

蒋正武 梅世龙 等编著

机制砂高性能混凝土



化学工业出版社



蒋正武 梅世龙 等编著

机制砂高性能混凝土

JIZHISHA GAOXINGNENG HUNNINGTU



化学工业出版社

·北京·

本书全面介绍了混凝土技术及我国机制砂工业发展现状与趋势，骨料岩相及典型岩性骨料的技术性能，我国机制砂的生产工艺、技术控制指标及特性；重点阐述了机制砂高性能混凝土配合比设计、生产与施工技术，机制砂高性能混凝土的工作性、力学性能及耐久性等，机制砂高性能混凝土的微观结构及其与性能的关系，机制砂特种高性能混凝土配合比设计、制备及生产及其在典型工程中应用技术，主要包括机制砂自密实混凝土、大粒径骨料机制砂自密实混凝土、机制砂抗扰动混凝土、机制砂高强混凝土、机制砂超高泵送混凝土等。

本书可供建筑结构、土木建筑、港口水运、水利工程、桥梁市政、建筑材料、工程管理等专业从事混凝土材料、混凝土施工等领域的研究、教学、设计、施工、生产等科技人员、大专院校师生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

机制砂高性能混凝土/蒋正武，梅世龙等编著. —北京：
化学工业出版社，2015.1
ISBN 978-7-122-20280-2

I. ①机… II. ①蒋…②梅… III. ①高强混凝土-
研究 IV. ①TU528.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 068975 号

责任编辑：吕佳丽
装帧设计：史利平
责任校对：宋 玮

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 装：三河市延风印装厂
787mm×1092mm 1/16 印张 23½ 字数 582 千字 2015 年 1 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：88.00 元
版权所有 违者必究

前言

Preface

混凝土是世界上最大宗的人造建筑结构材料,其逐渐向着高性能、超高性能方向发展。随着现代工程结构向大跨度、高耸、重载方向发展以及恶劣环境条件的需要,高性能混凝土已广泛应用于高层建筑、市政、桥梁、港口、地下、海工等工程中。2012年,我国水泥熟料产量12.79亿吨,水泥产量21.84亿吨,混凝土用量达到60亿吨以上。骨料作为混凝土中最主要的组成之一,受自然资源的限制,尤其在我国西南、南部等地区,以河砂为主的天然砂越来越无法满足未来持续增长的混凝土用量需求。随着混凝土技术发展、自然资源短缺与环境保护的需求等问题,采用机制砂全面替代河砂已成为混凝土行业可持续发展的一种必然趋势。全面研究机制砂的生产工艺、特性、技术指标及机制砂高性能混凝土技术,不仅对我国混凝土技术发展提供理论支撑与技术指导,而且对提高我国混凝土结构工程的长期耐久性与使用寿命具有重要的指导意义。

在贵州省交通厅及其他众多科研项目的资助下,结合在我国不同地区,根据贵州地区的多年机制砂高性能混凝土工程应用实践,本书全面分析了混凝土技术及我国机制砂工业发展现状与趋势,论述了骨料岩相及典型岩性骨料的技术性能;全面论述了我国机制砂的生产工艺、技术控制指标及特性,重点阐述了机制砂高性能混凝土配合比设计、生产与施工技术,论述了机制砂高性能混凝土的工作性、力学性能及耐久性等,全面阐述了机制砂高性能混凝土的微观结构及其与性能的关系;全面讲述了机制砂特种高性能混凝土配合比设计、制备、生产及其在典型工程中应用技术,主要包括机制砂自密实混凝土、大粒径骨料机制砂自密实混凝土、机制砂抗扰动混凝土、机制砂高强混凝土、机制砂超高泵送混凝土等。本书将专业理论基础与专业实践知识有机地结合在一起,具有科学性、知识性、先进性与实践性、趣味性。本书可供建筑结构、土木建筑、港口水运、水利工程、桥梁市政、建筑材料、工程管理等专业从事混凝土材料、混凝土施工等领域的研究、教学、设计、施工、生产等科技人员、大专院校师生和研究生参考。

本书由同济大学蒋正武教授等编著,编著的具体分工为:同济大学蒋正武编写第1章、第3章、第6~10章;贵州高速公路集团有限公司总工程师梅世龙博士编写第2章、第4章;贵州建工集团廖卫红总工程师编写第5章;贵州建工集团第一分公司张义勇高工编写第11章、傅亚松高工编写第12章。同济大学博士、硕士研究生邓子龙、袁政成、杨凯飞、严希凡、韩超、黄青云、肖鑫、田曼丽、周磊等同学参与了资料、文字整理等工作,在此一并感谢。本书由蒋正武统稿。

