

江苏省优势学科建设工程资助项目
江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性高校重点实验室重点项目
江苏省自然科学基金项目 (BK2008128)

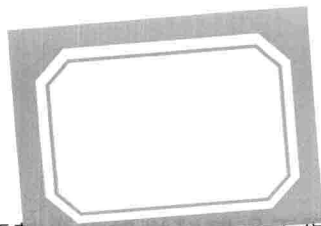
煤矿地面工业环境中

既有钢筋混凝土结构损伤劣化机理和防治技术

吕恒林 吴元周 周淑春 著

Meikuang Dimian Gongye Huanjing Zhong
Jiyou Gangjin Hunningtu Jiegou Sunshang Liehua Jili He Fangzhi Jishu

中国矿业大学出版社
China University of Mining and Technology Press



江苏省优秀工科建设工程资助项目

江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性高校重点实验室重点项目

江苏省自然科学基金项目(BK2008128)

煤矿地面工业环境中既有钢筋混凝土 结构损伤劣化机理和防治技术

吕恒林 吴元周 周淑春 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书论述了煤矿地面工业环境及既有钢筋混凝土结构损伤劣化主要特征,研究了多因素耦合作用下 RC 结构损伤劣化时变规律研究方法,并从材料、界面、构件和结构四个层面分别研究了煤矿地面工业环境中钢筋混凝土结构损伤劣化时变规律;在以上成果的基础上,从物理、化学和力学三个层面研究了钢筋混凝土结构损伤劣化机理,提出了既有钢筋混凝土结构防治流程,并结合煤矿地面建(构)筑物形式有针对性地提出了防治技术。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿地面工业环境中既有钢筋混凝土结构损伤劣化机理和防治技术 / 吕恒林, 吴元周, 周淑春著. —徐州: 中国矿业大学出版社, 2014. 2

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1279 - 5

I. ①煤… II. ①吕…②吴…③周… III. ①煤矿—矿业建筑—地面工程—钢筋混凝土结构—损伤(力学)—劣化—防治 IV. ①TD22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 210831 号

书 名 煤矿地面工业环境中既有钢筋混凝土结构损伤劣化机理和防治技术
著 者 吕恒林 吴元周 周淑春
责任编辑 崔永春 耿东锋
责任校对 何晓惠
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏徐州新华印刷厂
开 本 880×1230 1/16 印张 19.25 字数 629 千字
版次印次 2014 年 2 月第 1 版 2014 年 2 月第 1 次印刷
定 价 66.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前言

作为主要能源之一,煤炭在我国经济发展中的重要作用显而易见,但是煤矿地面建(构)筑物如选煤厂厂房、筒仓、带式运输走廊及支撑框架、井架、井塔等大部分钢筋混凝土(RC)结构长期处于复杂的荷载与恶劣环境耦合作用下,较早出现严重的损伤劣化,直接影响煤矿的安全生产,甚至导致经济损失和人员伤亡,严重影响了国民经济的发展。为此,需要及时了解煤矿地面工业环境的主要特征以及建(构)筑物的损伤劣化状况,研究既有 RC 结构损伤劣化机理及相应修复加固维护技术、新建结构预防技术,实现对煤矿地面工业环境中 RC 结构全寿命的规划、设计、建造、养护、修复、加固和拆除的客观评定。

作者团队自 2003 年开始对煤矿地面工业环境中既有 RC 结构损伤劣化机理与防治技术进行探索性研究。十年来先后承担了江苏省自然科学基金、江苏省优势学科项目,并与江苏及河南地区的相关煤矿企业合作研究,通过理论分析、工程实测、试验研究、数值计算以及工程应用,围绕煤矿地面工业环境中既有 RC 结构损伤劣化机理与防治技术进行了较为全面、细致、深入的研究,取得了一系列研究成果,基本建立了多因素耦合作用下 RC 结构损伤劣化时变规律研究方法、煤矿地面工业环境中 RC 结构劣化时变规律和机理及防治技术。本书是对作者团队十年来研究工作和研究成果的总结。

本书共 12 章。

第 1 章:论述了研究煤矿地面工业环境及既有 RC 结构损伤劣化机理与防治技术的背景和重要意义,介绍了国内外关于 RC 结构损伤劣化时变规律研究方法、损伤劣化时变规律和机理与防治技术的研究现状,以及本书主要内容及技术路线。

第 2 章:首先介绍煤矿地面工业环境测试集成技术以及采用该技术对江苏与河南等地十多个煤矿的地面工业环境的工程实测结果及分析,最后提炼了煤矿地面工业环境主要特征。

第 3 章:首先介绍既有 RC 结构损伤劣化状况测试集成技术以及采用该技术对江苏与河南等地十多个煤矿的 31 个建(构)筑物中共计 1 600 多个 RC 构件的工程实测结果与分析,最后提炼了煤矿地面工业环境中既有 RC 结构损伤劣化主要特征。

第 4 章:在分析煤矿地面工业环境主要特征的基础上,确定三类主要模拟环境设置以及五类对比环境。研究了集工程实测法、物理模拟试验法、数值模拟计算、理论分析等为一体的多因素耦合作用下 RC 结构劣化时变规律研究方法,并对试验总体方案进行设计,涉及材料、界面、构件和结构等多个层面的研究方案和总体试验规划。

第 5 章:首先介绍了材料性能退化规律试验方案,然后从原材料基本性能、混凝土性能退化规律、钢筋锈蚀速率及力学性能退化规律、CFRP 性能退化规律等四个方面展开论述,并总结归纳了各类材料劣化后的本构关系。

第 6 章:首先介绍了试验方案,然后从劣化过程及破坏形态、粘结应力—滑移曲线以及粘结性能退化规律等三个方面介绍了钢筋与混凝土粘结性能退化规律,从破坏形态和粘结力退化两个方面介绍了 CFRP 与混凝土正向粘结性能破坏规律。

第 7 章:介绍了试验方案,研究了简支梁在未劣化以及八类模拟环境中劣化不同时间后正截面受弯承载力退化规律,以及修复加固后增强规律。研究了模拟环境一中简支梁正截面承载力时变规律。

第 8 章:介绍了试验研究方案,研究了轴心受压杆(柱)在未劣化以及在模拟环境四中劣化不同时间后力学性能退化规律,以及修复加固后增强规律。并研究了模拟环境四中轴心受压杆(柱)力学性能时变规律。

第 9 章:介绍了试验方案,研究了小偏心受压柱在未劣化以及在三类模拟环境中劣化不同时间后力学性能退化规律,以及修复加固后增强规律。研究了模拟环境一中小偏心受压柱力学性能时变规律。

