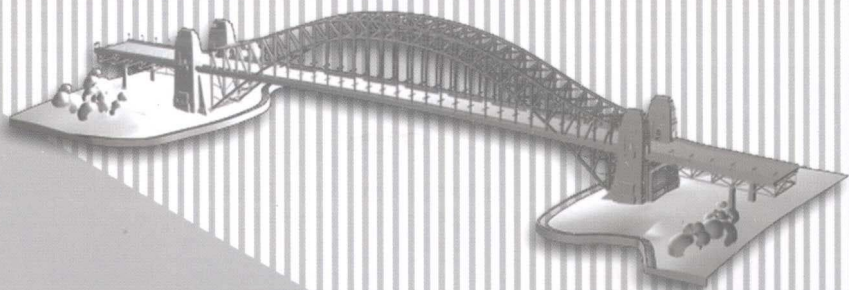


纳米路面混凝土 的基本性能

张茂花 著



BASIC PERFORMANCE
OF NANO-PAVEMENT
CONCRETE

东北林业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

纳米路面混凝土的基本性能/张茂花著. —哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2008.6

ISBN 978-7-81131-264-5

I. 纳… II. 张… III. 纳米材料-应用-水泥混凝土路面
IV. U416.216

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 095382 号

责任编辑: 张红梅

封面设计: 彭宇



NEFUP

纳米路面混凝土的基本性能

Nami Lumian Hunningtu De Jiben Xingneng

张茂花 著

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

哈尔滨市工大节能印刷厂印装

开本 850 × 1168 1/32 印张 6.75 字数 172 千字

2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 978-7-81131-264-5

U·55 定价: 20.00 元

前 言

近年来,随着国民经济的发展,公路交通运输呈现出“大流量、重型化”特点,而沥青路面的质量和数量难以满足要求,从而为混凝土路面的发展提供了良好的机遇。目前,混凝土路面在我国高等级公路中的应用越来越广泛,故对其基本性能进行深入系统的研究具有十分重要的意义。

纳米材料是一门新兴的并正在迅速发展的材料学科。由于其小尺寸,纳米材料在结构、物理和化学等方面具有许多独特的性质,已经成为当今材料科学领域研究的热点,被科学家们誉为“21世纪最有前途的材料”。纳米材料为发展多功能土木工程材料和改善传统土木工程材料的性能开辟了一条崭新的途径。然而,目前纳米材料在土木工程材料领域的研究与应用还很少。

本书是作者近5年研究工作与研究成果的总结。本书利用纳米材料的特殊性能,提出在普通路面混凝土中掺入适量的纳米材料,研制具有良好力学性能和耐久性能的纳米路面混凝土,使路面结构在其寿命周期内具有更好的服务水平;同时对PP纤维混凝土以及纳米材料与PP纤维混掺混凝土的相关性能进行了对比研究。

全书共分7章:第1章介绍了路面混凝土的基本性能及其研究现状,对纳米材料的发展历程、基本性质、特殊性能和应用状况进行了概括;第2章以普通路面混凝土为基础,确定了纳米混凝土、PP纤维混凝土以及纳米材料与纤维混掺混凝土的制备工艺和配合比,并对各种混凝土的力学性能进行了试验研究;第3章介绍了路面混凝土的磨损机理和耐磨性影响因素,采用滚珠轴承法对各种混凝土的耐磨性能进行了试验研究;第4章介绍了路面混凝

土的抗渗性影响因素,分别采用压汞法和 NEL 法对各种混凝土的孔结构和抗渗性能进行了试验研究;第 5 章介绍了路面混凝土的冻融破坏机理和抗冻性影响因素,采用快冻法对各种混凝土的抗冻性能进行了试验研究;第 6 章介绍了路面混凝土的疲劳破坏机理和疲劳性能影响因素,采用三分点法对各种混凝土的弯曲疲劳性能进行了试验研究,并采用落球法对各种混凝土的抗冲击性能进行了试验研究;第 7 章介绍了路面混凝土厚度设计的标准和步骤,给出了普通混凝土路面和纳米混凝土路面板厚的设计示例。

本书是国家自然科学基金重点项目“机敏混凝土及其结构”(编号:50238040)、国家高新技术研究与发展计划(“863”计划)项目“智能混凝土与结构”(编号:2002AA335010)、交通部西部建设科技计划项目“机敏混凝土在桥梁及隧道工程健康监测中的开发应用研究”和教育部跨世纪优秀人才培养计划基金“高性能机敏混凝土、形状记忆合金驱动筋及其智能结构体系”(编号:750)的部分研究内容。作者对上述项目的资助表示衷心的感谢!