本书的内容不仅是作者多年来从事混凝土材料领域的理论研究、科研与工程实践的积累,也参考国内外大量的技术资料文献,在此一并向相关作者与研究机构表示谢意。另外,由于我们水平有限,书中不当之处难免,还望广大读者不吝赐教、指正。

编者

2014年8月

目录

Contents

1 绪论 1

1.1 高性能混凝土的发展	1
1.1.1 混凝土的发展	1
1.1.2 高性能混凝土的发展	2
1.2 机制砂工业的发展	3
1.2.1 骨料的分类与发展	3
1.2.2 机制砂工业的现状	6
1.2.3 机制砂工业的展望	9
1.3 机制砂高性能混凝土的发展	11
参考文献	12

2 骨料的岩性及性能 14

2.1 岩石的分类	14
2.2 不同岩石骨料的性能	15
2.3 石灰岩	15
2.3.1 石灰岩的分类与特性	16
2.3.2 贵州地区石灰岩特性及其分布	19
2.3.3 贵州地区石灰岩母岩的物理力学性能	21
2.3.4 贵州地区石灰岩岩相与碱活性分析	22
2.4 玄武岩	26
2.4.1 玄武岩的特性	26
2.4.2 玄武岩骨料的物理力学性质	27
2.4.3 玄武岩骨料的碱活性	27
参考文献	28

3 机制砂的生产工艺、技术指标及控制 29

3.1 生产工艺及优化	29
3.1.1 传统机制砂生产	29
3.1.2 机制砂生产工艺改进	34

3.1.3 泥浆回收工艺	39
3.2 技术指标	46
3.2.1 国家标准	46
3.2.2 关键技术控制指标	48
3.3 品质控制	56
3.3.1 母岩质量控制	56
3.3.2 给料机对机制砂MB值的影响	57
3.3.3 机制砂颗粒级配控制	57
3.3.4 干法除粉及其工艺控制	57
3.3.5 机制砂防离析措施	58
3.3.6 其他	58
3.4 机制砂特性	58
3.4.1 颗粒形貌	58
3.4.2 机制砂和河砂的级配和石粉含量	59
3.4.3 机制砂和河砂的泥块含量对比	60
3.4.4 机制砂与河砂的表观密度、堆积密度、空隙率对比	60
3.4.5 石粉粒度分布	61
3.4.6 岩性	61
参考文献	62

4

机制砂高性能混凝土配合比设计与施工技术 64

4.1 原材料	64
4.1.1 水泥	64
4.1.2 粗骨料	66
4.1.3 机制砂	69
4.1.4 外加剂	69
4.1.5 矿物掺合料	71
4.2 设计参数选择	74
4.2.1 试配强度	74
4.2.2 水泥品种、强度等级及水泥用量	74
4.2.3 用水量	75
4.2.4 砂率	75
4.2.5 机制砂性能要求及用量	75
4.2.6 粗骨料用量	76
4.2.7 矿物掺合料	76
4.2.8 外加剂	76
4.3 配合比设计	77
4.3.1 普通混凝土配合比设计	77
4.3.2 高性能混凝土配合比设计法则	83
4.3.3 确定高性能混凝土拌合物配合比的方法	84

4.3.4 机制砂高性能混凝土配合比设计	86
4.4 施工技术	88
4.4.1 机制砂高性能混凝土搅拌工艺	88
4.4.2 拌合物的运输	89
4.4.3 浇筑工艺	90
4.4.4 振捣工艺	90
4.4.5 养护工艺	91
4.4.6 施工中常见问题的处理	92
参考文献	93

5 机制砂高性能混凝土的性能 95

5.1 工作性	96
5.1.1 工作性的含义及其测定方法	96
5.1.2 机制砂对混凝土工作性的影响	101
5.2 力学性能	106
5.2.1 抗压强度	106
5.2.2 抗拉强度	110
5.2.3 弹性模量	111
5.2.4 抗压强度与弹性模量之间的关系	114
5.2.5 石粉和机制砂在混凝土中的正负效应	117
5.3 耐久性	118
5.3.1 概况	118
5.3.2 抗裂性	119
5.3.3 渗透性	122
5.3.4 体积稳定性	125
5.3.5 抗冻融性	131
5.3.6 碱-骨料反应	132
5.3.7 地下腐蚀环境中的混凝土耐久性	136
参考文献	146

6 机制砂混凝土的微观结构 148

6.1 水化特性	148
6.1.1 水泥水化硬化机理	148
6.1.2 水泥水化过程	149
6.1.3 水泥水化动力学模型	153
6.1.4 机制砂中石粉对水泥水化的影响	154
6.2 孔结构特性	156
6.2.1 孔结构种类	156
6.2.2 孔结构与宏观性能的关系	156

