

沥青路面细观结构 特性与衰变行为

裴建中 ©著

217.01



科学出版社

www.sciencep.com



90

沥青路面细观结构 特性与衰变行为

裴建中 著

科学出版社

北京

U416.217.01

P389

内 容 简 介

沥青路面是由集料、沥青和空隙形成的复杂多相复合材料。沥青路面的使用性能与其组成材料的形态、性能和组成材料之间界面特性等细观参数密切相关。本书综合运用X射线CT扫描技术、数字图像分析技术、分形理论等方法首次对集料的形态、形貌和空隙的空间分布理论进行了系统研究;通过连续介质理论和多孔固体力学相结合,分析了空隙的力学特性,建立了多个空隙衰变模型;基于室内试验、数字图像分析技术和离散元法(DEM),对沥青混合料中空隙分布的衰变行为进行深入探讨;利用拓扑优化方法等手段,提出了沥青混合料细观特征对沥青路面宏观性能的影响规律。

本书可供从事道路工程科研、教学和工程设计人员参考使用,也可作为相关专业研究生教材或学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

沥青路面细观结构特性与衰变行为/裴建中著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-026321-6

I. 沥… II. 裴… III. 沥青路面-路面衰坏-研究 IV. U416.217.01

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第244505号

责任编辑:王志欣 闫井夫 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕 者

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>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年1月第一次印刷 印张:16 3/4

印数:1—2 000 字数:327 000

定价:50.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

近年来,我国的公路交通事业发展迅速,公路网已极具规模,高速公路通车里程稳居世界第二,长期制约我国经济社会发展的基础设施得到了较大的缓解,广大人民的出行需求也得到了较大的满足。但是,在取得数量发展的同时,我们还应看到由于在公路关键技术的储备不足,导致我国公路中存在不同程度的病害,这在某种程度上成为阻碍我国公路交通可持续发展的技术瓶颈。

自 2000 年以来,国家逐渐认识并开始提倡自主创新,每年投入近两亿元开展西部交通建设科技项目,用于解决我国交通发展中面临的重大共性技术难题,这为我国特殊地区公路快速发展和新一轮公路大发展奠定了坚实基础。

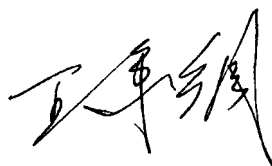
回顾我国公路研究的历程可以发现,同样储备不足的不仅仅是关键技术,作为技术支撑的基础理论研究始终也是其中的薄弱环节。国外发达国家在进行长寿命路面实践的时候,我们还在为达到设计寿命而努力尝试。国外在寻求路面的环境友好、资源节约时,我们还在为路用性能的提升而论证路面结构问题。基础研究积淀不足和原始创新缺位的局面亟须改变。

该书所研究的沥青路面细观结构就是目前国际上热门的基础研究领域之一。自从美国 SIMAP 开始以来,沥青混合料微细观结构的研究就备受关注。沥青路面细观结构研究,借助于其他学科日新月异的测试技术,并结合数字图像处理技术在道路学科中的应用,可望对集料的几何形态和表面形貌、空隙的空间信息挖掘、沥青与集料界面行为、混合料试件的三维重构进行深度解析;同时,应用 DEM 和原子 FEM 方法,有利于实现级配由基于集料粒径向基于集料形态过渡的设计并为实现、混合料设计阶段进行性能虚拟评价和长期性能预测、建成路面与目标设计的符合性检验提供一线曙光。

该书在国家自然科学基金、教育部新世纪优秀人才支持计划等项目的资助下,围绕沥青路面细观结构,立足基础研究,综合采用 X 射线 CT 技术、数字图像技术、分形理论、离散元法和拓扑优化等方法,多学科交叉应用,在道路学科领域进行了理论探索。作者紧密跟踪国际研究前沿,经多年的独立钻研,取得了若干成果,包括集料几何特征的精细评价、空隙信息的深度挖掘和基于功能的细观结构优化探索。尽管是侧重理论探索,但一些结果对指导实践也具有重要参考价值。如通过真实试件空间分析发现多孔沥青混合料空隙的等效直径主要集中在

