

博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

大跨度建筑结构太阳辐射 非均匀温度效应

刘红波 陈志华 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

大跨度建筑结构太阳辐射 非均匀温度效应

刘红波 陈志华 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统总结和阐述了作者在大跨度建筑结构太阳辐射非均匀温度效应方面的研究成果。本书共6章,第1章论述了在大跨度建筑结构建造过程中考虑太阳辐射非均匀温度作用的必要性;第2章论述了常用材料的太阳辐射吸收和透射特性;第3章论述了太阳辐射下典型构件的非均匀温度试验;第4章论述了太阳辐射非均匀温度场的数值模拟方法;第5章结合工程实例,论述了大跨度建筑结构太阳辐射的非均匀温度效应;第6章给出了典型构件太阳辐射非均匀温度作用的简化计算方法。

本书可供土木工程及相关领域的广大科技人员参考,也可作为土木工程专业研究生和高年级本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大跨度建筑结构太阳辐射非均匀温度效应/刘红波,陈志华著. —北京:科学出版社,2016

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-046858-1

I. ①大… II. ①刘…②陈… III. ①建筑物-大跨度结构-研究
IV. ①TU208.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 311407 号

责任编辑:裴 育 高慧元 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第一版 开本:720×1000 1/16

2016年6月第一次印刷 印张:16 1/2 插页:2

字数:316 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

傅伯杰 付小兵 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

《博士后文库》序言

博士后制度已有一百多年的历史。世界上普遍认为,博士后研究经历不仅是博士们在取得博士学位后找到理想工作前的过渡阶段,而且也被看成是未来科学家职业生涯中必要的准备阶段。中国的博士后制度虽然起步晚,但已形成独具特色和相对独立、完善的人才培养和使用机制,成为造就高水平人才的重要途径,它已经并将继续为推进中国的科技教育事业和经济发展发挥越来越重要的作用。

中国博士后制度实施之初,国家就设立了博士后科学基金,专门资助博士后研究人员开展创新探索。与其他基金主要资助“项目”不同,博士后科学基金的资助目标是“人”,也就是通过评价博士后研究人员的创新能力给予基金资助。博士后科学基金针对博士后研究人员处于科研创新“黄金时期”的成长特点,通过竞争申请、独立使用基金,使博士后研究人员树立科研自信心,塑造独立科研人格。经过30年的发展,截至2015年底,博士后科学基金资助总额约26.5亿元人民币,资助博士后研究人员5万3千余人,约占博士后招收人数的1/3。截至2014年底,在我国具有博士后经历的院士中,博士后科学基金资助获得者占72.5%。博士后科学基金已成为激发博士后研究人员成才的一颗“金种子”。

在博士后科学基金的资助下,博士后研究人员取得了众多前沿的科研成果。将这些科研成果出版成书,既是对博士后研究人员创新能力的肯定,也可以激发在站博士后研究人员开展创新研究的热情,同时也可以使博士后科研成果在更广范围内传播,更好地为社会所利用,进一步提高博士后科学基金的资助效益。

中国博士后科学基金会从2013年起实施博士后优秀学术专著出版资助工作。经专家评审,评选出博士后优秀学术著作,中国博士后科学基金会资助出版费用。专著由科学出版社出版,统一命名为《博士后文库》。

资助出版工作是中国博士后科学基金会“十二五”期间进行基金资助改革的一项重要举措,虽然刚刚起步,但是我们对它寄予厚望。希望

通过这项工作,使博士后研究人员的创新成果能够更好地服务于国家创新驱动发展战略,服务于创新型国家的建设,也希望更多的博士后研究人员借助这颗“金种子”迅速成长为国家需要的创新型、复合型、战略型人才。

李尔瑜

中国博士后科学基金会理事长

前 言

近年来,布置大型室外构件或者大面积透光性屋面的大跨度、超大跨度建筑工程不断涌现,使得太阳强烈辐射对结构的影响日显重要,不容忽视。目前进行结构设计与施工时,温度荷载一般采用历史最低和最高气温确定一个整体、均匀的温度作用。然而,在太阳强烈辐射作用下,钢结构表面的温度受到太阳短波辐射、周围建筑物与天空的长波辐射、外部空气的对流换热等多因素动态耦合作用,温度值不仅超出环境气温很多,而且具有强非均匀性和时变性。目前工程中对其了解并不充分,从而导致钢结构钢材开裂、局部结构严重变形、结构整体破坏等各种工程事故。