6.2.3 机制砂中石粉对混凝土孔结构的影响	159
6.2.4 利用热孔计法表征混凝土的孔结构	159
6.3 微观结构特性	167
6.3.1 界面过渡区的微观结构	167
6.3.2 机制砂中石粉对不同强度等级混凝土微观结构的影响	168
6.3.3 石灰岩质骨料混凝土微观结构特性研究	169
参考文献	172

7 机制砂自密实混凝土及工程应用 **175**

7.1 机制砂自密实混凝土研究应用现状	175
7.2 机制砂自密实混凝土原材料的选用	177
7.2.1 机制砂自密实混凝土之机制砂的选用	177
7.2.2 机制砂自密实混凝土之其他材料的选用	178
7.3 机制砂自密实混凝土的配合比设计	178
7.3.1 机制砂自密实混凝土配合比设计的原则	178
7.3.2 机制砂自密实混凝土配合比设计的方法	179
7.3.3 机制砂自密实混凝土配合比参数优化	180
7.4 机制砂自密实混凝土的性能	187
7.4.1 机制砂自密实混凝土的工作性及其评价	187
7.4.2 机制砂自密实混凝土的力学性能	189
7.4.3 机制砂自密实混凝土的耐久性	189
7.5 机制砂自密实混凝土的工程应用	190
7.5.1 机制砂自密实混凝土用于一般工程中	190
7.5.2 机制砂自密实混凝土用于特殊工程中	197
参考文献	200

8 大粒径骨料机制砂自密实混凝土及工程应用 **202**

8.1 大粒径骨料机制砂自密实混凝土概况	202
8.2 大粒径骨料机制砂自密实混凝土原材料要求	204
8.2.1 水泥	204
8.2.2 机制砂	204
8.2.3 粗骨料	205
8.2.4 矿物掺合料	205
8.2.5 外加剂	206
8.2.6 拌合水	206
8.3 大粒径骨料堆积计算机模拟与分析	206
8.3.1 程序整体设计思路	207
8.3.2 各个模块的算法描述	207
8.3.3 堆积参数对大粒径骨料堆积程度的影响计算分析	211

8.4 超流态机制砂自密实混凝土配合比设计与制备	213
8.4.1 超流态机制砂自密实混凝土配合比设计原则	213
8.4.2 超流态机制砂自密实混凝土性能指标要求	213
8.4.3 超流态机制砂自密实混凝土配合比设计路线	214
8.4.4 超流态机制砂自密实混凝土配合比设计	214
8.4.5 超流态机制砂自密实混凝土的制备	215
8.5 大粒径骨料机制砂自密实混凝土性能	224
8.5.1 超流态机制砂自密实混凝土工作性能	224
8.5.2 大粒径骨料机制砂自密实素混凝土构件性能	225
8.5.3 大粒径骨料机制砂自密实钢筋混凝土构件性能	227
8.5.4 大粒径骨料机制砂自密实混凝土耐久性能	232
8.6 大粒径骨料机制砂自密实混凝土工程应用	234
8.6.1 毕节至威宁高速公路工程概况	234
8.6.2 大粒径骨料机制砂自密实混凝土的性能要求	235
8.6.3 大粒径骨料机制砂自密实混凝土现场原材料性能	235
8.6.4 工程现场应用配合比及基本性能测试	235
8.6.5 工程现场施工流程及质量控制	236
8.6.6 现场混凝土性能评价	238
8.6.7 工程应用总结	239
参考文献	240

9

机制砂抗扰动混凝土及工程应用

242

9.1 绪论	242
9.1.1 定义	242
9.1.2 抗扰动混凝土的研究意义	242
9.1.3 车桥耦合振动对混凝土性能影响的研究现状	242
9.1.4 贵州地区公路桥梁交通流量特征以及车桥耦合振动效应	244
9.1.5 抗扰动混凝土研究现状与存在的问题	246
9.2 原材料、试验方法与方案	247
9.2.1 原材料	247
9.2.2 试验与评价方法	247
9.2.3 研究思路与试验方案	251
9.3 模拟车桥耦合振动对混凝土性能的影响	251
9.3.1 模拟车桥耦合振动对不同性能混凝土的基本力学性能的影响	252
9.3.2 不同频率的振动对混凝土性能的影响	254
9.3.3 不同振幅的振动对混凝土性能的影响	258
9.3.4 不同的振动模式对混凝土基本力学性能的影响	261
9.3.5 不同振动作用时间段对混凝土基本力学性能的影响	261
9.4 抗扰动外加剂及抗扰动混凝土的研发	262
9.4.1 抗扰动混凝土的设计思路及研究方案	262

