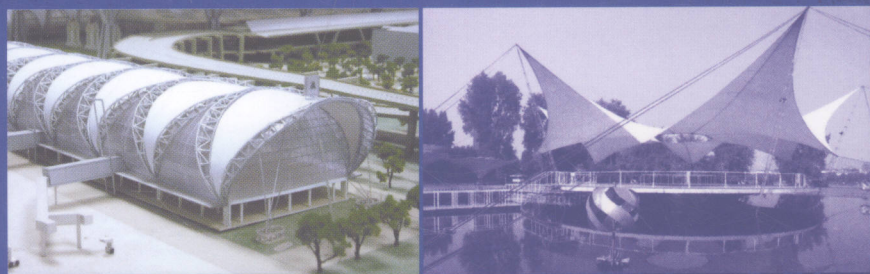


“十一五”国家重点图书

Membrane 膜结构建筑 Structures

Innovative Building with Film and Fabric



Klaus-Michael Koch
(德) 克劳斯-迈克尔·科赫 著

大连理工大学出版社

Author: Klaus-Michael Koch

Title: Membrane Structures

© Prestel Verlag, München Berlin London New York, 2004

Chinese language edition arranged through HERCULES Business& Culture

Development GmbH, Germany

© 大连理工大学出版社 2007

著作权合同登记06-2005年第223号

版权所有·侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

膜结构建筑 / (德) 科赫 (Koch, K.M.) 著; 卢昀伟等
译. — 大连: 大连理工大学出版社, 2007.10

书名原文: Membrane Structures: Innovative Building
with Film and Fabric

ISBN 978-7-5611-3761-1

I. 膜… II. ①科…②卢… III. 薄膜结构—结构设计
IV. TU33

中国版本图书馆CIP数据核字 (2007) 第139308号

出版发行: 大连理工大学出版社

(地址: 大连市软件园路80号 邮编: 116023)