本书结合作者多年的研究成果,系统阐述大跨度建筑结构太阳辐射非均匀温度效应的分析理论与控制技术。全书共6章,第1章简要阐述大跨度建筑结构的发展及考虑太阳辐射非均匀温度效应影响的必要性;第2章采用紫外-可见-近红外分光光度计,测定大跨度建筑结构常用材料的太阳辐射吸收系数、透射系数等物理特性;第3章通过大量的温度实测,分析太阳辐射作用下大跨度建筑结构常用构件形式的温度分布和变化规律;第4章基于有限元方法和计算流体动力学方法,分别提出两种大跨度建筑结构太阳辐射非均匀温度场的数值模拟方法;第5章结合作者参与的山东茌平体育馆、天津于家堡交通枢纽站房、内蒙古鄂尔多斯新建机场航站楼等工程项目,系统分析典型大跨度建筑结构太阳辐射非均匀温度场和温度响应的分布和变化规律;第6章基于稳态热传导理论,推导大跨度建筑结构常用构件形式的太阳辐射非均匀温度作用计算公式。

本书涉及的研究工作先后得到国家自然科学基金青年科学基金项目(51208355)、中国博士后科学基金面上项目(2012M510751)、天津市建交委科技项目(2012-12)、中国博士后科学基金特别资助项目(2013T60253)、全国百篇优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(201453)以及多项重大工程委托项目的大力资助,本书的出版也得到了中国博士后科学基金会优秀学术专著出版基金的资助,在此对国家自然科学基金委员会、中国博士后科学基金会和各部委表示由衷的感谢。

天津大学博士生赵中伟和硕士生张智生、李博、陈滨滨、肖骁等参与了有关章节的素材收集、文字编辑和插图绘制等工作;各位前辈、老师和同仁的相关文献为作者的研究开阔了视野,提供了参考。在此一并感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 大跨度建筑结构	1
1.2 结构温度作用	3
1.3 太阳辐射对大跨度建筑结构的影响	4
1.4 本书的主要内容	5
第 2 章 大跨度建筑结构常用材料太阳辐射系数	7
2.1 大跨度建筑结构常用材料	7
2.2 太阳辐射系数及其测试方法	7
2.2.1 太阳辐射光谱	7
2.2.2 太阳辐射系数	8
2.2.3 太阳辐射系数的测试标准	9
2.2.4 太阳辐射系数的测试方法	9
2.3 太阳辐射系数试验试件设计	11
2.3.1 钢结构常用涂料配套	11
2.3.2 钢结构常用涂料试件制备	13
2.3.3 铝合金材料试件制备	18
2.3.4 膜材料试件制备	18
2.4 常用涂料与铝合金材料太阳辐射吸收系数试验	21
2.4.1 试验仪器	21
2.4.2 试验过程	21
2.4.3 试验结果	22
2.5 膜材太阳辐射透射系数和吸收系数试验	28
2.5.1 试验仪器	28
2.5.2 试验过程	28
2.5.3 试验结果	29
2.6 太阳辐射系数试验结果总结	33
第 3 章 太阳辐射作用下金属构件温度试验	34
3.1 温度测量方法	34