第 10 章:介绍了试验方案,研究了井架结构在模拟环境一中劣化后力学性能退化规律,以及修复加固

后增强规律。并研究了井架结构力学性能时变规律。

第 11 章:从物理、化学和机械三个方面角度研究了煤矿地面工业环境中各要素对于钢筋混凝土材料的劣化机理。研究了钢筋类型、钢筋锈蚀率、锈胀裂缝宽度以及混凝土劣化程度等因素对于钢筋与混凝土界面粘结性能退化规律的影响。从环境作用、材料劣化等方面对简支梁、小偏心受压柱以及 RC 结构的损伤劣化机理进行了分析,给出了相应的因素,给出了损伤劣化混凝土构件修复加固前后的承载力计算模型。

第 12 章:总结了既有 RC 结构损伤劣化防治总体流程以及常用治理技术,结合实际工程从检测、鉴定、防治建议、加固设计及施工等方面有针对性地提出治理技术,并从设计阶段优化、施工阶段控制以及服役期间维护等层面对新建 RC 结构损伤劣化预防技术进行研究。

后记:总结十年来主要研究成果,分析提炼了创新成果。并结合研究过程中的思考和下一步需要开展的工作提出了研究展望。

在本书的编写过程中,作者团队的研究生对本书作出了贡献(包括查阅资料、做试验、内容分析等):田国华、黄耀宗、宋雷、赵承明、温海燕、刘彬(第 1 章);谢海舰、方忠年、刘伟、宋雷、赵承明、刘矿、许更龙、马英(第 2、3 章);田国华、刘伟、黄耀宗、巩思锋、宋雷、赵承明、刘矿、方忠年、马英、温海燕(第 4、5 章);马英、温海燕(第 6 章);巩思锋、宋雷、方忠年、马英、温海燕(第 7 章);黄耀宗、赵承明、刘矿、马英、刘彬(第 8 章);田国华、朱军、黄耀宗(第 9 章);田国华、刘伟、黄耀宗、巩思锋、宋雷、赵承明、刘矿、马英、温海燕、谢海舰(第 10、11 章);方忠年、温海燕、刘彬(后记)。

煤矿地面工业环境中既有 RC 结构损伤劣化机理及防治技术因其行业特殊性和复杂性,设计的科学和工程问题较为复杂和多样,尚有许多问题亟待解决。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

著 者

2012 年 12 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 煤矿地面工业环境及既有 RC 结构损伤劣化特征研究	2
1.3 RC 结构损伤劣化时变规律研究方法	5
1.4 RC 结构损伤劣化时变规律	6
1.5 RC 结构损伤劣化机理	12
1.6 RC 结构损伤劣化防治技术	21
1.7 主要内容及技术路线	25
参考文献	26
2 煤矿地面工业环境测试集成技术及主要特征	35
2.1 测试集成技术	35
2.2 测试结果及分析	37
2.3 主要特征	60
参考文献	62
3 既有 RC 结构损伤劣化测试集成技术及主要特征	63
3.1 测试集成技术	63
3.2 测试结果及分析	65
3.3 主要特征	80
参考文献	83
4 多因素耦合作用下 RC 结构损伤劣化时变规律研究方法	85
4.1 煤矿地面工业环境模拟	85
4.2 时变规律研究方法	86
4.3 总体方案设计	90
参考文献	98
5 材料性能退化规律	100
5.1 试验方案	100
5.2 原材料基本性能	102
5.3 混凝土劣化及力学性能退化规律	106
5.4 钢筋锈蚀速率及力学性能退化规律	117
5.5 CFRP 力学性能退化规律	123
参考文献	126
6 钢筋或 CFRP 与混凝土粘结性能退化规律	127
6.1 试验方案	127
6.2 钢筋与混凝土粘结性能退化规律	130

6.3	CFRP 与混凝土粘结性能退化规律	140
	参考文献	141
7	RC 简支梁力学性能时变规律	143
7.1	试验方案	143
7.2	未劣化简支梁力学性能	152
7.3	不同程度劣化简支梁力学性能	153
7.4	未劣化简支梁加固后力学性能	162
7.5	不同程度劣化简支梁修复加固后力学性能	165
7.6	力学性能时变规律	171
	参考文献	173
8	轴心受压 RC 柱(杆)力学性能时变规律	175
8.1	试验方案	175
8.2	未劣化轴心受压柱(杆)力学性能	178
8.3	不同程度劣化轴心受压柱(杆)力学性能	179
8.4	未劣化轴心受压柱(杆)加固后力学性能	181
8.5	不同程度劣化轴心受压柱(杆)修复加固后力学性能	189
8.6	力学性能时变规律	194
	参考文献	195
9	小偏心受压 RC 柱力学性能时变规律	197
9.1	试验方案	197
9.2	未劣化小偏心受压柱力学性能	201
9.3	不同程度劣化小偏心受压柱力学性能	202
9.4	未劣化小偏心受压柱加固后力学性能	208
9.5	不同程度劣化小偏心受压柱修复加固后力学性能	210
9.6	力学性能时变规律	216
	参考文献	218
10	RC 井架力学性能时变规律	219
10.1	研究方案	219
10.2	未劣化井架力学性能	224
10.3	劣化井架力学性能	226
10.4	劣化井架修复加固后力学性能	228
10.5	力学性能时变规律	229
	参考文献	231
11	RC 结构损伤劣化机理	233
11.1	材料	233
11.2	锈蚀钢筋与劣化混凝土界面粘结性能	236
11.3	简支梁	239
11.4	轴心受压柱(杆)	246
11.5	小偏心受压柱	257
11.6	结构	261

参考文献.....	262
12 RC 结构损伤劣化防治技术和工程应用	265
12.1 既有结构损伤劣化防治总体流程.....	265
12.2 既有结构损伤劣化防治常用技术.....	267
12.3 选煤厂主厂房主体结构防治技术.....	270
12.4 运输胶带走廊主体结构防治技术.....	274
12.5 煤仓防治技术.....	280
12.6 井架防治技术.....	283
12.7 运输胶带走廊桁架防治技术.....	288
12.8 新建结构损伤劣化预防技术.....	290

1 绪 论

1.1 研究背景和意义

长期以来,煤炭一直是我国能源的主体,而且由于我国的资源分布和储藏情况,近期我国以煤炭为主的能源格局不会有多大变化。《中国可持续能源发展战略》研究报告中,20 多位中国科学院和中国工程院院士认为,在未来几十年内,煤炭仍然是我国的主要能源和重要的战略物资。据国土资源部储量快报统计,2007 年度我国能源矿产新增探明资源储量有较大增加,其中 17 种主要矿产新增大型矿产地 62 处,煤炭勘查净增查明资源储量 448 亿 t(《中国煤炭》,2008,34(3):95)。在 2008 年 1 月 28 日上午的新闻发布会上,国家发改委表示,一些地区的煤矿停产使得煤炭紧张的情况有所加剧,一定要在确保安全的前提下增加煤炭的供应。在国家发改委的有关文件和国务院召开的保证煤电油运供应电视电话会议上,国务院领导也强调一定要在确保安全的前提下增加煤炭的供应。2010 年 11 月 28 日发布的《煤炭产业政策》指出,“十二五”期间是构建新型煤炭工业体系,实现煤炭工业健康发展的重要时期,到 2015 年,全国将形成 10 个亿吨级、10 个 5 000 万吨级特大型煤炭企业。