印 刷: 利丰雅高印刷(深圳)有限公司

幅面尺寸: 240mm × 300mm

印 张: 16.5

插 页: 4

出版时间: 2007年10月第1版

印刷时间: 2007年10月第1次印刷

责任编辑: 袁 斌 刘 蓉

责任校对: 王 颖

封面设计: 温广强

ISBN 978-7-5611-3761-1

定 价: 228.00元

电 话: 0411-84708842

传 真: 0411-84701466

邮 购: 0411-84703636

E-mail: dutp@dutp.cn

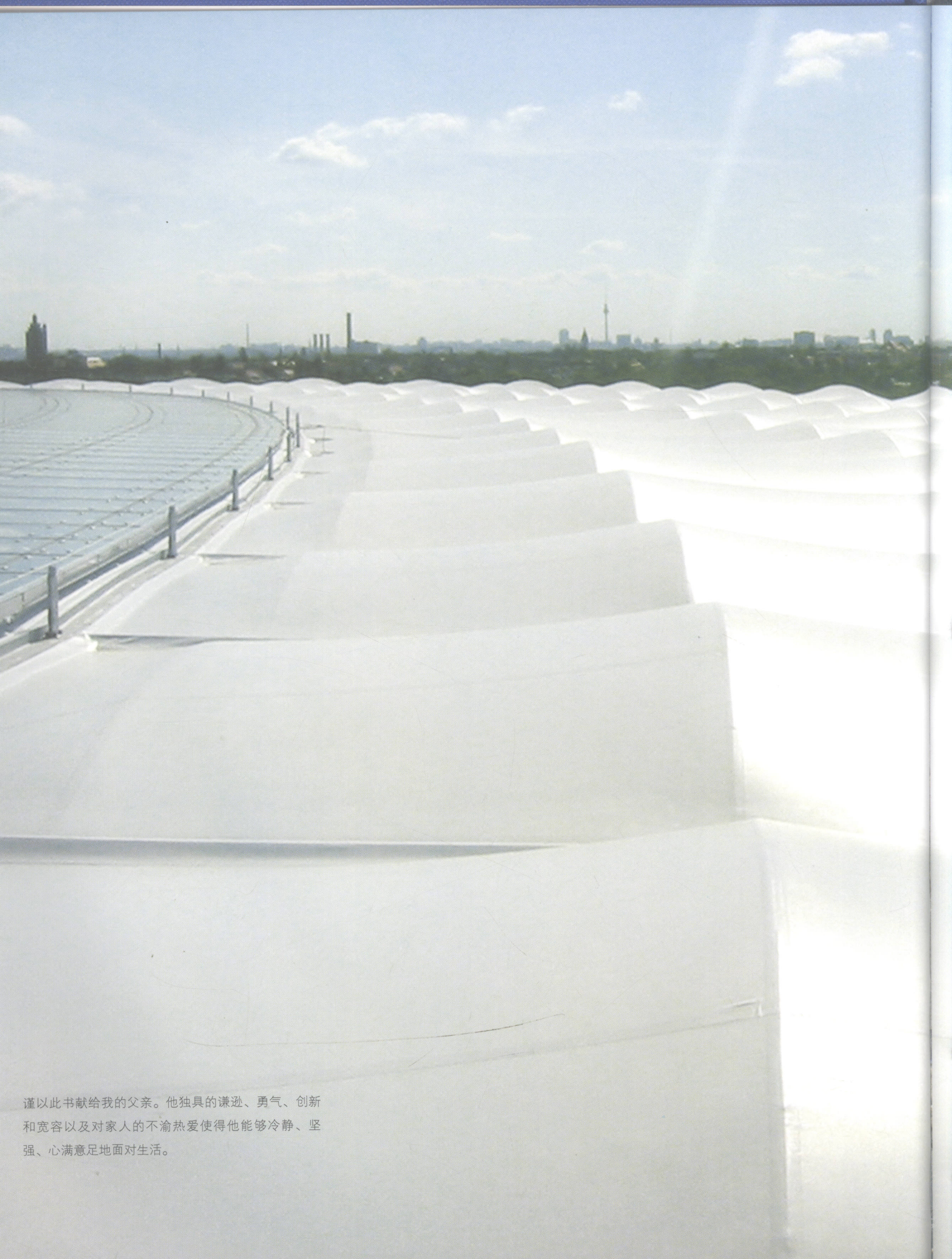
URL: <http://www.dutp.cn>

Membrane Structures

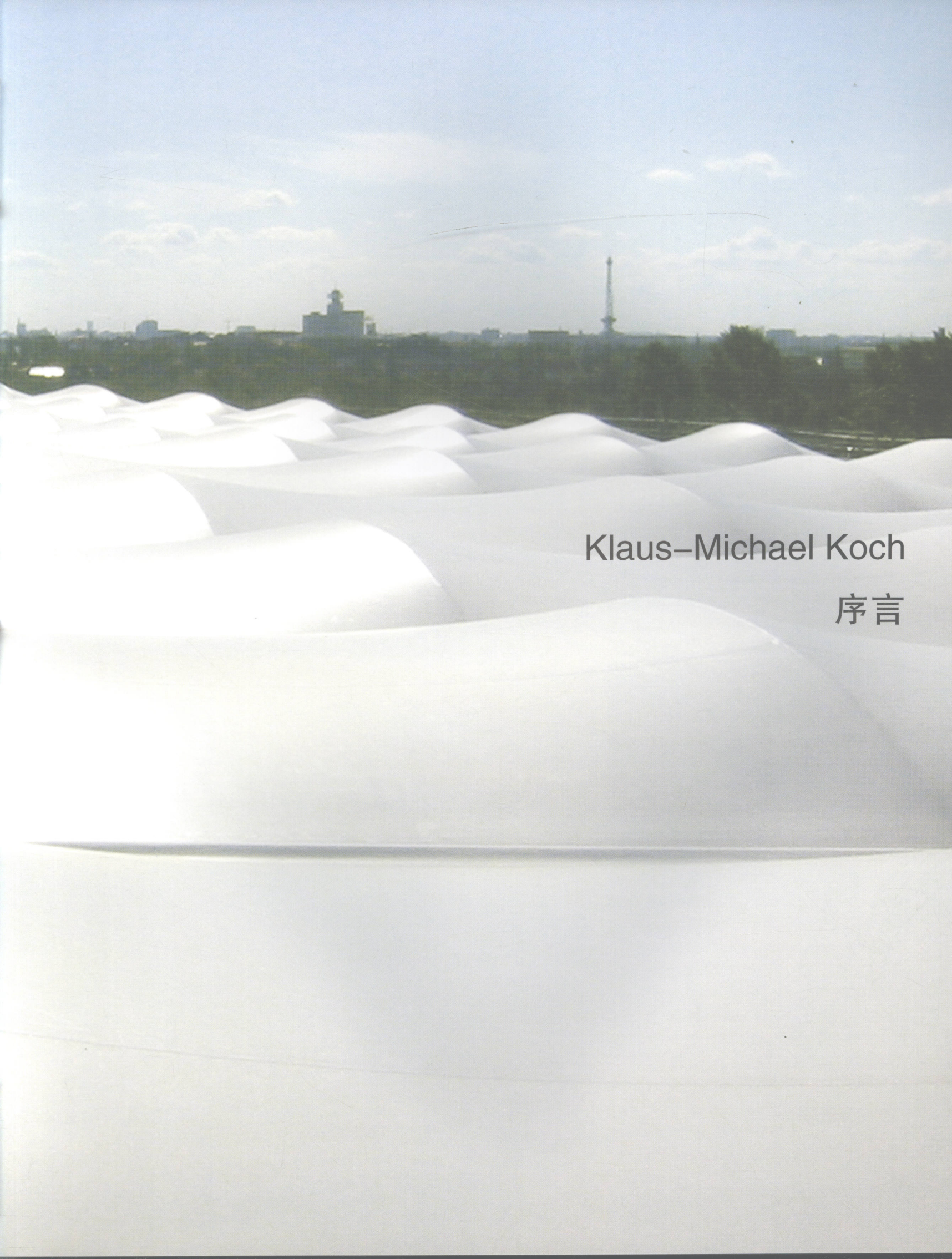
Innovative Building with Film and Fabric

