



*Aggregate Microscopic Characteristics and Asphalt Mixtures*

# 集料微观与沥青混合料

杨建国 汪 成 王旭东 罗代松 著

海外借

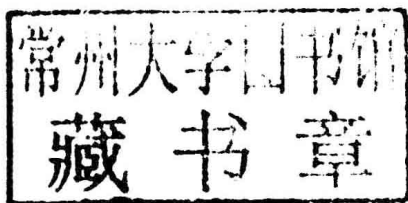


人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

# 集料微观与沥青混合料

Aggregate Microscopic Characteristics and Asphalt Mixtures

杨建国 汪 成 王旭东 罗代松 著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

越来越先进的微观设备开阔了工程师的视野,石料微观特征日益受到关注。本书是作者近两年来研究成果的总结。作者运用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、偏光显微镜等微观设备,研究了集料的微观结构、形貌和物质组成特征。通过室内试验和试验路验证,在分析集料宏观指标与微观特征之间关联性的基础上,总结了影响集料宏观指标和混合料性能的主要微观特征,提出了评价集料微观特征的指标和方法,探讨了集料路用性能改良途径。

本书对公路料场勘察、选择优质集料母岩具有借鉴意义,为沥青路面设计、施工和养护提供了参考,可作为从事公路工程、岩土工程专业科研及设计人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

集料微观与沥青混合料 / 杨建国等著. —北京 :  
人民交通出版社股份有限公司, 2017.9  
ISBN 978-7-114-14139-3

I. ①集… II. ①杨… III. ①沥青拌和料—研究  
IV. ①U414.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 213170 号

书 名: 集料微观与沥青混合料  
著 作 者: 杨建国 汪 成 王旭东 罗代松  
责任编辑: 袁 方  
出版发行: 人民交通出版社股份有限公司  
地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号  
网 址: <http://www.ccpres.com.cn>  
销售电话: (010)59757973  
总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部  
经 销: 各地新华书店  
印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司  
开 本: 720×960 1/16  
印 张: 5.75  
字 数: 95 千  
版 次: 2017 年 9 月 第 1 版  
印 次: 2017 年 9 月 第 1 次印刷  
书 号: ISBN 978-7-114-14139-3  
定 价: 35.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 前 言

集料是路面工程中用量最大的材料。除自然地理环境、沥青品质、路面施工过程控制以及运营期交通量、交通组成等因素外,集料品质是影响路面工程质量的最重要因素。

一般料场在设计阶段就已选定,然而,由于受设计阶段勘察精度、土地征用、石料市场和其他不确定性因素的影响,设计料场不一定是最终选定料场。在施工前期,承包商根据设计文件和项目所在地自然地理条件,对路线沿线潜在料场进行深入勘察。传统的做法是根据项目所在地区工程地质图,通过经验丰富的技术人员实地踏勘,对岩石的层位、岩性和地质构造特征等做出定性分析;结合物理、力学性能试验结果,根据技术标准和设计文件要求,最终确定料场。长期以来,这种做法在实践中发挥了很好的作用。但这种做法很大程度上依赖于岩土工程师的经验判断,也有一定的盲目性、局限性和主观性。由于施工中直接采用的是集料产品,生产实践中通常聚焦集料本身宏观指标和集料加入沥青混合料后的指标。现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)、《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中,也主要对集料宏观物理力学指标作了详细的规定,而对集料母岩的要求很少,基本不涉及集料微观特征及微观技术指标。

实际上,工程师要全面了解集料的路用特征,必须从如下4个层面入手:

(1)母岩宏观层面,原岩基本特征直接影响加工后的集料。影响集料性质的原岩特征有:成因、产状、结构、构造、物质组成、物理力学性质等。

(2)集料宏观层面,原岩粉碎成集料的压碎值、磨光值、针片状颗粒含量等宏观物理和力学性质。集料母岩在加工过程中,物理性质、力学

性质、水理性质和机械化学能等宏观性质发生改变,不同的母岩,变化过程不同。

(3)集料微观层面,主要指集料的微观特点,包括微晶大小、结晶程度和集料表面粗糙程度等。

(4)集料进入沥青混合料后,沥青混合料的路用性能。

令人欣慰的是,随着大量微观试验检测设备的出现,公路行业已采用微观“武器”围绕集料微观特征开展了大量科研、试验检测工作。部分研究成果已引起工程界的广泛关注,工程技术人员逐渐从宏观和微观两个方面对比、分析和研究集料的路用性能。