9.4.2	不同砂浆的抗扰动性	263
9.4.3	不同种类外加剂对砂浆抗扰动性的影响	266
9.4.4	抗扰动外加剂的配制	267
9.4.5	抗扰动混凝土的配制及性能研究	270
9.5	抗扰动混凝土的作用机理研究	272
9.5.1	混凝土的黏度	272
9.5.2	混凝土的凝结时间	272
9.5.3	混凝土的内部显微结构	272
9.5.4	混凝土的微观分析	273
9.5.5	水化热分析	274
9.5.6	抗扰动混凝土的作用机理	275
9.6	抗扰动混凝土长期力学性能和耐久性的研究	276
9.6.1	研究方法	276
9.6.2	试验研究结果及分析	277
9.7	工程应用	279
9.7.1	工程概况	279
9.7.2	扰动混凝土的性能要求	280
9.7.3	原材料	280
9.7.4	工程应用配合比及基本性能测试	281
9.7.5	工程应用总结	281
	参考文献	282

10

机制砂高强混凝土及其工程应用

284

10.1	机制砂高强混凝土概况	284
10.2	机制砂高强混凝土的原材料	286
10.2.1	水泥	286
10.2.2	骨料	286
10.2.3	外加剂	286
10.2.4	矿物掺合料	286
10.3	机制砂高强混凝土配合比设计	287
10.3.1	机制砂高强混凝土配合比设计的基本原则	287
10.3.2	机制砂高强混凝土配合比设计思路	287
10.4	机制砂高强混凝土的性能	287
10.4.1	机制砂高强混凝土的工作性能与力学性能	287
10.4.2	机制砂高强混凝土耐久性能	295
10.4.3	机制砂高强混凝土微观性能测试	297
10.5	机制砂高强混凝土工程应用	301
10.5.1	六冲河大桥简介及施工方案	301
10.5.2	水文地质条件	302
10.5.3	原材料加工工艺及性能参数	303

10.5.4 现场施工配合比及其工作性能	306
参考文献	308

11 机制砂水下抗分散混凝土及其工程应用 310

11.1 概况	310
11.2 原材料	311
11.2.1 水泥	311
11.2.2 机制砂	312
11.2.3 粗骨料	312
11.2.4 外加剂	312
11.2.5 矿物掺合料	313
11.2.6 水	313
11.3 配合比设计	313
11.3.1 基本原则	313
11.3.2 配合比设计方法	314
11.4 性能	315
11.4.1 拌合物性能	315
11.4.2 力学性能	317
11.4.3 耐久性能	318
11.4.4 水下抗分散混凝土外加剂与其他外加剂相容性与优化技术	321
11.5 工程应用	325
11.5.1 厦蓉高速水格项目 AT22 合同段水下灌注桩	325
11.5.2 贵黄公路花鱼洞大桥加固工程溶洞处理	327
参考文献	335

12 机制砂超高泵送混凝土及其工程应用 337

12.1 机制砂超高泵送混凝土泵送理论研究	337
12.1.1 泵送混凝土流变学模型	337
12.1.2 泵送混凝土流变学特征	339
12.1.3 泵送混凝土极限剪切应力	340
12.1.4 泵送混凝土塑性黏度	340
12.1.5 泵送混凝土颗粒集合模型	341
12.2 机制砂超高泵送混凝土性能及影响因素	343
12.2.1 机制砂超高泵送混凝土泵送性能及评价指标	343
12.2.2 机制砂超高泵送混凝土泵送性能影响因素	343
12.2.3 机制砂超高泵送混凝土其他性能需求	346
12.2.4 机制砂超高泵送混凝土关键问题	347
12.3 机制砂超高泵送混凝土原材料要求	348
12.3.1 水泥	348

12.3.2	矿物掺合料	348
12.3.3	粗骨料	349
12.3.4	机制砂	349
12.3.5	外加剂	349
12.4	机制砂超高泵送混凝土配合比设计	349
12.5	机制砂超高泵送混凝土工程应用	350
12.5.1	赫章大桥工程概况	350
12.5.2	赫章大桥机制砂超高泵送混凝土性能要求	350
12.5.3	赫章大桥机制砂超高泵送混凝土现场原材料	351
12.5.4	赫章大桥机制砂超高泵送混凝土配制技术	353
12.5.5	赫章大桥机制砂超高泵送混凝土泵送压力计算	356
12.5.6	赫章大桥机制砂超高泵送混凝土泵送作业	358
12.5.7	赫章大桥机制砂超高泵送混凝土施工养护	360
12.5.8	赫章大桥机制砂超高泵送混凝土全程质量控制	361
12.6	本章小结	362
	参考文献	362

1

绪 论

1.1 高性能混凝土的发展

1.1.1 混凝土的发展

混凝土是世界上最大宗的人造材料，也是当今最主要的土木工程材料之一。

混凝土，简称为“砼”，是指由胶凝材料将骨料胶结成整体的工程复合材料的统称。通常讲的“混凝土”一词是指用水泥作胶凝材料，砂、石作骨料，与水（加或不加外加剂和掺合料）按一定比例配合，经搅拌、成型、养护而得的水泥混凝土，也称普通混凝土。