目前,我国煤矿现有的建(构)筑物如筒仓、运输胶带走廊、选煤厂厂房、井架和井塔等大部分是钢筋混凝土(RC)结构,受特殊工艺需求,长期处于复杂的煤矿地面工业环境中,较早出现严重的损伤劣化,直接影响了煤矿的安全生产甚至导致经济损失和人员伤亡。研究发现^[1-7],煤矿地面建(构)筑物中的 RC 结构从投入使用之日起就处在恶劣自然环境与复杂的力学环境耦合作用下,极易过早地出现损伤劣化(如图 1-1 所示),主要表现在以下几方面:

(1) 材料层面:混凝土劣化严重,面层疏松,成分变化,内部孔隙和微裂纹增大;钢筋裸露并严重锈蚀,部分箍筋锈断,力学性能严重衰退等。

(2) 构件层面:混凝土面层疏松剥落,产生大量的顺筋裂缝,构件缺棱掉角,钢筋与混凝土间粘结力持续下降,构件刚度降低,承载力不断下降。

(3) 结构层面:由于构件劣化程度不同,局部因应力过大而破坏,结构产生变形、倾斜、节点破坏等,严重影响整体结构的安全性和正常使用。煤矿建(构)筑物一旦破坏,极易造成巨大的经济损失,甚至人员伤亡。

中国建筑科学研究院的调查(赵基达 2010 年 6 月 28 日,第二届中国房地产科学发展论坛)表明,我国现役工业建筑物损坏严重,结构的使用寿命一般达不到 50 年,多数在 20 年到 30 年之间就必须进行大修或加固而煤矿地面工业环境中 RC 结构损伤劣化尤其突出。因此,了解煤矿地面工业环境中既有 RC 结构的性能,评定其可靠性,预测其剩余使用寿命,并及时进行修复加固维护,对确保煤矿安全生产有着巨大的作用,有利于降低结构破坏造成的经济损失,同时避免不必要的伤亡。

针对上述要求,本着“防治结合、确保安全”的宗旨,本团队集成现有技术及自主研发新技术,综合运用土木工程、环境工程和工程力学等多学科知识,基于理论研究、物理模拟试验、数值模拟计算和工程实测等多种研究方法,采取定性分析和定量试验与计算相结合,构建了“煤矿地面工业环境及既有 RC 结构损伤劣化主要特征提炼—多因素耦合作用下 RC 结构损伤劣化时变规律研究方法确立—RC 结构损伤劣化时变规律研究—RC 结构损伤劣化机理研究及承载力模型建立—既有 RC 结构可靠性评定、损伤劣化治理和寿命预计—新建 RC 结构损伤劣化预防”为一体的煤矿地面工业环境中 RC 结构损伤劣化机理与防治技术体系。

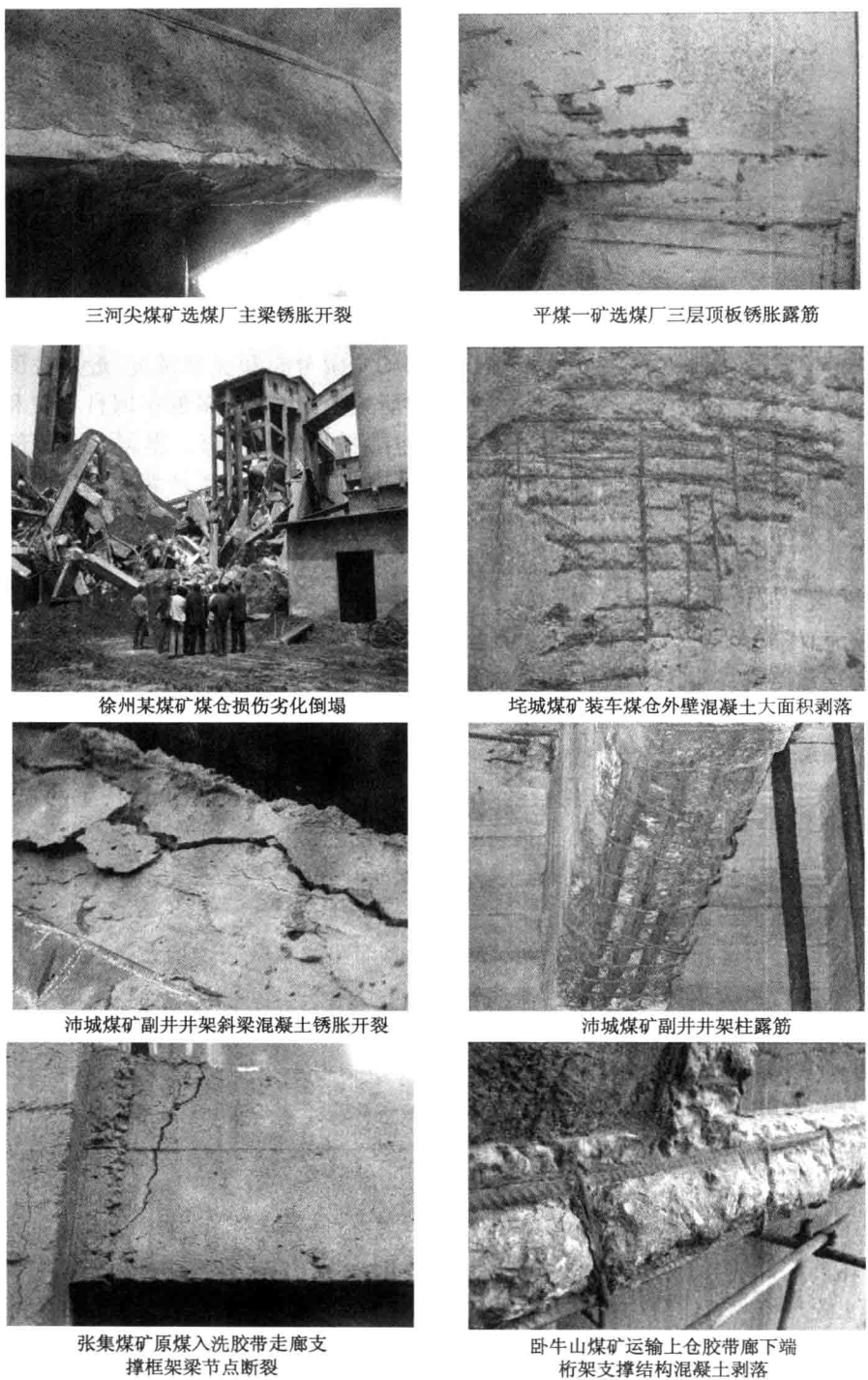


图 1-1 煤矿地面工业环境中 RC 结构损伤劣化现象

1.2 煤矿地面工业环境及既有 RC 结构损伤劣化特征研究

1.2.1 煤矿地面工业环境主要特征

《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)^[8]将结构所处环境分为一般环境、冻融环境、海洋氯化环境、除冰盐等其他氯化物环境以及化学腐蚀环境等五大类。一般大气环境下混凝土的劣化作用主要