尽管本书在纳米路面混凝土的力学性能和耐久性能方面进行了探索性研究,但还有许多问题需进行深入研究和完善,例如纳米混凝土的耐磨性、抗冻性、抗渗性、弯曲疲劳性能和抗冲击性能的多因素耦合效应研究,以及耐化学侵蚀性和碱-集料反应等其他耐久性能的研究。此外,鉴于纳米混凝土在公路工程中的良好性能和应用前景,可以考虑将其用于港口、码头、海岸等工程,有望对这些水工结构的混凝土进行改性。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

著 者

2008 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 路面混凝土的基本性能及其研究现状	(2)
1.3 纳米材料的性能与应用概述	(11)
1.4 本书主要研究内容介绍	(23)
第 2 章 纳米路面混凝土的配制及其力学性能	(25)
2.1 引言	(25)
2.2 纳米混凝土的配制	(26)
2.3 力学性能试验结果分析	(36)
2.4 混凝土抗折强度与抗压强度之间的关系	(43)
2.5 小结	(48)
第 3 章 纳米路面混凝土的耐磨性能	(51)
3.1 引言	(51)
3.2 路面混凝土的磨损机理和耐磨性影响因素	(52)
3.3 耐磨性试验方法	(64)
3.4 耐磨性试验结果分析	(69)
3.5 小结	(78)
第 4 章 纳米路面混凝土的孔结构和抗渗性能	(80)
4.1 引言	(80)
4.2 路面混凝土抗渗性影响因素	(80)
4.3 纳米混凝土的孔结构特征	(87)

4.4	纳米混凝土的抗渗性能	(100)
4.5	小结	(110)
第5章	纳米路面混凝土的抗冻性能	(113)
5.1	引言	(113)
5.2	路面混凝土冻融破坏机理和抗冻性影响因素	(114)
5.3	抗冻性试验方法	(129)
5.4	抗冻性试验结果分析	(132)
5.5	小结	(145)
第6章	纳米路面混凝土的弯曲疲劳性能	
	和抗冲击性能	(148)
6.1	引言	(148)
6.2	混凝土的疲劳破坏机理和疲劳性能影响因素	(149)
6.3	弯曲疲劳试验方法	(155)
6.4	混凝土的疲劳方程和疲劳寿命概率分布	(158)
6.5	弯曲疲劳性能试验结果分析	(162)
6.6	纳米混凝土的疲劳应变规律	(174)
6.7	混凝土的抗冲击性能	(177)
6.8	小结	(180)
第7章	混凝土路面厚度设计	(182)
7.1	混凝土路面厚度设计标准和步骤	(182)
7.2	混凝土路面厚度设计示例	(185)
参考文献	(196)

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

公路交通在国民经济和人民生活占有极其重要的地位,是衡量一个国家经济实力和现代化水平的重要标志。随着国民经济和交通运输事业的发展,交通繁忙和重交通路段日益增多,而沥青路面的质量和数量均难以满足要求;因为我国沥青产量较少,价格偏高,质量较差,故高速公路建设每年都要花费巨额外汇进口大量的重交通沥青^[1],这为水泥混凝土路面的发展提供了良好的机遇。由于水泥混凝土路面具有高强、稳定、使用寿命长、养护费用低等优点,且其路面形式更适合我国的资源条件^[2],因此是高速公路、桥梁路面、机场跑道、城市主干道、停车场等高等级道路工程的主要结构形式之一。从 20 世纪 80 年代中期开始,交通部就始终不懈地致力于水泥混凝土路面的推广;进入 90 年代,水泥混凝土路面发展较为迅速,表 1-1 为我国水泥混凝土路面建设里程统计。

表 1-1 我国水泥混凝土路面建设里程统计^[1]

年 份	1960	1970	1980	1990	1996	1997	1998	2000	2001	2002
里程/km	60	200	1 600	11 373	56 625	68 740	83 652	118 576	140 745	167 517
占当年建成高级路面的比例/%	2.2	3.9	11.0	24.4	36.3	37.8	40.3	46.2	52.1	58.0

