

王双军 陈先明 著

“水立方” ETFE 充气膜结构技术



化学工业出版社

王双军 陈先明 著

TU245.3
W352

“水立方”

ETFE

充气膜结构技术



化学工业出版社

· 北京 ·

TU245.3
W352

本书结合国家游泳中心（“水立方”）屋面和墙面围护系统的膜结构工程的设计与施工实践，详细介绍了 ETFE 充气膜结构系统的技术原理和功能特点，包括材料、性能、制造与施工技术 etc。

本书可供从事建筑幕墙专业的技术人员和施工人员、建筑设计师、建筑业主、开发商等建筑业界人士以及关注“水立方”及其膜结构外衣的人士阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

“水立方”ETFE 充气膜结构技术/王双军，陈先明著.
北京：化学工业出版社，2010.3
ISBN 978-7-122-07586-4

I. 水… II. ①王…②陈… III. 游泳池-体育建筑-
充气结构：薄膜结构-结构设计-中国 IV. TU245.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 004679 号

责任编辑：马燕珠 郭乃铎

文字编辑：陈 喆

责任校对：宋 玮

装帧设计：尹琳琳

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 18 1/4 彩插 4 字数 363 千字 2010 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：68.00 元

版权所有 违者必究

京化广临字 2009—41 号

序

作为 2008 年北京奥运会的标志性建筑之一，被称为“水立方”的国家游泳中心，以其简洁的立方体造型和覆盖内外表面的大小气枕立面而令人耳目一新，这个新型游泳馆的出彩之处在于其外墙和屋面结构设计。通过精密的构思，这些由钢构架分隔而成的形状各异的气枕恰恰成为建筑的承重和围护构件，真正融建筑与结构设计于一体。用于覆盖气枕的材料采用了一种 ETFE 膜材，总面积达十万平方米，是目前世界上规模最大、声光热要求最高、构造最为复杂的 ETFE 气枕围护结构。

自 20 世纪 80 年代以来，采用新型材料的膜结构在我国得到迅猛发展。用于膜结构的两种主要膜材，即涂敷聚四氟乙烯（PTFE）的玻璃纤维织物和涂敷聚乙烯（PVC）的聚酯织物，其技术已发展得相当成熟，被广泛用于体育建筑、展览中心、交通服务设施等。和上述两种膜材不同的是另一种非织物材料，即挤压成形的乙烯-四氟乙烯聚合物（ETFE）。它虽然已经生产了好多年，但在膜结构中却没有得到成规模的应用，直到近几年才在英国的伊甸园植物园和德国的安联体育场采用 ETFE 建成了大面积的充气膜结构，从而西方国家也掌握了比较成熟的技术。在中国，对 ETFE 充气膜结构几乎没有任何了解，这一技术领域还是空白，因此对于“水立方”，设计与施工技术几乎是从零开始的。通过大量的调研、试验和技术攻关，这样一个举世瞩目的膜结构工程终于实现了。

本书作者王双军是沈阳远大铝业工程有限公司的总工程师，长期以来从事于幕墙结构的开发研究与施工实践，此次又参与国家游泳中心充气膜结构的施工。他亲历了设计、研发和施工安装的全过程，积累了丰富的经验。现在他将这些材料编写成书，意义非常重大。书中详细地论述了从设计、制造、安装一直到运行维护等一整套技术，是一本关于 ETFE 膜结构的很有价值的参考书。相信本书的出版将推动 ETFE 充气膜结构的技术发展，并且进一步促进中国膜结构的推广与应用。

中国建筑科学研究院建筑结构研究所 研究员

中国钢结构协会空间结构分会 名誉理事长

中国钢结构协会空间结构分会 膜结构专业委员会 主任委员



2010 年 1 月

前言

Foreword

随着北京国家体育场的奥运火炬缓缓地熄灭，举世瞩目的北京第 29 届夏季奥林匹克运动会落下了帷幕，画上了圆满句号。这是一届规模宏大、盛况空前的奥运会，也是一届成功的、完美的奥运会。无论是精彩的奥运比赛、周密系统的赛事组织，还是个性鲜明的比赛场馆、周到细致的志愿服务，都给人们留下了深刻的印象，难以忘怀。正如国际奥委会主席罗格先生（Mr. Jaques Rogge）在闭幕式上总结发言时给予的评价：“These are truly exceptional Games!” 这是一届真正无与伦比、绝无仅有的奥运会。

