比并保证混合料的流动性,使混合料的拌制、运输、浇筑和成型等工艺变得容易,提高强度的同时改善了混凝土的性能;硅灰等活性掺料则可以减少水泥中的碱骨料反应,同时改善混凝土的孔结构并降低孔隙率,从而提高混凝土的强度。

20 世纪 60 年代,日本首先成功研制出高效减水剂,从此开辟了混凝土技术的新时代。高效减水剂使混凝土的高强和高流态变得相当容易,使高强混凝土(high strength concrete, HSC)的广泛应用成为可能<sup>[3]</sup>。在 20 世纪 70 年代末期,日本已经能够制备 C80~C90 的 HSC,90 年代初期,日本集中研究使用 C110HSC 建造 60~90 层高层建筑的可行性和关键技术;北美于 1976 年开始采用高效减水剂制备 HSC,并很快在高层建筑中广泛应用;我国清华大学在 20 世纪 70 年代末期自行研制出高效减水剂并投入生产,为我国 HSC 的发展提供了基础,但直到 80 年代初期,我国才开始对 HSC 进行广泛的研究和应用<sup>[4]</sup>。

在 HSC 应用中,随着新型外加剂和胶凝材料(尤其是硅灰)的出现,使既有优良工作度,又有优异力学性能和耐久性的混凝土生产成为现实,这种新型混凝

土称为高性能混凝土(high performance concrete, HPC),并在实际工程中得到了应用<sup>[5]</sup>。

例如,美国西雅图第二联合广场大厦是世界第一座采用平均抗压强度达 120MPa 的 HPC 建造的建筑(1989 年,56 层,高 226m,C120)。Scotia 大厦是加拿大用 HPC 建造的第一幢混凝土建筑(1988 年,C70),也是该国最高的混凝土建筑。1991 年我国的广东国贸大厦首次应用 C60 的 HPC,此后,HPC 在国内高层建筑中得到了广泛应用,如上海金茂大厦(C60)、沈阳皇朝万鑫国际大厦(C60)和北京西站(C60)等工程<sup>[6]</sup>。

在桥梁隧道工程中,日本早在 20 世纪 60 年代就采用 C60~C80 混凝土建设高强混凝土铁路桥。法国的伊沃纳河桥采用 C70 的 HPC 和体外预应力索的结构形式,使混凝土用量减少 30%,自重降低 24%。美国纽约自 1996 年就要求全州新建桥梁的桥面必须使用 HPC。欧洲英吉利海峡隧道位于海平面下 50~250m,总长 50.5km,其中 37km 位于海平面下,整个隧道由三条分隧道组成,设计寿命为 120 年,原设计强度为 45MPa,由于耐久性方面的要求,采用了平均抗压强度约 63MPa 的 HSC。

在我国,京津城际铁路是首次在设计中提出要求采用 HPC 的轨道交通工程,该工程 2005 年底开工至 2008 年 8 月开通运营,在采用 HPC 的所有结构物中,经检测没有发现混凝土开裂、腐蚀、溶洞等现象,混凝土表现出较好的耐久性。

我国的一些国有大型煤矿在矿井施工和隧道支护中也推广使用 HSC 和 HPC,如淮南矿业集团丁集矿在冻结段井壁结构设计中首次采用了 C60~C70HSC 和 HPC,并在该矿的三个井筒冻结段井壁工程中得到成功应用<sup>[7]</sup>。在澳大利亚、加拿大、日本和美国,HPC 已用于固定式和漂浮式钻井平台。

HSC 和 HPC 的广泛应用,也暴露出一些问题。一是 HSC 的高脆性严重影响结构的抗震性;二是 HSC 水灰比较低,容易产生较大的收缩变形,导致结构过早出现裂缝,影响结构的正常使用。例如,美国的混凝土桥面板在 20 世纪 70 年代普遍开裂,为延长桥的使用寿命转而使用更高强度的混凝土进行翻修。1995 年美国公路战略研究计划的调查结果表明,约有 10 万座桥梁的桥面板在浇筑后一个月内便出现间隔 1~3m 的裂缝。分析认为,HSC 早期的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,导致它比中、低强度的混凝土更容易开裂。其次,硅粉掺量越多、水胶比越低的混凝土,早期强度发展越迅速,开裂和强度倒缩现象也就越显著<sup>[6]</sup>。此外,HSC 和 HPC 存在耐火性能差的缺点,当遭受高温或火灾时,温度梯度、内外约束、水泥浆体同骨料热膨胀的不匹配以及温度敏感性等会引起材料热开裂,导致混凝土的爆裂性破坏,进而引发结构的整体失效,造成灾难性后果。1996 年发生在英吉利海峡隧道的 10h 火灾,导致数千米长的 HPC(抗压强度达到 100MPa)爆裂,造成隧道内表面