目 录

7	Klaus-Michael Koch 序言
11	William Taylor 为什么选择膜结构建筑
17	Karl J. Habermann 膜结构建筑的历史
47	John Pudenz 建筑材料及建筑工艺
67	Knut Göppert/David Wakefield 膜形式和结构的发展
73	Knut Göppert 膜建筑的基本结构
97	David Wakefield 膜结构工程
125	Brian Forster 细部设计
139	Karl J. Habermann 世界膜结构精选
245	Thomas Herzog 膜结构建筑 未来的展望与选择
253	附录



谨以此书献给我的父亲。他独具的谦逊、勇气、创新和宽容以及对家人的不渝热爱使得他能够冷静、坚强、心满意足地面对生活。



Klaus-Michael Koch

序言



(乙烯-四氟乙烯共聚物)膜材制作成了太阳能热水器。近年来,随着CFD(计算机流体动力学分析)及其他基于计算机辅助的模拟技术的出现,膜结构建筑材料的生产及表面处理技术都获得了飞速发展,由此又带来了建筑材料业持续的创新繁荣。膜材料科技正快速发展成为影响建筑业发展的关键因素之一,对于创造智能化、灵活性的建筑外结构以及更好地利用太阳能都起着至关重要的作用。除此之外,膜结构建筑材料的发展无疑会广泛拓展标准化建筑材料市场,为其增添一系列富有价值的新产品。

编写这本书的目的正是为了向建筑师和结构工程师,同时也要向政府官员和经济学者表明:膜结构建筑已经走出了早期成就的光环,正在不断大胆创新、展露锋芒。几十年以来的实践经验和教训(往往都是困难重重、步履维艰)使膜结构建筑发展成为一门面向未来的新科技,尽管现在它仍处于起步阶段。另外,膜结构建筑相当节省资源并且支持和倡导积极的能源利用观,这些在一定程度上也说明它应该被创立为一门专题学科,在更多的职业教育机构和第三阶段教育机构广泛传授。除此之外,本书还将着重对膜材与膜结构建筑这一新兴行业所需的技术人员以及工程师的工作范围和内容加以描述,其中加入了物理、化学、材料学、工艺学及企业管理等各学科方方面面的内容。书中还介绍了膜材技术人员(膜材加工人员及塑料和重型织物生产工人所掌握的工艺技巧等)在工程实践方面所应掌握的一些技术工艺。

同膜结构建筑本身的发展历程一样,我自身的专

图1 1972年,慕尼黑奥林匹克临时体育场顶部首次使用单层膜结构

图2 1960年,以PVC材料制作而成的号称“现代屋顶的最佳配套材料”

图3 2004年,新曼谷国际机场候机大厅的100000m²膜结构屋顶

至今为止,尚未有任何一所科技院校开设“膜结构建筑”的专题课程,这不能不让人感到十分惊讶。除了巴斯、布鲁塞尔、埃森、慕尼黑、北京、斯图加特、悉尼和东京的一些专家以外,现在只有很少一部分学者投身于膜结构建筑领域的课题研究。当然,除了这些专家学者,也有几所著名的研究和检测机构正致力于研究膜材料的应用给建筑业带来的无限可能性,它们分别是:弗劳恩霍夫建筑物理研究所、轻型材料和概念设计研究所、南德合成材料中心、威灵顿研究中心和巴伐利亚能源应用研究中心。

在Frei Otto与他的学生们开始研发“帐篷式”建筑和“吊顶式”建筑的前25年间,可用的材料仍然只有棉布和PVC防水油布而已。但很快,这些建筑材料的可利用空间就走到了极限,远远不能继续满足此种建筑结构发展的更多要求。此类建筑的最基本功能仍限于遮蔽雨雪和使人们免受阳光暴晒,而它引人入胜之处则在于其拥有颠覆传统概念的超大建筑跨度以及极其多样化的设计造型。1938年,工程师Roy J. Plunkett发明了PTFE膜材(聚四氟乙烯,也称作铁氟龙或赫司特氟龙)。1970年,这种膜材首次用作玻璃纤维材料的外涂层,从此便与膜结构建筑结下了不解之缘。但那时,像现在常用的一些耐用透明建筑膜材仍未出现。也正因为如此,即使是作为20世纪自由形态建筑先锋代表作的慕尼黑奥林匹克体育场穹顶也是由厚重的半透明有机玻璃板材覆盖而成的。在此以后,真正意义上的现代膜建筑材料的迅猛发展才正式起步。

早在1976年,我的父亲Herbert Koch就已利用新的焊接和应用技术为物理学家Hans和Jürgen Kleinwächter制造出了第一支大型太阳能气球,并使用透明ETFE