是碳化腐蚀、干湿交替和冻融循环等,国内外学者对于一般大气环境的研究通常按照相关规范进行^[9-16],其中冻融试验主要选择快冻法进行试验研究^[12-16];海洋环境主要分为水下区和土中区、大气区、潮汐区、浪溅区等,对混凝土劣化作用主要是氯盐侵蚀,其次还有硫酸盐侵蚀、干湿循环和冻融循环等,国内外学者对于海洋环境的研究主要有现场暴露站法和实验室模拟两种^[17-20],其中暴露站法更能真实地体现实际环境;化学腐蚀环境包括气态介质、液态介质和固态介质三类环境,对于混凝土的劣化作用主要表现为化学腐蚀,按照腐蚀性分为强、中、弱、微四个等级,《工业建筑防腐蚀设计规范》(GB 50046—2008)^[21]中明确给出了各类化学介质的腐蚀性等级。国内外学者针对化学腐蚀环境对 RC 结构的劣化作用研究主要集中在酸雨侵蚀^[22-28],尤其是硫酸侵蚀和硝酸侵蚀方面。

煤矿地面建(构)筑物,以选煤厂厂房、运输胶带走廊、筒仓以及井架等为代表,因其特殊的工艺及用途而处于一种复杂的环境中,这里概括为煤矿地面工业环境,是一种由自然环境、工艺环境和力学环境多因素耦合作用的复杂环境系统,因而不同于上述五类环境。由于煤矿地面工业环境的特殊性和复杂性,国内外对其展开的研究还处于起步阶段,且重点研究自然环境污染治理^[29-34]。本团队自 2003 年起,对江苏和河南两地多处煤矿进行实地测试,初步研究了煤矿地面工业环境主要特征。

(1) 自然环境

从大类上划分,煤矿地面工业环境中的自然环境属于化学腐蚀环境的一种,包括气态介质、液态介质、固态介质和温湿度等。气态介质主要有 Cl_2 、 HCl 、 NO_x 、 H_2S 、 SO_2 和 CO_2 等,液态介质中主要含有 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子成分,固态介质主要有钙、镁、锌、铁、铝的氯化物以及硫酸镁等。煤矿地面建(构)筑物的外侧暴露于空气中,温湿度与大气一致,内部空间受生产及日常管理等因素影响,湿度一般较大,而温度变化幅度则较小。气态介质和固态介质主要来源有^[29]:① 煤炭生产、贮存、运输过程中向大气排放的大量粉尘,有的矿区排向大气的煤粉尘是煤炭产量的 1.6%;② 矿区各类汽车派出的尾气,其中含有大量 CO 、 NO_x 和铅化合物;③ 矿区固体废弃物露天堆放期间由于风化、氧化、自燃等作用而向大气排放的颗粒状和气态污染物,煤矸石自燃过程中每平方米每天排放 CO_2 10.8 kg, SO_2 6.5 kg, NO_x 5.0 kg;④ 矿井通风排气产生的粉尘、 CH_4 、 CO 、 CO_2 、 H_2S 等;⑤ 矿区其他生产过程(如化工、建材、冶金、橡胶、纺织等)对大气排放的污染物。而液态介质主要来源有^[29]:① 煤矿矿井水,平均吨煤涌水量约 4 m^3 ,由地下水与碳酸岩和硫酸岩层的接触溶蚀,使水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等增多而形成,矿化度大多为 $1\,000\sim4\,000 \text{ mg/L}$;② 选煤废水,湿法选煤中洗选 1 t 原煤用水量约 4 m^3 ;③ 煤化工废水,主要有焦化厂废水和煤制气厂废水;④ 矿区生活污水;⑤ 矿区其他废水,包括矿区医院污水、TNT 炸药生产厂废水、矸石堆淋溶水等。

(2) 工艺环境

煤炭自井下经井塔、井架提升到地面,经运输胶带走廊输送到选煤厂、煤仓等建(构)筑物,工艺流程繁杂,且各建(构)筑物间存在间距大、高差大等特点,复杂的工艺环境决定了建(构)筑物的特种结构形式:选煤厂厂房内部 RC 结构具有较特殊的错层、孔洞等,为安装选煤设备及其附属设备而设计的减振结构、溜槽、管道、料仓及水池等也随之定位;运输胶带走廊跨度较大,且多数同时具有较大的高差;筒仓多为薄壁圆筒结构形式,有较大的容积,一般在底部设有卸料漏斗或在底部侧面有门洞或窗洞;井架和井塔多为塔式结构。

(3) 力学环境

煤矿地面建(构)筑物除承受自重和其上安装的大型机器设备重量外,大量构件还要长期承受动力设备的高频振动作用:选煤厂厂房内部布置许多大型选煤设备及附属设施,自重有几吨到几十吨之间,选煤设备运行产生近 100 Hz 激振频率;运输胶带走廊及支承框架要承受输送的煤炭重量以及设备运转产生的振动荷载;筒仓要承受卸煤时煤炭对仓壁产生的水平推力;井架要承受天轮运转时产生的偏心荷载;井塔要提供煤炭提升过程中需要的动能。

1.2.2 既有 RC 结构损伤劣化主要特征

环境作用造成既有材料劣化、构件损伤劣化、结构变形,已引起国内外学者和相关部门的广泛关注。目前关于既有 RC 结构损伤劣化的研究很多,也取得了一定的研究成果。

(1) 一般大气环境

一般大气环境中既有 RC 结构主要包括民用和无重污染的工业建(构)筑物、城市中的 RC 道路和桥梁等。据日本土木工程学会 20 世纪 80 年代统计,日本每年仅用于房屋结构维修的费用即达到 400 亿日元,约 21.4% 的 RC 结构损伤是因钢筋锈蚀引起的。新干线使用不到 10 年,就出现大面积混凝土开裂、剥落现象^[35]。1988 年美国材料顾问委员会提交的报告表明,大约 25.3 万座 RC 桥梁的桥面板有不同程度的损坏,其中部分仅使用不到 20 年,而且每年还将增加 3.5 万座^[9]。近年来,国外关于在役 RC 桥坍塌的报道已屡见不鲜,如韩国首尔桑苏大桥坍塌(1994 年)、葡萄牙北部的 Hintze-Ribeiro 大桥坍塌(2001 年)、西班牙格兰纳达地区的高速公路桥坍塌(2005 年)、美国明尼苏达州一座跨越密西西比河的大桥坍塌(2007 年)。