本书建立在大量室内微观试验和现场试验路观测的基础上,并且融入了多个科研项目和实体工程项目的研究成果和经验总结。书中主要论述了母岩微观特征与集料宏观指标的关联性、集料化学性质和物质组成对沥青混合料路用性能的影响、集料的微观组织与沥青混合料路用性能的关联性,讨论了评价母岩微观特征的评价方法以及基于集料微观特征的集料路用性能改善途径。

本书由交通运输部科学研究院杨建国、罗代松,交通运输部公路科学研究院汪成,北京中路汇技术咨询有限公司王旭东合著。在撰写本书过程中,我们引用和参考了部分相关文献和资料,在此向原作者表示感谢!锡林郭勒盟褚建峰、鲍澍、王君、罗树兵、钱燕青、付景文、乔巍、白杰、张海霞、刘殿兵、温琰琳参加了现场试验路的管理、试验、观测和研究,交通运输部沥青分子实验室郭朝阳、杨万里、赵蔚、王书杰、魏道新、陈景、李霖、朱宝林、王瞳、雷谦荣、杜卫峰、李雪锋在微观试验方面做了大量卓有成效的工作,在此一并致谢。

著作者

2017年3月

于交通运输部沥青分子实验室

# 目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 国外现状	2
1.3 国内现状	3
1.4 工程实践认识	5
1.5 小结	6
第2章 母岩微观特征与集料宏观指标	7
2.1 集料相关基本概念	7
2.2 母岩的微观特征	8
2.3 集料物理性质	14
2.4 集料力学性质	16
2.5 小结	22
第3章 集料化学性质和矿物组成与沥青混合料路用性能	23
3.1 化学性质	23
3.2 矿物成分	33
3.3 沥青混合料路用性能技术指标	40
3.4 小结	52
第4章 集料微观组织与沥青混合料路用性能	53
4.1 微观结构	53
4.2 集料微观形貌特征	56
4.3 小结	64
第5章 基于母岩微观特征的集料评价方法	65
5.1 评价指标	65
5.2 评价方法	70
5.3 集料路用性能改善方法	73
5.4 本章小结	84
参考文献	85

# 第1章 绪 论

中国公路交通运输建设突飞猛进,在经济和社会效益上成果卓越。截至2016年年底,全国公路通车里程达到469.63万km,其中高速公路里程13.10万km,国家高速公路9.92万km,高速公路车道里程57.95万km。二级及以上等级公路达到60.12万km,国道35.48万km,省道31.33万km,农村公路395.98万km。公路交通在国民经济和社会发展中发挥着举足轻重的作用。

我国公路路面结构通常采用沥青路面或水泥混凝土路面,由于沥青路面具有表面平整、行车舒适、施工期短、维护方便等优点,在高等级公路建设中得到了广泛的应用。

## 1.1 概述

碎石、机制砂等沥青混凝土集料是由岩石经机械破碎、筛分得到的,在沥青混合料中起骨架和填充作用。集料是沥青混凝土路面工程中用量最大的建筑材料,显著影响路面的性能、质量、造价和耐久性。长期工程实践经验表明,集料母岩的品质显著影响路面工程质量。因而,重视母岩的路用性能意义重大,选择优质集料母岩,并控制母岩加工质量是提高路面质量、减轻路面病害、延长路面使用寿命的重要途径。

公路路面病害中很多损坏现象是与集料性能密切相关的,集料性能和质量不高,是沥青路面出现破坏现象(如车辙、松散剥落、裂缝等)的主要原因之一。因此,研究集料特性对沥青混合料路用性能的影响就显得尤为重要。但是由于设备、理论和方法的欠缺,目前的路面集料研究多数停留在宏观指标(如压碎值、磨耗值、棱角性等)上,对集料的岩性和微观特征领域没有深入涉及。集料微观与宏观特征是辩证统一的关系,集料微观特征决定宏观特性,而宏观指标往往是微观特征的反映。所以,有必要深入研究集料岩性和微观特征。