水泥混凝土路面在世界各国的公路,特别是在高等级、重交通公路中也占有很大比例,例如美国在高速公路中有 40%,城市与乡村道路的高级路面中有 15% 采用水泥混凝土路面;德国在高速

公路上有 30% 是水泥混凝土路面;日本的高级路面中也有 25% 是水泥混凝土路面;比利时公共工程部确定新建公路采用水泥混凝土路面,而沥青混凝土则主要用于已有公路路面的维修和改建^[1]。目前,我国水泥混凝土路面每年在建规模超过 25 000km,已经成为世界上水泥混凝土路面里程最多的国家之一,因此,对水泥混凝土路面的基本性能进行深入系统的研究就显得格外重要。

随着现代材料科学的不断进步,作为最主要建筑材料之一的混凝土已逐渐向高强、高性能、多功能和智能化方向发展。纳米材料是一门新兴的并正在迅速发展的材料科学。由于纳米材料的小尺寸,使其在结构、物理和化学性质等方面具有诱人的特征,使之成为当今材料科学领域研究的热点,被科学家们誉为“21 世纪最有前途的材料”^[3]。纳米材料在建筑材料领域的研究开发工作刚刚起步,但的应用前景非常广阔。

基于上述背景,本书拟利用纳米材料的特殊性能,在普通路面混凝土中掺入适量的纳米材料,配制具有较好力学性能和耐久性能的纳米路面混凝土,使路面结构在其服役周期内具有更好的服务水平。

1.2 路面混凝土的基本性能及其研究现状

因为水泥混凝土路面暴露在大气中,并长期承受着以机动车辆为主的载荷—卸荷往复作用,是一种使用和环境条件极为苛刻严酷的承受动荷载的结构物^[4],故其力学性能和耐久性能都十分重要。路面混凝土的耐久性能包括耐磨性能、抗渗性能、抗冻性能、弯曲疲劳性能和抗冲击性能等许多方面。

当前对水泥混凝土路面耐久性的研究着重从结构形式、路基处理、排水设计、混凝土原材料及配合比选择、接缝设置和施工等出发,探讨水泥混凝土路面出现严重破坏的原因^[2]。研究重点集

中在探讨混凝土路面的疲劳裂缝、基层不良导致的面板破坏、温度应力引发的开裂现象等,并根据各自的研究提出许多改善水泥混凝土路面耐久性的方法^[2]。

1.2.1 力学性能

水泥混凝土的力学性能一般包括抗压强度、抗折强度和劈拉强度。道路路面或机场道面用的水泥混凝土,以抗弯拉强度(或称抗折强度)为主要强度指标,抗压强度作为参考强度指标^[5]。换言之,水泥混凝土路面设计施工和质量评定的首要技术指标是抗折强度,这一点与其他水泥混凝土结构中使用抗压强度作为第一强度指标是不同的^[1]。

水泥混凝土路面在其服役期内一直承受着静载弯曲和动载疲劳的作用^[6,7],因此要求路面混凝土具有足够的抗折强度和较低的脆度系数^[8,9]。然而普通混凝土的脆性较大、抗折强度较低;掺加活性矿物掺合料的高强混凝土虽然抗折强度有所提高,但同时脆度系数也随之大幅度增加,从而降低了路面混凝土的耐久性能^[8,9]。20 世纪 80 年代中期,美国军队工程师团,为解决其军事工事的混凝土结构在炮弹、炸弹的轰击下不易碎裂的问题,研制和开发了聚丙烯(PP)纤维混凝土^[6,7]。PP 纤维作为一种次要的混凝土加强筋,比较成功地解决了普通混凝土的弯拉强度低、脆性大等问题,从而提高了混凝土的耐久性。

马彘等^[10]研究表明:网状 PP 纤维对混凝土强度性能改善效果明显,尤其是抗折强度增长了 15.4%;掺入网状 PP 纤维后,混凝土的抗弯拉弹性模量明显降低,说明其柔韧性明显提高,这对改善 UTW 路面的应力状况非常有利。陈栓发等^[6,7]报道,掺量为 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 的 PP 纤维混凝土的强度比同配合比的普通混凝土强度有所增长,其中抗折强度增长了 13.86%,抗压强度增长了 6.75%,这说明 PP 纤维能够较大幅度地提高混凝土的抗折强度,