这是中国第一次举办如此规模的世界性体育盛会，奥运会承载着中国人多年以来的梦想和希望。中国政府和人民倾注了极大的关注和热情以及巨大的投入。中国人以其勤劳和智慧，创造了一个又一个奇迹，将一届完美无缺的奥运会呈献给世人。通过本届奥运会的成功举办，让世界更多地了解了中国，也让此前来自西方的一些不和谐的声音悄然消失，转而对中国刮目相看。匠心独具、气势恢宏的奥运会开幕式和闭幕式，从一个侧面显示出中国式集体力量和智慧的强大，让每一个中国人为之骄傲和自豪。这是继 2008 年初的雪灾和“5. 12”汶川大地震之后，中国人的民族情感再一次得到强烈地激发，民族的团结、自信心和凝聚力得到极大地增强。

北京奥运会给人们留下了恒久的记忆和无限的感慨，同时，轰轰烈烈的比赛结束后，人们也在从不同侧面进行认真地思考和总结，从不同角度分析和解读，从而让奥运会激发出来的民族精神和情感、智慧和力量在奥运会后得到进一步发挥和发扬，对今后经济建设、社会发展和文明进步，起到持续长久的推动作用。

北京奥运会的成功，得益于中国共产党和政府的英明领导下的安定团结的社会政治局面，得益于和谐、团结、向上的民族精神，也得益于中国不断进步的社会文明和日益强大的经济基础。作为中国人，我们不仅仅为中国体育事业蓬勃

发展、跻身于世界体育强国行列而感到骄傲，更多的是为我们在经济、科技和文化等方面在世界上越来越重要的地位和影响而感到自豪。北京奥运会给人们留下深刻印象的不只是开闭幕式的空前盛况、比赛场面的精彩绝伦，抑或是中国军团首次位列金牌榜首的喜悦、多项世界纪录被改写的惊叹，而承办奥运比赛的31个风格各异的比赛场馆，则更是令人赏心悦目，令人惊叹。奥运赛后到比赛场馆参观的人群络绎不绝，每天数以万计的观众就是一个真实的写照。

本届奥运会新建场馆11个，改扩建场馆12个，临时场馆8个。其中，最令人瞩目的国家体育场“鸟巢”和国家游泳中心“水立方”，双双被美国《商业周刊》评选为世界十大新建筑奇迹之冠亚，而“水立方”则在美国的《大众科学》评选的“100项最佳建筑科技成果”中位居榜首。分立在北京中轴线北端两侧的“鸟巢”和“水立方”，作为本届奥运会的主要比赛场馆，同时也是本届奥运会的标志性建筑，集中体现了北京奥运会的三大核心理念：绿色奥运，科技奥运，人文奥运。

“水立方”作为封闭式高标准的室内水上比赛场馆，采用了多项先进的、具有高科技含量的建筑技术和节能环保技术，成为实现绿色、科技和人文奥运理念的典范。本届奥运会的游泳、跳水 and 花样游泳项目的全部比赛在“水立方”举行，共有44块金牌在这里产生，并有21人次在这里刷新了世界纪录，美国水中飞人菲尔普斯在这里勇夺8金，改写了7项世界纪录。对于运动员，用他们自己的话说，这里是游泳的天堂、破纪录的福地。

应该说，这些骄人成绩的取得，不仅与运动员自身竞技水平的提高有直接关系，而且与“水立方”通过高科技手段给运动员和观众创造了舒适的环境有着不可分割的关系。这些高科技手段包括先进的泳池设计和水处理技术、适宜的水温控制和室内及泳池区域空气温度的控制、清新舒适的空气环境以及合理的光照环境控制和声环境控制等，使得运动员的竞技水平得以超常发挥。采用高科技的同时，“水立方”还采用了多项节能和环保技术，建筑总体上节能达到了30%。人们对这个神奇的建筑充满惊奇和慨叹，甚至给“水立方”起了一个新名字——“水魔方”，更是给这座梦幻般的建筑平添了神秘的色彩。