混凝土的历史可以追溯到公元前 3600 年，那时人们就开始使用一些胶凝材料。古埃及人在建造金字塔时，将煅烧后的熟石膏与水、河砂混合制成石膏砂浆，用花岗岩砌筑成 146m 高的正方锥体。我国古人于公元前 220 年修建长城时，用石灰、砂、黏土配成三合土，洒水夯实筑成城墙。古希腊、古罗马人用火山灰磨细后与石灰、砂混合，得到强度高、抗水性好的砂浆。

19 世纪 20 年代，英国人研制出波特兰水泥生产工艺，用它作为胶凝材料配制的混凝土具有工程所需的强度和耐久性，而且原料易得，造价较低，因而波特兰水泥的出现极大地推动了混凝土的发展。

1848 年，法国人莫尼尔发明了钢筋混凝土，使得混凝土的抗拉性能得到改善。1900 年，万国博览会上钢筋混凝土在诸多方面应用的展示，引发了建材领域的革命。1918 年，水灰比理论的提出，初步奠定了混凝土强度计算的理论基础。至此，钢筋混凝土成为改变世界景观的重要材料。

1945 年第二次世界大战结束后，预应力混凝土逐渐从西欧各国发展起来。预应力混凝土的出现，使得混凝土构件的抗裂性、耐久性得到充分提高，同时也降低了构件自重，节省了原材料。预应力技术在混凝土中的应用为建筑物向大跨度、高耸、重载发展奠定了基础^[1-2]。

20 世纪 60 年代以来，混凝土外加剂的广泛使用，使得混凝土的性能得到进一步的改善，混凝土的研究与工程应用步入一个全新的发展时期。高效减水剂的发明，带来了流态混凝土；高分子材料进入混凝土材料领域，出现了聚合物混凝土；多种纤维被应用于混凝土中，形成了纤维混凝土。此外，现代测试技术也越来越多地应用到混凝土材料科学的研究之中^[3-5]。

1.1.2 高性能混凝土的发展

混凝土材料作为现代工程结构的首选材料至今已有 100 多年的历史。在使用过程中,混凝土也暴露出诸多问题,如工作性不好、长期耐久性较差、体积稳定性不足、使用寿命缩短等,特别是由混凝土结构耐久性不足而引起失效的例子屡见报端,引起工程界的高度重视。在此背景下,国内外混凝土界的专家、学者在其研究基础上,提出了高性能混凝土这一概念^[6-9]。

高性能混凝土 (high performance concrete, HPC) 是 20 世纪 80 年代末至 90 年代初,一些发达国家基于混凝土结构耐久性设计提出的一种全新概念的混凝土。挪威于 1986 年首先对此进行了研究,在 1990 年由美国国家标准与技术研究院 (NIST) 与美国混凝土学会 (ACI) 共同主办的一次研讨会上正式定名。高性能混凝土以耐久性为首要设计指标,具有高强度、高工作性、高抗渗性和高体积稳定性等许多优良特性,被认为是目前性能最为全面的混凝土^[10-12]。高性能混凝土已在不少重要工程中被采用,特别是在桥梁、高层建筑、海港建筑等工程中显示出其独特的优越性,在工程安全使用期、经济合理性、环境条件的适应性等方面产生了明显的效益,因此被各国学者所接受,被认为是今后混凝土技术的发展方向,有“21 世纪混凝土”之称。

高性能混凝土的研究与开发应用,对传统混凝土的技术性能有了重大的突破,对节能、工程质量、工程经济、环境与劳动保护等方面都具有重大的意义^[13]。

尽管如此,不同学派根据实际工程的要求,对高性能混凝土看法的侧重点有所不同^[14-15]:

(1) 高耐久性混凝土。以 Mehta 为代表的美、加学派强调的是硬化后混凝土的性能。Mehta 认为,耐久性应当放在高性能混凝土的首位,并具有高抗渗性和高体积稳定性^[16]。

(2) 高强、超高强混凝土。高性能混凝土首先必须具有高强度,这也是大部分日本学者及工业界所强调的。

现代高强混凝土采用矿物超细粉与高效减水剂并用的方式配制。在混凝土中掺入超细粉物质,可以使硬化水泥石结构致密,孔径细化,改善界面结构,具有高的抗渗性、耐久性和强度,即在混凝土中掺入超细粉物质可以改善高强混凝土的结构并提高其性能。