在国内,据 1986 年国家统计局和建设部普查统计,当时有城镇住房面积约 46.8 亿 m^2 ,由于设计、施工、维护等多方面因素影响,约 10 亿~12 亿 m^2 需要加固,其中 10 亿 m^2 急需修缮处理^[17],2012 年更是发生了“12·16 宁波楼房倒塌事件”,造成严重影响;据 2000 年全国公路普查,截至 2000 年底,公路危桥 9 597 座,达 323 451 延米;2002 年底,铁路桥梁总数约 4 万座,其中混凝土桥梁约占 93%,有碱骨料反应和碳化深度超过 20 mm 的约 8 千多孔,占 6.7%^[36]。据调查,1999~2012 年期间,我国在役 RC 桥倒塌重大事件近 40 项,如重庆綦江彩虹桥垮塌(1999 年)、四川泸州泸州大桥坍塌(2001 年)、重庆彭水红泥槽桥垮塌(2010 年)、江西广昌河东大桥坍塌(2012 年)等。

(2) 海洋环境

海洋环境中既有 RC 结构包括海港工程和跨海桥梁工程,由于其损伤劣化被发现并研究相对最早,因而研究成果也最多。在国外,1902 年工程师 A. P. 舒良琴柯和 B. H. 察尔诺姆斯基调查了欧洲港口码头的 RC 构筑物。1934~1964 年比利时的 O. 戈尔夫对海上码头建筑物的 RC 结构耐久性进行了研究^[10]。1962~1968 年挪威混凝土协会设立专门技术委员会对挪威沿海的 200 多座混凝土港口结构的现状和长期性能进行调查,结果发现所有混凝土港口结构虽然已服役 50~60 年,在最严酷的海洋环境和结构荷载的复合作用下,依然表现出较高的承载能力;而挪威现有的 300 座混凝土桥梁中,50% 以上的桥梁存在钢筋锈蚀,或已因钢筋锈蚀而进行过修复^[18]。1986 年 Kiyomiya 等检查了日本 103 座混凝土海港码头,发现凡是有 20 年历史的,都有相当大的顺筋锈裂,需要修补。美国俄勒冈州 Alsea 海湾上的多拱大桥、在阿拉伯海湾和红海上建造的大量海工混凝土结构、印度孟买某河上的后张预应力桥等都存在较大的损伤劣化^[18]。

在国内,吴绍章等于 20 世纪 60 年代调查华南、华东地区 27 座海港钢筋混凝土结构,发现其中因钢筋锈蚀导致结构破坏的占 74%;1984 年童保全等调查浙江沿海使用 7~10 年的 22 座钢筋混凝土水闸,损伤劣化的构件占 56%^[18]。2006~2008 年,交通部组织调查发现,1987~1996 年期间建成、使用时间为 13~17 年的码头,多数构件表面出现锈蚀痕迹,说明混凝土中的钢筋已经发生锈蚀,部分出现了较为严重的锈蚀开裂现象^[37]。

(3) 化学腐蚀环境

化学腐蚀环境中既有 RC 结构主要包括冶金和化工等环境下建(构)筑物。

西安建筑科技大学 1979 年调查发现,一般的冶金、化工等工业建筑,其安全使用期一般为 15~20 年;而经常处于高温、高湿条件下的工业建筑,安全使用期一般仅为 5~7 年^[9]。文献[37]检测上海宝钢 1[#] 高炉水渣脱水槽和一炼钢连铸辊道基础时发现钢筋锈蚀严重,混凝土大面积剥落,并有大量的锈胀裂缝,且部分混凝土内存在中空现象。

(4) 煤矿地面工业环境

煤矿地面工业环境中既有 RC 结构主要包括与煤矿生产和加工处理相关的地面建(构)筑物中 RC 结构。目前,国外还未发现有相关研究文献报道;在国内,文献[39]对河南平煤集团 6 座地面建(构)筑物和 2 个矿井进行过检测鉴定。本团队自 2003 年起对江苏和河南两地煤矿地面工业中 RC 建(构)筑物进行可靠性检测鉴定,总结出煤矿地面工业环境中既有 RC 结构损伤劣化主要特征为:服役 20 年前后混凝土碳化深度达到 20 mm 以上,强度损失超过 30%,钢筋锈蚀率超过 12%,而服役 30 年时则分别达到 30 mm、50% 和 30%;构件面层混凝土锈胀裂缝宽度较大(服役 35 年时,最大达 16 mm),大面积混凝土酥松剥落,

钢筋裸露;运输胶带走廊容易出现不同方位的偏斜,且节点和端部易出现损伤,在与其他建(构)筑物界面处存在分离;煤仓容易出现上部倾斜、中间“胀肚”现象;选煤厂厂房和井架等也容易出现主要受力构件损伤和变形等现象。

1.3 RC 结构损伤劣化时变规律研究方法

国内外关于 RC 结构损伤劣化规律研究方法主要有两类:一是工程实测法,包括实体检测法和天然暴露实验法;二是相似模拟研究,包括物理模拟试验法和数值模拟计算法。

1.3.1 实体检测法

实体检测法是在实际工程中应用现代检测监测手段,从材料和力学等方面获取在役 RC 结构损伤劣化情况。其优点是测试结果真实反映结构的损伤劣化情况,如实反映环境对于 RC 结构的作用;缺点是工程实测的对象主要集中于材料和构件层面,数量上很难达到全覆盖,且检测过程中对原结构会有损伤,受施工、使用以及维护等因素影响,很难将实测结构进行现状与初始状况的对比分析。

1.3.2 天然暴露试验法

天然暴露试验法是将 RC 试件置于研究对象实际服役环境,如大气环境、海洋环境、工业环境等中,定期对试件进行分批检测获取试验数据。其优点是试验数据真实可靠,可以弥补室内试验的不足,更具有说服力和实际应用价值,可直接用于工程实践;缺点是试验周期长,环境条件复杂^[10]。

1.3.3 物理模拟试验法

物理模拟试验法是根据相似理论,在实验室中模拟工程实际,包括环境作用、RC 结构设计等,得到 RC 结构损伤劣化规律。物理模拟试验法主要有以下两种方法:

(1) 通电加速锈蚀法

通电加速锈蚀法是早期研究锈蚀 RC 构件的力学性能普遍采用的方法之一,至今仍被大量采用^[8-9,40-42]。其优点是钢筋锈蚀速度快,易控制钢筋的锈蚀程度,从定性的角度,对了解结构性能退化表征是比较实用的。但是,从钢筋锈蚀的电化学原理角度进行分析,应用恒电流通电法使混凝土内钢筋发生锈蚀与自然环境下混凝土内钢筋发生锈蚀的电化学原理是不同的,不同的锈蚀机理导致不同的钢筋表面锈蚀特征、不同的钢筋/混凝土粘结特征和不同的结构性能退化程度^[43]。

(2) 人工气候环境加速试验法

人工气候环境加速试验法是近期随着室内模拟试验手段的不断更新和完善而逐步成熟的一种物理模拟试验方法,是定量分析 RC 结构材料劣化和力学性能损伤劣化时变规律的有效试验方法^[18-19,43-50]。其优点是模拟环境设置和试验结果与工程实测吻合度较高,真实反映了 RC 结构损伤劣化过程和机理;其缺点是试验周期相对通电加速锈蚀法长,且考虑因素多、机理分析难度大,尤其是定量公式建立困难。

1.3.4 数值模拟计算法

随着研究的逐步深入以及计算机技术的日益成熟,数值模拟方法因其运算周期短、成本低、便于考虑各种因素的影响等优势在土木工程领域获得越来越广泛的应用。目前,数值模拟计算法主要用于以下三个方法:① 试验回归分析方法^[51];② 基于推导理论公式的计算方法^[52];③ 有限元分析^[53]。

由于工程实测法存在实施周期长的缺点,国内外学者在研究中经常采取两者相结合的方法,即在工程实测的基础上在实验室进行物理模拟试验或数值模拟计算研究,达到既缩短研究周期又真实反映工程实际的目的。

1.3.5 理论研究法

理论研究方法主要有以下两类:

(1) 定性分析法

定性分析法,又称“非数量分析法”,是对研究对象进行“质”的方面的分析,即运用归纳和演绎、分析与综合以及抽象与概括等方法,对获得的各种材料进行思维加工,从而能去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里,达到认识事物本质、揭示内在规律的目的。其基础是现有理论基础以及研究人员自身经验、主观判断和分析能力,旨在推演事物的性质和发展趋势。这类方法主要适用于一些没有或不具备完整的历史资料和数据的事项,如当定量分析的条件不满足时或需要进行长期的预测时,定性分析的优越性将得以显现。常用的定性分析方法,包括归纳分析法、演绎分析法、比较分析法、结构分析法等。

(2) 定量分析法

定量分析,指分析一个被研究对象所包含成分的数量关系或所具备性质间的数量关系;也可以对几个对象的某些性质、特征、相互关系从数量上进行分析比较,研究的结果也用“数量”加以描述。其理论基础是实证主义。从研究的逻辑过程看,定量分析比较接近于假说—演绎方法的研究,既保留重视观察实验、收集经验资料的特点,又保留重视逻辑思维演绎推理的特点,应用假说使得观察实验方法和数学演绎形式结合起来。定量分析往往比较强调实物的客观性及可观察性,强调现象之间与各变量之间的相互关系和因果联系,同时要求研究者在研究中努力做到客观性和伦理中立。

定量分析方法很多,但各种方法在应用时往往都有一定的程序化。如实验法、观察法、访谈法、社会测量法、定量分析图、问卷法、描述法、解释法、预测法等。

目前,关于单一因素环境(如碳化、氯盐或硫酸盐侵蚀等)或部分因素复合环境(如氯盐或硫酸盐侵蚀与干湿交替或冻融循环耦合)作用下 RC 材料和构件劣化规律的研究方法已大量提出,但对于多因素自然环境(气态介质、液态介质、固态介质、温湿度)与力学环境耦合作用下 RC 结构损伤劣化规律的研究方法还处于探索阶段,将研究成果与工程实际相结合的实践鲜见报道。

1.4 RC 结构损伤劣化时变规律

建立耦合因素作用下钢筋混凝土材料与结构损伤劣化和可靠性评定理论的重要基础是将钢筋混凝土损伤劣化过程、损伤叠加和交互作用的研究与微结构演变的定量描述密切结合,并进行多尺度的数值模拟,从不同结构、性能与时间层次揭示其损伤劣化本质^[54]。目前,对于 RC 结构损伤劣化后的力学性能、材料性能等,国内外学者已有大量的研究成果,但对于 RC 结构损伤劣化时变规律的研究是最近几年才被提出的,目前还处于探索阶段。

1.4.1 材料

国内外学者分别从混凝土微观形态及成分变化^[43,45,55]、中性化程度^[53]、强度损失^[46]、弹性模量的衰减^[51]、钢筋的锈蚀率及锈蚀钢筋的力学性能^[41,47]、混凝土锈胀裂缝的发展^[48]等方面研究了 RC 构件的损伤劣化规律。文献[56]基于改进的碳化深度预测模型,结合 IPCC 预测大气 CO₂ 浓度数据,研究 CO₂ 浓度变化的规律及其对 RC 结构的碳化损伤影响,提出时变可靠度模型来计算混凝土结构在多种 CO₂ 排放策略作用下将来 100 年内的开始劣化概率和劣化开裂比例。

材料劣化后的力学性能,即指混凝土劣化及钢筋锈蚀后的力学性能,国内外学者在这方面已有一些研究。

(1) 混凝土

目前,国内外对劣化混凝土的研究主要集中于劣化混凝土强度和弹性模量变化,对于混凝土劣化后本构关系的研究相对还很少。混凝土受劣化后本构关系发生变化,从而引起试件破坏形态和力学性能变化。文献[9]、[57]、[58]的研究成果表明:

① 劣化作用将引起混凝土内部产生膨胀内应力,在劣化作用初期,这种膨胀内应力的存在使混凝土抗压强度有所提高,但随着劣化作用的不断进行,混凝土内部的膨胀内应力积累到一定程度则会导致混凝土的开裂,膨胀内应力得到释放,混凝土力学性能也将退化。

② 劣化混凝土强度与劣化时间成线性关系,与介质浓度成正比;劣化程度不高时,介质的劣化作用

不改变应力—应变关系的基本形式,峰值应力处的应变值基本保持不变。

③ 劣化混凝土的极限应变比未劣化混凝土降低。

劣化混凝土力学性能的研究已得到了一定的重视,但目前的试验量及理论分析成果还不足以确定劣化混凝土的应力—应变关系。因此,在该方面仍需进一步进行定量的研究,确立劣化混凝土破坏准则和本构模型。

(2) 钢筋

钢筋锈蚀的直接结果是导致钢筋有效截面积减少,随着锈蚀程度的加深,面积减小率的增加,钢筋的强度及延性均会逐渐下降^[59]。钢筋锈蚀后体积膨胀(约为劣化前的 2~4 倍)引起顺筋裂缝、保护层脱落及钢筋与混凝土之间的粘结力下降等,最终导致构件承载力下降,结构服役寿命缩短。因此,研究不同程度锈蚀钢筋的力学性能有着实际的理论意义和应用价值。