业训练也经历了一个漫长而曲折的过程。这其中包括：上学期间，通过在父母的膜结构公司里面帮忙学习到一些相关知识；此后，在1972年又负责组织了学生团队建造慕尼黑奥林匹克体育场馆的屋顶。当时，负责建造奥运体育场馆的建筑公司负责人Carl Merz 极力邀请Herbert Koch协助筹划将一项新技术应用于使用单层塑料膜材的奥运村建筑中去。在此之前，即20世纪50年代，身为化学家的Herbert Koch就已经研究出了使用PVC材料制作塑料膜材的工艺。但在那时，人们习惯于将PVC材料切割成段后铺于屋顶平台上作为密封材料使用。所以Herbert Koch的新技术面世之后受到了很多屋顶建造专家的嘲讽，因为他们已习惯于以铺设多层加厚屋顶油纸或是浇高温沥青的方式来密封屋顶。慕尼黑奥林匹克运动会工程需要好几万平方米的塑料膜材以满足为宾馆、露天花园啤酒酒店、曲棍球比赛场、建筑物间相连通道以及其他更多场所建造临时房顶的需要。但另一方面却因为财务预算紧张、时间迫切而无法使用高质量的塑料涂层织物膜材。而当时基地位于康士坦茨的著名膜结构企业Stromeyer公司已经采用了这种高质量膜材来制作大型帐篷，并且美国的Birdair公司也用它制造了气承式膜结构会堂。在这样的情况下，Herbert Koch却拿出了一个十分理想的解决方案，其简易和经济实用的程度让人惊讶。首先，他将成段的弯曲水管连接在一起以形成无数弧形面。其次，再用价格低廉的大片透明PVC膜材将其紧密连接为一个大的弧形面。因为这些临时弧形顶只需维持奥运会举行的一段时间，所以不必过度担心其使用寿命。Herbert Koch并没有对膜材弧面施以过大的预应力，而是直接将其边缘部分捆绑住加以固定。为了避免大范围进行费时费力的张力调整工序，他设计在膜材下表面涂加了薄薄的一层金属涂层，以促使膜材在阳光照射下适当升温来迅速减少高挥发性软化剂的含量。得益于这一措施（与在模型飞机内使用膏状漆涂料同样原理），在仅仅几周的时间内膜材表面就达到了所要求的张拉力值。即使是专业建筑膜材领域也为这一成就所深深震撼——整个临时建筑屋顶精致美观并且毫无褶皱！

现在，膜建筑科技正广泛应用于世界范围内各种规模类型的建筑之中，比如体育场的固定或伸缩式屋顶、中间毫无支撑的公共广场屋顶、半通透的室内游泳馆及机场大厅屋顶等。其中新建的曼谷机场应该是较显著的建筑实例之一：占地面积超过十万平方米的机场大厅屋顶以三层膜材构筑而成，传音效果好，能源利用率高。

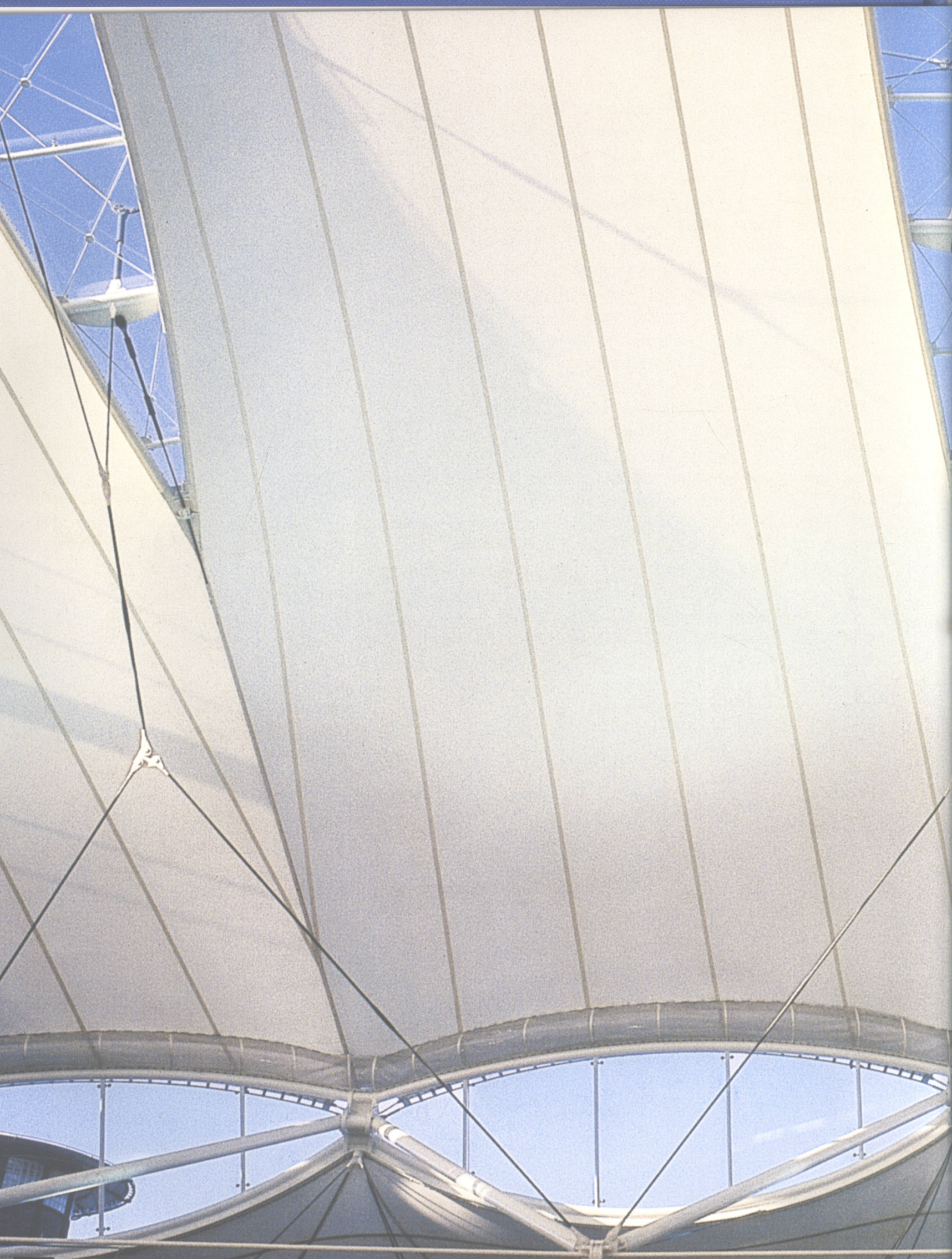
应该说，是过去40多年来从建筑实践中获得的真知灼见促使了建筑膜材这一新型材料的诞生。然而更值得鼓励与关注的应该是膜结构建筑领域的新发展。此书汇集了国际膜结构建筑专家们所贡献给该领域的一系列基本知识和主要实例，并广泛借用这些建筑界