“水立方”主要采用的节能技术包括先进的采暖空调系统及其控制系统和其他节能环保技术，水资源的综合利用及水循环处理技术，以及采用高效节能光源与照明控制技术等。尤其采用了环保节能型的新材料——ETFE薄膜制成的气枕作为内外墙面和屋面的围护结构，这种全新的围护结构体系具有重量轻、高保温、高透光、耐老化、耐腐蚀等突出特点，是“水立方”整个建筑实现高效节能与环保的重要因素。应该说，ETFE充气膜结构围护系统，对于“水立方”建筑效果和建筑主题的体现、建筑功能及物理性能指标的实现，起到了至关重要的作用。

“水立方”是ETFE充气膜结构围护系统在国内首次应用的建筑，也是目前世界上规模最大、构造最为复杂、技术和施工难度最高的ETFE充气膜结构工程。工程设计和施工过程中，在引进消化国外原有技术的基础上进行了大胆的自主创新，解决了许多国内外前所未有的课题，填补了多项国内外空白，并专门为本项目制定了《国家游泳中心屋面及墙面ETFE装配系统工程技术及施工质量验收标准》，形

成了从设计、制造、施工安装,到质量验收以及运行过程中的电子监控及维护维修等一整套完整技术,其中部分专项技术达到国际领先水平,有5项专有技术已申报了国家发明专利。“水立方”的成功建设和卓有成效的使用效果,充分验证了ETFE充气膜结构体系作为建筑外围护系统的特点和突出优势,推动了世界范围内ETFE充气膜结构的技术发展,同时也带动了该技术在我国的建筑领域的应用和发展。

作为国内大型建筑幕墙公司和“水立方”项目管理公司的技术负责人,笔者有幸参与了“水立方”膜结构工程的设计和施工过程,主持了设计和施工过程中的全部技术攻关,组织进行了大量的性能试验和性能测试,解决了一系列技术和施工难题,从中也总结和积累了一定的经验。

现代建筑业的发展不断催生出新的建筑形式、建筑技术和建筑材料,而新的建筑形式、新的材料和技术的产生,又会使富有创意的建筑设计理念的完美实现成为可能。在这样相互依存、相互促进和相互推动的循环发展过程中,人们需要以敏锐的触角,去努力发掘、了解、掌握和应用层出不穷的新技术,方能使现代建筑设计不断推陈出新,建筑功能日趋完美,建筑技术日新月异。尽管“水立方”ETFE充气膜结构工程的成功建设,使得世界ETFE充气膜结构技术又有了进一步的完善和提高,但我们应该看到,在建筑艺术百花齐放、建筑技术高速发展的今天,ETFE充气膜结构技术在我国的的应用还处于很初级的阶段,对这种全新的建筑形式和技术的研究和应用已经十分必要,甚至是当务之急。只有了解了这种新建筑形式的特点和优势所在,掌握了这一技术的原理,才有可能将其合理地应用到建筑实践中,从而推动ETFE充气膜结构技术的发展及在我国建筑领域的应用。

为使更多的人了解“水立方”神奇的膜结构外衣,使建筑界的业主和开发商、建筑师以及建筑幕墙行业的相关人员深入了解ETFE充气膜结构系统的技术原理和功能特点,从而进一步推动该技术和系统在我国建筑领域的广泛应用,笔者愿将所掌握和了解的相关技术呈现给建筑界同仁和关注“水立方”、关注ETFE充气膜结构技术乃至建筑幕墙技术的业界同仁,这正是编写本书的目的所在。

然而,尽管笔者在“水立方”之前就已对ETFE充气膜结构技术进行了大量的调查研究和实地考察,并亲历了“水立方”ETFE充气膜结构工程设计和施工的全过程,但毕竟这是第一个工程,所涉及的范围和所总结的经验有限,加之时间仓促,难免有不足之处,还望谅解。笔者更希望此书能起到抛砖引玉的作用,借此引起业界同仁对该技术领域的广泛关注,对有关技术问题展开广泛的讨论甚至争论,进而推动我国ETFE充气膜结构体系技术乃至建筑外墙技术的发展和提高。

本书在编写过程中,沈阳远大董事长高级助理段铁汉,“水立方”膜结构工程项目经理于兰松,施工团队的刘大志、邵长征等,主设计师刘建国,设计团队的刘建涛、曾庆伟等,生产制造及工艺团队的石振宇、陈德莱等,以及企划中心的李鹏等,提供了极大的支持和帮助,在此一并表示诚挚谢意。