目前,国内外学者对受劣化(锈蚀)钢筋的力学性能进行了广泛的试验研究,主要讨论了锈蚀钢筋屈服强度、极限强度、伸长率等力学特征随钢筋锈蚀率的变化规律。研究结果表明^[9,58-59]:

① 表面有浮锈的钢筋,当其截面损失率小于 1% 时,钢筋的应力—应变曲线以及钢筋的抗拉强度、屈服强度与原材基本相同,此类轻微锈蚀钢筋对构件没有影响。

② 当钢筋平均锈蚀率小于 5% 时,由于坑蚀影响较小,锈蚀钢筋的力学性能影响不明显。随锈蚀率的增大,坑蚀逐渐明显,退化影响增大。

③ 对于截面损失率小于 5% 且均匀锈蚀的弱劣化钢筋,热轧钢筋的应力—应变曲线仍有明显的屈服点,钢筋的伸长率基本大于规范最小允许值,钢筋抗拉强度和屈服强度可以与原材相同考虑,承受荷载的计算需考虑截面的折减,对结构计算影响不大。

④ 对于截面损失率在 5%~10% 之间的钢筋,由于钢筋锈蚀的不均匀性,钢筋屈服强度、抗拉强度、伸长率均开始下降。

⑤ 热轧钢筋锈蚀程度较大(大于 10%)后的极限强度与屈服强度之比非常接近,在 1.1 左右。

⑥ 对于截面损失率大于 10% 且小于 60% 的严重劣化的钢筋,钢筋的屈服点不很明显,伸长率小于规范的最小允许值,钢筋的各项力学性能指标严重下降。

文献[60]通过对 95 根锈蚀热轧钢筋的试验曲线分析研究,得出了屈服强度和抗拉强度与钢筋锈蚀程度关系,及极限伸长率与钢筋锈蚀程度的关系。

$$f_{ys} = \frac{0.985 - 1.028\rho_s}{1 - \rho_s} f_{y0} \quad (1-1)$$

$$f_{bs} = \frac{0.986 - 1.103\rho_s}{1 - \rho_s} f_{b0} \quad (1-2)$$

式中 f_{ys} ——锈蚀钢筋的屈服强度;

f_{bs} ——锈蚀钢筋的抗拉强度;

f_{y0} ——未锈蚀钢筋的屈服强度;

f_{b0} ——未锈蚀钢筋的抗拉强度。

当截面损失率大于 5% 时,具有局部坑蚀的钢筋,锈蚀后伸长率与原始伸长率的关系可表示为:

$$\delta_s = (0.85 - \rho_s)^2 \delta_{s0} \quad (1-3)$$

式中 δ_s ——锈蚀钢筋的伸长率;

δ_{s0} ——正常钢筋的伸长率。

(3) 碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)

文献[61]研究 CFRP 在三种不同温度(22℃, 45℃, 60℃)作用、22℃下水溶液或饱和盐溶液干湿作用、2 000 h 的紫外线加速老化作用状态下的劣化规律。结果表明,在 45℃下,CFRP 的性能稍有提高或没有变化,且水和盐溶液中的干湿循环对 CFRP 的弹模没有明显的负作用,2 000 h 的紫外线辐射对试件的力学性能没有负作用。文献[62]对 CFRP 进行了不同地区、不同周期暴露在自然环境下抗拉强度试验。发现经过五年暴露试验后试件的平均抗拉强度降低不大,试件还能保持良好的抗拉性能。文献[63]研究发现 CFRP 在受拉作用(极限拉力的 0.65 倍)下浸泡于 pH 值为 13~14 的碱溶液中,经过 9 个月的

劣化后,CFRP 抗拉强度不变。文献[64]认为 CFRP 浸泡在 CaCO_3 溶液中(温度为 $23\text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH}=9.5$),持续时间为 125 d,CFRP 不受影响。

文献[65]研究了 CFRP 在水环境、冻融循环、湿热老化、碱环境下的劣化规律,发现 CFRP 耐浸泡、冻融循环及湿热老化能力较强,但在饱和碱溶液侵蚀试验中,未经环氧树脂浸润的碳纤维片材强度和模量都下降了,而经过浸润的碳纤维片材抗拉强度和弹性模量基本保持不变。

(4) 浸渍树脂基体

树脂材料是 CFRP 耐久性的第一道防线,它的耐久性能的好坏,直接关系到 CFRP 加固材料的使用寿命。虽然树脂材料具有良好的比强度、抗疲劳性,以及耐电磁、耐酸碱盐等特点,但在潮湿、紫外线的作用下,其力学性能亦会受到较大影响。文献[66]研究了树脂在不同的温度和湿度硬化后的粘结强度规律,树脂在温度 $35\text{ }^\circ\text{C}$ (湿度 95%)下硬化后粘结强度比在温度 $23\text{ }^\circ\text{C}$ (湿度 50%)下硬化后的粘结强度降低了近 73%(另外一种树脂粘结强度降低了 53%)。文献[67]把树脂暴露于紫外线和潮湿环境(温度为 $50\text{ }^\circ\text{C}$)中(如表 1-1 所示),试验结果表明,潮湿环境对树脂的强度劣化明显。文献[68]中也做了相关的试验和论述,结果相近。

表 1-1 物理试验设置

Environment	Exposure condition	Duration
Combined UV radiation and condensation	3 hours repeated cycle UV: 0.68 W/m^2 inadiance at 340 nm , Condensation: 100% relative humidity, Temperature: $50\text{ }^\circ\text{C}$	1 320, 2 712 and 4 098 hours
Moisture	Continuous exposure 80% relative humidity, Temperature: $50\text{ }^\circ\text{C}$	1 320, 2 712 and 4 098 hours

文献[65]和[69]研究了湿气对 CFRP 复合材料力学性能和破坏行为的影响。结果表明,环氧树脂在试验的温度条件下,强度和模量都有相应的提高,但对于湿度比较敏感,经过一定时间的暴露,抗拉强度和模量都有显著降低。文献[70]测试与分析了 4 种自制建筑修复用树脂体系制备的 CERP 混凝土试件在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 水煮老化、 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 湿热老化和常温紫外线老化条件下的正拉粘结强度,发现 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 水煮老化对各体系试件的正拉粘结强度影响最大,但各体系的正拉粘结强度值经过 28 d 水煮老化后仍远高于规范值; $60\text{ }^\circ\text{C}$ 的湿热老化条件对各树脂体系的正拉粘结强度影响要比 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 水煮老化条件弱。