实例展现了建筑膜材广泛的可应用空间。这一工作应该说还是必不可少的，因为它为建筑师、工程师以及相关客户指明了膜材建筑应用和发展的方向，沿着这一方向，膜结构建筑领域在新的千年里一定会获得更加深远的发展。

在此，我将诚挚的谢意献给以下人士：我的膜建筑专业老师Harald Mühlbergert, Peter Ricet, Josef Zuckert, Peter Ackermann, Rudolf Bergermann, Klaus Bloch, Jürgen Bradatsch, Ewald Bubner, Berthold Burkhardt, Todd Dalland, Herbert Fitz, Knut Göppert, Nicholas Goldsmith, Thomas Herzog, Michael Hopkins, Kazuo Ishii, Josef Jenner, Chul-Hee Kang, Kyonore Kikutake, Jürgen Kleinwächter, Ian Liddell, Frei Otto, Bodo Rasch, Kurt Stepan, Jürgen Troitzsch以及David Wakefield；我的合作伙伴David Walker, John Pudenz, Manfred Heeg；我团队的所有工作人员和我的家人——尤其要感谢我的妻子和孩子；感谢我身边无数的守护天使；还有我的出版人Jürgen Tesch和Katharina Haderer；并深深感谢本书诸位作者William Taylor, John Pudenz, David Wakefield, Knut Göppert, Brian Forster, Thomas Herzog在专业方面及私下对我的不懈支持和帮助。另外，特别要感谢Karl Habermann，感谢他卓有价值的工作，感谢他与我合作构思完成这本书。

Klaus-Michael Koch





William Taylor

为什么选择膜结构建筑

相信大部分人童年时都曾有“进帐篷”的经历：可能是去马戏团看杂技表演，也可能是在与父母一起度假的旅途中，甚至只是在一个晴朗的日子和小伙伴在花园里游戏。但不管怎样，有关于此的记忆一般而言都是甜蜜的。总而言之，“帐篷”很好玩——而且我们喜欢“帐篷”。

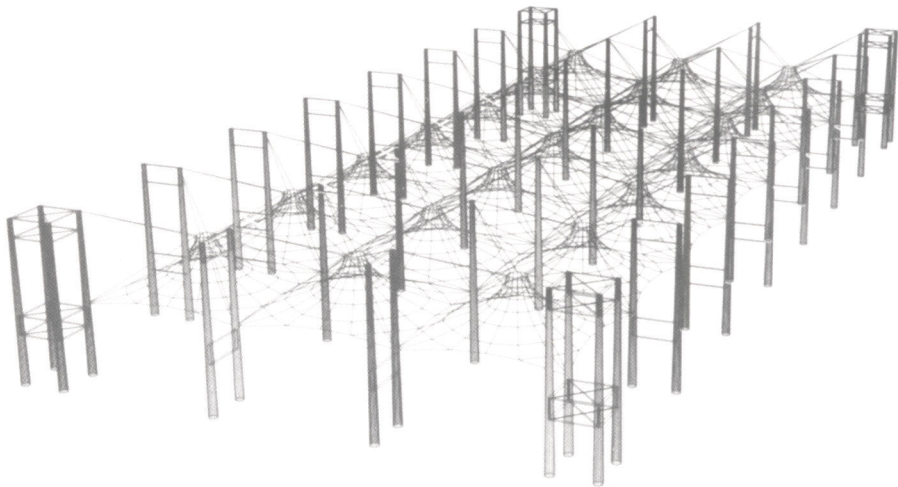
对于我个人，之所以对膜结构建筑如此着迷，一方面自然是因为它本身所表现出来的科学性、技术性和逻辑性，另一个同样重要的原因却是被其所散发的内在感性品质所吸引。造型良好的“帐篷”看起来自然也会很舒服：动感、轻盈、开放、有韵律感、和谐而又典雅。其实对某一建筑物外观的评价没有必要多做解释，只要让人感觉恰到好处并且建筑本身有激动人心的力量，就必定是佳作了。也许这些感觉与童年时的那些记忆不无关系。