目前评价和控制公路沥青路面路用性能的因素为高温稳定性、水稳定性、低温抗裂性、耐久性、防渗水能力及足够的抗滑能力等,这些因素都是根据其破损原因

分类提出的。虽然通过控制集料宏观指标、沥青和外加剂性能及配合比,对保证沥青混合料具备良好的路用性能有较明显的作用,但是实际工程中还是会出现车辙、松散剥落、裂缝等破坏,特别是很多工程项目在早期就会呈现出这样的破坏现象,这说明仅仅控制目前提出的集料宏观技术指标是远远不够的,在研究更多的集料宏观技术指标的同时,应该将集料的微观特性重视起来。因此,深入开展对集料岩性和微观特征及其对沥青混合料路用性能影响的研究有着极为重要的意义。

作者在充分借鉴和吸收国内外有关集料与沥青混合料关系研究成果的前提下,结合国内沥青混凝土路面最新研究进展,开展了集料岩性、微观特征的研究。主要内容包括:

(1)母岩微观特征与集料宏观指标,主要从集料的物理性质、水理性质、力学性质三个方面分析母岩微观特征与集料宏观性质之间的关系。

(2)分别从集料化学性质和矿物组成两个方面,研究这两个关键因素对沥青混合料路用性能的影响。

(3)研究集料微观组织和集料颗粒微观形貌特征对沥青混合料路用性能的影响。

(4)基于微观特征,研究集料性能评价方法,并从施工工艺、材料等方面分析改善沥青混合料性能的途径。

## 1.2 国外现状

CW Curtis 发现集料与沥青之间的相互作用直接影响集料与沥青之间的黏结和吸附力的强度,这个作用决定了在有水环境下,沥青包裹集料的维持能力。Curtis 重点研究集料与沥青界面的物理化学现象,同时分析了沥青在集料孔隙中发挥的作用。研究发现集料的性能是决定集料与沥青黏附与剥离的决定性因素,集料所起的作用远远大于沥青本身的性能。研究指出集料的 pH 值和表面极性官能团对集料与沥青的黏附起着决定性的作用<sup>[1]</sup>。但是研究报告只对集料的酸碱性,即 SiO<sub>2</sub> 含量做了研究,并没有深入研究集料其他方面的微观特征。

集料的矿物组成对集料性能有重要影响,而集料性能又是沥青混合料路用性能的重要决定因素之一,所以集料的矿物组成与沥青混合料的性能有密切的关系。Dimitri Kondelchuk 和 Karel Miskovsky 研究发现细集料中的云母会破坏骨料与沥青之间的黏附,降低道路承载力,对道路结构有危害。他们提出了用砂当量和亚甲蓝



2种试验关联的方法准确测定集料中自由聚合云母的含量,以此确定集料对道路结构承载力的破坏情况<sup>[2]</sup>。这项研究涉及了集料的成分分析,将集料中云母成分含量与沥青混合料和道路结构结合在一起,但是只针对云母含量对沥青混合料的危害做了分析验证,对集料中含有的其他主要成分没有做分析,而岩石成分对集料性能指标的影响,以及对沥青混合料路用性能的影响是复杂和综合的。

早在1912年,劳埃就利用XRD技术分析研究了许多无机晶体结构。至今,XRD技术的利用范围越来越广泛,在岩石岩样的分析领域也得到了应用。但是多数研究都只是分析岩石成分<sup>[3]</sup>或者是通过岩石的定性定量测定来分析所在岩层的地质方面的特征<sup>[4]</sup>,并没有将岩石成分等微观领域的岩性与宏观领域的沥青混合料性能相结合,也没有将XRD技术用在道路工程的科研和检测应用上。

Eyad A. Masad设计出了一种使用图像分析技术测量骨料形状的系统,该系统基于两个模块的系统运作。第一个模块主要用来研究细集料,通过捕获细集料的黑白图像进行分析;第二个模块主要用来研究粗集料,通过捕获粗集料的灰度图像和黑白图像来分析。两个模块相结合成一个系统来量化沥青混合料中任意形状的集料尺寸,以方便开展有关集料形状方面的研究工作。该系统主要针对尺寸从37.5mm到150mm的集料进行分析,可以测得集料的黏结形式、表面粗糙纹理、沥青混合料中集料的形状<sup>[5]</sup>。此项研究只针对一定范围的集料做形态的描述分析,缺少量化的数据,没有为研究集料对沥青混合料影响找出规律性的结论。