著者

2010年2月

目录

Contents

第一章 绪论

第一节 “水立方”简介	3
一、“水立方”概况	3
二、“水立方”的建筑设计理念	5
三、“水立方”的结构设计原理	8
四、ETFE 充气膜结构与“水立方”	11
第二节 ETFE 充气膜结构技术综述	17
一、ETFE 充气膜结构技术发展简史	17
二、ETFE 充气膜结构典型工程简介	21
三、ETFE 充气膜结构体系基本构成原理	29

第二章 ETFE 膜材及其特性

第一节 概述	34
第二节 ETFE 膜材的物理性能	36
第三节 ETFE 膜材的力学性能	38
第四节 ETFE 膜材的热性能	40
第五节 ETFE 膜材的化学性能	41
第六节 ETFE 膜材与其他材料性能的综合比较	43
第七节 ETFE 膜材产品规格	44
第八节 水立方所用 ETFE 膜材	46

第三章 ETFE 充气膜结构系统建筑设计

第一节 建筑效果设计	51
一、ETFE 膜结构影响建筑效果的主要因素分析	51
二、建筑效果设计与视觉测试	53
三、ETFE 充气膜结构建筑效果的最终确定	58
第二节 景观照明设计	59
一、系统综述	60

二、系统配置	60
三、景观照明系统主要场景功能描述	72
第三节 热工性能设计	81
一、ETFE 充气膜结构的保温隔热原理	82
二、保温性能检测	86
三、热工性能的主要影响因素	88
四、热工性能设计与综合分析	94
第四节 声学性能设计	109
第五节 采光性能设计	117

第四章 系统结构设计

第一节 概述	124
第二节 气枕结构受力特性	125
第三节 “水立方”气枕特性与荷载	129
第四节 气枕设计	133

第五章 系统构造设计

第一节 立面系统构造设计	144
一、系统构成原理及功能描述	145
二、系统密封原理	149
第二节 屋面系统构造设计	151
一、系统构成原理及功能描述	152
二、密封防水原理	160
三、屋面排水系统	163
第三节 天花系统构造设计	165
一、系统构成原理	165
二、系统密封原理	173
第四节 “泡泡吧”系统构造设计	176
一、系统构成原理	177
二、系统密封原理	181
第五节 充气系统	182
一、充气管道和阀门	184
二、充气单元	190
三、电子监控系统	196

第六章 制造与施工技术

第一节 概述	200
第二节 ETFE 气枕制造	203
一、ETFE 膜材裁剪	204
二、ETFE 膜材焊接及气枕制造	207
第三节 夹具及天沟制造	213
一、铝合金夹具制造	213
二、天沟制造	214
第四节 施工安装	217
一、施工培训	217
二、施工措施及施工工艺	221
三、创新性施工技术	255

第七章 质量控制、系统运行与维护

第一节 质量控制	262
一、概述	262
二、制造过程质量控制	263
三、安装过程质量控制	266
第二节 系统运行与维护	273
一、系统运行管理	273
二、清洗与维护	274

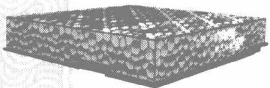
参考文献



第一章



绪 论



ETFE（乙烯和聚四氟乙烯的共聚物）充气膜结构技术在欧美等西方国家的开发和应用已有近 30 年的历史，在技术、材料和工艺上比较成熟。而对于我国这个世界上最大的建筑市场，在“水立方”之前，这一技术领域尚属空白，没有任何建筑采用 ETFE 充气膜结构，人们对这种全新的建筑形式及其功能和技术特点也没有任何了解。“水立方”是我国第一个采用 ETFE 充气膜结构系统作为围护结构的建筑，也是目前世界上规模最大的 ETFE 充气膜结构建筑。不仅如此，为使围护结构满足建筑功能的需求，“水立方”还首次采用了双层气枕构造，用以提高系统的热工性能和通风性能，是构造最为复杂、技术和施工难度最高的 ETFE 充气膜结构建筑。首次采用就要创造如此多的世界之最，开创历史先河，而且要应用到如此重要的奥运建筑上，这无疑是对 ETFE 充气膜结构系统的设计和施工提出了严峻的考验和挑战。