同时也使混凝土的脆性有所降低,降幅达 6.24%。孙家瑛^[8,9]指出,在高性能混凝土中掺加 PP 纤维可以充分发挥高性能混凝土的高强效应,特别是高抗折效应;当高性能混凝土掺加 PP 纤维的体积分数为 0.15%~0.2% 时,混凝土的抗压强度几乎不变,而其抗折强度提高 30% 以上,从而使混凝土的脆性大幅度下降。陈德玉^[11]研究表明,PP 纤维的最佳掺量为 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$,在此掺量下其抗折强度均提高 30% 左右,抗压强度提高 20% 左右;在最佳掺量下,PP 纤维的长度在 5~15mm 范围内变化对混凝土强度影响不明显。

迄今为止,应用纳米材料对混凝土的力学性能进行改性的研究还鲜见报道。

1.2.2 耐磨性能

耐磨性是物体抵抗表面由于机械原因导致颗粒松脱、磨耗的一种能力^[12]。目前,有关材料耐磨性的研究主要局限于金属、陶瓷和精加工材料表面,对混凝土材料的研究也主要集中于水工结构物受含泥砂水流冲磨、空蚀的影响,更多的是根据各自的试验条件,研究混凝土耐磨性的影响因素,提出改善混凝土耐磨性的方法和途径。虽然我国水泥混凝土路面的修建里程逐年增加,修筑技术也日臻完善,但是对于这种形式路面的表面特性研究相对滞后。

近年来,随着我国现代化建设的迅猛发展,城市道路、高速公路、桥梁路面、机场跑道、停车场、港口码头等交通基础设施相应地获得较快发展,而且越来越多地采用混凝土及其制品作为路面材料^[13]。在这些应用中,除了强度外,还要求混凝土有足够的抗滑耐磨能力^[14,15]。

混凝土的耐磨性差会导致路面板的厚度减小,引起材料内部张拉应力的增长,从而产生张拉裂缝,缩短混凝土路面的设计使用寿命^[16]。另外,混凝土的耐磨性不足会影响刹车阻力,由于被刮

削下来的混凝土颗粒而使路面的清扫工作增多。因此,混凝土的耐磨性直接关系到路面结构的使用寿命,并对人们的生命和财产安全有重要影响。

由于原材料选择不够严格或施工水平不高,导致各种混凝土路面在使用不久即出现脱皮、麻面、露骨等严重的磨损病害,影响了道路的正常使用寿命^[2];有的路面仅使用 1~2 年就可能完全破坏,需要翻修或重建,远远达不到预期的设计使用寿命^[1]。

然而在现行的设计和施工中,路面用混凝土的控制指标只是强度指标,对路面的耐磨性并未做具体要求^[2,17]。据调查,有些路面的损坏并不完全是因为强度不足,而是由于混凝土的耐磨性太差造成的^[2,17]。因此,为了保证混凝土路面的耐久性、减少养护费用和维修费用、延长道路的使用寿命、减少交通事故的发生,必须对路面混凝土的耐磨性进行深入研究。

大量研究表明,聚丙烯(PP)纤维的加入可以提高路面混凝土的耐磨性能。挪威政府公路实验室的模拟抗磨损试验结果表明,加入 PP 纤维网的混凝土,抗磨损能力增加 52%,并减少材料损耗 34.4%;美国陆军工程师团 CRD - C52 - 54 方法测试结果表明,PP 纤维混凝土的抗磨损能力提高 105%,相同条件下加入 PP 纤维可使混凝土的寿命延长 1 倍^[18]。Chen 等^[19]指出,当 PP 纤维掺量为 $0.6\text{kg}/\text{m}^3$, $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 时,纤维混凝土的抗磨损强度分别比普通高强混凝土提高了 33%, 49% 和 58%。陈栓发等^[6]研究发现,当 PP 纤维掺量为 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 时,纤维混凝土的耐磨性比普通混凝土提高 27.13%。孙家瑛等^[9]指出,PP 纤维体积掺量为 0.1% 和 0.2% 时,纤维混凝土的耐磨性能较对照试样分别提高了 20% 和 25%。马焱^[10]报道,网状 PP 纤维掺量为 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 时,纤维混凝土的耐磨性比普通混凝土提高了 30.36%。许多工程实践也证明^[20],PP 纤维混凝土有较好的抗磨损性能。