3.1.1	温度测量方法概述	34
3.1.2	热电阻法	34
3.1.3	热电偶法	35
3.1.4	辐射温度计	36
3.1.5	测试方法选择	36
3.2	不同涂层钢构件与铝合金构件太阳辐射温度试验	37
3.2.1	试件设计	37
3.2.2	试验装置设计	38
3.2.3	试验过程	39
3.2.4	热电偶法试验结果	39
3.2.5	红外线测温枪试验结果	47
3.3	不同截面形式与空间方位的钢构件太阳辐射温度试验	49
3.3.1	试验目的	49
3.3.2	试验方案	49
3.3.3	测点布置	50
3.3.4	夏季太阳辐射作用下钢板试件试验数据分析	53
3.3.5	夏季太阳辐射作用下钢管试件试验数据分析	57
3.3.6	夏季太阳辐射作用下箱型钢管试件试验数据分析	58
3.3.7	夏季太阳辐射作用下 H 型钢试件试验数据分析	59
3.3.8	不同气象条件下钢构件试验数据分析	61
3.4	不同防护措施下矩形钢管构件太阳辐射温度实测	63
3.4.1	试验目的	63
3.4.2	试验方案	63
3.4.3	试验数据分析	64
3.5	不同膜材屋面下钢构件太阳辐射温度实测	68
3.5.1	试验目的	68
3.5.2	试验模型设计	69
3.5.3	测点布置	70
3.5.4	试验方案	71
3.5.5	试验测试过程	72
3.5.6	试验结果分析	73
3.6	天津东亚运动会自行车馆屋盖钢结构温度作用与温度应力实测	79
3.6.1	工程概况	79
3.6.2	应力与温度监测方案	80
3.6.3	应力与温度监测结果	82

第 4 章 太阳辐射作用下钢构件非均匀温度场数值模拟	86
4.1 太阳辐射	86
4.1.1 太阳常数	86
4.1.2 太阳光线方向角度参数	87
4.1.3 太阳辐射强度计算	89
4.2 基于 FEM 的钢结构太阳辐射非均匀温度场模拟方法	91
4.2.1 钢构件表面的热流类型	91
4.2.2 瞬态导热微分方程	93
4.2.3 边界条件	93
4.2.4 与空气间的热对流	94
4.2.5 长波辐射强度计算	94
4.2.6 阴影计算方法	94
4.2.7 有限元数值分析的实现	100
4.3 基于 FEM 的不同截面形式钢构件太阳辐射非均匀温度场模拟	102
4.3.1 数值模型中参数的取值	102
4.3.2 太阳辐射作用下钢板试件数值模拟	105
4.3.3 太阳辐射作用下钢板试件温度场参数分析	107
4.3.4 太阳辐射作用下钢管试件数值模拟	108
4.3.5 太阳辐射作用下钢管试件温度场参数分析	110
4.3.6 太阳辐射作用下箱型钢管试件数值模拟	112
4.3.7 太阳辐射作用下箱型钢管试件温度场参数分析	113
4.3.8 太阳辐射作用下 H 型钢试件数值模拟	114
4.3.9 太阳辐射作用下 H 型钢试件温度场参数分析	115
4.4 基于 FEM 的不同涂层钢板试件温度场数值模拟	116
4.5 基于 CFD 的钢结构太阳辐射非均匀温度场数值模拟方法	120
4.5.1 CFD 数值分析模型	120
4.5.2 太阳辐射作用下封闭方钢管温度场数值模拟	124
第 5 章 太阳辐射作用下大跨度建筑结构温度效应	128
5.1 山东茌平体育馆太阳辐射温度效应	128
5.1.1 工程概况	128
5.1.2 弦支穹顶叠合拱太阳辐射非均匀温度场数值模拟	132
5.1.3 弦支穹顶叠合拱结构的温度效应分析	135
5.1.4 支座刚度对弦支穹顶叠合拱结构温度效应的影响	137
5.1.5 合拢温度对弦支穹顶叠合拱结构温度效应的影响	138
5.1.6 钢拱刚度对弦支穹顶叠合拱结构温度效应的影响	139