设计人员和施工人员深知此重任的艰巨性和复杂性，投入全部精力，进行了大量周密细致的工作，为此也付出了艰辛和汗水。他们深入研究了相关资料和以往相关的工程实例，并多次组织相关人员进行实地考察。对设计方案进行了全面缜密的考虑，并采用专用计算机软件对系统的物理性能进行分析研究和比较，设计方案经过了多次讨论和改进才初步确定下来。设计过程中，还针对系统的各项物理性能，组织了多项专题科研攻关，并进行了大量的科研试验和性能检测，以验证设计的合理性和有效性，给设计工作提供充分的依据和重要参考。同时，对于重要的科研课题，还多次组织国内外相关专家进行专题研讨，并审查确定最终的设计方案。

对于施工，更是从零开始，没有任何膜结构施工经验，却要担负起如此重要工程和难度如此之大的 ETFE 膜结构工程，施工人员承担着巨大的压力。为保证施工顺利进行，在现场安装正式开始之前，施工人员进行了大量的研究和精心的准备。制作了各种不同大小的模型，反复进行模拟安装，从中摸索总结经验，并聘请国外有经验的施工人员做施工技术指导。经过研究和模拟实践，制订出一整套施工组织方案，进行了多次研究、反复讨论推敲，并组织有关施工方面的专家进行讨论和审查，最终形成了完善的、系统的、适合于国情和适用于“水立方”工程的施工方案，在实际工程的施工实践中，又对这一方案进行了进一步的改进和完善。在整个施工过程中，创造性地开发了多项前所未有的施工技术。

为确保工程质量，项目团队还专门针对“水立方”工程，制定了质量验收标准，作为工程专项技术标准，在北京市建委备案。此标准对于制作和施工的每个具体操作细节，都提出了明确严格的质量要求，是工程操作过程中严格执行的技术和质量控制标准，同时也是质检人员和施工监理人员进行质量检查和验收的依据。

所有这些创造性的工作，都凝结着设计和施工人员大量的心血和汗水，经过两年多的艰苦工作和不懈努力，终于取得了圆满的成功。“水立方”ETFE 充气膜结构工程的成功建设，不仅为世人呈献了一座美轮美奂的充满神奇色彩的北京奥运会标志性建筑，而且使这座建筑成为采用高科技手段打造出绿色节能型奥运建筑的典



范。同时,从建筑技术角度来看,进一步完善和提高了 ETFE 充气膜结构系统的设计和施工技术水平,推动这一技术在我国建筑领域的推广和应用,具有划时代的历史意义。



第一节 “水立方”简介

国家游泳中心——“水立方”是 2008 年北京第 29 届奥运会和残奥会的主要比赛场馆之一,是国家奥林匹克公园内的最重要的建筑之一。奥运会和残奥会期间,这里承担了全部的游泳、跳水和花样游泳比赛。“水立方”是一座建筑艺术与建筑技术完美结合的新型现代建筑,通过多项高新技术、新型材料和节能环保技术的采用,以及制造与施工技术的创新与应用,集中体现了北京奥运会“绿色奥运”、“科技奥运”和“人文奥运”的三大理念,对北京奥运会的成功举办起着至关重要的作用。奥运会和残奥会之后,“水立方”已成为北京市的标志性建筑之一。

一、“水立方”概况

“水立方”坐落于北京奥林匹克中心区 B 区,北京市中轴线北端西侧,与国家体育场“鸟巢”隔路相望。“水立方”长宽均为 177.1m,高 31.7m。总占地面积 63000m²,建筑面积 80000m²。总体上,“水立方”内部由南北向和东西向的两道隔墙将整个平面划分为 4 个主要功能区(见图 1-1):

(1) 比赛大厅 是建筑的主要功能区。内部净空尺寸为 126m(南北向长)×116m(东西向宽)×24m(高,不含泳池和跳水池的深度)。用于奥运会和残奥会期间的游泳、跳水和花样游泳比赛。

(2) 多功能厅(热身池) 位于比赛大厅西侧,内部平面净尺寸为 126m×46.7m。一层设有 25m×50m 的标准泳池,用于奥运会和残奥会期间训练和热身泳池,赛后可用于训练泳池,也可用于对公众开放的游泳馆;二层为室内综合运动场,可用于室内篮球场、网球场或溜冰场等。