但是,也有人认为 PP 纤维对混凝土的耐磨性没有影响^[21]。

到目前为止,应用纳米材料对混凝土的耐磨性能进行改性的研究还未见报道。

1.2.3 抗渗性能

抗渗性是路面混凝土中较为重要的耐久性能之一。抗渗性不好,路面板首先发生溶蚀性渗漏,混凝土的孔结构逐渐劣化,其他各种侵蚀破坏接踵而至,从而使强度、耐磨性和抗冻性等严重变差^[1]。抗渗性是混凝土密实度的一个间接衡量指标,混凝土具有足够的抗渗性是提高其他耐久性的基本前提,因此,提高路面混凝土的抗渗性是增强其耐久性的首要问题^[1]。

渗透性可以定义为各种离子、液体、气体等外部流体介质以及其他污染物受压力、化学势或者电场的作用,在混凝土中渗透、扩散或迁移的难易程度^[22-24],被认为是影响混凝土耐久性的最重要的性质之一^[25]。高的抗渗性可以降低水、盐和其他污染物的侵入和移动,不致造成混凝土耐久性失效与损伤,因此是有利的^[23]。抗渗性低的混凝土允许气体、液体以及其他侵蚀性材料(如氯化物和硫酸盐)更快的渗透,导致混凝土快速劣化^[24]。

有学者认为混凝土的抗渗性是评价混凝土耐久性最重要的综合指标,因为混凝土耐久性的很多方面都取决于混凝土的渗透性,例如:混凝土发生硫酸盐侵蚀的必要条件是有水及侵蚀离子进入混凝土内部;发生碱—集料反应需要有水参与;钢筋锈蚀需要在水和氧气的参与下,离子破坏钢筋钝化膜或者 CO₂ 气体降低混凝土的高碱性环境;混凝土中 Ca(OH)₂ 的析出需要有水分及侵蚀离子的参与;混凝土碳化需要有 CO₂ 和水分的参与等。另外,混凝土的抗冻性也受抗渗性的重要影响^[26]。因此,混凝土耐久性的最好的测量标准是其渗透性^[23];可以说,混凝土的抗渗性是其耐久性的第一道防线^[26]。美国的 Metha、英国的 Neville 及我国已故工程院院士吴中伟都主张,大幅度提高混凝土的抗渗性是改善混凝土

耐久性的关键。

许多研究表明,在混凝土中掺加 PP 纤维对其抗渗性不利。Toutanji 等^[27,28]报道,PP 纤维的掺入提高了混凝土的氯离子渗透性,说明 PP 纤维的掺加对混凝土的氯离子渗透性产生负面影响,这是由于水泥基体缺乏内聚性以及纤维的分散性较差,导致纤维混凝土中的空隙含量增加。Huang^[29]研究表明,1% 掺量的 PP 纤维增加了硬化水泥浆的渗透性。但也有研究表明,PP 纤维的掺加使混凝土的渗透性显著降低。美国圣荷西州立大学的透水性试验表明^[18]:PP 纤维掺量为 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 时,纤维混凝土的渗水性减少 33% ~ 44%;而 PP 纤维掺量为 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 时,纤维混凝土的渗水性则可减少 79%。Vondran^[30]的研究也表明,PP 纤维的应用可以提高混凝土的抗渗性。

对于纳米混凝土的抗渗性能研究到目前还少见报道。

1.2.4 抗冻性能

在气候寒冷地区,混凝土的冻融循环造成的破坏往往是导致路面混凝土劣化的主要因素,因此抗冻性也是路面混凝土中较为重要的耐久性能之一。据调查和报道,在我国东北、华北、西北地区主要大中城市中,20 ~ 70 年的露天环境中的钢筋混凝土结构均因冻融循环而造成破坏,为使这些工程建筑继续发挥作用,各部门每年都要耗费巨资加以维修。

在我国北方各省的公路,路面混凝土必须具有良好的抗冻性,因为抗冻性是寒冷地区水泥混凝土的主要特性,在很大程度上决定着混凝土路面的耐久性^[31,32]。水泥混凝土路面因抗冻耐久性不足、过早遭受破坏而造成的危害,直接影响路面的安全性和使用性,同时也带来巨大的经济损失。因此,开展对混凝土路面抗冻性的研究具有重要的理论意义和经济效益。