5.1.7	钢拱与弦支穹顶结构不同合拢温度下的温度效应	139
5.1.8	索滑移对弦支穹顶叠合拱结构温度效应的影响	142
5.2	天津保税中心大堂屋盖太阳辐射温度效应	145
5.2.1	工程概况	145
5.2.2	太阳辐射作用下温度场分析	145
5.2.3	太阳辐射作用下弦支穹顶结构温度响应分析	146
5.3	天津天山海世界米立方屋盖太阳辐射温度效应	147
5.3.1	工程概况	147
5.3.2	天山海世界米立方钢屋盖温度实测方案	149
5.3.3	天山海世界米立方钢屋盖温度实测结果	151
5.3.4	非均匀温度场对树状结构的影响	155
5.3.5	不同温度工况对树状结构的影响	159
5.3.6	温度作用下树状支承与普通柱支承的结构性能对比	161
5.4	鄂尔多斯新建机场航站楼太阳辐射温度效应	163
5.4.1	工程概况	163
5.4.2	太阳辐射作用下非均匀温度场分析	164
5.4.3	太阳辐射作用下非均匀温度效应分析	166
5.5	秦皇岛首秦办公楼中庭太阳辐射温度效应	168
5.5.1	工程概况	168
5.5.2	参数取值	169
5.5.3	结果分析	169
5.5.4	温度响应分析	170
5.6	曹妃甸开滦储煤基地单层网壳结构太阳辐射温度效应	173
5.6.1	工程概况	173
5.6.2	太阳辐射作用下铝合金板的温度场数值模拟	174
5.6.3	铝合金网壳的太阳辐射温度效应	176
5.6.4	参数化分析	178
5.7	天津于家堡交通枢纽站房太阳辐射温度效应	179
5.7.1	工程概况	179
5.7.2	太阳辐射温度效应现场监测方案	183
5.7.3	太阳辐射作用下非均匀温度场分析	183
5.7.4	太阳辐射作用下非均匀温度效应分析	188
第6章	考虑太阳辐射作用的钢构件温度计算方法	197
6.1	概述	197
6.2	太阳辐射作用下钢板温度计算简化公式	198

6.2.1	钢板温度计算理论	198
6.2.2	钢板温度简化计算公式	198
6.2.3	钢板温度计算算例	203
6.2.4	简化计算公式结果与温度实测值对比	207
6.3	太阳辐射作用下矩形钢管温度计算简化公式	208
6.3.1	矩形钢管温度计算简化公式	208
6.3.2	矩形钢管温度计算算例	210
6.4	太阳辐射作用下圆钢管温度计算简化公式	214
6.4.1	圆钢管温度计算简化公式	214
6.4.2	圆钢管温度计算算例	217
6.5	太阳辐射作用下 H 型钢温度计算简化公式	219
6.6	基于年度极值的基本温度取值	222
6.7	温度作用确定的方法	226
	参考文献	228
	附录 基于年极值温度的各地区基本气温	231
	编后记	250

第 1 章 绪 论

1.1 大跨度建筑结构

随着我国经济的飞速发展和社会精神文化需求的日益增加,尤其借助北京奥运会、上海世博会、深圳大运会、广州亚运会和多届全运会以及我国高速铁路和民航事业大发展的契机,我国已建、在建和将要建造大量的公共建筑和工业建筑,如大型体育场馆、会展中心、火车站房、机场航站楼、大型厂房和仓库等,这类建筑以其优美的造型,往往成为一个城市的标志和经济文化活动的中心。空间结构由于其受力合理、自重轻、刚度大及形式活泼新颖而备受世界各国建筑师的青睐,成为大跨度建筑的首选结构形式。

我国空间结构在 20 世纪 50 年代末多采用薄壳结构和悬索结构,如北京火车站大厅和北京工人体育馆;60 年代多采用网架结构,如首都体育馆;80 年代较多地采用了网壳结构,如北京体院体育馆;进入 21 世纪,这些比较传统的近代空间结构,除薄壳结构外,均获得了长期蓬勃的发展,工程项目遍布全国各地。

同时,我国自 20 世纪 90 年代起开始采用索膜结构(如上海八万人体育场)、张弦梁结构(如上海浦东国际机场航站楼)、弦支穹顶结构(如天津保税区商务中心大堂)、索穹顶结构(如内蒙古伊金霍洛旗全民健身体育中心和天津理工大学体育馆)等一些轻质高效的现代空间结构。

目前,我国大跨度空间结构的规模和数量已经跃居世界前列,其中许多大跨度空间结构成为世界之最。例如,济南奥体中心体育馆弦支穹顶结构,直径 122m,如图 1-1 所示;国家体育馆双向张弦结构,跨度 $114\text{m} \times 144\text{m}$,如图 1-2 所示;山东东营黄河口模型试验厅张弦桁架结构,跨度 148m。这些大跨度空间结构极大地提升了我国土木工程的建造水平,使我国成为世界空间结构大国,并逐步成为世界空间结构强国。