FHWA组织在1998年开展了SMAP项目的研发工作,项目核心成员Masad联合Tashman Laith等人研究出通过CT技术和数码成像技术定性定量的分析沥青混合料内部的集料形态结构变化<sup>[6,7]</sup>。但是最终并没有将沥青混合料的宏观性能与微观特征相结合来分析描述其路用性能。

Chandan等学者利用图像分析技术对集料的微观纹理进行分析,发现了在相同条件下,集料表面粗糙度与沥青混合料车辙深度成反相关关系,即集料表面粗糙程度越大,车辙深度越小<sup>[8]</sup>。

### 1.3 国内现状

梁建红等人通过对某工程项目中的沥青混合料配合比设计发现,虽然根据试验报告中集料的各项性能指标来看,均符合规范中的指标要求,但是由它们所构成的沥青混合料的性能却低于规范要求。针对这种现象,梁建红等人通过试验研究

发现集料技术指标好的沥青混合料路用性能不一定符合要求,在路面工程中,还是要通过评价沥青混合料的试验性能来决定集料的品质<sup>[9]</sup>。这项研究虽然提出了比较科学的结论,但是却停留在原有的集料技术指标范围,没有深入和更广泛地研究集料的其他指标,比如表面纹理、粗糙度、岩石成分等对沥青混合料的影响,缺乏一定的深度。

路面抗滑性能是由路面的微观和宏观特征共同决定的。初秀民等人基于这项理论基础,深入微观领域分析了路面微观特征对路面抗滑性能的影响,并对微观特征的采集和图像处理方法进行了研究<sup>[10]</sup>。这种深入微观领域,并结合宏观特征来分析沥青路面技术指标的方法值得借鉴。

西南交通大学的何昌轩重点对粗细集料的抗剪强度、集料的几何形态对沥青混合料性能的影响开展了深入研究。研究认为集料颗粒之间会产生嵌挤、摩擦作用,因此集料各组分的物理力学性质、几何形态、它们之间的相互作用及混合料各体积组成必然对沥青混合料的力学性质有很大影响<sup>[11]</sup>。

华南理工大学的孙杨勇博士基于分形理论,研制出了成套的软硬件系统,对粗集料表面微观特征进行采集、计算和分析。提出了可用于路面工程实践(集料选材、路面设计、施工控制、竣工检测等)的控制指标<sup>[12]</sup>,在工程上丰富了集料的评价和控制指标,使其与沥青混合料路用性能指标相适应,同时也对研究集料微观特征与沥青混合料路用性能关系提供了新的思路。

长安大学的孔维川通过3种方法分别测定集料的化学分子组成、分形维数和界面自由能,研究了沥青和集料界面的相互作用机理<sup>[13]</sup>,为今后研究沥青与集料界面作用情况提供了新的技术思路和有效的参考。

安徽理工大学的赵斌等人利用XRD衍射仪、SEM扫描电镜等,研究了岩石成分和表面微观特征(如颗粒、孔隙、裂隙、断痕)对岩石力学性质的影响<sup>[14]</sup>。这项研究的研究思路和方法较新颖,不仅从微观角度分析岩石的宏观特性,还利用材料学的分析仪器对矿物岩石进行分析,也为著者的研究思路和方法提供了参考。但是其研究方向属于岩石力学,并没有涉及沥青混合料和道路沥青路面领域。

综上所述,公路行业对于沥青路面的研究工作逐渐开始深入到微观领域,但是大多集中在研究沥青混合料、沥青性能和集料物理力学性能上,对集料岩性和微观特征的研究还很少,对集料在微观领域方面与沥青混合料性能的关系缺乏全面、系统的研究,目前多数研究停留在现行行业规范规定的集料指标的研究层次上。现阶段在道路路面领域通过X射线衍射仪和扫描电镜及能谱仪等先进设备对集料岩

