

空间结构系列图书

铝合金空间网格结构抗震性能

孙国军 吴金志 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目（CIP）数据

铝合金空间网格结构抗震性能 / 孙国军，吴金志著
— 北京：中国建筑工业出版社，2023.9
（空间结构系列图书）
ISBN 978-7-112-29078-9

I. ①铝… II. ①孙…②吴… III. ①铝合金—建筑
结构—抗震性能 IV. ①TU395

中国国家版本馆 CIP 数据核字（2023）第 161719 号

铝合金材料具有较高的强度，与钢材相比自重更轻，且具有良好的耐腐蚀和便于回收等优点，并越来越多地应用于大型工程结构。在对空间结构及铝合金结构的发展现状简单介绍基础上，本书从铝合金材料、H 形截面构件和板式节点的力学性能入手，之后扩展到铝合金网壳结构，并详细介绍了铝合金网格结构的抗震分析方法及其抗震性能。本书共分为 5 章，第 1 章讲述空间结构及铝合金的发展动态；第 2 章讲述铝合金材料和构件性能；第 3 章讲述铝合金板式节点力学性能；第 4 章讲述铝合金网壳结构静力稳定性能；第 5 章讲述铝合金网壳结构抗震性能。

本书可供土木工程、结构工程、铝合金结构相关专业的设计和研究人员以及从事空间结构的设计分析人员参考使用，也可作为上述研究领域内硕士和博士研究生的专业参考书。

责任编辑：刘瑞霞 梁瀛元
责任校对：张 颖
校对整理：赵 菲

空间结构系列图书
铝合金空间网格结构抗震性能
孙国军 吴金志 著

中国建筑工业出版社出版、发行（北京海淀三里河路 9 号）
各地新华书店、建筑书店经销
国排高科（北京）信息技术有限公司制版
印刷厂印刷

开本：787 毫米×1092 毫米 1/16 印张：18½ 字数：454 千字
2023 年 9 月第一版 2023 年 9 月第一次印刷
定价：68.00 元
ISBN 978-7-112-29078-9
（41800）

版权所有 翻印必究
如有内容及印装质量问题，请联系本社读者服务中心退换
电话：（010）58337283 QQ：2885381756
（地址：北京海淀三里河路 9 号中国建筑工业出版社 604 室 邮政编码：100037）

空间结构系列图书

编审委员会

- 顾 问：蓝天董石麟沈世钊马克俭刘锡良严慧曹资
姚念亮张毅刚许立准
- 主 任：薛素铎
- 副主任：（按姓氏拼音排序）
陈志华高继领韩庆华胡鸿志黄达达李亚明李中立
刘中华罗尧治吴金志张其林周观根朱忠义
- 委 员：（按姓氏拼音排序）
白宝萍蔡小平陈务军崔家春耿笑冰韩更赞贺孝宇
胡洁雷宏刚李凯李明荣李雄彦刘枫刘小光
刘宜丰罗斌罗兴隆宁艳池欧阳元文瞿鑫任俊超
孙国军谭宁唐泽靖子王丰王浩王平王雄
王秀丽王元清王泽强王喆吴一红武岳向阳
徐隽薛海滨杨建叶峰灵张秀华赵伯友赵忠秋
支旭东钟宪华朱勇军

空间结构系列图书

序 言

中国钢结构协会空间结构分会自 1993 年成立至今已有二十多年，发展规模不断壮大，从最初成立时的 33 家会员单位，发展到遍布全国各个省市的 500 余家会员单位。不仅拥有从事空间网格结构、索结构、膜结构和幕墙的大中型制作与安装企业，而且拥有与空间结构配套的板材、膜材、索具、配件和支座等相关生产企业，同时还拥有从事空间结构设计与研究的设计院、科研单位和高等院校等，集聚了众多空间结构领域的专家、学者以及企业高级管理人员和技术人员，使分会成为本行业的权威性社会团体，是国内外具有重要影响力的空间结构行业组织。