但是，“感觉”上的简单性往往会遮掩住构成这些精美建筑背后的种种要素：高度的精密性和复杂性。膜结构建筑及其建造过程是一项严肃而复杂的工程，必须用心设计、严格建造，建筑物才能长期使用并安全承担足够的荷载。得益于先进的织物材料的出现以及高端的分析方法，当今的膜结构建筑已经远远超越了旧式的“马戏团大帐篷”。相比于那个时代的“帐篷”，今天的膜结构建筑拥有更多样式、更多功能，所以自然也拥有更为吸引人的“节目单”。而且，作为一种全新的建筑学诠释，膜结构建筑必将为未来的建筑领域做出更多贡献。

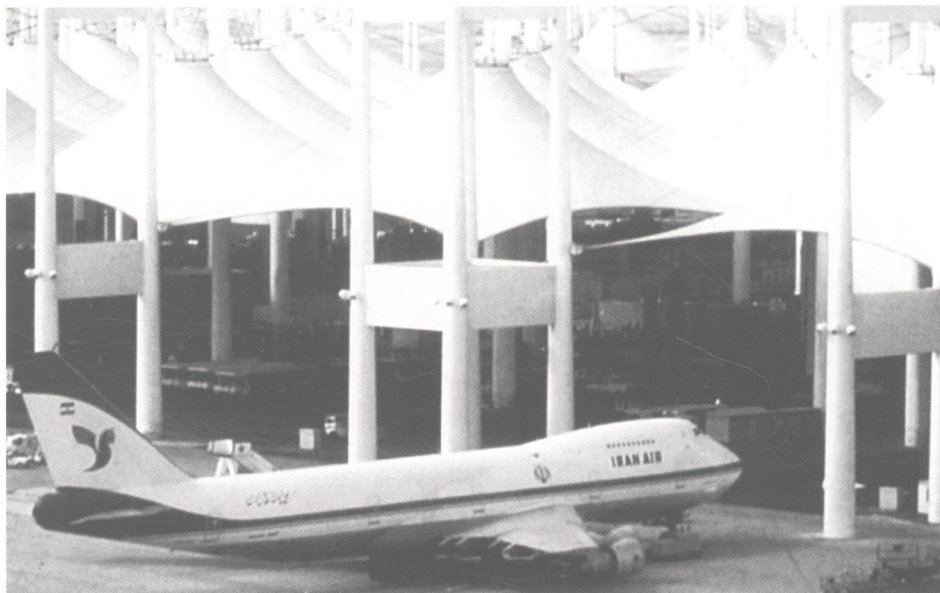
即便如此，我之所以选择膜结构建筑在很大程度上仍是理性思索的结果。与其他建筑形式相比，膜结构建筑可能是最倾向于直接从结构性能和建筑材料方面来寻求解决方案的一类建筑。膜结构屋顶是建筑外形与结构功能之间密不可分关系的最纯粹的外在表现——建筑外在的美感直接来自于其内部结构体系。这样一来就为整个建筑方案提供了一套清晰的设计思路，同时也对其意义做出了明确解释——可以说是“建筑学上的声喻法”——而这也是现代建筑界一直追寻的梦想。

我开始真正地对膜结构建筑产生兴趣还是在建筑学院学习的最后几年。虽然我确实也曾努力研究过Frei Otto和the IL的著作和文章，但真正点燃我对膜建筑及其内在无限可能性热情的，却是我在学校最后一年的导师——Ron Herron（建筑电讯派成员）和Cedric Price以及他们富有探索精神的研究工作。那时我突然发现，膜建筑是由时代孕育却又超前于时代的，它总是使用最新的材料、应用最前沿的科技。事实上，伴随着社会创新理念的普及和科技的不断进步，膜结构建筑正面临着一个创造全新建筑表达方式的机遇。

在我所保存的最初有关膜结构建筑的文献资料里



1



2

图1、2 Abdul Aziz国王国际机场的哈吉航站楼，沙特阿拉伯吉达：膜结构穹顶的等容线设计及其外观一览，建筑师及结构工程师：SOM, Horst Berger, Schlaich Bergermann及其合伙人事务所

图3 英国剑桥Schlumberger研究中心，建于1982~1992年间，建筑师：迈克尔·霍普金斯及其合伙人事务所，结构工程师：Arup联合事务所及Wintergarden公司

有一本小册子，这就是Chemfab膜材公司与著名膜结构企业Birdair公司为其当时刚刚建造完成的吉达哈吉航站楼（见图1、2）所做的宣传册。就整体结构优势来说，这座“建筑”最出众的当属其激动人心的巨大规模：多个面积约为40平方米的白色独立凸起的结构重复排列，连接成片组成屋顶，为下面来来往往朝圣的旅客遮风挡雨，它使得停靠在旁边的波音747客机也相形见绌。宣传册内有一张照片，是从场顶上方拍摄的。首先映入眼帘的是一片波动起伏而又庞大的白色膜材，有个人站在一辆四轮汽车旁边，从照片上看去却像个模糊不清的小点。由此可见整个膜结构场顶之庞大，建筑师竟然要开车驶过屋顶才能到达工作的地方。而其力量之大也可见一斑——用来制造屋顶的膜材并不比桌布厚多少——汽车却可以在上面安全而自由地奔驰。膜结构建筑彻底颠覆了一般意义上人们对建筑外形、建筑结构以及建筑材料的期望值。