(3) 嬉水乐园 位于比赛大厅南侧,内部净平面尺寸为 143m×39.5m。内部



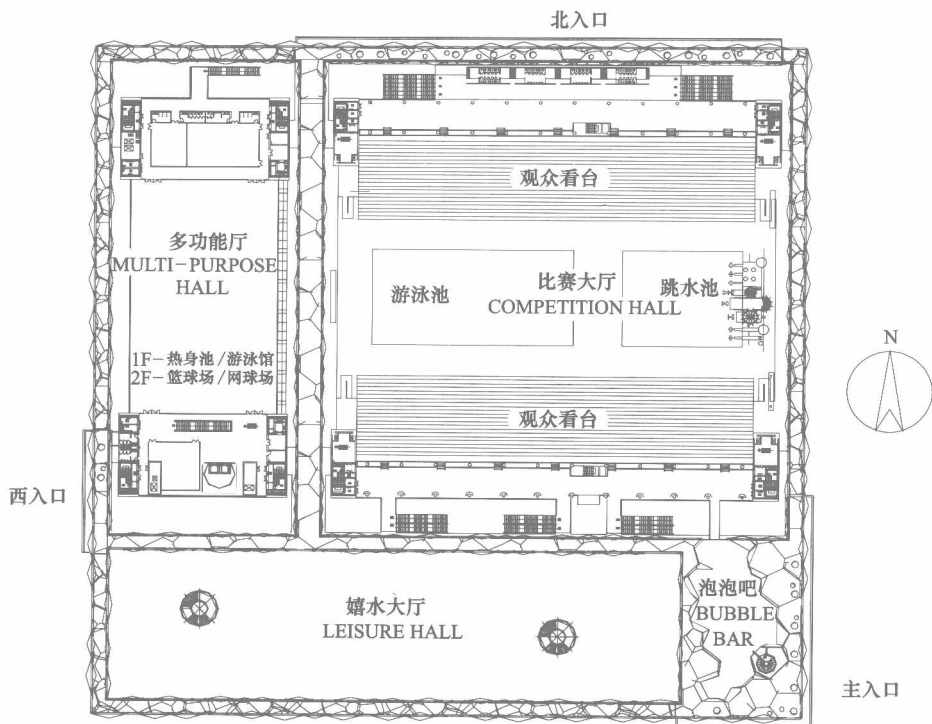
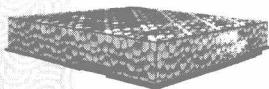


图 1-1 “水立方”功能区划平面图

设有多种先进的水上娱乐设施，主要用于赛后对公众开放的水上休闲娱乐场所。

(4) 泡泡吧 位于建筑的东南角二层，戏水乐园的东侧，即“水立方”观众主入口的上部。主要用于赛后对公众开放的休闲酒吧。

比赛大厅中间为游泳池和跳水池，东西向分布。游泳池为国际标准泳池：50m×25m，水深 3m，用于游泳和花样游泳比赛；跳水池为 30m×25m，水深 4.5～5.5m，用于跳台和跳水比赛。分列在泳池南北两侧（即比赛大厅南北两侧）的观众席，共有 17000 个座位，是目前世界上最大的室内游泳馆。每侧看台由低至高分别由两部分组成。其中，较低的区域，即靠近泳池的区域，看台由钢筋混凝土制成，为永久看台，共有 6000 个座位；较高的区域，即离泳池较远的看台区域，是用钢结构制成的临时看台，共有 11000 个座位。按照设计规划，临时看台在奥运会及残奥会结束后将被拆除，并在该区域建起宽度约东西走向的两座小楼，作为商业用途或作为写字间等。届时，“水立方”将拥有 6000 个观众坐席，仍将符合承办国际大型游泳、跳水、花样游泳及水球等比赛的标准。

“水立方”是 2008 年北京奥运会的主要比赛场馆之一，同时，又是本届奥运会中唯一一座由海外华人华侨集资捐建的比赛场馆。可以看出，在赛时这是一座高标准、高档次的游泳馆，而在赛后，更是一座兼具观赏性、功能性和实用性的综合性运动休闲类建筑。不同于以往奥运建筑在奥运比赛后，除举办一些其他比赛和文艺



演出以外,无法他用,被闲置,甚至无法维持自身运行的状况。

“水立方”的比赛大厅在奥运会和残奥会比赛之后,可根据需要拆除临时看台,仍然拥有 6000 个固定坐席(其中 2000 个坐席可拆除),可以继续承办国际大型比赛,无赛事时,可以作为向公众开放的游泳馆,也可作为举办大型晚会、演唱会等的场地;赛后在临时看台处建起的商业建筑或写字间,可以使建筑空间得到更充分有效的利用,达到功能最大化。