4.5~9mm,而通过拓扑优化结果发现具有最大降噪效果的空隙直径为4~8mm,这就从理论上验证了多孔沥青混合料之所以具有优良降噪性能的细观机理。

沥青路面细观结构是一个新的研究领域,研究难度大,该方面的研究从理论到实践还有很长的路要走,但已有了一个良好的开端,假以时日,将会取得实质进展。



前 言

近年来,研究人员逐渐意识到沥青混合料宏观力学特性与其细观结构密切相关。关于宏观、细观和微观等范畴的划分随研究学科和对象的不同而尺度有所不同,综合国内外相关研究成果,沥青路面中细观结构应该更多指的是集料的形态与形貌特性、空隙的空间信息和沥青/集料的界面行为。

随着其他学科在路面工程中的不断渗透和研究手段的不断丰富,越来越多的学者开始致力于研究沥青混合料内部微细观结构与外部宏观力学特性之间的关系,从新的角度探求宏观现象的微观机理。关于沥青路面细观结构的研究代表了本领域未来的主要发展趋势之一,逐渐成为解决沥青路面复杂行为和深层问题的切入点和着力点。

为此,本书在沥青路面细观结构特性及其衰变行为等方面进行了深入探索。为了研究的方便,本书在大部分研究中选用空隙率较大的多孔排水沥青混合料作为载体,采用X射线计算机层析(CT)扫描技术、数字图像处理技术和分形理论对集料的形态与形貌特性、加工与遗传特性开展了科学评价,对沥青混合料空隙空间信息进行深入挖掘,揭示了集料的几何特性和空隙的分布规律;通过室内试验、DEM和连续介质力学等方法,对空隙的衰变行为进行分析,从多个角度构建了衰变模型;基于拓扑优化方法研究揭示了细观结构特征与混合料性能之间的关系。本书研究成果初步实现了对沥青混合料细观结构信息的深入挖掘和虚拟评价,揭示了沥青混合料细观结构的本质属性和内在规律,有助于重新审视现行沥青混合料的设计方法,阐释沥青路面一些病害的形成机理,同时,为将来在沥青混合料设计阶段预测沥青路面使用期间的路用性能奠定了坚实的基础,为将来混合料由体积设计过渡到性能设计迈出了成功的第一步。

本书研究成果是在国家自然科学基金项目(资助编号:50608006)、教育部新世纪优秀人才支持计划(资助编号:NCET-07-120)和交通应用基础研究项目(资助编号:2006319812120)的共同资助下完成的。开展基础理论的研究不是一件容易的事情,选择的是一条充满荆棘和相对沉默的道路,有时由于资助经费的不足而力不从心,有时限于研究手段的不能到位而感到茫然,有时在外界利益的诱惑下产生困惑而有些浮躁。值得庆幸的是,作者多年来坚持了下来,终于取得了一些成果,尽管不那么完美,有些还很肤浅,但从默默探索中体会到了快乐,并对将来的继续深化充满了信心。

本书在写作和研究过程中得到了作者的研究生的支持与帮助,研究生张嘉林

参加了第2、4、6、7和8章的研究,研究生常明丰参加了第2、5、9和10章的研究并协助完成了全书的格式统一,研究生张冬冬参加了第3章的研究,研究生张志辉参加了第2和11章的研究。同时,本书在研究和写作过程中得到了我国著名道路工程专家王秉纲教授的指导,王老师仔细审阅了本书的书稿,提出了许多宝贵的修改意见,并欣然为本书作序,作者受益匪浅,在此深表感谢。

沥青混合料细观结构的研究是目前本领域研究的热点和难点,是一个新兴的研究领域,众多的问题仍悬而未决;同时,现有的研究成果也仅仅是理论上的探索,离解决实际问题还有很长的路要走。因此,本书在写作中除了介绍作者的研究成果之外,还力求反映国内外相关的最新研究进展,但因时间紧张,加之作者水平有限,书中的疏漏和不当之处在所难免,恳请各位专家、学者和读者不吝指正。