近年来,随着大跨度建筑结构的快速发展,结构跨度不断实现突破,建筑造型也日益复杂,出现了很多布置大型室外构件或大面积透光性屋面的大跨度、超大跨度建筑钢结构工程。图 1-3 所示的鄂尔多斯东胜体育场开合屋盖结构,室外钢拱跨度达 330m;图 1-4 所示的国家体育场钢结构,跨度 $296\text{m} \times 332\text{m}$,屋面上弦采用透光率达 94% 的 ETFE 膜材,下弦采用透光率为 30% 的 PTFE 膜材;图 1-5 所示的天津天山海世界水上娱乐中心屋盖钢结构,跨度 $200\text{m} \times 140\text{m}$,部分屋面采用了

玻璃材料;图 1-6 所示的天津于家堡京津城际延长线交通枢纽站房螺旋线单层网壳结构,跨度 $143\text{m} \times 80\text{m}$,为目前国内跨度最大的双螺旋单层网壳结构,屋面采用了透光率较高的 ETFE 膜材。结构跨度的不断超越和透光性屋面材料的广泛应用,使得大跨度建筑结构对温度变化和太阳辐射越来越敏感,尤其是太阳强烈辐射作用下的非均匀温度作用,常常成为结构的控制荷载之一。

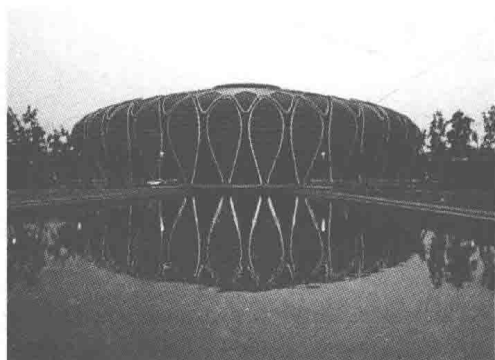


图 1-1 济南奥体中心体育馆



图 1-2 国家体育馆



图 1-3 鄂尔多斯东胜体育场



图 1-4 国家体育场

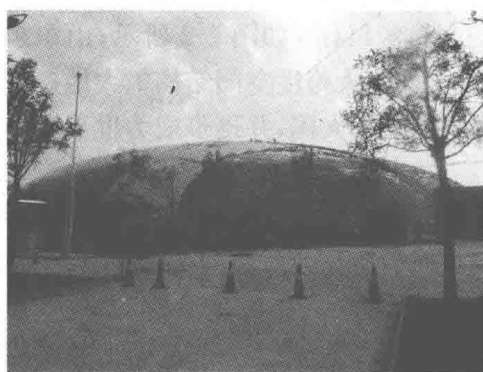


图 1-5 天津天山海世界水上娱乐中心

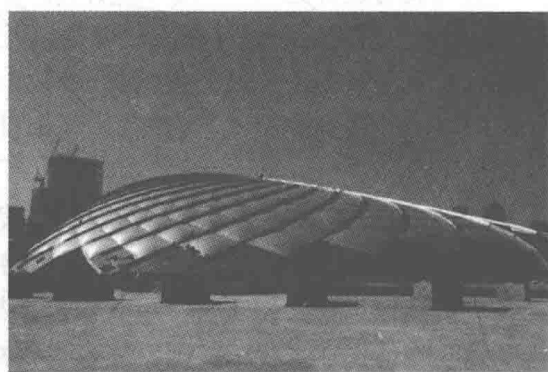


图 1-6 天津于家堡交通枢纽站房

1.2 结构温度作用

温度分布是指某一时刻结构内部与表面各点的温度状态。影响温度分布的主要因素有两种:①外部因素,如太阳辐射、冷气流、热气流、风、雨、雪等气候现象;②内部因素,如材料热物理性质、构件形状等。对于暴露于大气中的结构物,其构件表面与内部各点的温度时刻都在变化。由于材料的热胀冷缩,若结构为超静定结构,温度变化必然导致结构产生一定的变形和应力。这种温度变化在土木工程领域被称为温度作用。