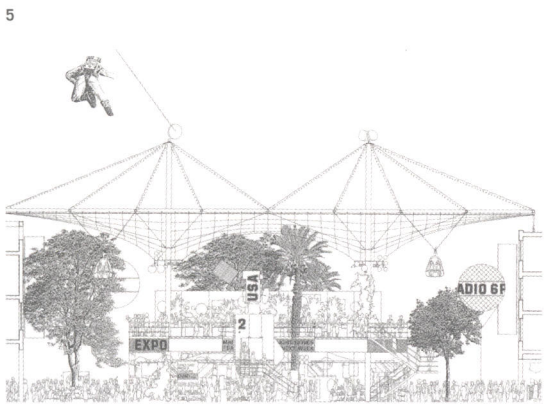
除此之外，哈吉航站楼工程还有一个非常重要的特点：它并没有沿袭早期膜结构建筑师创造并一直青睐有加的自由形体或有机形体结构，而是在另一建筑设计理念体系的指导下做出了完全不同的选择。

我个人认为，对于膜结构建筑屋顶和外围护结构的设计及建造是有必要进行控制的，而扎根于更开放建筑理念的总体指导方针也是必不可少的。膜结构建筑并不只是对于某种理论上的结构挑战所做出的单纯技术层面的回应，相反，它其实完全有潜力实现建筑使用者的种种潜在预想并为某一设计师的作品体系提供统一的建筑理念。

设计师在设计某一作品时总会面对数不清的选择，而他的工作则是要通过设计选择同时淘汰。从最初选定设计方案直到最后对某些建筑细节的设计或施工，这种选择贯穿始终。但这也适用于所有其他建筑工程，膜结构建筑并不需要设计师拥有更多的敏感性。那么，到底是什么原因促使我们从众多的建筑方案中独独选择膜结构建筑呢？

通常，我们选择膜结构建筑方案是因为在当时情况下这种选择合情合理，因为膜结构建筑所体现出的特点或某些品质正好符合本项工程的要求，或者客户的设计任务书正好提供了采用这一方案的机会。一般情况下（至少对于我们确实如此），膜结构建筑最初的构想主要并不归功于施工技术，而是得益于结构本身所提供的——创造新的、前所未有的建筑空间的无限可能性。比如下面空间：可能不需要整体环境控制的空间，或可创造并促进社会交流互动的空间（甚至连客户设计任务书也并未提出过类似方面的要求）。我们将膜结构建筑视作富于想像力的工具，它所拥有的每一个特点，都会使它成为实现某种特定功能的最佳选择。





对于膜结构建筑使用者而言，其建筑本身的吸引人之处自然不言而喻：它所提供的不仅仅是一处遮身之所，更是几近完美的便于休闲和社交的环境；不出家门就可以与外界融为一体，充分享受自然光线的同时又可以与外部社会不弃不离，所有这些无疑都会增强使用者的舒适感和归属感，自然是一处不可多得的“好所在”。

膜结构建筑空间确实让人难忘，甚至成为某种内在精神的象征。比如说剑桥的Schlumberger研究中心：整座膜结构外围空间存在的意义并不仅仅是作为一个“外在形象”，它其实已经将该中心的“内部个性”有机地结合在一起（见图3、4）。

其实，膜结构建筑本身就完全能够“树立”一种形象。膜结构建筑日间所呈现的外貌特征到了晚上却又别有一番风味。夜间的膜结构建筑以一种截然不同的方式焕发生机，有时甚至摇身一变好似成了投影和动画的光色调板（见图9）。

无论置身何处，膜结构建筑总是能保持自己内在特有的“建筑语言”而不被历史、地理、周边建筑或社会环境的因素所影响，这确实是这一建筑类型最有趣同时也最富有价值的特点之一。凭借着这一特点，膜结构建筑得以轻松地与周边环境融为一体而又不失去自身强烈的个性风格。对于我们，这是它最吸引人的地方之一（见图8）。

设计师选择膜结构建筑而放弃其他可选项时，不可避免地总要陈述清楚做出这一选择背后的理性考虑，而这些考虑因素往往都是技术或者专业层面上的——膜结构建筑拥有令人惊讶的资源 and 能源高利用率。另外，它有利用最少的材料覆盖庞大面积的潜能，又能将自然光和新鲜空气吸纳到更广泛的空间中去，所有这些都为建筑设计师和结构工程师实现更多创新方案提供了可能。现在，只需使用薄薄一层膜材就能覆盖庞大的建筑空间，而材料消耗却只有原来的几分之一。这在以前，仅仅使用传统材料是远不能做到的，即使能够做到，其花费也会多得多。

北欧的膜结构建筑为其居住者提供了遮寒之处和庇护之所：它不但能够通过减少热耗增强房屋的御寒功能，而且因为外围防护结构使用了透明或近透明的建筑膜材，即便是处于房屋中心也可以充分享受太阳光。与此同时，有效利用光线照射附带的太阳能自然也对房屋居住者有百利而无一害。在气候相对较热的南欧地区，膜结构建筑却起着缓冲带的作用：除了可以提供阴凉，其特有的建筑外形也非常利于通风。

很早以前，我们就从已有的建筑实践中总结出：成功利用膜结构穹顶的关键在于对自然光的有效控制利用，尤其要同时处理好直接照射光和间接照射光，（分别使用表面聚光或漫光膜材）为居住者提供设计