长约40m、厚约450mm的剥落受损。1999年连接法国和意大利的勃朗峰隧道发生火灾,隧道中的混凝土衬砌被全部烧毁,事故发生后,该隧道被关闭维修长达两年之久<sup>[8,9]</sup>。美国“9·11”事件中世贸中心配楼的坍塌也是一个著名的例子,钢筋混凝土大厦在800℃以上高温作用下,因结构丧失承载力而发生坍塌。此外,温度的持续作用还会导致服役期内混凝土结构的耐久性降低,使结构过早地进入大修阶段或者提前结束服役年限。

为避免上述问题的发生,常在硅灰混凝土中掺入钢纤维来增加混凝土的韧性、控制其开裂;通过在混凝土中掺加可熔的有机纤维、在混凝土外层设置阻燃屏障以及在混凝土外层加设钢筋网或覆盖钢板、钢筋网片等方法来防止混凝土的爆裂飞散<sup>[2]</sup>。但是,掺加钢纤维时粗骨料的存在会使钢纤维的“架桥”作用受到限制,而且长的钢纤维对拌合物的工作度影响又十分显著。

1993年,法国BOUYGUES公司的Richard和Cheyrezy仿效高致密水泥基均匀体系(densified system containing homogeneously arranged ultrafine particles, DSP),将其中的粗骨料剔除,换用最大粒径为400~600 $\mu\text{m}$ 的石英砂作为骨料,掺入适量短纤维和硅灰等活性矿物掺料,通过成型施压、热养护等工艺,制备出强度高、其他性能优异的水泥基复合材料,由于这种混凝土增加了组分的细度和反应活性,因此称为RPC。该材料申报了专利,并在1994年美国混凝土学会旧金山春季会议上首次公开。1998年8月在加拿大魁北克省Sherbrooke大学召开了第一次有关RPC和HPC的国际研讨会,与会专家就RPC的原理、性能和应用进行了广泛深入的讨论,一致认为:RPC作为一种新型材料,具有广阔的应用前景<sup>[10]</sup>。

RPC根据其抗压强度分为RPC200和RPC800两级。其中,RPC200的制备条件接近普通混凝土(normal concrete, NC),它在凝固期内不需加压,采用热养护,养护温度为20~90℃;RPC800在凝固期内施加10~50MPa的压力,并在250~400℃高温下养护制得。凝固期内RPC200的抗压强度可达170~230MPa,是HSC的3~12倍,RPC800的抗压强度则高达500~800MPa。重要的是,RPC的抗折强度和断裂能大大提高,抗折强度达50~60MPa,是HSC的10倍,掺入微细钢纤维能显著提高RPC的韧性和断裂能,其断裂能可达 $3 \times 10^4 \text{J/m}^2$ ,足可与金属媲美,而普通混凝土的断裂能仅为 $120 \text{J/m}^2$ ,有效克服了HSC的高脆性。

表1.1给出了RPC200和RPC800的典型配比<sup>[11]</sup>。表1.2比较了RPC和HSC的力学性能指标,表1.3给出了一些材料的断裂能,图1.1表示不同材料的断裂能<sup>[12]</sup>。

表 1.1 RPC200 和 RPC800 的典型配比(以重量计)