性和微观特征的研究试验虽然很少,但是在材料学领域(如金属、陶瓷、高分子材料等)却得到了很广泛的应用,其研究方法和成果值得借鉴。

## 1.4 工程实践认识

长期以来,公路工程技术人员通常认为应选择基性岩(如玄武岩、辉绿岩和辉长岩等)或偏基性中性岩(如安山岩、闪长玢岩和闪长岩等)作为粗、细集料母岩,且普遍把玄武岩视为最好的路面石材。此外,由于基础理论、检测方法、试验设备和传统认知等方面的原因,技术人员更多地关注了集料的宏观指标。例如,现场踏勘料场时,通常的做法是结合长期的路面工程实践经验和项目所在地工程地质条件与自然地理条件,参考当地工程地质图确定岩石所在层位和岩性;然后在现场借助放大镜、地质手锤等工具,通过肉眼识别岩石的宏观结构、构造、矿物组成和胶结物等;初选料场后试破碎石,并按照试验规程在室内检验集料的各项指标是否满足现行规范要求;通过比选,最终确定路面料场。在筛选料场的整个过程中,技术人员不需要考虑母岩的微观结构、表面活性、表面化学性、矿物成分和化学成分等,所用仪器设备也仅限于材料宏观指标检测设备。

然而,通过对内蒙古东部地区路面工程的调研发现:

(1)有些玄武岩在不添加任何外掺剂的情况下,母岩品质达不到《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)、《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)(以下简称现行规范)的标准。这一结果说明并非所有的玄武岩都可作为路面集料的母岩。

(2)其他的母岩试验还表明,即使母岩原材满足现行规范所有指标要求,集料加工质量及沥青品质良好,且面层施工过程控制较好,用这种集料铺筑的路面,并不能达到技术人员所期望的路面性能。

在这种情况下,管理者可能会把由此产生的质量问题归于集料加工质量,认为石料质量的好坏可以通过改进加工工艺、加强中间控制得到改善。面对这些实际情况,技术人员有必要搞清楚一个基本问题:影响岩石路用性能的本质是什么?什么样的岩石才真正称得上品质优良?这些问题需要从微观特征出发,研究母岩微观特征与混合料路用性能之间的关系。

作者主要通过岩矿分析方法、微观分析方法、地球化学分析方法、室内试验、表面化学法等开展了相关研究。从现行规范中提出的集料检测指标入手,通过室内

试验,对比分析两种不同微观特征玄武岩宏观路用特征。运用微观分析手段,例如X射线衍射仪、扫描电子显微镜、核磁共振仪、偏光显微镜等设备分析玄武岩微观结构、形貌和物质组成特征。通过统计分析,建立集料宏观指标与母岩微观特征之间的关联性,分析影响集料宏观指标的主要微观特征,为进行母岩微观特征与沥青混合料路用性能奠定基础。然后选择矿料和沥青,在试验室进行矿料级配试验,综合考虑矿料最紧密状态、设计空隙率、沥青饱和度等技术指标,确定最佳油石比。对混合料进行高温性能(车辙试验)、水稳定性(残留稳定度试验、冻融劈裂试验)、低温性能(小梁弯曲)验证。通过室内试验,分析母岩化学成分、矿物组成、微观结构、微观形貌特征等对沥青混合料的影响。通过试验结果的对比分析,确定影响混合料性能的主要微观特征,研究评价集料微观特征的指标和方法。同时,从各种不确定性因素出发,研发集料路用性能改良材料。

### 1.5 小结

母岩在被粉碎的过程中,除了物理性质、力学性质、水理性质等宏观性质发生改变外,机械化学能也发生了改变,母岩岩性在一定程度上决定了这些变化过程和结果;另一方面,集料微观特征决定了集料作为混合料骨料的物理、水理和力学性质以及路用性能,即集料微观特征与沥青混合料路用性能并不是相互独立的,而是具有一定的客观关联性。因而,生产实践过程中,不能一味关注集料及其母岩的宏观指标。近年来,随着微观分析设备的广泛应用,利用微区分析方法从微观尺度研究集料特性成为一种新趋势。从微观角度分析集料的微观特征(矿物成分、化学成分、微观结构、形貌特征、表面活性等)对沥青混合料路用性能的影响,有助于深入了解沥青与集料相互作用机理,以寻找改善路面工程性能的有效途径;也可为施工前期选择石料提供借鉴,提高路面工程质量和耐久性。