图4 Schlumberger研究中心，剑桥，1982~1992年

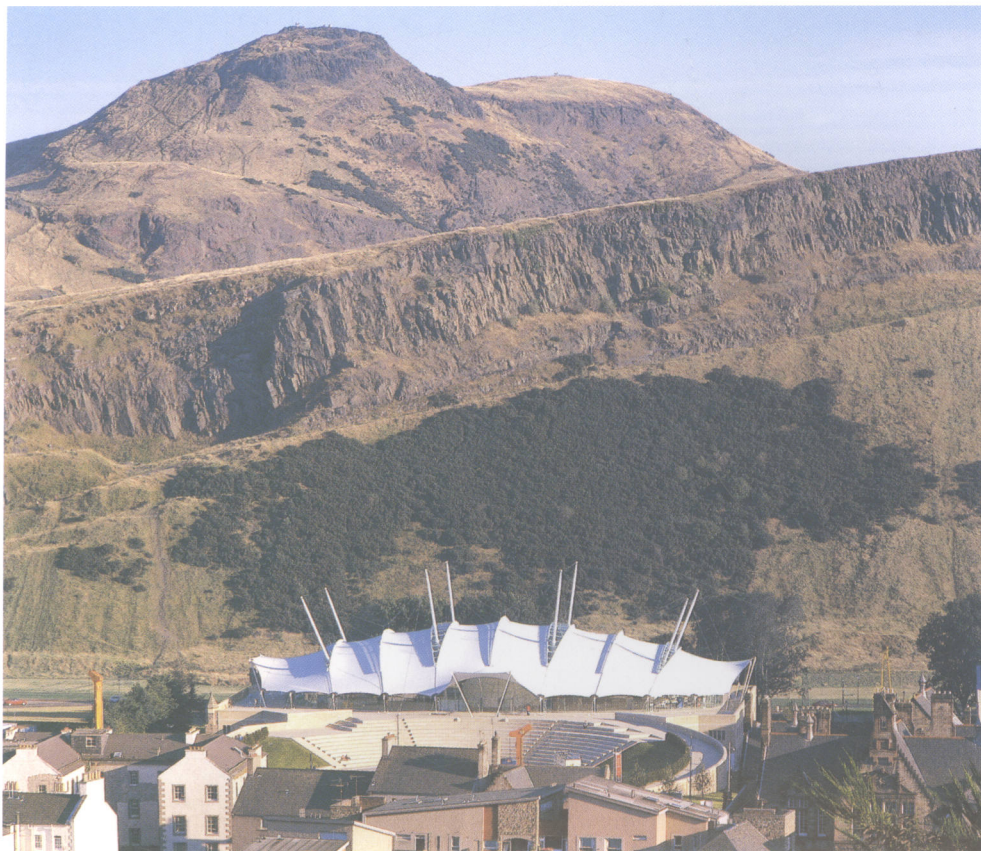
图5 格林德波恩歌剧院剧场门厅，英国格林德波恩，1989~1994年
建筑师：迈克尔·霍普金斯及其合伙人事务所
结构工程师：Arup联合事务所

图6、7 巴西尔登市中心，1981~1984年
建筑师：迈克尔·霍普金斯及其合伙人事务所

图8 动感地球中心日间华丽写真，苏格兰爱丁堡，1990~1999年
建筑师：迈克尔·霍普金斯及其合伙人事务所
结构工程师：Arup联合事务所

图9 动感地球中心夜景

图10 传奇世界：由室内观看到的周边和海洋景色，1996~1998年
建筑师：迈克尔·霍普金斯及其合伙人事务所
结构工程师：Arup联合事务所



8



10

精良而又自然真切的室内居住环境。

是否选择膜结构建筑并不只是建筑设计师和结构工程师要面对的问题。尽管现在PTFE和PVC涂层纤维以及ETFE膜材在建筑中的使用已经得到了更广泛的认可，但与其他建筑形式相比较，膜结构建筑仍不普遍，所以说说服某位客户同意采用膜结构设计方案也并非易事。从这个意义上来讲，这一新建筑领域所取得的越来越广泛的认可以及创造的越来越多的成功建筑作品（如书中所示）并不仅仅是工程设计者、建筑者的荣耀，同时也是对坚持选择这一建筑形式并对其寄予厚望的广大客户的最好回报。

现在，时代所提供给建筑界的是更新的材料、更高水准的精细技术。各种新型膜材和合成材料将继续赋予膜结构建筑更多潜力和可能性，它们无疑会增强热性能、提高结构效率、提供更优的性价比。各方面的发展和革新应用于建筑实践到底会引起怎样的结果尚有待研究，但膜结构建筑发展的未来必定同样振奋人心。随着这些方面的发展，膜结构建筑所适用的范围必将大大扩展，它所诠释的全新建筑语言也终将崭露头角。这一建筑语言所展现的建筑形体、建筑材料、空间、光线以及结构之间的关系不同于以往任何建筑形式。从某种意义上讲，这种语言是抽象的、数学的。但是，换一个角度看，它却给设计师提供了彻底革新人与建筑物之间组合关系的机遇。



9