(3) 高流态、自密实混凝土。冈村等日本学者则认为高流态、自密实混凝土就是高性能混凝土。

自密实混凝土是在浇筑时仅靠混凝土自身的重力而不需要任何捣实外力而达到自密实、自流平的一种混凝土,尤其适用于施工形状复杂、钢筋密集,因而难以振捣的部位,同时可以大大加快混凝土浇筑速度,另外还可以消除振捣带来的噪声。自密实混凝土和广泛用于钢桥面铺装的浇筑式沥青混凝土相似,后者由于其本身的高流动性,摊铺后无需碾压,只要简单整平即可。

(4) 绿色高性能混凝土。1997 年 5 月,我国吴中伟院士提出了绿色高性能混凝土的概念。“绿色”的含义是指节约资源、不破坏环境,符合可持续发展的原则,既满足当代人的需求,又不危及后代人的生存与发展^[17-19]。

绿色高性能混凝土的特点是更多地节约硅酸盐水泥熟料,更多地掺加以工业废渣为主的活性细掺料,更大地发挥高性能优势。

冯乃谦教授^[15]认为,高性能具有相对性,是指不同的设计载荷、不同的施工条件及使用环境中均具有优异的性能。因此,高性能混凝土既是性能最全面的混凝土,也应该是能针

对性地满足各种特殊使用条件的混凝土。

机制砂高性能混凝土是指用机制砂部分或全部取代河砂配制的高性能混凝土。我国对于机制砂混凝土的研究始于 20 世纪 60 年代, 并成功应用于诸多重大工程项目之中, 极大地促进了我国机制砂工业的发展。机制砂工业的发展也进一步推动了机制砂在混凝土中的使用, 成为研究人员继续开发、应用机制砂高强、高性能混凝土的技术和物质基础。

1.2 机制砂工业的发展

1.2.1 骨料的分类与发展

骨料又称为集料, 约占混凝土原材料总质量的 75%, 是混凝土的主要组成之一, 对混凝土的性能有重要影响。骨料是混凝土的骨架材料, 呈颗粒状, 一部分来自天然的卵石和河砂, 另一部分来自机制砂石, 还有少量烧结陶粒等轻骨料。

骨料对混凝土的性能有十分重要的影响。过去骨料被认为是混凝土中的填充料, 所以常被忽视。骨料已渐被当作主要架构材料, 因为即使没有水泥浆, 骨料亦可支撑载重。骨料在混凝土中起骨架作用, 并抑制水泥的收缩; 水泥和水形成水泥浆, 包裹在粗细骨料表面并填充骨料间的空隙 (见图 1-1)。水泥浆体在硬化前起润滑作用, 使混凝土拌合物具有良好的工作性能, 硬化后将骨料胶结在一起, 形成坚强的整体。骨料形成的骨架除了承载应力、防止收缩外, 还在混凝土和砂浆中起到防止开裂和耐磨作用。此外, 骨料的材性对混凝土的强度、施工性 (和易性) 和耐久性均有极大的影响。骨料的强度、表面特征、清洁度、级配、颗粒形状、最大粒径、含泥量和泥块含量等会影响混凝土的强度。骨料的级配、粒型、吸水率、表面特征、黏土矿物含量等会影响混凝土的施工性。骨料的级配、孔隙率、孔结构、渗透性、饱和度、结构和构造、黏土矿物、弹性模量、热膨胀系数、硬度、有害物质等会影响混凝土的耐久性^[20]。

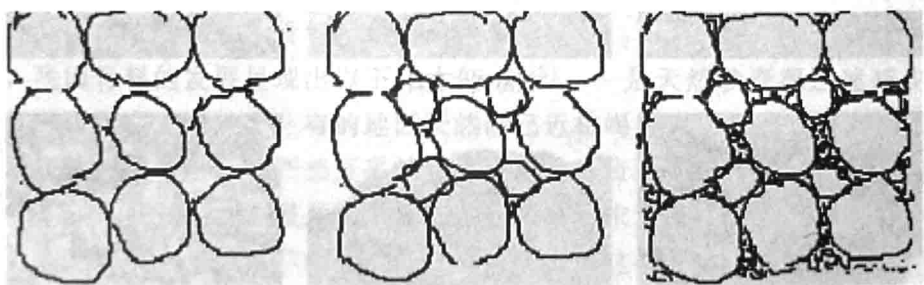


图 1-1 骨料在混凝土中的作用示意图

尽管如此, 骨料的质量问题仍然是当前砂石行业的主要问题。建筑用砂石没有行业规划, 各地也是临时应对; 没有按工业产品认真管理, 在全国各地工商企业产品名录登记中, 关于骨料的名称竟达 65 种。用“一盘散沙”形容建筑骨料生产行业非常形象。陈家珑教授也多次强调, 质量问题是表面问题, 根本原因仍在认识不足, 需从提高认识和加强管理等方面着手解决。

