



国家出版基金资助项目
“十二五”国家重点图书
材料研究与应用著作

沥青与沥青混合料 黏弹特性

VISCOELASTIC
CHARACTERISTICS OF
ASPHALT BINDER
AND ASPHALT MIXTURE

谭忆秋 单丽岩 编著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目
“十二五”国家重点图书
材料研究与应用著作

沥青与沥青混合料 黏弹特性

VISCOELASTIC
CHARACTERISTICS OF
ASPHALT BINDER
AND ASPHALT MIXTURE

谭忆秋 单丽岩 编著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书主要介绍黏弹力学的基本原理及其在沥青材料性能分析中的应用。全书共分为9章,分别阐述了非牛顿流体、线性黏弹性材料黏弹特性、黏弹模型、积分型本构模型、黏弹材料的动态力学行为、三维黏弹模型、沥青与沥青混合料的静态黏弹特性,以及沥青与沥青混合料的动态黏弹特性。

本书适用于从事实验黏弹力学以及沥青与沥青混合料研究的科研人员,也可作为高等院校相关专业师生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

沥青与沥青混合料黏弹特性/谭忆秋,单丽岩编著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2017.6

ISBN 978—7—5603—6047—8

I. ①沥… II. ①谭… ②单… III. ①沥青—黏弹性—
高等学校—教材 ②沥青拌和料—黏弹料—高等学校—教材
IV. ①U414.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 119768 号

策划编辑 王桂芝
责任编辑 李广鑫 杨明蕾
封面设计 卞秉利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451—86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂
开 本 660mm×980mm 1/16 印张 12.75 字数 196 千字
版 次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978—7—5603—6047—8
定 价 68.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

目前,道路沥青与沥青混合料已经成为最重要的路面工程材料。随着沥青与沥青混合料应用面积的不断扩大以及科技水平的不断提高,对沥青材料的质量要求也在不断提高。依据合适的理论与科学方法不断提高沥青与沥青混合料的路用性能,对提高路面性能、延长道路使用寿命、促进我国道路建设事业的不断发展具有重要意义。

沥青与沥青混合料是典型的黏弹性材料,其力学行为及路用性能具有特殊性。采用黏弹理论分析及解决目前沥青与沥青混合料评价及使用中存在的问题,是合理有效的研究途径,也是目前及未来主要的研究方向。现今关于黏弹性的书籍主要讲述的是高聚物的黏弹特性,缺少专门针对沥青材料黏弹特性的书籍。此外,多数黏弹性书籍讲述的是材料的黏弹变形,忽略了黏弹性材料的破坏与强度问题。针对以上问题,作者结合现有的黏弹性理论及多年从事沥青材料研究所取得的成果,详细讲述了和沥青与沥青混合料路用性能相关联的黏弹技术,以及研究涉猎的基础理论和基本方法。

本书得到黑龙江省精品图书出版工程项目和国家出版基金资助出版,研究成果是在国家自然科学基金(资助编号:51225803,51478153)的资助下完成的。本书紧密结合沥青材料研究中面临的主要问题,系统、全面地介绍了黏弹力学基本理论及该理论在沥青与沥青混合料性能研究中的应用。

全书共9章,由哈尔滨工业大学谭忆秋主持撰写,其中第1,3,5,6,7章由谭忆秋撰写,第2章由北京科技大学郭猛撰写,第4,8,9章由哈尔滨工业大学单丽岩撰写。此外,张红、许亚男、田霜、贺鸿森、冯一尘、李壮等参与了本书的修改和校对工作,在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中疏漏及不妥之处在所难免,敬请同行专家不吝赐教。

作 者

2016年12月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 黏弹性理论	1
1.1.1 黏弹性材料	1
1.1.2 黏弹性力学的研究方法	3
1.2 沥青与沥青混合料的黏弹性	4
1.2.1 道路石油沥青	4
1.2.2 沥青混合料	5
1.2.3 沥青与沥青混合料路用性能的基本特点	6
1.2.4 沥青与沥青混合料的黏弹性力学行为	7
第 2 章 非牛顿流体	9
2.1 牛顿流体特性	9
2.1.1 稳定的剪切流动	9
2.1.2 牛顿流体变形的特点	11
2.2 非牛顿流体特性	12
2.2.1 基本特性	12
2.2.2 黏度的温度依赖性	15
2.2.3 触变性	19
2.2.4 其他性质	23
2.3 非牛顿流体流动曲线	27
2.3.1 流动曲线的分析	27
2.3.2 幂律公式	29
2.3.3 宾汉姆(Bingham)塑性体	30
2.4 流动曲线的测定	31
2.4.1 旋转式黏度计	31
2.4.2 圆管中流体的黏度测量	37
2.4.3 动态剪切流变仪	39