多年来，空间结构分会本着积极引领行业发展、推动空间结构技术进步和努力服务会员单位的宗旨，卓有成效地开展了多项工作，主要有：（1）通过每年开展的技术交流会、专题研讨会、工程现场观摩交流会等，对空间结构的分析理论、设计方法、制作与施工建造技术等进行研讨，分享新成果，推广新技术，加强安全生产，提高工程质量，推动技术进步。（2）通过标准、指南的编制，形成指导性文件，保障行业健康发展。结合我国膜结构行业发展状况，组织编制的《膜结构技术规程》为推动我国膜结构行业的发展发挥了重要作用。在此基础上，分会陆续开展了《膜结构工程施工质量验收规程》《建筑索结构节点设计技术指南》《充气膜结构设计施工指南》《充气膜结构技术规程》等编制工作。（3）通过专题技术培训，提升空间结构行业管理人员和技术人员的整体技术水平。相继开展了膜结构项目经理培训、膜结构工程管理高级研修班等活动。（4）搭建产学研合作平台，开展空间结构新产品、新技术的开发、研究、推广和应用工作，积极开展技术咨询，为会员单位提供服务并帮助解决实际问题。（5）发挥分会平台作用，加强会员单位的组织管理和规范化建设。通过会员等级评审、资质评定等工作，加强行业管理。（6）通过举办或组织参与各类国际空间结构学术交流，助力会员单位“走出去”，扩大空间结构分会的国际影响。

空间结构体系多样、形式复杂、技术创新性高，设计、制作与施工等技术难度大。近年来，随着我国经济的快速发展以及奥运会、世博会、大运会、全运会等各类大型活动的举办，对体育场馆、交通枢纽、会展中心、文化场所的建设需求极大地推动了我国空间结构的研究与工程实践，并取得了丰硕的成果。鉴于此，中国钢结构协会空间结构分会常务理事会研究决定出版“空间结构系列图书”，展现我国在空间结构领域的研究、设计、制作与施工建造等方面的最新成果。本系列图书拟包括空间结构相关的专著、技术指南、技术手册、规程解读、优秀工程设计与施工实例以及软件应用等方面的成果。希望通过该系列图书的出版，为从事空间结构行业的人员提供借鉴和参考，并为推广空间结构技术、推动空间结构行业发展做出贡献。

中国钢结构协会空间结构分会 理事长
空间结构系列图书编审委员会 主 任
薛素铎

2018 年 12 月 30 日

序 言

中国现代铝合金结构的发展可以追溯到 20 世纪 90 年代后期, 天津平津战役纪念馆作为我国建造的第一座铝合金单层球面网壳, 跨度达到了 48.95m, 成为我国在铝合金发展方面的代表作。国外最早的大跨度铝合金空间结构是 1951 年建成的英国南方银行展厅“探索”穹顶, 为直径 111.3m 的单层球面网壳。美国跨度最大的铝合金结构是 1983 年在加州长海滩建造的用于停放水上飞机的穹顶, 该穹顶亦为单层球面网壳, 直径达到 125.6m。相对于世界上其他铝合金结构来说, 中国建造的首座铝合金网壳结构跨度并不算大, 但也是铝合金结构的有益尝试, 之后相当长时期内我国的铝合金结构技术水平也不高, 但我国科技人员对铝合金结构创新及设计的热情与努力是持续不断的, 从 1996 年至 2015 年这近二十年时间, 可以说是我国铝合金结构发展的蓄力时期, 这个阶段虽然没有较大跨度结构建成, 但从材料、构件、节点到结构体系都有不同程度的研究探索, 工程建设也有多方面实践, 为铝合金结构发展奠定了相当的基础。2015 年, 在我国南京建成的牛首山佛顶宫自由曲面网壳, 最大跨度达到了 130m, 结构体系先进, 最大悬挑 52.7m, 充分展现了我国铝合金行业作为后来者居上的能力, 一代又一代科研人员不畏艰难、勇往直前的努力, 让中国铝合金结构的发展达到了世界先进水平。