作用在结构或构件上的温度作用,应采用结构服役阶段温度与施工合拢温度变化值来表示。由自然环境变化所产生的温度作用,一般可以分为三种类型:季节温度作用、骤然降温温度作用、太阳辐射温度作用。

(1) 季节温度作用。由季节变化导致的结构施工合拢温度与使用阶段温度的温差。

(2) 骤然降温温度作用。主要是强冷空气的侵袭作用和日落后夜间形成的内高外低温差。降温温差一般只考虑气温变化和风速这两个因素。

(3) 太阳辐射温度作用。工程结构的太阳辐射温度作用变化很复杂,影响因素众多,主要包括太阳短波辐射、周围环境温度、风速、地理纬度、结构物的方位和壁板朝向、附近地形地貌条件等。因此,工程结构物由太阳辐射变化引起的表面和内部温度变化,是一个随机变化的复杂函数。

各种温度作用特点如表 1-1 所示。

表 1-1 各种温度作用特点

温度作用	主要影响因素	时间性	作用范围	分布状况	对结构影响	复杂性
季节温差	缓慢温变	长期缓慢	整体	均匀	整体位移大	较复杂
骤降温差	强冷空气	短时变化	整体	较均匀	应力较大	较复杂
太阳辐射温差	太阳辐射	短时变化	局部性	不均匀	局部应力大	最复杂

GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》一般采用基本气温来计算建筑结构的温度作用,但对于金属结构等对气温变化较敏感的结构,宜考虑极端气温的影响,即应根据当地气候条件适当地增加基本气温 T_{\max} 和降低基本气温 T_{\min} 。基本气温一般指当地 50 年重现期的月平均最高气温 T_{\max} 和月平均最低气温 T_{\min} 。

对结构最大温升的工况,均匀温度作用标准值按式(1-1)计算:

$$\Delta T_k = T_{s,\max} - T_{0,\min} \quad (1-1)$$

式中, ΔT_k 为均匀温度作用标准值($^{\circ}\text{C}$); $T_{s,\max}$ 为结构最高平均温度($^{\circ}\text{C}$); $T_{0,\min}$ 为结构最低初始平均温度($^{\circ}\text{C}$)。

对结构最大温降的工况,均匀温度作用标准值按式(1-2)计算:

$$\Delta T_k = T_{s,\min} - T_{0,\max} \quad (1-2)$$

式中, $T_{s,\min}$ 为结构最低平均温度($^{\circ}\text{C}$); $T_{0,\max}$ 为结构最高初始平均温度($^{\circ}\text{C}$)。

结构的最高初始平均温度 $T_{0,\max}$ 和最低初始平均温度 $T_{0,\min}$ 应根据结构的合拢或形成约束的时间确定,或根据施工时结构可能出现的温度按不利情况确定。

计算结构或构件的温度作用时,常用材料的线膨胀系数 α_T ,如表 1-2 所示。

表 1-2 常用材料的线膨胀系数 α_T

材料	普通混凝土	钢,锻铁,铸铁	不锈钢
线膨胀系数 $\alpha_T/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	10	12	16
材料	铝,铝合金	钢丝束索	钢绞线索
线膨胀系数 $\alpha_T/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	24	18.7	13.8
材料	钢丝绳索	钢拉杆索	
线膨胀系数 $\alpha_T/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	19.2	12	

对于暴露于室外的结构、采用透光性屋面材料或施工期间的结构,宜依据结构的朝向和表面吸热性质考虑太阳辐射的影响,此时结构的温度作用具有强非均匀性和时变性。

太阳辐射作用下钢结构构件的温度要比气温高出很多,钢构件温度与空气温度的温差最高可超过 20°C 。因此,施工过程中应合理考虑和控制钢结构合拢温度,假如钢结构在炎热的夏季或者寒冷的冬季施工合拢,钢结构的年温差一般都在 60°C 以上,而对于两端铰接的钢构件而言, 60°C 温差引起的温度应力为 197.6MPa ,为 Q235 钢材设计应力的 84%,为 Q345 钢材设计应力的 57%。