第 3 章	线性黏弹性	44
3.1	线性黏弹性的基本概念	44
3.1.1	蠕变实验	44
3.1.2	应力松弛实验	46
3.2	线性黏弹性的定义——玻尔兹曼(Boltzmann)加和原理	48
3.2.1	正比性	48
3.2.2	加和性	48
3.3	蠕变与松弛	54
3.3.1	蠕变柔量	54
3.3.2	松弛模量	56
3.3.3	蠕变和回复	57
第 4 章	黏弹模型	61
4.1	黏弹模型的基本元件	61
4.1.1	弹性元件	61
4.1.2	黏性元件	62
4.1.3	塑性元件	62
4.2	拉普拉斯积分变换	63
4.2.1	拉普拉斯变换	63
4.2.2	拉氏变换的性质	66
4.3	二元件黏弹模型	74
4.3.1	Maxwell 模型	74
4.3.2	Kelvin 模型	77
4.4	三元件和四元件黏弹模型	79
4.4.1	三元件模型	79
4.4.2	四元件模型——Burgers 模型	86
4.4.3	模型元件的基本特性	90
4.5	微分型本构方程	93
4.5.1	广义 Maxwell 模型	93
4.5.2	广义 Kelvin 模型	97
第 5 章	积分型本构模型	101
5.1	响应函数	101

5.1.1	蠕变柔量和松弛模量	101
5.1.2	各种流变模型的响应函数	101
5.2	卷积定理	104
5.2.1	卷积的概念	105
5.2.2	卷积定理	106
5.2.3	Stieltjes 卷积定理	108
5.3	积分型本构方程	109
第 6 章	黏弹材料的动态力学行为	113
6.1	振动荷载输入与响应	113
6.1.1	施以交变应变时材料的应力响应	113
6.1.2	施以交变应力时材料的应变响应	117
6.1.3	振动荷载下黏弹材料的能耗	118
6.2	黏弹模型对于交变应力的响应	120
6.3	黏弹性特征函数的换算关系	124
6.3.1	黏弹性特征函数	124
6.3.2	复数模量与松弛函数的关系	124
6.3.3	复数蠕变柔量与延迟函数的关系	126
6.3.4	松弛系和蠕变系之间的换算	127
6.4	时温等效	128
6.4.1	时间温度换算	128
6.4.2	WLF 公式	130
6.4.3	Arrhenius 公式	134
6.4.4	“时温等效原理”在流动曲线上的应用	135
第 7 章	三维黏弹模型	139
7.1	三维本构关系	139
7.2	线性黏弹性理论的基本方程及对应原理	145
7.3	对应原理的应用	150
7.3.1	薄壁筒问题的黏弹性解	150
7.3.2	柱体单向拉伸问题	156
第 8 章	沥青与沥青混合料的静态黏弹特性	158
8.1	沥青与沥青混合料的蠕变、松弛特性	158

8.1.1	沥青的蠕变特性	158
8.1.2	沥青的蠕变恢复特性	158
8.1.3	沥青的松弛特性	161
8.1.4	沥青混合料的蠕变特性	162
8.2	沥青的触变性	163
8.2.1	触变性对沥青疲劳性能的影响	163
8.2.2	沥青的触变模型	164
8.3	关于零剪切黏度	166
8.3.1	零剪切黏度	166
8.3.2	静态模式确定零剪切黏度	167
8.3.3	动态模式确定零剪切黏度	169
第9章	沥青与沥青混合料的动态黏弹特性	172
9.1	沥青与沥青混合料的模量主曲线	172
9.1.1	模量主曲线模型	172
9.1.2	模量主曲线的建立	173
9.2	沥青的疲劳一流变机理	176
9.2.1	沥青的疲劳一流变过程	176
9.2.2	损伤与触变性对沥青疲劳性能影响的分离	180
附录	拉氏变换简表	185
参考文献	191
名词索引	192