Mehta 教授曾在第二届国际混凝土耐久性会议上的报告“混

凝土耐久性——五十年进展”中指出：“当今世界混凝土破坏的原因，按重要性递减顺序排列是：钢筋锈蚀、冻害、物理化学作用。”由此可见，除了氯盐腐蚀以外，冻融循环是影响混凝土结构耐久性的最重要因素^[26]。

冻融循环对混凝土的强度特性和变形性能都有不利影响^[33,34]。冻融破坏是指混凝土在浸水饱和或潮湿状态下，正负温度交替变化使其内部孔隙水冻结膨胀、融解收缩产生疲劳应力，使混凝土内部形成微裂纹，在反复冻融作用下，微裂纹逐渐增多和扩大，混凝土的损伤逐步累积和扩展，从而使混凝土膨胀开裂、表面酥松剥落、强度逐渐降低、变形能力减弱，直至混凝土破坏的一种现象^[33,35]。

混凝土的抗冻性是指混凝土在负温与正温交变循环作用下抵抗裂缝形成、表层剥落、强度降低、结构疏松乃至破坏的性质或能力^[26,36]。在很长一段时期内，国内外在评价混凝土耐久性时经常以混凝土的抗冻性作为主要标准或综合指标，甚至把抗冻性试验也叫做耐久性试验^[37]。近年来，国际上提出研究高抗冻性和超高抗冻性的高性能混凝土，将抗冻标号在 300 ~ 500 的混凝土称为高抗冻性混凝土；抗冻标号大于 500 的称为超高抗冻性混凝土^[1]。

大量研究表明，掺入 PP 纤维可显著提高混凝土的抗冻性。王彤等^[38]研究表明，加入 PP 纤维可显著改善路面混凝土的抗冻性，PP 纤维混凝土受冻后抗折和抗压强度的损失明显降低、表面剥落明显减少，冻融后混凝土的强度损失率和质量损失率均随 PP 纤维掺量的增加而降低。孙家瑛等^[9]报道，经过 50 次和 100 次冻融循环，PP 纤维混凝土的质量损失和强度损失与普通混凝土相比均大为减少。王玲等^[39]研究发现，随 PP 纤维掺量的增多，混凝土的抗剥落能力增强，相对动弹模迅速下降的时间逐渐变慢，抗冻次数增加，抗冻能力提高。

对于纳米混凝土的抗冻性能研究到目前还鲜见报道。

1.2.5 弯曲疲劳性能

由于车辆的来往,路面混凝土在其服役寿命期内承受了反复的循环加载^[40,41]。荷载的重复作用对混凝土路面的损伤日益累积使混凝土路面的剩余使用寿命逐渐减少,疲劳断裂是水泥混凝土路面的主要破坏形式。

疲劳可以定义为遭受重复荷载的材料中一个渐进的、永久性的内部结构变化过程^[40],或是重复荷载作用下材料内部损伤不断发展和累积的过程^[42,43];这归因于引起不可恢复应变显著增长的内部微裂缝的产生和扩展^[40,42]。经常遭受重复弯折荷载会引起结构刚度的稳定下降和裂缝的扩展,最终导致疲劳破坏^[40,41]。换言之,疲劳是一种材料强度降低现象,材料承受重复应力作用时,会在低于静载一次作用下的极限应力值时出现破坏^[4,44],即在遭受大量的应力循环之后,当混凝土结构在小于设计荷载作用下发生突变失效时,疲劳破坏出现^[42]。

混凝土的弯曲疲劳破坏是指混凝土梁、板构件在小于其抗折强度的重复弯曲荷载作用下发生的破坏^[45,46]。在路面结构中,混凝土的疲劳性能是重要的性能和设计参数^[40]。抗折疲劳强度是设计路桥工程时必须考虑的一项重要力学指标,也是确定道路、桥面铺装层厚度及使用年限的重要约束条件,因此,提高混凝土的抗弯疲劳性能是减薄路面厚度和提高路面工作性能的重要途径^[47]。

许多研究表明,在混凝土中掺入 PP 纤维能够显著提高其弯曲疲劳性能。马焱等^[10]研究表明,网状 PP 纤维对混凝土抗弯疲劳性能的改善效果明显,在 0.65~0.90 应力水平范围内,PP 纤维混凝土的疲劳寿命均增长明显,这是因为网状 PP 纤维具有良好的增韧作用,可以提高混凝土的柔韧性。曹诚等^[48]指出,较低掺量的 PP 纤维能有效提高混凝土的抗疲劳性能:在同样的应力比