裴建中

2009年9月于长安大学

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 沥青混合料多尺度问题	1
1.1.2 沥青混合料集料特性问题	3
1.1.3 沥青混合料空隙信息挖掘问题	5
1.1.4 沥青混合料沥青/集料界面行为问题	6
1.2 沥青混合料集料特性研究进展	7
1.3 沥青混合料空隙信息挖掘研究进展	15
1.3.1 沥青混合料空隙模型的研究进展	17
1.3.2 沥青混合料空隙率影响因素的研究进展	18
1.3.3 空隙率对沥青混合料技术性能的影响研究进展	19
1.3.4 空隙在边缘学科中的研究进展	20
1.4 沥青混合料集料/沥青界面行为研究进展	23
参考文献	26
第 2 章 理论基础与技术途径	31
2.1 分形理论	31
2.1.1 分形与分维的定义	31
2.1.2 分形的自相似性	32
2.1.3 分形的无标度性	32
2.1.4 分形理论在沥青混合料研究中的应用	33
2.2 X 射线 CT 技术	35
2.3 离散元法	39
2.3.1 基本思想	39
2.3.2 基本方程	40
2.3.3 接触本构模型	44
2.3.4 离散元法的程序实现	47
2.3.5 颗粒流程序的解题途径	52
2.4 拓扑优化理论	54

2.4.1	拓扑优化基本原理	55
2.4.2	连续体拓扑优化方法	57
2.4.3	拓扑优化的应用	61
	参考文献	63
第3章	沥青混合料集料几何特性	65
3.1	集料的几何形态特性	65
3.1.1	集料的数字化方法	65
3.1.2	集料几何形态特性	67
3.1.3	集料几何形态特性二维解析	73
3.1.4	集料几何形态特性三维解析	82
3.1.5	集料机械筛分与理论筛分的相关性	85
3.2	集料的表面形貌特性	89
3.2.1	集料形貌特征的量化指标	89
3.2.2	集料形貌特征的多维解析	92
3.2.3	集料表面形貌的理论构造	94
3.2.4	单参数指标对集料表面形貌的影响	95
3.3	集料的加工与遗传特性	96
3.3.1	集料破碎理论	96
3.3.2	破碎过程中的能量守恒	98
3.3.3	破碎过程中的熵平衡	101
3.4	级配与空隙形成理论	102
3.4.1	骨架空隙的形成原理	102
3.4.2	集料级配分维与空隙率的关系	103
3.4.3	影响空隙率变异的因素	104
	参考文献	105
第4章	沥青混合料空隙信息获取方法	107
4.1	空隙分布描述的基本参数	107
4.1.1	空隙率与连通空隙率	107
4.1.2	空隙等效直径	108
4.1.3	空隙数量	108
4.1.4	空隙分维数	109
4.1.5	空隙形貌	109
4.1.6	比表面积	110
4.2	空隙空间分布描述的数学方法	110
4.2.1	经典的统计学方法	110

4.2.2 拓扑学方法	110
4.2.3 分形几何方法	111
4.2.4 重正化群方法	111
4.2.5 谱密度方法	111
4.3 空隙空间分布描述的试验方法	112
4.3.1 压汞法	112
4.3.2 气体吸附法	113
4.3.3 X射线层析摄像法	114
4.3.4 小角度 X 射线散射法	114
4.3.5 光学法	114
4.4 空隙分形的测试评价方法	115
4.4.1 图像分析法	115
4.4.2 压汞法	117
4.4.3 X 射线小角度散射法	117
参考文献	118
第 5 章 沥青混合料空隙力学特性	120
5.1 不同状态下空隙体积模量数学模型	120
5.1.1 多孔沥青混合料空隙模型概念化	120
5.1.2 基于 Betti 定理的空隙体积模量数学模型	122
5.1.3 空隙体积模量的温度影响关系	125
5.2 有限空隙力学特性	127
5.3 空隙力学特性数值模拟	130
5.3.1 模型的建立与参数的选择	130
5.3.2 骨料变形特性	134
5.3.3 不同荷载下空隙变形特性	138
参考文献	140
第 6 章 沥青混合料空隙 CT 图像解析	141
6.1 基于 CT 技术的沥青混合料数字图像处理与识别	141
6.1.1 沥青混合料数字图像的获取	141
6.1.2 沥青混合料数字图像的处理	142
6.1.3 空隙的属性表征与评价	145
6.2 沥青混合料 CT 图像二维解析	148
6.3 沥青混合料 CT 图像空间解析	151
6.4 空隙级配分析法	155
6.5 空隙的分形表达	155