第1章 绪论

1.1 黏弹性理论

1.1.1 黏弹性材料

刚体不改变形状。在基本的力学处理中,只考虑物体的平动和转动而不考虑其形状的变化,这种物体称为刚体,刚体不改变形状。弹性体的形状取决于所施加的力。很显然,这种物体有一定的形状,施加力时,其形状发生变化,而力被移去后,物体即恢复其原有的形状。

对于金属、其他结晶固体和玻璃态固体,如果变形比较小,在轴向拉伸试验中长度的变化是正比于施加的力的,这种力学模式称为线弹性(Linear elasticity),它对许多固体是适用的。钢是刚体还是弹性体取决于实验方法。如果力较小,测量方法不十分精密,钢可被认为是刚体。如果力较大,测量方法较精密,能测出钢的变形,这时钢可被看作弹性体。在其他实验中(如振动的衰减或施加很大的力,使钢材出现永久变形或断裂时),这两种模式都不适用,必须采用更复杂的模式。

对于液体,在经典力学中常常讨论的两种模式为:完全流体和线性黏性流体或牛顿流体。在完全流体中,液体作用在任何表面上的力总是垂直于该表面。而且,一部分流体作用在相邻部分上的力,也总是垂直于这两部分流体之间想象的界面。这种压力称为静水压。这种模式被应用于水力学、气动力学以及流体力学中。对于线性黏性流体,如流体是静止的,静水压也是各向同性的。如施加任何别的力,流体发生变形,这种变形称为流动,最简单的实验是流体通过小口径管子的流动。我们发现,流动速度正比于所加之力。

对于空气和水这样的流体,离管壁较远的部分可被认为是完全流体,而接近管壁的部分则可被认为是黏性流体。实际上,完全流体即当速度梯

度很小时的黏性流体,被认为是黏性流体的一种特殊情况。

随着研究的不断深入以及力学理论的发展,人们发现除以上的弹性体和黏性体外,有一类材料受力后的变形过程是一个随时间而变化的过程,卸载后的恢复过程又是一个延迟过程。这类材料内的应力不仅与当时的应变有关,而且与应变的全部变化历史有关,这时应力应变之间的一一对应关系已不复存在,人们把这类材料称为黏弹性材料。高分子材料、复合材料、地质材料、沥青、混凝土、高温下的金属即属于这种类型的材料。

黏弹性材料随时间而变化的过程,表现出下列 4 个主要特点:

- ① 蠕变:在持续不变的加载下变形会逐渐增加;
- ② 应力松弛:在持续不变的应变下应力会逐渐减弱;
- ③ 迟滞:材料的应变响应滞后于应力,致使一个加载过程中的应力应变曲线形成滞后环,滞后环下的面积代表一个加卸载过程的能量损失;
- ④ 应变率敏感:反映材料力学性质的一些物理量,如杨氏模量、剪切模量、泊松比等,一般与应变速率(或时间)有关。

黏弹性材料可以想象为一个“谱”,在这个“谱”的最右端是经典黏性流体,而在最左端是弹性固体。许多实际材料则展示出介于弹性和黏性两种极端情况之间的力学性质,这种黏弹性性质可以由弹性性质和黏性性质按某种相对比例组合出来。在一般情况下,固体高聚物(如尼龙、刚化聚苯乙烯、塑料等)以及金属、橡胶等接近弹性端,而黏弹性流体(如高分子溶液)则靠近黏性端,熔融的高分子材料其性质似乎处于中间位置。任何一种具体材料到底处于黏弹性“谱”的何种位置除依赖于材料本身条件外,还依赖于工作条件,如温度、加载速率等。钢材在一般条件下是固体,但在高速撞击下与流体无异。Silly putty(一种类似橡皮泥的材料)在通常情况下可塑性很大,但在快速落地时可以像皮球一样被弹回。

黏弹性一词来源于模型理论,即这种性质可以用弹性元件和黏性元件串联或并联所组合而成的某种模型加以表示,如 Maxwell 模型、Kelvin - Voigt 模型等。在不同场合、不同书刊中我们还常常接触到一系列相关而不尽相同的名词,如蠕变、松弛、黏性、阻尼、内摩擦、滞弹性或弹性后效等,这些统称为材料的黏弹性性质。