1.3 太阳辐射对大跨度建筑结构的影响

随着布置大型室外构件或者大面积透光性屋面的大跨度、超大跨度钢结构工程不断涌现,使得太阳强烈辐射对结构的影响日显重要,不容忽视。目前进行结构设计及施工时,温度荷载一般采用历史最低和最高气温确定的一个整体、均匀的温度作用。然而,在太阳强烈辐射作用下,钢结构表面的温度受到太阳短波辐射、周围建筑物与天空的长波辐射、外部空气的自然对流换热、钢管内部和透光性屋面与吊顶夹层内的弱流动气体非线性对流传热、室内空调系统调节作用等多因素动态耦合作用,温度作用不仅超出气温很多,而且具有强非均匀性和时变性。然而,目前工程中对其了解并不充分,导致了钢结构钢材开裂、局部结构严重变形、结构整体破坏等各种工程事故。

在大跨度建筑结构的施工期内,太阳辐射作用下的时变温度作用会引起复杂

的温度残余应力、温度合拢施工控制偏差等施工缺陷,降低结构服役期内的工作性能,给工程带来重大安全隐患。2010年12月,耗资近十亿元的鄂尔多斯国际那达慕运动会赛马场发生主体结构坍塌,其主要原因就是带有较大施工缺陷的钢结构遭遇骤降温度,钢结构出现较大伸缩而发生垮塌。

在大跨度建筑结构的服役期内,太阳辐射作用下室外或透光性屋面下的钢构件会存在多种复杂的非均匀时变温度作用,而室内或非透光性屋面下的钢构件为相对稳定的均匀温度作用,二者温度场的非协调变化,将导致更加复杂的时变温度效应,引起显著的非均匀温度变形和非线性温度应力。这种非均匀时变温度作用有时可成为决定结构安全的主控因素,甚至引起局部结构严重变形、焊缝开裂、结构坍塌等工程事故。

现有的研究表明,在太阳强烈辐射作用下,夏季构件的最高温度可超过 60°C ,沿构件截面的非线性温度梯度可达 20°C ,不同构件间的温度差别可超过 20°C ;构件温度的日变化幅度可达 40°C ,年变化幅度可达 100°C 。温度场大幅度的复杂变化可导致非常大的温度应力和温度变形,引起结构失效。

目前,通过对多项重大工程结构的计算分析发现,通过整体均匀升温或降温来考虑温度作用的传统方法,已不能包络结构实际经历的温度作用,因此建议考虑结构实际经历的非均匀温度作用,否则,结构会存在重大安全隐患。

《建筑结构荷载规范》在2012年版本中增加了温度作用相关内容但未考虑太阳辐射-内外对流耦合作用下温度作用的时变性和强非均匀性,因此该规范不能对布置大型室外构件和透光性屋面的大跨度钢结构提供直接指导。国家行业标准JGJ 7—2010《空间网格结构技术规程》也未给出太阳辐射作用下大跨度空间结构的温度作用分析方法和设计原则,使得实际工程在太阳辐射作用下的分析设计无规范和理论可循,从而导致不合理甚至错误的设计,给工程带来重大安全隐患。

太阳辐射作用下大跨度建筑结构的时变温度场和时变温度效应已得到学术界和工程界的普遍关注,但由于涉及计算流体力学、传热学、气象学等多学科交叉,时变温度场和时变温度效应较为复杂。如何保证大跨度建筑结构在太阳强烈辐射作用下的结构安全性已是结构工程领域亟待解决的难题之一。

1.4 本书的主要内容

进行太阳辐射作用下大跨度建筑结构非均匀温度效应分析时,首先需要确定建筑结构表面的太阳辐射强度吸收系数以及膜材等透光性屋面的太阳辐射透射系数。作者通过数百组试验,采用紫外-可见-近红外分光光度计,测定了大跨度建筑钢结构常用涂料的太阳辐射吸收系数以及常用膜材的透射系数和吸收系数,可为钢结构的太阳辐射非均匀温度场分布分析提供支撑,具体内容将在第2章介绍。