参考文献	155
第7章 沥青混合料空隙分布特性	157
7.1 试件制备与室内试验评价	157
7.1.1 多孔沥青混合料试件制备方案	157
7.1.2 多孔沥青混合料试件制备	157
7.1.3 开级配沥青混合料与 SMA 试件的制备	161
7.2 沥青混合料空隙横向分布特性	162
7.3 沥青混合料空隙竖向分布特性	164
7.3.1 空隙特征提取图像分析	165
7.3.2 空隙特征参数分析	167
7.3.3 空隙竖向级配分析	167
7.3.4 竖向空隙与横向空隙对比分析	168
7.3.5 空隙轮廓分维数与面积分维数关系分析	169
7.4 沥青混合料空隙空间分布特性	169
7.4.1 空隙率的空间分布规律	175
7.4.2 空隙等效直径的空间分布规律	176
7.4.3 空隙数量的空间分布规律	176
7.4.4 空隙分维数的空间分布规律	177
7.4.5 空隙级配走向规律分析	177
第8章 沥青混合料空隙分布影响因素	179
8.1 矿料级配对沥青混合料空隙分布特性的影响	179
8.1.1 不同级配对沥青混合料空隙分布特性	179
8.1.2 空隙横向分布与竖向分布的对比	183
8.2 压实功对沥青混合料空隙分布特性的影响	184
8.3 压实方法对沥青混合料空隙分布特性的影响	186
第9章 多孔沥青路面空隙衰变行为	190
9.1 基于 X-CT 技术的空隙衰变试验评价	190
9.1.1 空隙分布对沥青混合料劈裂抗拉强度影响	190
9.1.2 沥青混合料空隙分维数与渗透性能的关系	191
9.1.3 多孔沥青混合料空隙衰变行为探索	192
9.2 基于连续介质线弹性理论的空隙衰变模型	194
9.2.1 具有空隙的线弹性材料理论	194
9.2.2 基于连续介质线弹性理论的沥青混合料参数及其确定方法	196
9.2.3 多孔沥青混合料空隙衰变规律	198
9.3 空隙衰变的龚帕斯模型及衰变行为	200

9.3.1 空隙衰变的龚帕斯模型	201
9.3.2 龚帕斯模型参数的确定	201
9.3.3 基于龚帕斯模型的空隙衰变行为规律	203
9.3.4 基于龚帕斯模型的空隙率预测模型	205
参考文献	206
第 10 章 基于 DEM 的多孔沥青路面空隙衰变规律	208
10.1 沥青结合料二维数字重构及离散元模型	208
10.1.1 沥青结合料的数字重构及离散元模型	208
10.1.2 集料颗粒的数字重构及离散元模型	209
10.1.3 沥青混合料的数字重构及离散元模型	211
10.1.4 不同空隙率沥青混合料模型的生成	212
10.2 间接拉伸试验的数值模拟	213
10.2.1 几何模型的构建	213
10.2.2 试验条件的模拟	215
10.2.3 数值模拟结果与分析	216
10.2.4 不同加载速率下间接拉伸试验模拟	218
10.3 多孔沥青路面力学响应的数值模拟	222
10.3.1 模型的建立与参数选择	222
10.3.2 力学响应模拟	225
10.3.3 不同荷载下空隙衰变的模拟	230
参考文献	231
第 11 章 基于拓扑优化方法的沥青混合料细观结构设计	232
11.1 沥青混合料强度特性优化	232
11.1.1 沥青混合料应变能与空隙率关系	232
11.1.2 沥青混合料强度与应变能关系	235
11.1.3 沥青混合料强度与空隙率关系	235
11.2 沥青混合料排水性能优化	237
11.2.1 沥青混合料的渗透性与空隙关系	238
11.2.2 基于拓扑优化的渗透模型	240
11.3 沥青混合料降噪性能优化	244
11.3.1 轮胎/路面噪声产生机理及控制方法	247
11.3.2 基于降噪的沥青混合料空隙结构优化	252
参考文献	255

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

沥青路面是我国 300 多万公里公路网和 6 万多公里高速公路的主要路面结构型式,永久变形、疲劳开裂和低温开裂是伴随沥青路面发展中的主要病害形式。当前,面临的主要问题是重载条件下沥青混合料流动失稳以及由此造成的车辙病害,其已经成为高等级公路沥青路面的典型破坏形式,严重影响了道路的服务水平、服役寿命和运营效益,工程界技术人员谈“辙”色变。

长期以来,国内外研究人员在此领域进行了积极探索,从材料改善的角度,先后大量使用改性沥青、不断调整级配、局部修正设计指标和加强施工质量控制来试图改善路面性能,减少车辙病害,延长路面使用寿命,但限于问题的复杂性,目前还缺乏总体的把握、系统的思路和深入的理论探索,因而并没有能从根本上扭转我国沥青路面车辙破坏的发展趋势。