1.2.1.1 骨料的分类

骨料可按粒径、密度和成因进行分类 (见表 1-1)。

表 1-1 骨料的分类^[15]

区分	名称	说 明
粒径	细骨料	粒径在 0.075~4.75mm
	粗骨料	粒径在 5~150mm
成因	天然骨料	河砂、河卵石；山砂、山卵石；海砂、碎石；火山碎石
	人工骨料	膨胀页岩、陶粒、膨胀珍珠岩
	副产骨料	矿渣碎石、膨胀矿渣、石煤渣
	再生骨料	废弃再生混凝土、再生砂浆
密度/(t/m ³)	轻骨料	绝干密度在 2.3 以下，如烧成的人造轻骨料与火山渣
	普通骨料	绝干密度在 2.4~2.8 左右，如通常混凝土用的天然骨料及人造骨料
	重骨料	绝干密度在 2.9 以上，多者达 4.0 以上，放射线屏蔽用混凝土骨料属于此类，如重晶石、铁矿石等

在建筑业中，根据骨料粒径大小，骨料可分为粗骨料和细骨料。根据骨料密度，骨料可分为轻骨料、普通骨料和重骨料。

在骨料市场中，根据骨料来源，骨料可分为天然骨料、人工骨料、工业副产骨料和再生骨料（见图 1-2）。天然骨料是在河水冲击积累、海沙沉淀等自然力的作用下形成的，如河砂、河卵石、海砂、海石、山砂、山石等；人工骨料是人类利用机械加工的手段将一些自然材料和废弃材料按照科学标准加工而成的，如膨胀页岩、陶粒、膨胀珍珠岩等；副产骨料是