多功能厅分为上下两层,奥运比赛后,底层可作为训练泳池或对外开放的游泳馆,上层空间可以容纳三个网球场或两个篮球场或一个溜冰场,赛后可以根据需要建造成对公众开放的室内篮球场、网球场或溜冰场。嬉水乐园在奥运期间和奥运比赛后的一段时期,可用于承办大型展览,如作为奥运主题展示中心等,而其长远期的规划,是作为对公众开放的水上乐园,以中部的造浪池为中心,并设有水滑道、漂流河、娱乐池区及水上景观等。

“泡泡吧”是一个别具一格的休闲酒吧,人们在运动娱乐后,或在观看比赛和参加其他活动后,可以来这里小憩。在这里,品味香醇咖啡和浓茶美酒的同时,可以享受异样空间的感觉,仿佛置身于晶莹剔透的“水泡”之中,还可以近距离观赏和接触魔幻般的“泡泡”。

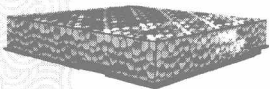
这些建筑功能,在“水立方”最初的设计中,已经充分地考虑,并对赛后的运营进行了详细的分析和论证。总体上,维持建筑的正常运行和维护,应该不成问题,而且由于“水立方”在奥运比赛期间的影响力和人们的关注程度远远超过预期,人们有理由相信,“水立方”赛后的合理运营,可以带来相当可观的经济效益。

二、“水立方”的建筑设计理念

“水立方”最初的设计灵感和理念,来源于建筑功能主题以及中国传统建筑文化与现代建筑设计理念的交融,当然也与“鸟巢”有着密不可分的联系。“鸟巢”的设计方案是先确定的,国家游泳中心与国家体育场作为奥林匹克公园的标志性主体建筑,自然应该与“鸟巢”相互联系,协调一致,共同体现北京奥运会的主题理念。

早在 2003 年初,作为 2008 年北京第 29 届奥运会主会场的国家体育场的建筑设计方案就已确定。由赫尔佐格与德梅隆(Herzog & de Meuron)设计的外观形态酷似“鸟巢”的国家体育场,带着深刻的寓意展现在人们面前。“鸟巢”是孕育生命和未来的地方,它是北京奥运会的象征,代表着正在发展壮大的中国,孕育着中国强盛的生命和光明美好的未来。巨大的建筑体量,由 48 榀双向布置的箱形钢梁斜向交织在一起,形似“鸟巢”的“枝干”。钢梁截面尺寸多为 $1\text{m} \times 1\text{m}$,最大的 $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$,最小的 $0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$,钢梁最大悬挑达 120 余米。巨型钢梁架起的巨大鸟巢,铸就了雄浑而强悍的气势,充满了阳刚之气。透过巨型钢架展露出来





“水立方” ETFE充气膜结构技术

的，是内部看台背面的鲜艳的红色，寓意生命的炽烈和强盛。“鸟巢”的建筑形态则体现了中国传统建筑文化中的重要元素——“圆”。一方面，“鸟巢”的平面形状为椭圆形，长轴 332.3m，短轴 296.4m，相差不大，总体上接近圆形；另一方面，其圆润流畅的顶部曲面，是取自一个巨型圆环的内环表面的一个局部，因此与圆形有着不可分割的联系（见图 1-2）。

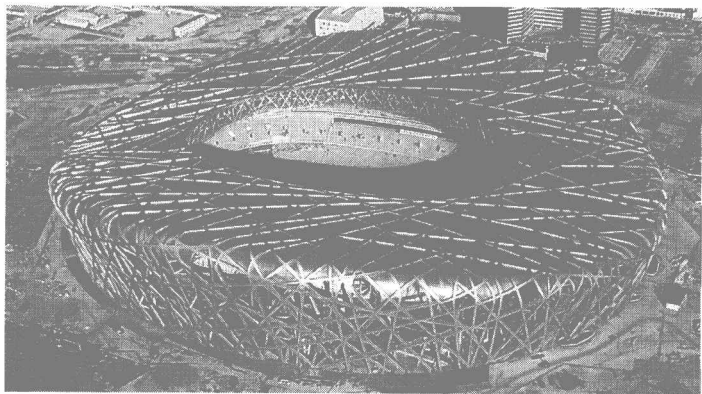


图 1-2 国家体育场——“鸟巢”