近年来,研究人员逐渐意识到沥青混合料的微观结构对其宏观力学特性影响的重要性,越来越多的学者开始致力于研究沥青混合料内部微细观结构与外部宏观力学特性之间的关系,从新的角度探求宏观现象的微观机理。关于沥青路面微细观结构的研究代表了本领域未来的主要发展趋势之一,逐渐成为解决沥青路面复杂行为的切入点和着力点。

众所周知,沥青混合料是由集料、沥青和空隙形成的复杂多相复合材料,混合料的路用性能不仅受到 VV、VMA、VCA 等体积因素的影响,且与其组成材料的形态、性能和组成材料之间的界面特性密切相关,同时与这些组成要素的大小和空间特性相关,传统的体积设计方法和参数并不能全面反映混合料的所有细观结构信息。

1.1.1 沥青混合料多尺度问题

自然界物质有多种层次,从宇观的宇宙体系,宏观的天体和常规物体,细观的颗粒、纤维和晶体,到微观的分子、原子和基本粒子。尺度问题在不同的学科中由于研究对象和需要的不同,划分标准也不同。

在地球材料学科中,第一种是矿物颗粒(grain)的尺度,亦可称为矿物尺度,即研究各个矿物的性质,矿物与矿物之间相互的接触几何等;第二种是研究多个矿

物组成的岩石尺度,通常称为岩石尺度,即在这种尺度下,矿物的性质被平均,取而代之的是岩石的性质;第三种尺度则更大,不仅包含完整的岩石,而且还包括多种岩石的组合,以及岩石中的节理等间断面,这种称为岩体尺度,岩体性质取决于岩石的组成和各种间断面的控制;最后一种尺度是地质尺度,它是各级尺度性质的高度而复杂的综合,地质现象是由矿物、岩石、岩体和构造运动的总体所决定的,如图 1.1 所示(陈颢等,2001)。

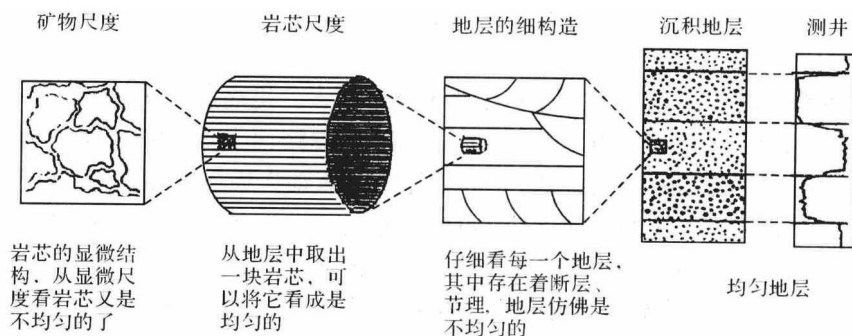


图 1.1 岩石的研究尺度问题

对于不同尺度工程材料的研究,混凝土领域的研究较之于沥青混合料要早。众所周知,混凝土是由水、水泥和粗细集料组成的复合材料。一般根据特征尺寸和研究方法的侧重点不同将混凝土内部结构分为三个层次(见图 1.2):①微观层次(micro-level)。材料的结构单元尺度在原子、分子量级,即 $10^{-7} \sim 10^{-4} \text{cm}$,着眼于水泥水化物的微观结构分析,由晶体结构及分子结构组成,可用电子显微镜观察分析,是材料科学的研究对象。②细观层次(meso-level)。从分子尺度到宏观尺度,其结构单元尺度变化范围在 10^{-4}cm 至几厘米,或更大些,着眼于粗细集料、水泥水化物、孔隙、界面等细观结构,组成多相复合材料,可按各类计算模型进行数值分析。在这个层次上,混凝土被认为是一种由粗集料、硬化水泥砂浆和它们之间的过渡区(黏结带)组成的三相材料。砂浆中的孔隙很小而量多,且随机分布,水泥砂浆力学特性可以看作细观均质损伤体。相同配合比、相同条件的砂浆试件,通常其力学特性也比较稳定,可以由试验直接测定。泌水、干缩和温度变化可引起粗骨料和水泥砂浆之间产生初始黏结裂缝,而这些细观内部裂隙的发展将直接影响混凝土的宏观力学性能。③宏观层次(macro-level)。特征尺寸大于几厘米,混凝土作为非均质材料存在着一种特征体积,一般认为是相当于 3~4 倍的最大集料体积。当小于特征体积时,材料的非均质性质将会十分明显;当大于特征体积时,材料假定为均质。有限元计算结果反映了一定体积内的平均效应,这个特征体积的平均应力和平均应变的关系成为宏观的应力应变关系(马怀发等,2004)。