我本人作为空间结构研究者中的一员, 从 1987 年读研究生以来, 就投身于空间结构领域的科研和工程建设, 不仅见证了我国空间结构事业的蓬勃发展, 也一直关注乃至参与了铝合金结构的发展, 见证了铝合金结构作为空间结构的新材料新体系的代表, 从初期的缓慢推进到如今的快速蓬勃发展。2017 年北京工业大学的吴金志和孙国军两位老师告诉我, 他们申请的国家自然科学基金项目“铝合金单层球面网壳结构弹塑性稳定性及强震失效机理研究”(课题编号: 51778016)和北京市自然科学基金项目“铝合金单层柱面网壳强震失效机理研究”(课题编号: 8182006)获审批通过, 这也无疑是对他们, 更是对整个铝合金行业发展的鼓励、支持和有益的推动。以这两个基金项目和中国钢结构协会空间结构分会为依托, 北京工业大学团队对铝合金网壳结构进行了系统的研究, 并将其丰富的成果汇编成书。本书不仅包含了从铝合金材料、构件、节点到铝合金结构整体的力学性能分析, 还成体系地全面介绍了铝合金结构工程情况, 特别是铝合金单层球面网壳结构弹塑性稳定性

及强震失效机理的研究更是领先的，也充分体现了我国科研人员对铝合金结构的研究进展及科学技术的进步。

目前以铝合金结构体系分析研究为基础的专著还不多，相信本书的出版一定会为我国铝合金结构的发展奠定良好的基础，并为铝合金结构的设计与研究提供宝贵的参考设计资料。最后，很高兴为本书作序，愿与各位同仁们共勉。

陈志华
2023 年 8 月

前言

铝作为地球中最丰富的元素之一, 储量较大, 已经广泛地应用于各行各业中, 但铝本身的强度相对于其他金属材料较低。人们通过在铝中添加镁、硅及铜等金属元素形成了抗拉性能较好的铝合金材料。铝合金材料有较好的抗拉强度, 与同规格的钢材相比, 有自重轻、强度高、耐腐蚀好的优点。

从 20 世纪 40 年代开始, 在国外建筑行业铝合金得到了越来越广泛的发展与应用, 到 50 年代, 国外已经建立铝合金网壳结构, 并且逐渐地应用到桥梁、电厂、煤棚等重要领域中。但是我国相对于国外起步较晚, 到 20 世纪 90 年代开始, 铝合金结构在我国才逐渐发展。30 年来, 铝合金在建筑工程领域中得到了日新月异的发展, 从铝合金材料到铝合金构件, 再到铝合金节点, 最后到铝合金网壳结构。结构形式上从单层网壳发展到双层网壳, 再到网架及交叉梁系结构, 充分展示了铝合金结构的优越性能。尽管我国起步较晚, 但一代又一代空间人一直积极开展铝合金结构的理论分析、建造技术、数值模拟及试验研究等工作, 先后建成了如南京牛首山佛顶宫、上海南部的拉斐尔云廊等建筑。目前国内已建成几十座铝合金单层网壳结构, 如上海国际体操中心、上海马戏城、上海浦东科技馆、上海辰山植物园温室展览馆、成都郫县体育馆等项目均采用了板式节点铝合金单层网壳结构。铝合金网壳结构已经逐渐发展成为大跨空间结构领域中的重要角色之一。

目前, 铝合金网壳虽然得到了广泛应用, 但是对其材料性能、构件性能、节点性能、结构整体稳定性能、结构抗震性能的研究, 远没有钢网壳成熟。本书首先介绍空间结构及铝合金结构的发展现状, 然后从铝合金网壳结构用铝合金材料及构件入手, 研究铝合金板式节点的力学性能, 之后扩展到铝合金网壳结构, 系统地分析了铝合金网格结构的稳定性能, 可以为相关的铝合金网壳结构设计提供参考依据。本书共分为 5 章, 第 1 章讲述空间结构及铝合金的发展动态; 第 2 章讲述铝合金材料和构件性能研究; 第 3 章讲述铝合金板式节点力学性能研究; 第 4 章讲述铝合金网壳结构静力稳定性能研究; 第 5 章讲述铝合金网壳结构抗震性能研究。