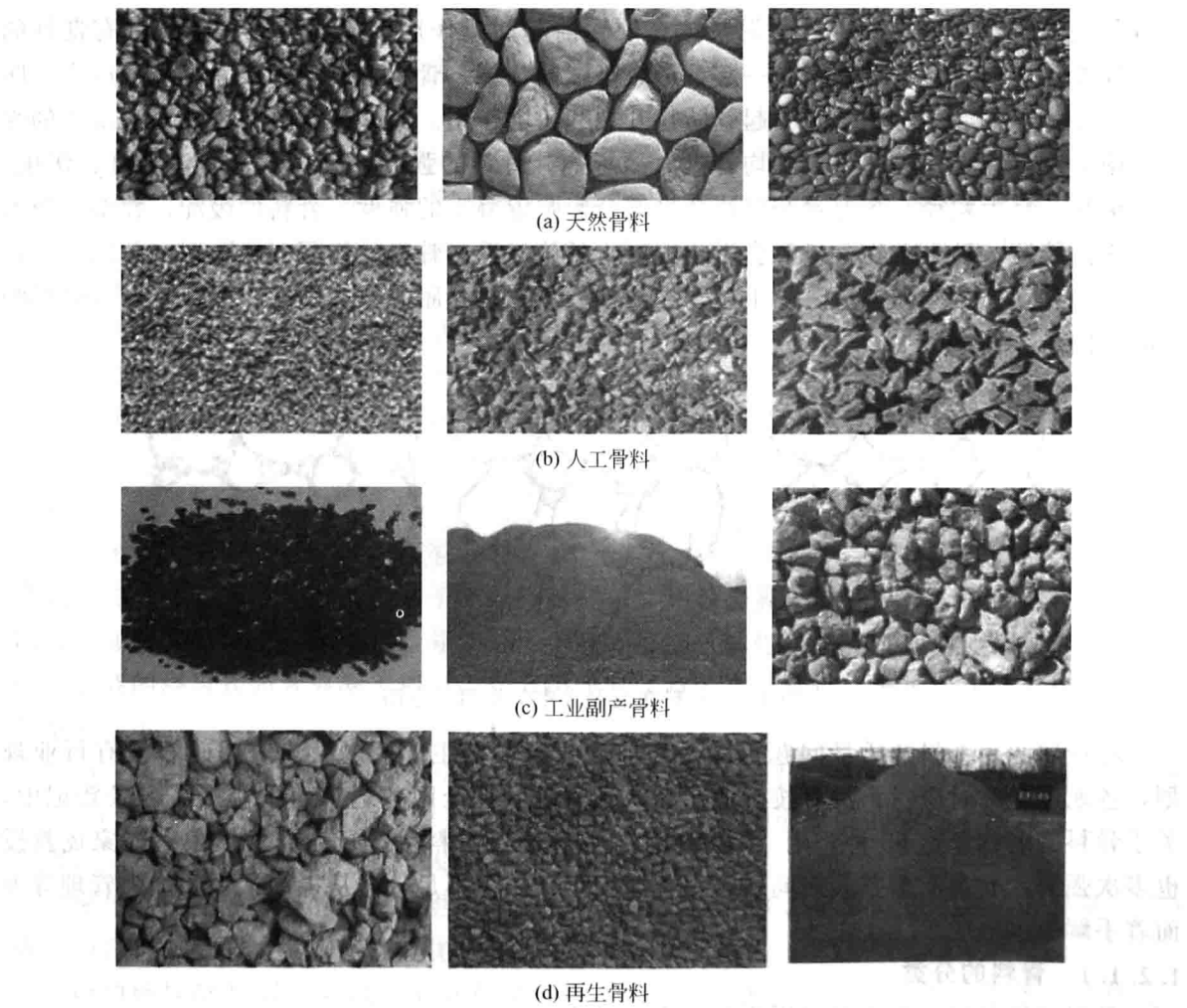


图 1-2 各类混凝土骨料示意图^[28]

在工业过程中一些环节产生的副产品，可以直接用来做骨料，如矿渣碎石、膨胀矿渣、石煤渣等；再生骨料是废弃混凝土再生利用制备而成的骨料。

1.2.1.2 骨料的发展

我国骨料的发展是伴随着土木建设的发展而发展起来的。从新中国成立至今，大致可以分为起步阶段、发展阶段和转型阶段三个阶段（见表 1-2）^[21]。

表 1-2 建筑骨料发展阶段的划分

阶段	时间	特 征
起步阶段	1949～1977 年	需求量少、供应充足、自然储量充足、发展缓慢、自然骨料为主
发展阶段	1978～2010 年	需求量大、供应充足、自然储量不足、发展快速、自然骨料为主、机制砂和副产品骨料出现
转型阶段	2011 年至今	需求量大、供应吃紧、自然储量殆尽、持续增长、机制骨料为主

（1）起步阶段（1949～1977 年） 新中国成立之后，由于历史问题，国家把重心放在了国防建设和民生问题上，其他各方面的发展明显滞后，土建发展相对迟缓，这一时期的建筑骨料供应充足，基本上全部来源于自然骨料。

（2）发展阶段（1978～2010 年） 1978 年党的十一届三中全会召开以后，市场机制的引进促进了中国各行各业的全面快速发展，各种建筑工程更是如雨后春笋般涌现出来，带动了整个骨料行业的高速发展。虽然需求量巨大，但由于骨料标准要求不很严格，且在开采过程中几乎没有限制，所以基本上还可以满足建筑骨料的市场需求，这个时期骨料的主要来源仍然是自然骨料。后期开始出现了利用机制骨料（机制砂）和副产品骨料的现象。

（3）转型阶段（2011 年至今） 从“十二五”开始，国家坚持把经济结构战略性调整作为加快转变经济发展方式的主攻方向，坚持把建设资源节约型、环境友好型社会作为加快转变经济发展方式的重要着力点。传统粗放型、以破坏性为代价的建筑骨料开采受到了来自各方面的限制，此时的市场对骨料的品种、质量、性能等要求有了一套严格的标准。过去的骨料开采方式无以为继，面对不断增加的骨料市场需求和自然骨料的限制开采的矛盾，骨料行业开始悄然转型，这个时期人工骨料开始占据主导地位。

现阶段，我国骨料的发展呈现出以下几大特点^[22]：一是天然砂资源迅速减少。经过多年开采，天然砂资源在迅速减少，有的地区天然砂已近枯竭。为了保护江堤河坝、保护生态平衡，各地政府加大河流限量和严禁开采的力度。天然砂资源日趋紧张，价格持续看涨。二是机制砂生产基地建设发展势头强劲。随着施工技术的要求和高科技的发展，对砂石的数量和质量都有更高的要求，积极推广使用机制砂有助于缓解这些突出矛盾。机制砂石已是砂石行业产业结构转型升级的主要发展方向和产业主体。国内大型水泥企业集团根据行业发展趋势已开始涉足和布局砂石骨料行业，为行业发展注入了新的发展动力，成为推动行业高质量、高水平发展的生力军。新建生产企业规模以大中型为主，生产规模在 800～1200t/h。三是砂石行业的企业管理力度加大。在国家提高安全和环境政策的推动下，各地政府加大了砂石行业的企业管理力度，限期、强行关闭各地的小型、不达标的采砂矿厂。行业内的优胜劣汰有利于行业整体规模的提高和工业化发展。四是产业升级、延长产业链。在传统砂石开采业改造提升水平的基础上，延长产业链，淘汰关闭落后产能，在提升技术、产品标准与提高进入门槛的前提下，依据市场容量适度发展。五是科技进步、和谐发展。砂石工业将在技术进步、产业规模与结构上加快转变发展方式，把加快行业技术进步和科技创新作为提升与