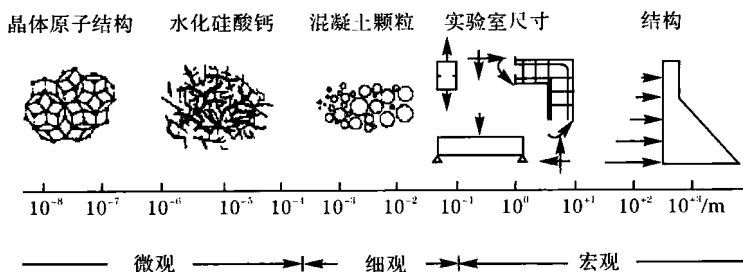


图 1.2 混凝土层次结构示意图

具体到沥青混合料,由于沥青混合料是由集料、沥青和空隙形成的多层次立体复合材料,过去传统的研究基本上是现象学基础上的宏观层次研究,包括理论分析和试验评价;细观结构研究则包括集料的形态与形貌等几何特性、空隙信息和沥青(或沥青胶浆)/集料界面层特性等方面的内容;而微观研究则限定在对沥青、集料等原材料的微观研究,包括元素组成、分子/原子结构、晶体形态等。

1.1.2 沥青混合料集料特性问题

对于将沥青混合料中集料作为个体,而不是作为级配进行研究,近年来国内外已经开始涉足。本质上,沥青混合料是由集料、沥青和空隙构成的典型的颗粒类复合材料,从体积构成角度分析,沥青混合料中绝大部分为集料,约占沥青混合料体积的 90%。一般来说,颗粒类材料在宏观上都具有三个特征:材料由许多颗粒组成,颗粒的自身强度远大于其联结强度,在外力作用下颗粒间发生相互错位移动。

SHRP 研究显示,沥青结合料在低温抗裂方面的贡献率约为 90%,在高温抗车辙方面贡献率占 40%,由此说明,在表征高温性能的时候,集料及级配还是起主导作用。因此,有必要对在混合料中占主导的集料进行系统的分析研究,除了过去常规的对集料整体的“级配”研究之外,还应深入分析集料作为有限“个体”时的性能特征,分析集料参数与路用性能的关系。

通过对比我国集料规范与美国 ASTM 和 AASHTO、欧洲 EN、德国 DIN、日本 JIS、英国 BS 等规范中关于集料的技术指标与标准,可以发现各国(地区)的技术指标不尽相同,对其内涵的理解存在差异,其差异可能源于对集料本质认识的不同,也可能尚未从根本上认识集料对于级配和沥青混合料性能的影响。

纵观国外沥青路面发展之路,集料质量的控制始终是沥青路面质量控制中的重要一环。在发达国家的公路建设中,均有稳定的集料料源产地,严格的集料控制指标,规范的集料生产工艺和完善的集料供应市场准入体系。

总体而言,我国在集料研究与应用中存在的主要问题包括:

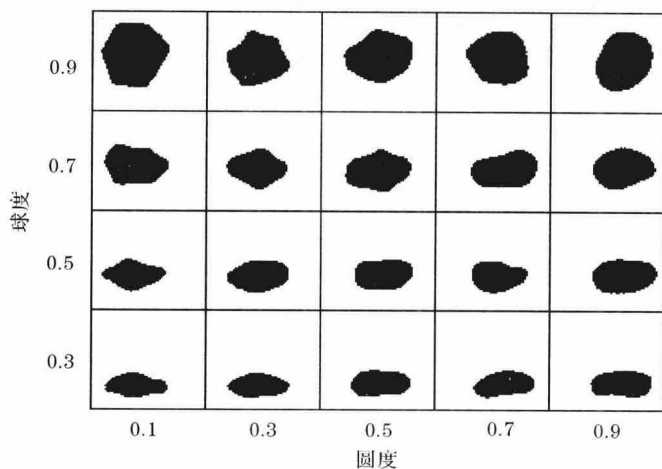
(1) 料源复杂,集料生产工艺粗糙,加工方式原始,集料性能的均匀性难以控

制,突出表现为集料粉尘多、针片状含量超标、形态不规格等。

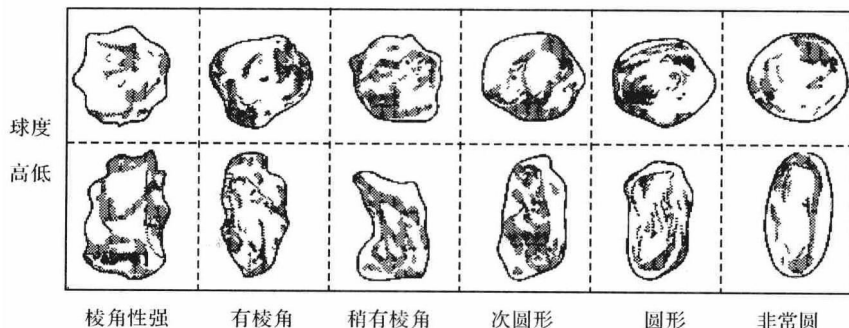
(2) 现有评价指标参数在层次和力度上,不能有效区别和控制集料质量。技术人员普遍对集料的资源特性(如集料品种、压碎值、磨光值、吸水率等)要求很严,但对加工特性(如针片状含量、破碎面比例、含泥量、棱角性)重视不够。

(3) 集料对于沥青混合料性能的影响关系不明确,对集料评价指标的合理性无法验证。

目前,国际上尚不清楚不同集料的表面形状、棱角、纹理等特性对混合料的路用性能的影响程度。一般研究将颗粒外形简化为类似球体的规则形体,而在建模中仅仅考虑级配的影响,或者通过不同颗粒估算其平均形状参数,最终试图与路用性能建立联系,如图 1.3 所示(Erdogan,2005)。这些成果尽管有用,但也存在缺点。由于缺乏有关集料特性的准确评价,混合料定量分析通常不包括集料形状的影响,因此更谈不上由集料等原材料的特性来预测混合料的性能。



(a) 圆度和球度测试评价



(b) 形态学评价

图 1.3 集料颗粒形状的图像评价

同样,对于集料的其他信息,如破碎加工规律、表面物理化学特性、尺寸效应特征等目前均没有比较完整的表述,无法应用于实践。

1.1.3 沥青混合料空隙信息挖掘问题

对于沥青混合料中空隙的探索,源于 X 射线 CT 扫描技术和数字图像处理技术在道路学科中的应用,目前已经有了很好的成果,如图 1.4 所示(Razavi,2006)。此外,对于不同混合料类型、不同混合料成型方式、不同公称最大粒径等情况的空隙也均开展了工作。

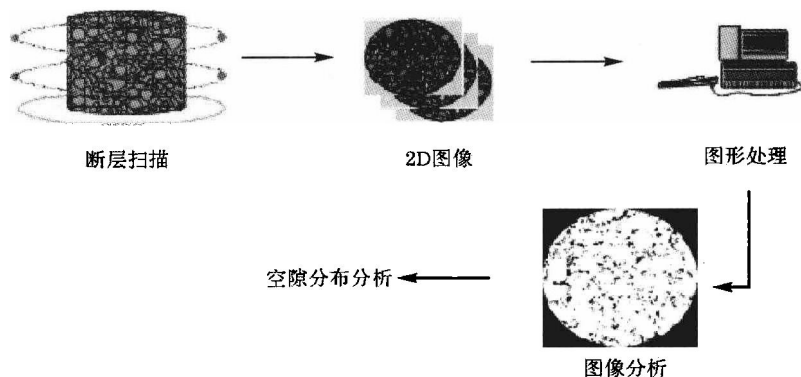


图 1.4 空隙分布研究的最初模型

由于空隙在各种介质中的空间分布具有不规则性、几何形状具有多样性[见图 1.5,其中标注的部分为空隙,其余空间为集料和沥青结合料(张嘉林,2008)],因此,给空隙的研究带来了困难,也使得空隙空间分布的理论出现多样化,但国内外鲜有研究空隙衰变的文献和研究成果。



图 1.5 基于 CT 扫描的沥青混合料试件