## 第2章 母岩微观特征与集料宏观指标

集料是母岩经机械破碎的产物,当加工设备、场地等条件相同时,集料性质很大程度上取决于母岩特征,两者之间存在一定的关联性。研究母岩微观特征和集料宏观指标内在联系,是揭示母岩微观特征与沥青混合料路用性能相互关系的基础,有助于了解对集料物理、水理和力学性质影响较大的微观因素。

集料的核心作用是在混合料中起骨架和填充作用,它包括碎石、砾石、石屑、砂等。根据集料形成的过程可分为经自然风化、地质作用形成的卵石、砂砾和人工机械加工而成的碎石;根据粒径大小可分为粗集料和细集料(又称砂);根据化学成分分为酸性集料和碱性集料。

### 2.1 集料相关基本概念

为掌握集料的粒度成分,通常要对集料进行筛分试验。级配是集料中各级粒径的分配情况,通过筛分试验确定粗细集料颗粒粒级的分布状况。分计筛余百分率是指某号筛上的筛余质量占试样总质量的百分率;累计筛余百分率是指某号筛的分计筛余百分率和大于该筛号的各筛分计筛余百分率之和;通过百分率是指通过某号筛的试样质量占试样总质量的百分率,在数值上等于100减去某号筛的累计筛余百分率。

对颗粒性材料进行筛分试验用的符合标准形状和尺寸规格要求的系列样品筛为标准筛。标准筛筛孔为正方形,筛孔尺寸依次为31.5mm、26.5mm、19mm、16mm、13.2mm、9.5mm、4.75mm、2.36mm、1.18mm、0.6mm、0.3mm、0.15mm、0.075mm。集料的100%都要求通过的最小的标准筛筛孔尺寸称为集料最大粒径;集料可能全部通过或允许有少量不通过(一般容许筛余不超过10%)的最小标准筛筛孔尺寸为集料最大公称粒径,通常比集料最大粒径小一个粒级。

在沥青混合料中,粗集料是指粒径大于2.36mm的碎石、破碎砾石、筛选砾石和矿渣等。粗集料技术性质所包含的内容如下:

- (1) 物理性质,包括物理常数(各种密度、空隙率)、级配、坚固性。
- (2) 力学性质,包括压碎值、磨耗性、冲击值、磨耗值、磨光值。
- (3) 化学性质,包括有害杂质含量、碱集料反应。

在沥青混合料中,细集料是指粒径小于 2.36mm 的天然砂、人工砂(包括机制砂)及石屑。砂的技术性质涉及范围:物理常数、级配、粗度、有害物质。砂的筛分试验是称取一定数量的砂样,在规定的标准套筛上进行筛分,分别称出砂样在各个筛上的存留质量;然后再根据公式计算出与级配有关的参数。

粗度是评价砂粗细程度的一种指标,通常用细度模数表示。该细度模数由规定的数个筛上的累计筛余百分率通过计算得到。细度模数越大,表示砂的颗粒越粗。砂中有害成分的类型包括泥和泥块、有机质、云母、轻物质以及三氧化硫等。影响筛分试验准确性的各种因素包括筛分过程中集料的损失及各套筛上筛分不完全,留有下一套筛上的颗粒质量。水洗法筛分时应注意用洁净水浸泡并充分搅拌,清洗过程中不得有集料损失。砂按细度模数分 3 级,分别为:粗砂(3.1~3.7)、中粗(3.0~2.3)、细砂(2.2~1.6)。

## 2.2 母岩的微观特征

相对于宏观特征而言,母岩微观特征主要是指母岩微晶大小、结晶程度、裂隙、表面微观形貌和孔隙结构等。利用扫描电镜等微观设备可获得母岩表面微观形貌特征。图 2-1 所示,分别是在 50 $\mu\text{m}$ 、10 $\mu\text{m}$ 、5 $\mu\text{m}$  和 3 $\mu\text{m}$  下砂岩表面的微观结构。

从试验结果看,砂岩表面空洞很少,结构较为致密。5 $\mu\text{m}$  图显示其表面有光滑平整磨面,但有孔洞发育,且较为明显;3 $\mu\text{m}$  图显示砂岩表面发育微裂隙。这一微观特征从微观表明砂岩为致密块状,可见利用微观特征可得到母岩的宏观特征。