作为奥林匹克公园中心区的两大主体建筑之一，与“鸟巢”隔路相望的国家游泳中心，就建筑形态而言，势必要考虑与“鸟巢”相互协调的关系，并尽可能使两者形成和谐共生、对立统一的交融关系。应该说，“水立方”的建筑设计，来源于建筑师的灵感，更确切地说，是来源于建筑师对中国传统建筑文化、现代建筑技术和材料技术、奥运理念及建筑功能、与周边建筑 and 环境的协调等诸多方面的深入了解和深刻理解，是经过全方位综合考虑，将各方面因素巧妙有机地融合而形成的伟大创意。

由中国建筑总公司、中建国际深圳设计院、澳大利亚 PTW 建筑事务所和悉尼 ARUP 工程顾问有限公司共同组成的设计团队，在最初做国家游泳中心的设计方案时，就已充分地考虑到，在建筑形态上，国家游泳中心要与“鸟巢”的和谐统一的、互相对比和映衬的关系。

从“形”上看，“鸟巢”总的形体元素主要表现为圆形。圆形是中国建筑文化的重要形体元素之一，如果国家游泳中心的基本形体元素也是圆形，可能也会形成一种简单的协调，但缺乏对比和映衬关系，而且由于体量较小，只能形成依从关系，又不能跳出体育馆类建筑的传统圆形俗套，缺少个性。于是，建筑师的灵感触及到中国建筑传统文化中另一个重要元素——“方”形。“方”和“圆”，都是中国传统建筑中最常见的元素，中国很多传统建筑采用方形，尤其在北京，方形建筑随处可见。如果采用“方”形，则可以在形体上与“鸟巢”形成和谐的对比关系，而且，方形会给人以静与雅的感觉。从“态”上说，“鸟巢”充满气势恢宏的阳刚之



气,充满激情与动感,为形成对照,国家游泳中心应该通过外形及表皮的处理,形成静谧、内敛的静柔之美。

考虑到国家游泳中心是奥运会水上比赛的中心场馆,使用功能决定了“水”应该作为这座建筑的重要主题。“水”是一种充满灵性的自然元素,给人以很自然的亲切感。同时,通过波光粼粼的“水”的质感,又可以进一步体现出建筑的柔和之“态”、静谧之“美”。然而,如何使建筑表现出水的质感,成为摆在建筑师面前的又一难题。几经周折,一种大胆的设想触发了建筑师的灵感,为何不考虑采用在欧洲较为常见的膜结构?那是一种几乎透明的膜,充气后鼓起后,形状酷似“泡泡”,用在建筑的屋面和墙面的表皮,具有很好的保温性能,又可以充分表达出水的主题。其起伏的外观形态,加上透明/半透明的机理和质感,可以充分表现出水泡一样的活力与动感。同时,充气膜结构起伏的表面,可以一改普通建筑平板单调的立面造型,使得立面更加丰富,又可营造出碧波荡漾的水面的感觉,恬静的外形中带有水的活泼与灵动。这正是能够表达设计理念、体现水的主体的理想材料。

于是,各方建筑师的灵感碰撞到一起,迸射出伟大的火花,“方”的形,“水”的态,有机地融合到一起,形成了国家游泳中心的设计理念——“水的立方”。这一打破常规的全新设计理念,用建筑的形态语言,完美地表达了建筑的主题,形成了“水立方”独特的富有浪漫色彩的性格。同时,又与“鸟巢”形成动与静、刚与柔、张扬与内敛、激情四射与恬静轻灵的对比和反差,达到了和谐统一的意境,两者相互映衬、相得益彰(见图1-3)。



图 1-3 “水立方”与“鸟巢”,互相映衬,相得益彰

为使“水立方”的立面更加丰富和富有动感,建筑师考虑到,表皮上“泡泡”的形状和尺寸规格不应该过于单调重复,那样会显得有人为的因素在里面,而应该是不规则变化的,甚至是无规律变化的。这样,感觉上不致过于单调和呆板,立面效果也就会更加自然,更加亲切,更像是自然形成的水泡泡。然而,表皮上的“泡