成分	RPC200				RPC800	
	无纤维		掺入纤维		硅质集料	钢质集料
普通水泥	1	1	1	1	1	1
硅粉	0.25	0.23	0.25	0.23	0.23	0.23
砂 150~600 $\mu$ m	1.1	1.1	1.1	1.1	0.5	—
石英粉 $d=10\mu$ m	—	0.39	—	0.39	0.39	0.39
超塑化剂	0.016	0.019	0.016	0.019	0.019	0.019
钢纤维 $L=12$ mm	—	—	0.175	0.175	—	—
钢纤维 $L=3$ mm	—	—	—	—	0.63	0.63
钢质集料 $d<800\mu$ m	—	—	—	—	—	1.49
水	0.15	0.17	0.17	0.19	0.19	0.19
成型压力/MPa	—	—	—	—	50	50
热处理温度/ $^{\circ}$ C	20	90	20	90	250~400	250~400

表 1.2 RPC 和 HSC 的力学性能指标

混凝土种类	RPC200	RPC800	HSC
抗压强度/MPa	170~230	500~800	60~100
抗折强度/MPa	30~60	45~140	6~10
断裂能/( $J/m^2$ )	20000~40000	1200~2000	140
弹性模量/GPa	50~60	65~75	30~40

表 1.3 不同材料的断裂能

材料种类	玻璃	陶瓷及岩石	普通混凝土	金属	RPC200	钢
断裂能/( $J/m^2$ )	5	<100	120	>10000	30000	100000

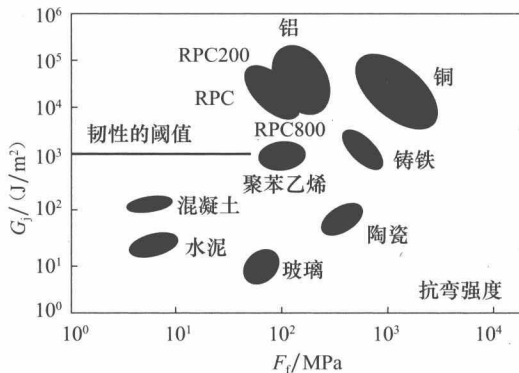


图 1.1 不同材料的断裂能



RPC 水胶比极低,良好的孔结构和孔隙率使其具有极低的渗透性、较高的抗环境介质侵蚀能力和良好的耐磨性能,从而使 RPC 具有优异的耐久性。表 1.4 是 RPC、HPC 与 NC 的耐久性比较<sup>[12]</sup>。

表 1.4 RPC、HPC 和 NC 的耐久性对比

性能指标	RPC	HPC	NC
氯离子扩散系数/( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$0.02 \times 10^{-12}$	$0.6 \times 10^{-12}$	$1.1 \times 10^{-12}$
碳化深度/mm	0	2	10
冻融剥落/( $\text{g}/\text{cm}^2$ )	7	900	>1000
磨损系数	1.3	2.8	4

## 1.1 国内外研究现状

自 RPC 问世以来,法国、美国、加拿大等国的学者相继开展了一系列研究工作。国内在 RPC 的研究上起步相对较晚,清华大学、湖南大学、中南大学、石家庄铁道大学、东南大学、中国矿业大学(北京)等高校和科研单位相继开展了 RPC 的研究工作,从发表的研究成果来看,主要集中在以下几个方面。

### 1.1.1 RPC 的配合比和基本性能

Lee 等<sup>[13]</sup>开展了将 RPC 作为新型修复材料的研究。研究表明,相比于 NC 和 HSC, RPC 具有较高的抗折强度、弹性模量和优良的耐久性,在承压和抗折构件上具有修复和改装潜力。Yazici 等<sup>[14]</sup>研究了不同养护制度下掺加粉煤灰和高炉矿渣颗粒的 RPC 材料的力学性能。结果表明,采用蒸汽和高压蒸汽养护后, RPC 的抗压强度明显提高,但抗折强度和韧性降低;随着粉煤灰和高炉矿渣颗粒掺量的增加, RPC 的抗折强度增大。