下,PP纤维混凝土的疲劳寿命明显高于普通混凝土;达到同样的疲劳寿命,PP纤维混凝土的疲劳强度更高。陈栓发^[7]报道,将PP纤维掺入普通道路混凝土可以大幅度提高其弯曲疲劳性能,但同时也提高了混凝土的应力敏感程度;随应力比的增大,PP纤维混凝土的疲劳寿命将成倍增长;当疲劳荷载的循环次数 $N = 10^6$ 时,PP纤维混凝土的疲劳强度也有较大幅度的提高。

近年来,随着国民经济的发展,公路交通运输呈现出“大流量、重型化”的特点,这对路面混凝土的弯曲疲劳性能提出了新的要求,人们对路面混凝土的疲劳问题有更多兴趣和关注。尽管混凝土是一种应用广泛的建筑材料,但对其疲劳破坏的理解仍然匮乏^[40]。对于像纳米混凝土这样的复合材料,这种不完全的理解更显著。

1.2.6 抗冲击性能

混凝土材料在许多场合应用时都会遭受冲击荷载^[49,50]。路面混凝土长期承受着以交通为主的载荷—卸荷的作用,不可避免的会遭受冲击荷载,所以它应该具备良好的抗冲击性能。

抗冲击性能是指材料在一次或多次迅速施加荷载(冲击荷载)的作用下,抵抗冲击荷载对其造成破坏的能力^[51];材料抗冲击能力的好坏由其瞬时能承受的最大冲击力、吸收和传递冲击能量的多少决定。冲击韧性表示混凝土承受反复冲击和吸收能量的能力^[49]。因为普通混凝土是一种脆性材料,在反复冲击荷载的作用下,其吸收能量的能力相对较低^[49]。

大多数研究者认为,纤维增强是提高混凝土冲击韧性的一种非常有效的方法^[52],因为纤维的掺入可大大提高混凝土的能量吸收和抗裂性^[50,51]。许多研究指出,在混凝土中掺加PP纤维可以显著改善其抗冲击性能^[8,53],并且与PP纤维的体积掺量成正比^[11,27,48,49,51,54]。用ACI 544委员会推荐的落锤法进行的试验也

表明^[49],掺加 PP 纤维后,混凝土的初裂冲击次数和极限破坏时的冲击次数都增加。

Alhozaimy 等^[49]报道,掺入 0.05%,0.1%,0.2% 和 0.3% 的 PP 纤维,混凝土的破坏冲击韧性分别提高 48%,62%,171% 和 90%。孙家瑛^[8]认为,PP 纤维高性能混凝土在冲击荷载下的抗裂性能是普通高性能混凝土的 3~4 倍。陈德玉等^[11]研究表明,PP 纤维掺量为 $0.6\text{kg}/\text{m}^3$, $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 时,混凝土的抗冲击能力分别提高 1.0 倍,3.4 倍和 3.8 倍。曹诚等^[48]指出,掺入 0.1%~0.2% 的 PP 纤维能使混凝土的抗冲击能力提高 5 倍以上;PP 纤维体积率为 0.1% 和 0.2% 时,混凝土的裂后抗冲击能力分别提高 2.62 倍和 3.83 倍。李顺凯等^[51]研究发现,改性 PP 纤维掺量为 $0.68\text{kg}/\text{m}^3$,混凝土初裂和极限破坏时的抗冲击性能分别提高 13% 和 18%;而掺量为 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 时,混凝土初裂和极限破坏时的抗冲击性能分别提高 32% 和 29%。胡紫日等^[53]指出,掺入改性 PP 纤维后,混凝土的抗冲击能力提高 40%。

迄今为止,应用纳米材料对混凝土的抗冲击性能进行改性的研究还未见报道。

除此以外,水泥混凝土路面的耐久性还包括碱—集料反应、耐化学侵蚀性(氯离子侵蚀、硫酸盐侵蚀)、碳化、钢筋锈蚀等许多方面。

1.3 纳米材料的性能与应用概述

纳米材料是一门新兴的并正在迅速发展的材料科学,它是一门与原子物理、凝聚态物理、胶体化学、固体化学、配位化学、化学反应动力学、热力学、表面和界面等学科有关的交叉学科,是现代材料科学的重要组成部分。“纳米”是一个长度单位,