文献[71]对混凝土粘钢补强用结构胶进行了耐久性研究。结果表明,环氧树脂类结构胶在室内常温环境条件下具有较长期的稳定性。而在长期浸水或冻融条件下,粘结强度虽然仍能超过 C40 以下混凝土基材的强度,但结构胶强度尤其是结构胶与钢板的界面粘结强度发生了明显的劣化,90 d 下降近 70%。因此,长期处在潮湿环境尤其是水中的钢筋混凝土构件不宜使用结构胶进行外部粘钢法加固补强。

通常情况下,环境中多个因素(腐蚀介质、温湿度)同时对钢筋、混凝土及加固材料产生作用,造成混凝土劣化、钢筋锈蚀、CFRP 及浸渍树脂基体的老化等,且各类材料劣化后还会对其他材料产生连带反应,如混凝土腐蚀后疏松剥落等导致保护层破坏,加快钢筋锈蚀速率;钢筋锈胀导致混凝土开裂,加快腐蚀介质进入混凝土中;CFRP 及浸渍树脂基体老化后剥落,撕裂混凝土面层等等。因而在研究过程中应当综合考虑 RC 材料劣化状况,不能割裂开来。

1.4.2 界面

材料劣化造成 RC 结构内锈蚀钢筋与混凝土间粘结性能退化,加固后的 RC 结构混凝土面层与加固材料之间的粘结性能也受到加固材料和混凝土劣化状况等因素影响。目前,国内外关于这两方面的研究已取得一系列成果。

(1) 钢筋与混凝土间粘结性能

目前,较公认的钢筋与混凝土之间的粘结力主要由三部分组成:① 水泥胶凝体与钢筋表面的化学胶

着力。化学胶着力是混凝土中的水泥凝胶体与钢筋表面产生的吸附胶着作用,并且随着相对滑移而消失。

② 钢筋与混凝土接触面间的摩擦力。摩擦力是由于混凝土硬化收缩对钢筋产生的握裹挤压作用,因此,随着接触面摩擦因数的增大而增大。

③ 钢筋与混凝土之间的机械咬合力。机械咬合力对于光圆钢筋主要是由于表面的凹凸不平产生的,对于变形钢筋则主要由于两者的相互嵌套形成。研究粘结性能退化规律的途径主要是进行粘结锚固试验,其试验方法主要有中心拔出试验和梁式或半梁式拔出试验。文献[72]通过电化学加速锈蚀方法研究了钢筋锈蚀率对再生混凝土与钢筋粘结滑移性能的影响;文献[73]通过中心拔出试验,研究了经历不同温度后钢筋和混凝土粘结性能的变化情况,得到不同温度下的 $\tau-s$ 曲线,并给出温度因素影响下的粘结应力—滑移本构方程;文献[74]试验研究了光圆钢筋与混凝土在遭受冻融循环作用后的粘结性能;文献[75]和[76]从数值模拟的角度分别分析了混凝土损伤破坏区域的分布和钢筋肋纹处的应力状态以及需要进一步完善的地方。

通过试验研究,得到以下结论^[11,77-86]:

- ① 钢筋锈蚀量较小时($<1\%$),粘结强度随锈蚀量增大而增大,在锈胀开裂前,高于无锈钢筋。
- ② 随钢筋锈蚀量的进一步增大,变形钢筋横肋受损,疏松的锈蚀产物在钢筋与混凝土之间起到润滑的作用;锈胀裂缝产生之后,混凝土对钢筋的约束作用降低,从而使粘结强度明显降低。
- ③ 锈胀开裂后,粘结力随裂缝宽度增大而降低,当裂缝宽度约为 0.1 mm 时,粘结力相当于无锈钢筋的粘结力。
- ④ 对光圆钢筋,当裂缝宽度大于 $1.5\sim 2.0\text{ mm}$ 时,粘结力约为未开裂构件的 $3.5\%\sim 5.5\%$;对变形钢筋,当裂缝宽度大于 $2.0\sim 3.0\text{ mm}$ 时,粘结力约为未开裂构件的 $3\%\sim 10\%$ 。
- ⑤ 在刚出现锈胀裂缝时,光圆钢筋的粘结强度高于无锈钢筋,而变形钢筋的粘结强度则低于无锈钢筋。

(2) 加固材料与混凝土间粘结性能

《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2006)^[87]中提供了多种混凝土结构修复加固技术,基本每种技术都涉及加固材料与原有混凝土界面间的粘结性能。本书重点介绍粘贴 CFRP 或钢板加固后,加固材料与原有混凝土间的粘结性能。

目前,试验主要有两种,一种为混凝土表面粘贴 CFRP(单面或双面)的剪切试验,反映混凝土表面处理情况、粘结材料类型、混凝土强度等因素影响;另一种为混凝土试块以不同角度锯开后粘胶的压剪或拉剪试验,基于莫尔—库仑破坏准则,反映正应力对粘结剪应力的影响^[88]。

研究表明^[89-90]:CFRP 与混凝土间粘结破坏是一种脆性破坏方式,极限状态时剪应力在树脂与混凝土界面上的分布近似呈三角形,且粘结强度完全发挥的搭接长度约为 100 mm ,一般该数值可作为 CFRP 间的有效搭接长度。在有效搭接长度范围内平均粘结剪切强度一般在 $3.5\sim 5.5\text{ MPa}$ 范围内,平均极限变形量在 $0.3\sim 0.6\text{ mm}$ 间变化,与混凝土裂缝宽度基本协调。

通常引起 CFRP 片材和混凝土界面发生破坏的原因有以下几种:粘结剂涂抹得不均匀或不足,混凝土中出现弯曲裂缝或剪切裂缝,混凝土表面凹凸不平,承受疲劳荷载。根据现有的研究成果来看,CFRP 与混凝土界面的剥离破坏形式可归纳为以下几种^[91]:由于 CFRP 片材端部的应力集中所引起的向梁中扩展的剥离破坏(对于较厚的 CFRP 片材容易发生),如图 1-2 中 a 位置;由剪切裂缝引起的上下错动的剥离破坏,如图 1-2 中 b 位置;在最大弯矩处,由弯曲裂缝引起的向两端发展的剥离破坏,如图 1-2 中 c 位置;沿梁纵向发生的层状剥离破坏,如图 1-2 中 d 位置。

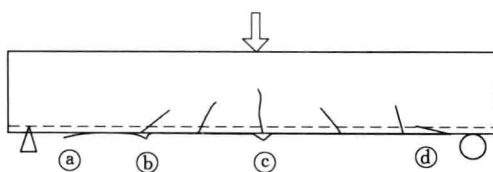


图 1-2 CFRP 与混凝土界面剥离破坏形式

单剪试验结果表明,在一定荷载作用下,荷载与端部位移呈线弹性关系,界面剪力和 CFRP 应力随外