覃维祖<sup>[15]</sup>采用水泥、粉煤灰和硅灰三元胶凝材料体系对 RPC 开展试验研究,制备的 RPC 抗压强度超过 200MPa,抗折强度为 50MPa,断裂能为 2100J/m<sup>2</sup>。何峰等<sup>[16]</sup>在未掺钢纤维的情况下,配制出流动性好且高温养护(200℃)下抗压强度达 229MPa 的超高强混凝土,在掺钢纤维及高温养护下 RPC 的抗压强度高达 298.6MPa。谢友均等<sup>[17]</sup>配制出抗压强度达 200MPa 的 RPC,并详细讨论了超细粉煤灰掺量、水胶比、砂胶比和钢纤维率等因素对 RPC 抗折强度、抗压强度的影响。闫光杰等<sup>[18]</sup>研制了 200MPa 级 RPC,抗压强度为 168.6MPa,抗折强度为 21.6MPa,由该材料制备的桥梁人行道构件已在青藏铁路桥梁的工程中得到应用。刘斯凤等<sup>[19]</sup>用天然黄砂、超细混合材成功配制出抗压强度大于 200MPa、抗折强度大于 50MPa 的 RPC,并研究了标准养护、热水养护和蒸汽养护条件下 RPC 的力学

性能。单波等<sup>[20]</sup>研究了钢纤维对 RPC 抗压强度的影响,发现钢纤维对 RPC 抗压强度的增强效果随水胶比的增大而减小,在水胶比较低时增强效果明显,水胶比较高时几乎无影响,两者间存在一个水胶比界限值。刘红彬等<sup>[21]</sup>利用低成本天然掺合料,在标准成型工艺和热水养护条件下,制备出强度达 200MPa 的高性能 RPC,测试了 RPC 立方体抗压强度、圆柱体轴心抗压强度、劈拉强度、弯折强度、弹性模量,分析了这些物理量随钢纤维体积掺量变化的规律,建立了 RPC 强度和弹性模量随钢纤维体积掺量变化的经验表达式。

### 1.1.2 RPC 的增韧及断裂性能

Bayard 等<sup>[22]</sup>研究了钢纤维 RPC 试件的弯折性能,观测了试件在裂纹产生时的局部各向异性和弹性性质,以及在裂缝扩展中的“桥接”作用,并利用 Bazant 的“微平面”模型和破坏理论,重现了纤维配比影响下的裂纹扩展过程。Chan 等<sup>[23]</sup>研究了硅粉掺量对 RPC 中钢纤维力学性能的影响,结果表明,硅粉掺量为水泥的 20%~30% 时,钢纤维具有最大的黏结强度和拉拔能。赖建中等<sup>[24]</sup>的研究表明,增韧效果随钢纤维掺量的增加而增强,但钢纤维掺量过大导致 RPC 流动性下降,纤维分散不均匀,影响纤维增韧效果。姚志雄等<sup>[25]</sup>采用虚拟裂缝模型结合线弹性断裂力学,分析了素 RPC 和钢纤维 RPC 的断裂特性,结果表明,钢纤维的加入极大地增强了 RPC 的性能,极限荷载、断裂韧度和裂缝尖端张开位移等断裂参数均大幅度提高,试件的破坏体现了极高的延性。张明波等<sup>[26]</sup>研究了钢纤维在 RPC200 梁中的抗弯工作机理及钢纤维含量对抗折强度的影响,结果表明,钢纤维含量的增加有利于提高初裂强度和抗折强度,荷载-挠度曲线随着纤维含量的增加而越加丰满,呈现出更大的韧性。余自若等<sup>[27]</sup>进行了 RPC 缺口梁断裂试验,结果表明,RPC 中的钢纤维能够阻碍 RPC 内部微裂缝的繁衍、扩展,使 RPC 的韧性和延性比 NC 有显著的提高。周瑞忠等<sup>[28]</sup>采用虚拟裂缝模型结合线弹性断裂力学的方法,分析了 RPC 及纤维增强 RPC 的断裂特性,研究发现,RPC 中掺入钢纤维后,裂缝的扩展受到限制,材料的断裂韧度、裂缝亚临界扩展量大大提高,材料韧性明显得到改善。

### 1.1.3 RPC 的动态力学性能

近年来,国内外学者相继开展了高应变率荷载作用下 RPC 动态力学性能的研究。例如, Tai<sup>[29,30]</sup>利用分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)压缩试验和平靶板侵彻试验,分别研究了应变率  $78.5 \sim 1.23 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  的冲击荷载和速度  $27 \sim 104 \text{ m/s}$  的侵彻荷载作用下 RPC200 的动态强度、应力-应变响应特征以及破坏模式,探讨了应变率和钢纤维含量对 RPC 动态性能和破坏方式的影响。Tian 等<sup>[31]</sup>利用 SHPB 冲击试验和数值模拟方法分析了 RPC 填充的钢管混凝土柱的动力响应与承载能力。Wang 等<sup>[32]</sup>基于不同钢纤维含量 RPC 的 SHPB