作者们的许多研究生参与了课题研究及数据整理工作, 正是他们的辛勤劳动为本书成稿提供了丰富的素材, 特此向他们表示感谢。同时, 本书得到了国家自然科学基金项目“铝

合金单层球面网壳结构弹塑性稳定性及强震失效机理研究”（51778016）的资助，也得到了专家的悉心指导，在此表示衷心的感谢。

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，以便在今后的研究工作中加以改进。

作者
2023 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 空间结构	1
1.1.1 空间结构的发展	1
1.1.2 空间结构的体系	5
1.2 铝合金结构	14
1.2.1 铝合金结构的特点	14
1.2.2 铝合金单层网壳结构的应用	15
1.2.3 铝合金单层网壳结构的设计与研究进展	19
第 2 章 铝合金材料和构件性能研究	30
2.1 铝合金材料性能	30
2.1.1 建筑用铝合金材料	30
2.1.2 单调本构关系研究	32
2.1.3 循环本构关系研究	47
2.2 H 形铝合金构件的轴向拉压滞回性能	52
2.2.1 轴向拉压滞回性能试验	52
2.2.2 轴向拉压滞回性能数值模拟	63
2.2.3 轴向拉压滞回性能参数化分析	68
2.3 H 形铝合金构件偏心拉压滞回性能	72
2.3.1 偏心拉压滞回性能试验	72
2.3.2 偏心拉压滞回性能数值模拟	86
2.3.3 偏心拉压滞回性能参数化分析	95
第 3 章 铝合金板式节点力学性能研究	102
3.1 考虑起拱的铝合金板式节点静力性能	102
3.1.1 节点静力性能试验	102
3.1.2 节点精细化数值模拟	109
3.1.3 节点静力性能的参数化分析	117
3.1.4 起拱后铝合金板式节点弹性极限承载力理论研究	124
3.2 考虑起拱的铝合金板式节点抗震性能	126
3.2.1 节点抗震性能试验	126
3.2.2 节点精细化数值模拟	133
3.2.3 节点抗震性能参数化分析	137

第 4 章 铝合金网壳结构静力稳定性能研究	140
4.1 铝合金单层球面网壳静力性能研究	140
4.1.1 铝合金单层球面网壳静力性能试验	140
4.1.2 铝合金单层网壳数值模拟	151
4.2 铝合金单层球面网壳稳定失效模式研究	173
4.2.1 稳定失效数值模拟	173
4.2.2 稳定失效模式及机理	174
4.2.3 破坏模式判别标准	180
4.2.4 钢和铝合金网壳静力稳定性对比	181
第 5 章 铝合金网壳结构抗震性能研究	184
5.1 铝合金单层球面网壳振动台试验	184
5.1.1 振动台试验设计	184
5.1.2 自振特性分析	195
5.1.3 弹性阶段试验现象与分析	196
5.1.4 弹塑性阶段试验现象与分析	202
5.2 铝合金单层球面网壳抗震性能分析及强震失效机理	207
5.2.1 多尺度有限元分析模型	207
5.2.2 数值模拟结果	209
5.2.3 足尺结构地震响应分析	215
5.3 铝合金单层柱面网壳振动台试验	228
5.3.1 振动台试验设计	228
5.3.2 自振特性分析	237
5.3.3 弹性阶段试验现象与分析	238
5.3.4 弹塑性阶段试验现象与分析	249
5.3.5 网壳倒塌试验现象与分析	254
5.4 铝合金单层柱面网壳抗震性能分析及强震失效机理	257
5.4.1 弹性阶段抗震性能数值模拟	257
5.4.2 弹塑性及倒塌阶段数值模拟	261
5.4.3 足尺结构地震响应分析	265
参考文献	276