作者拟通过微观分析方法,对比分析母岩微观对集料物理、力学特性,即宏观指标的影响。

### 2.2.1 获得微观特征的途径

(1) X 射线衍射仪。多晶 X 射线衍射仪也称粉末衍射仪,被测对象通常为粉末、多晶体金属或高聚物等块状材料。XRD-6000 的衍射仪,如图 2-2 所示。组成多晶 X 射线衍射仪的装置主要分为如下 4 部分:

- ① X 射线发生器;

②测角仪——测量角度  $2\theta$  的装置；

③X 射线探测器；

④X 射线各种控制、数据采集、电气及保护系统。

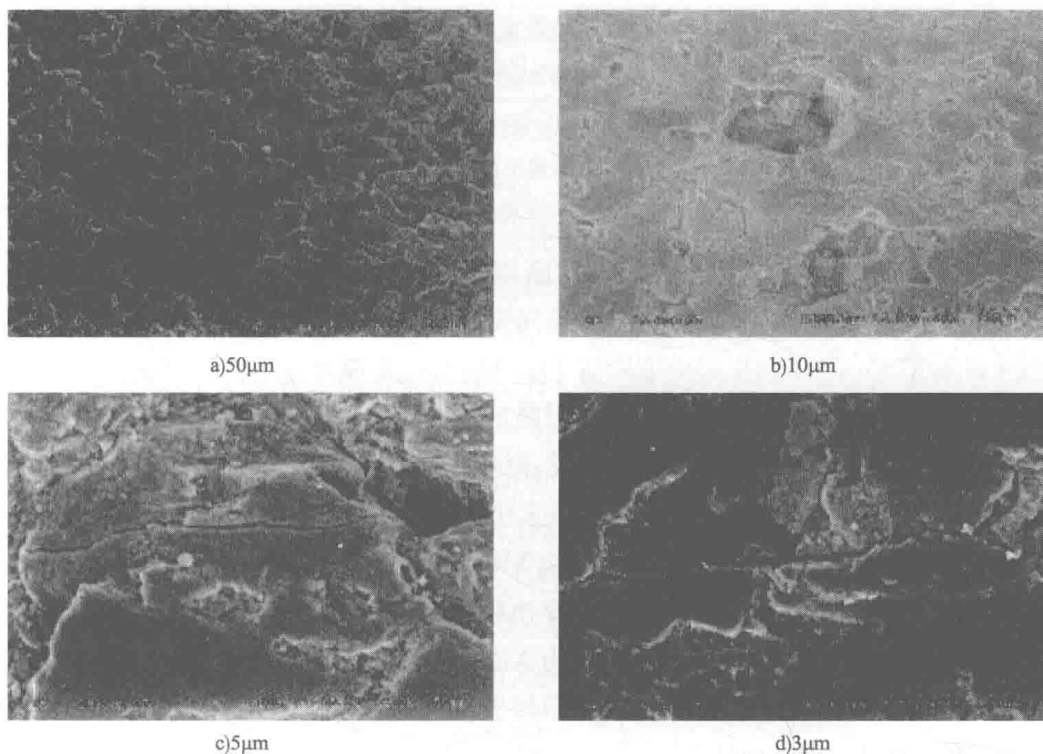


图 2-1 不同比例下砂岩表面微观形貌图



图 2-2 XRD-6000 衍射仪外观图

用 X 射线衍射仪可测得矿物结晶度、晶粒大小和矿物组成等。

测量结晶度的方法很多,其优缺点如表 2-1 所示。测量原理不一样,适用范围

不一致,所测得的结晶度不一定具有完全对应的关系。

结晶度测定方法比较

表 2-1

方法名称	傅立叶红外光谱法	核磁共振法	差热分析法	X 射线衍射仪法
特点	只测定近程有序	晶体温度需要玻璃化温度以上	受干扰因素较大	绝对法
对比总结	XRD 法属于绝对法;傅立叶红外光谱法和核磁共振法测得的结晶度通常高于 XRD 法测得的数据,且属于相对法; 差热分析法受干扰因素较大,结果准确度不好控制			

根据全倒易空间 X 射线散射守恒原理(FRS-XRSCP),对一个给定原子集合体,不论其凝聚态如何(气态、液态、非晶固态、晶态、不同取向态或不同晶相与非晶相的混合态等),当受到相同强度的 X 射线照射时,其相关散射在全倒易空间里总值保持守恒。这一守恒原理说明了 X 射线的总散射强度总是一个常数。