古希腊哲学家赫拉克利特(Heraclitus)曾提出过“一切皆流,一切皆

变”的观点,即任何物体和材料皆具流变特性。在常温、小变形情况下,多数金属为线弹性体,但即使在这种情况下,乐器的金属簧片的振动甚至在真空中也会很快衰减,说明材料或多或少存在“蠕变”“松弛”“迟滞”等现象,只不过有的表现得很明显,有的在一定条件下却不甚明显,可以不加考虑。因而给人们带来一种偏见,似乎认为固体与流体的区别就在于固体有一定形状,不随时间而改变。其实固体的这种属性不是绝对的,这只是一种条件下的一种近似而已。任何固体都具有一定的流动性,例如大地在缓慢地流动,比萨斜塔斜度在逐渐增加,古老教堂的大窗玻璃变得上薄而下厚,等等。反之,流体也都是具有一定的黏滞性(不流动性),如石油在管道中的流动、血液流动等都受到一定的黏滞阻力。因此材料流变特性或黏弹性特性的研究具有普遍的意义。

1.1.2 黏弹性力学的研究方法

黏弹性力学是流变学的一个重要分支,也是现代科学的一个新兴领域。与经典力学不同,黏弹性力学不仅研究物体宏观力学行为的一般规律,同时也研究导致物体宏观力学行为多种多样性的变形机理。因此,黏弹性力学的较新定义是“与可变形物体的机理有关的一个物理学分支”。换句话说,黏弹性力学不仅通过黏弹性变形这一特殊的运动形式来指导我们认识物质世界的宏观现象,更重要的是通过延迟弹性变形机理的研究,指导我们认识材料微观结构组成形式与材料宏观物质运动形式的内在联系,使我们从本质上了解材料力学行为的多种多样性。

在这一方面取得显著成果的是关于高分子合成材料聚合物的黏弹力学研究。在聚合物黏弹力学中,不仅可以根椐分子的热物理特性来说明物体产生瞬时弹性、黏弹性及黏性流动的变形机理,还可以根椐大分子的结构特点来说明一定条件下不同物体产生不同黏弹力学行为的变形机理。因此,黏弹性力学这一物理学分支的研究已经涉及物体的分子结构理论、热物理学、分子热力学理论,并且与弹塑性力学、流体力学、断裂力学、损伤力学等现代力学的研究成果紧密相关。在这一意义上,可以说黏弹性力学是一门处于前沿地位的新兴边缘学科。

黏弹性力学本身是一门以实验为基础的学科,由于通常不得不采用唯

象手段处理工程材料的黏弹特性力学行为,所以实验研究就具有更加重要的实际意义。以实验作为基本手段的黏弹性力学研究方法称为实验黏弹力学,实验黏弹力学更侧重对材料宏观力学变形规律的描述与预测。对于工程材料,实验黏弹力学的主要研究目的是通过适当的试验手段,根据生产活动中遇到的实际问题,模拟产生这些问题的应力条件、变形历程、温度及环境,建立经验或半经验一半理论公式来定量地描述材料的黏弹性力学行为。

由于黏弹性材料的变形行为依赖于温度和时间,在一些情况下还可能依赖于应力水平面表现出非线性,因此这类材料的试验研究设备一般比较精密,进行试验测定时需要严格控制时间、变形速度、温度或者降温速度、稳态应力、动态应力等。

1.2 沥青与沥青混合料的黏弹性

1.2.1 道路石油沥青

沥青材料品种繁多,可以按照沥青材料的来源、炼制加工方法、工业用途、存在形态等分为许多种类。

按沥青的来源可将其分为:由石油炼制得到的石油沥青;以特立尼达湖沥青为代表的天然沥青;煤、木材、页岩等有机物质经碳化作用或在真空中分馏得到的焦油沥青。按石油炼制方法可将其分为:直馏沥青、氧化沥青、溶剂沥青、调和沥青等。石油沥青可按原油蜡含量的多少,分为石蜡基、中间基和环烷基。按沥青的形态可将其分为:黏稠沥青、液体沥青、乳化沥青。按沥青的用途可将其分为:用于铺筑路面的道路沥青;用于防水、防潮,也用于制造防水材料,如油毛毡、沥青油膏的建筑沥青;大型水工结构物作为面板或芯强防水防渗材料的水工沥青等。道路石油沥青是使用量最大、最具有典型性的沥青材料,本书主要以道路石油沥青作为主要研究对象。