冲击压缩试验,利用数值分析方法研究了静水应力和应变率对提高 RPC 动态强度的不同影响,得到应变率对 RPC 动态强度的贡献,并分析了钢纤维含量对 RPC 动态抗压强度和破坏模式的影响。赖建中等<sup>[33]</sup>利用 SHPB 冲击压缩试验研究了 RPC 的抗多次冲击性能,分析了冲击次数、冲击方式和纤维掺量对 RPC 抗多次冲击性能的影响。王勇华等<sup>[34]</sup>通过 Hopkinson 压杆冲击压缩试验研究了不同钢纤维含量的 RPC 在不同应变率下的应力-应变全曲线,指出 RPC 具有应变率敏感性,钢纤维的掺入部分提高了材料的抗冲击压缩性能。Bagheri 等<sup>[35]</sup>研究了静荷载和冲击动荷载作用下 RPC 的吸能能力,发现冲击荷载作用下 RPC 的吸能能力显著高于普通高强钢纤维混凝土。葛涛等<sup>[36]</sup>利用多组侵入与接触爆炸试验研究了钢纤维率 5% 的 RPC 抗冲击与抗侵入性能,并检验了侵入深度的相关计算公式。Fujikake 等<sup>[37,38]</sup>利用落锤冲击试验和受拉试验分析了不同落锤高度和不同应变率对 RPC 的弯曲强度、受拉破坏模式、拉应力-应变响应和拉应力-裂纹张开位移响应特征的影响,建立了考虑应变率影响的 RPC 强度模型。Kuznetsov 等<sup>[39]</sup>利用平板爆炸试验分析对比了 RPC 和普通钢筋混凝土的抗爆裂性能,指出相同爆炸当量下 RPC 的抗爆裂性能显著优于普通钢筋混凝土。王德荣等<sup>[40]</sup>研究了 RPC 侵入破坏性质及影响因素,提出了一个简化的侵入计算公式,指出 RPC 抗侵入能力是 NC 的三倍左右。Toutlemonde 等<sup>[41]</sup>利用数值模拟方法分析了高应变率荷载作用下 RPC 放射性储集罐的抗冲击性能与设计方法。颜祥程等<sup>[42]</sup>对比研究了 RPC 与普通钢纤维混凝土的抗侵入能力,结合试验,数值模拟了混凝土在侵入作用下的变形及断裂特性,计算结果与试验结果对比表明,钢纤维能有效地增加混凝土的韧性和变形能力,增大混凝土对侵入弹丸能量的消耗,降低弹丸的剩余速度,RPC 较普通钢纤维混凝土具有更高的抗侵入能力,能更好地抑制裂缝发展。

#### 1.1.4 RPC 的高温性能及爆裂

相关研究表明,RPC 在高温下易发生性能衰退和高温爆裂。例如, Schneider 等<sup>[43]</sup>研究发现,RPC 在常温下性能较优越,但是在火灾高温下易发生高温爆裂现象。Felicetti 等<sup>[44]</sup>研究表明,RPC 从 200℃ 加热到 600℃ 的过程中,其残余抗压强度呈现先增大后减小的趋势,且经过 600℃ 高温作用后,还保留较高的强度剩余率。Tai 等<sup>[45]</sup>在研究准静态加载下经历高温后 RPC 残余强度和应力-应变关系时发现,与室温相比,200~300℃ 时 RPC 残余强度增加,300℃ 后显著减小;400~500℃ 残余峰值应变增加,500℃ 后逐渐减小。Liu 等<sup>[46]</sup>研究表明,与 HPC 相比,高流动性 RPC 可以耐受更长时间的高温作用,具有较高残余强度。Zheng 等<sup>[47]</sup>研究了高温后钢纤维 RPC 的抗折性能和抗拉性能,表明钢纤维率的增加有益于提高 RPC 的强度,且 RPC 的强度表现出先增加后降低的规律,200℃ 和 120℃ 是 RPC 抗折强度和抗拉强度突变的阈值点。刘红彬等<sup>[48]</sup>通过试验发现,一定升温速率下