一个粉末颗粒由多个晶粒聚集而成,而一个晶粒可能由多个微晶镶嵌而成,利用岩样的衍射峰半高宽可以计算出晶粒大小。

任何一个物相都有不同的晶体结构,XRD 利用其中的晶面间距  $d$  和衍射图谱中的强度值  $I$  组成一对特征值  $d$ - $I$ 。只要物相不同,那么它们在 XRD 试验下产生的衍射谱的  $d$ - $I$  特征值就会有差异,这即为 XRD 分析并且鉴定物相的理论基础。我们可以利用已知物相特征数据与被测物相进行对比,确定未知物的物相。物相分析的过程也称为“物相检索”。

利用物相检索功能,计算分析岩样的矿物组成。这是一个定性分析的过程,同时也是之后的定量分析和结晶度、晶粒大小的计算分析的前提基础。用 XRD 测量集料的矿物成分,优点在于方便快捷。需要注意的是,XRD 只能测试晶体结构,对非晶材料和物质则无能为力。



图 2-3 JSM-7100F 扫描电镜

(2)扫描电镜(见图 2-3)。扫描电镜原理是通过制造的高能电子束,轰击在样品表面产生各种射线和电子(如 X 射线、俄歇电子、二次电子、背散射电子和不同能量的光子等)。这些射线、电子和光子等作为信号,可以通过特殊探测器来接收,经过处理后能够得到样品特定区域的各种信息,利用这些信息来分析研究材料的



微观形貌特征、晶体学特征以及微区化学成分。

用扫描电镜观察岩石样品的表面微观特征,有其自身的优势,如具有很高的图像分辨率、灵活控制的放大倍数、较大的图像景深、较容易且干扰少的样品制备、易掌握的操作步骤、可结合能谱仪做定性和定量分析等优点。因此,在集料岩石微观特征的分析 and 评价方面具有广泛的应用前景。

### 2.2.2 相对结晶度与微晶尺寸

为获得母岩结晶度、微晶尺寸特征,选择 A、B、C 三种岩块进行测试,所用设备为 X 射线衍射仪。将 3 种岩石分别用研钵将其研细至  $45\mu\text{m}$  左右,做成 3 个样品,分别置于 X 射线衍射仪样品室的样品台上进行试验,见图 2-4。



图 2-4 放入样品的 XRD 样品室

使用型号为 XRD-6000 的 X 射线衍射仪测定衍射强度,  $\text{CuK}\alpha$  辐射,采用  $2\theta/\theta$  连续扫描方式,采样步宽  $0.02^\circ$ ,扫描速度为  $2^\circ/\text{min}$ ,见图 2-5。测量结束得出 3 种岩石样品的 X 射线衍射谱图;然后用 MDI Jade 6.5 软件包对谱图进行物相分析,在物相分析基础上进行定量分析,以及进行相对结晶度的测量计算和微晶尺寸大小的测量分析。

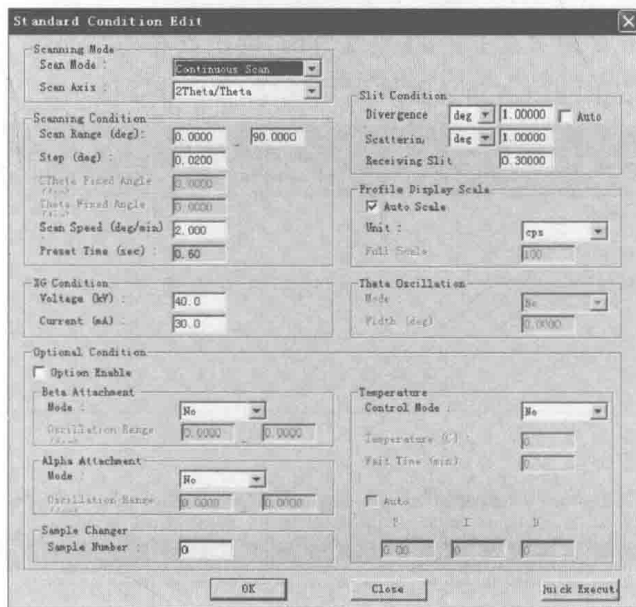


图 2-5 XRD 测定条件设置