道路石油沥青是由多种化合物组成的混合物,成分极其复杂。沥青的化学元素分析证明,沥青为碳氢化合物,主要由碳(C)、氢(H)两种化学元

素组成。沥青中也含有少量的硫(S)、氮(N)、氧(O),以及一些金属元素如钠(Na)、镍(Ni)、镁(Mg)和钙(Ca)等,它们以无机盐或氧化物的形式存在,约占5%。

目前,多使用四组分分析法将沥青分为沥青质、饱和分、芳香分和胶质四种组分。在沥青中,沥青质是分散相,饱和分与芳香分是分散介质,胶质包裹沥青质形成胶团,分散在油分中形成稳定的胶体。沥青各个组分的数量决定了沥青的胶体结构类型,沥青的胶体结构决定了沥青的物理力学性能与应用特点。

1.2.2 沥青混合料

沥青混合料由作为胶结料的道路石油沥青和砂、碎石、矿粉等矿质原料,按照一定比例(必要时也包括纤维等其他填料)共同组成,在沥青胶结料具有适宜黏度时,将沥青混合料充分拌和后摊铺、碾压成型,成为满足使用要求的沥青路面。沥青混合料种类繁多,大致可以分类如下。

1. 按混合料拌和与摊铺温度分类

热拌热铺沥青混合料是将沥青和矿质集料加热至沥青获得较好流动性能的温度后拌制而成的路面材料,需要在较高温度下摊铺、压实成型。由于在高温条件下采用专用设备拌和,所以沥青与矿质集料能形成良好的黏结。热拌热铺沥青混合料具有优良的路用性能,是目前沥青路面普遍使用的混合料类型。冷拌冷铺沥青混合料是采用乳化沥青、稀释沥青或其他低黏度沥青胶结料,在常温下与矿质集料拌和得到的混合料,仅在常温下摊铺、碾压成型。热拌冷铺沥青混合料是使用黏度较低的沥青与集料在热态下拌和成的混合料,储存于常温条件下,使用时在常温下直接摊铺压实,一般用作沥青路面的养护材料。

2. 按集料的最大粒径分类

按集料的最大粒径分类,可以将沥青混合料分成粗细不同类型,如粗粒式沥青混合料、中粒式沥青混合料、细粒式沥青混合料等。通常,粗粒式混合料用于沥青面层的中层或下层,中粒式混合料用于中层或上层,细粒式混合料用于上层。

3. 按压实后混合料的密实度分类

将集料颗粒配成连续级配,与沥青拌和经摊铺压实后其剩余空隙率小

于 10% 的,称为密实式沥青混合料。其中剩余空隙率为 3% ~ 6% 的称为 I 型密实式沥青混合料,剩余空隙率为 6% ~ 10% 的称为 II 型密实式沥青混合料。压实后剩余空隙率为 10% ~ 15% 的混合料称为半开级配沥青混合料。剩余空隙率大于 15% 的称为开级配沥青混合料,由于空隙率大,常常又称为多孔性沥青混合料。无论密实式还是开式沥青混合料,又都有粗粒式、中粒式和细粒式之分。

近年来,为了提高沥青路面表面功能,沥青玛蹄脂碎石(SMA)和排水性沥青混合料(OGFC)等也有较多应用。SMA 由高含量的粗集料形成骨架,用沥青、矿粉、纤维组成的玛蹄脂和少量细集料填充空隙形成密实结构,以提高沥青混合料的路用性能。OGFC 的空隙率通常大于 20%,用于加快路面排水能力,提高路面抗滑性能,降低行驶噪声。

沥青混合料中的矿质混合料是由粒径大小不等但按照一定比例组合的粗细集料组成,称为矿质混合料级配。不同级配的沥青混合料具有不同的物理力学性能,因而用途不同。级配主要分为连续级配和间断级配两类。连续级配中集料按粒径大小分级,由大至小逐级按一定的比例组合而成;间断级配则是将连续级配中某一级或几级去除,形成一种不连续的级配。

沥青混合料的强度由矿质集料之间的嵌挤力(内摩阻力)和沥青与集料之间的黏结力以及沥青的内聚力构成。根据级配类型差异和沥青混合料强度形成原理,沥青混合料可以划分为如图 1.1 所示的悬浮密实型级配(图 1.1(a))、骨架密实型级配(图 1.1(b))和骨架空隙型级配(图 1.1(c)) 3 种。

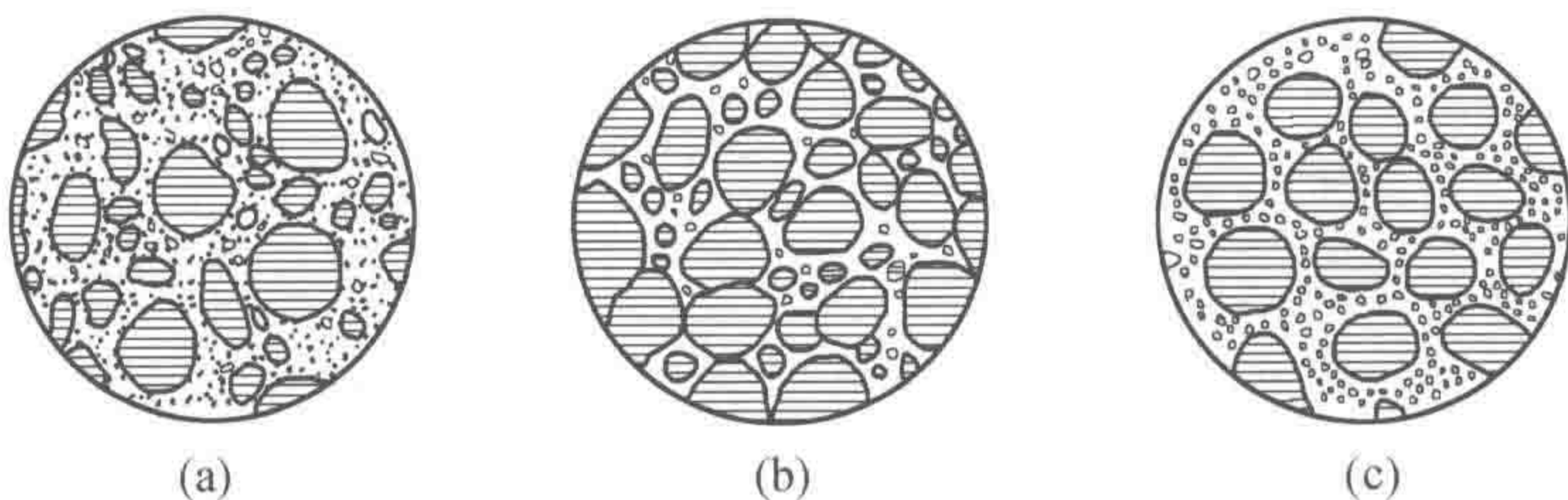


图 1.1 3 种典型级配示意图

1.2.3 沥青与沥青混合料路用性能的基本特点

沥青路面使用的沥青及沥青混合料的力学行为变化与差异依赖于工

艺温度与环境温度。在足够的高温条件下,沥青像通常的液体一样具有流动变形能力,因此能够与碎石、砂、矿粉等均匀地混合并裹覆在集料颗粒表面。混合得到的沥青混合料仍然具有足够的流动变形能力,经过摊铺碾压之后获得规范的几何形状。能够保证沥青及沥青混合料施工性能的特性称之为工艺特性或者施工和易性。保证施工和易性的温度范围称为施工温度,对于多数沥青路面材料来说,施工温度在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。

在通常的自然环境和气候温度条件下,沥青混合料流动变形的能力逐渐由弹性变形替代,因而能够承受车轮荷载作用。在极端的低温条件下,沥青混合料的模量可以高达 $30\ 000\ \text{MPa}$ ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\ \text{Hz}$),同水泥混凝土的弹性模量接近。此时,沥青混合料完全丧失流动变形的能力,可能引起温度应力累积导致的低温开裂。为了防止低温开裂发生与发展,我们需要研究沥青与沥青混合料的低温抗开裂问题。

在大约接近 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度条件下,沥青与沥青混合料仍然具有比较显著的流动变形能力。此时,在车轮荷载作用下产生的变形可能不会完全回复,将导致车辙变形或者剪切引起的推移拥包。因此,在这样的温度条件下,沥青与沥青混合料必须具有足够的变形抵抗能力,通常称为沥青混合料的高温稳定性问题。

沥青路面在多数情况下工作于高温和低温之间的温度区域。此时沥青路面既具有一定的刚度,也具有一定的柔度,沥青路面在大量的重复荷载作用下容易产生疲劳破坏。相对于高温条件和极端低温条件,我们把沥青与沥青混合料易于发生疲劳破坏的温度区域称为中温区,并特别关注中温区内沥青与沥青混合料的疲劳性能。

沥青与沥青混合料的疲劳性能、高温稳定性和低温抗裂性是影响路用性能最主要的3个力学特性。自1972年在密歇根大学召开第一届沥青路面结构国际会议将其确定为沥青路面3个重要技术研究目标以来,这些力学特性得到了全世界道路技术员的广泛注意,并为此付出了巨大的努力。

1.2.4 沥青与沥青混合料的黏弹性力学行为

沥青与沥青混合料一般具有相当复杂的内部结构,尽管这些材料就微观结构而言并不存在像高聚物那样确定的造成延迟弹性的变形机理,但在

一定的观测时间下,这些材料也表现出变形明显依赖于时间的力学行为。但在研究沥青与沥青混合料的黏弹性力学行为时,还必须注意沥青的材料结构与沥青混合料仍存在明显的差异。

沥青由多种化学成分极其复杂的碳氢化合物及其非金属元素的衍生物所组成,尽管其成分极其复杂,沥青仍然具有无定形结构物的基本特征。沥青混合料则由作为胶结料的道路石油沥青和砂、碎石、矿粉等矿质原料按照一定比例(必要时也包括纤维等其他填料)共同组成,它的力学特性既相似又有别于沥青和集料。

从宏观意义上讲,沥青是一种均质的黏弹性材料,沥青混合料是一种颗粒性的黏弹性材料。一般来说,所有的颗粒性材料在宏观上都具有这样3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^[14]。

由于这样的差别,与沥青黏弹性的研究方法不同,在研究沥青混合料时,必须注意以下问题:

沥青混合料的变形特性与破坏特性依赖于加荷方式,其中三轴试验、单轴压缩试验等加荷方式有利于发挥集料之间的嵌挤作用。迄今为止,沥青混合料力学特性研究的一个难题仍然是力学响应的第一象限(纯拉模式)与第三象限(纯压模式)的镜像映射不对称问题。

由于沥青材料的结构组成在宏观上可被认为是均质的,所以可以采用热力学、损伤力学、断裂力学等现代力学方法与手段研究沥青的力学行为。但沥青混合料的宏观材料结构组成就很复杂,沥青与矿料的表面物理化学作用使得其微观或者亚微观的结构组成更加复杂,这些经典的研究手段很难不加以经验性地处理而直接用于沥青混合料的力学行为研究。

尽管沥青与沥青混合料均具有类似的黏弹性力学行为,但沥青混合料仍具有颗粒材料的特点,其级配组成对于沥青混合料的黏弹性力学行为特征具有显著的影响。尽管一些研究人员或研究机构进行过许多努力^[3],我们仍然不能根据作为胶结料的沥青性能准确地预测沥青混合料的力学行为。

对于道路领域的研究人员来说,沥青混合料与沥青不同,其加工成型的条件相当复杂。不同的加工条件不仅导致沥青混合料中体积特性的差异,而且会导致集料颗粒排列的显著不同^[4]。

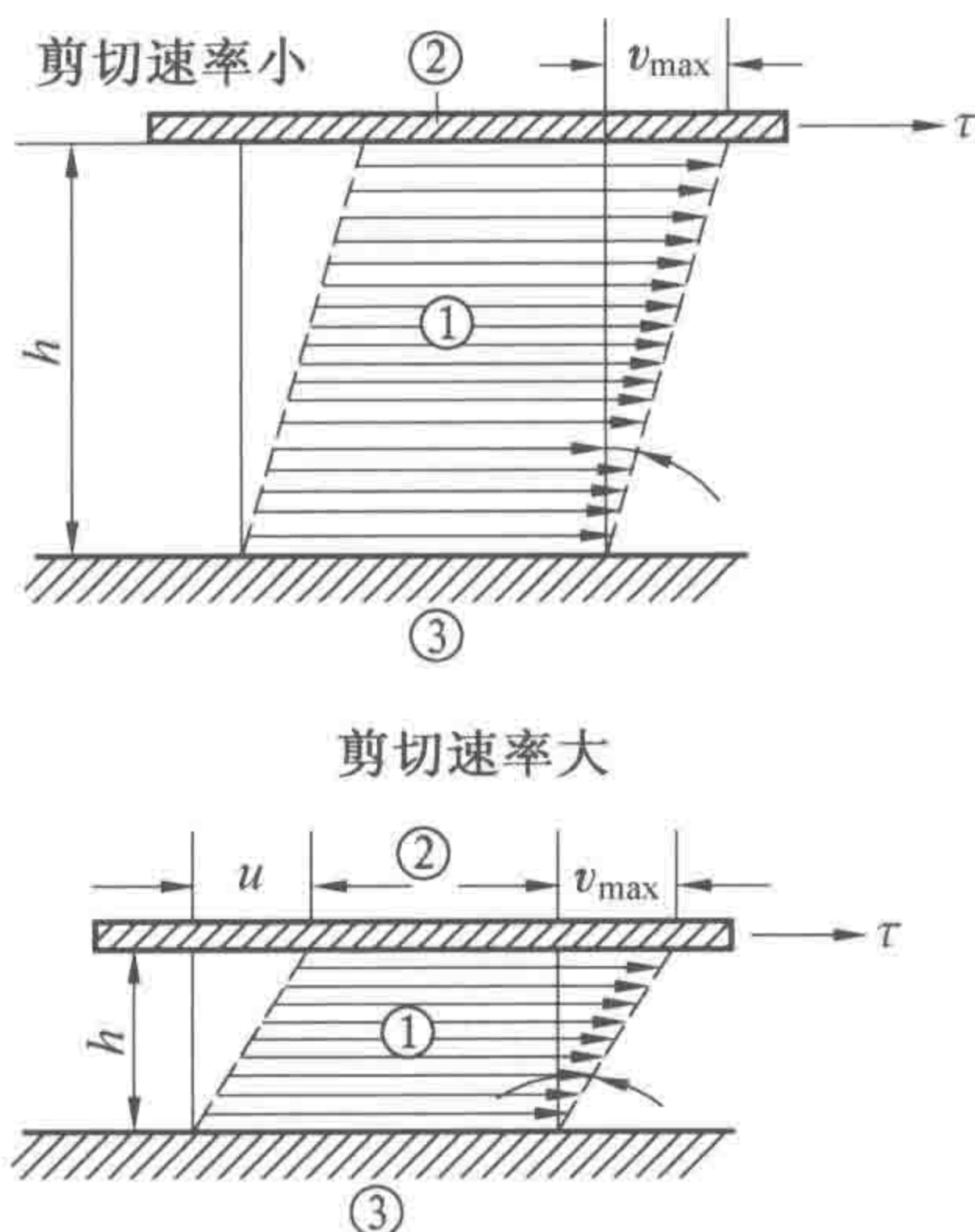
第 2 章 非牛顿流体

2.1 牛顿流体特性

2.1.1 稳定的剪切流动

牛顿流体又称为线性黏性流体。在牛顿流体受各向同性的压力时,它是处于平衡状态的。除此以外,当它受到任何其他的力时,都会失去平衡,发生流动。

稳定的简单剪切流动是最简单的流动方式。这种流动可看作是发生在处于两块平行板间的流动之一(图 2.1)。如采用直角坐标系,在 $y=0$ 处的流体是静止的,在 $y=h$ 处的流体则以与上板相同的速度 v_{\max} 在 x 方向上运动。



①— 流体;②— 运动的板,速度为 v_{\max} ;③— 静止板

图 2.1 稳定的简单剪切流动