

国外建筑材料与设计丛书

ETFE的技术与设计

ETFE

Technology and Design

[美] 安妮特·勒古耶 编著
姜忆南 李 栋 译

中国建筑工业出版社

ETFE

Technology and Design

国外建筑材料与设计丛书

ETFE 的技术与设计

[美] 安妮特·勒古耶 编著
姜忆南 李 栋 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2009-2549号

图书在版编目 (CIP) 数据

ETFE的技术与设计/ (美) 勒古耶编著; 姜忆南, 李栋译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2010

(国外建筑材料与设计丛书)

ISBN 978-7-112-11930-1

I . E… II. ①勒…②姜…③李… III. 薄膜结构—建筑设计 IV. TU33

中国版本图书馆CIP数据核字 (2010) 第045775号

ETFE: Technology and Design / Annette LeCuyer

Copyright © 2008 Birkhäuser Verlag AG (Verlag für Architektur),
P.O.Box 133, 4010 Basel, Switzerland

Chinese Translation Copyright © 2010 China Architecture & Building
Press

All rights reserved.

本书经 Birkhäuser Verlag AG 出版社授权我社翻译出版

责任编辑: 孙 炼 武晓涛

责任设计: 赵明霞

责任校对: 赵 颖

国外建筑材料与设计丛书

ETFE 的技术与设计

[美] 安妮特·勒古耶 编著

姜忆南 李 栋 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 字数: 252 千字

2010年8月第一版 2010年8月第一次印刷

定价: 49.00 元

ISBN 978-7-112-11930-1

(19173)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

目录

可持续性新技术	6
引言 需求、权利和有效荷载	10
充气式膜结构构想：建筑理念与应用	16
材料 ETFE	32
风险与可靠性	42
柔性结构	46
膜材的优越性	70
环境 变化的皮肤	94
安全保障	114
传达信息的膜面	126
调节气候的封闭罩体	136
ETFE 的未来	146
项目名录	150
作者简介	155
参考书目	156
插图目录	158
致谢	159

可持续性新技术

ETFE 膜材在建筑设计及技术领域所产生的深远影响，是任何一种新型材料难以匹敌的。在过去的一个世纪里，天才的设计师在建筑材料和建造技术领域曾进行过大量的探索。虽然那些材料技术极富创新性，但由于并不实用，往往只是昙花一现。例如 20 世纪 50 年代发展起来并在 60 年代风靡一时的混凝土壳体结构，在建筑经济学和设计美学对于混凝土材料技术的要求不断提高的前提下，最终被结构领域淘汰；繁荣于 20 世纪 80 年代的张拉膜结构，自 90 年代开始同样走向衰落；最具代表性的是在建筑领域中广泛采用的玻璃，1955 年前后，浮法玻璃开始进入工程领域，它使单平板片玻璃的尺寸大大增加，而且，更加坚硬与透明，尽管如此，由于存在自重、易碎和密封性能差等问题，致使多层玻璃顶棚的建造不仅造价高昂，而且具有一定危险性。ETFE 的出现为那些苦苦寻求轻质、强韧、耐久以及密闭性良好材料的设计师们提供了新的选择。他们有理由相信，这种新型材料在建筑领域

必将大放异彩。

我首次接触 ETFE 膜材是 1980 年，当时布罗·哈珀德 (Buro Happold) 正致力于研究在北极建造一座覆盖在罩体下的城市，命名为“北纬 58°” (58 Degrees)。基地位于北阿尔伯塔省距 Fort MacMurray 160km 的亚伯达河旁。作为辛克鲁德公司 (Syncrude) 采集焦油砂的厂区，该地环境异常恶劣，冬季寒冷刺骨，夏天则充斥着成群咬人的黑蝇。城市罩体的研究工作由加拿大建筑师阿恩·富勒顿 (Arne Fullerton) 主持，吸引了来自加拿大和欧洲众多相关学者的关注，其中就包括弗雷·奥托 (Frei Otto)、特德·哈珀德 (Ted Happold) 领导的巴斯大学建筑工程系研究小组、伦敦城市大学的麦克·巴恩斯 (Mike Barnes) 等人。此外，巴斯大学的园艺学家彼得·索迪 (Peter Thoday) 和人类学家 Ed Van Dyke 分别就植物生长条件以及光线刺激对于人类行为的影响两方面提出了各自的建议。

起初，研究小组试图采用充气式膜结构。



1

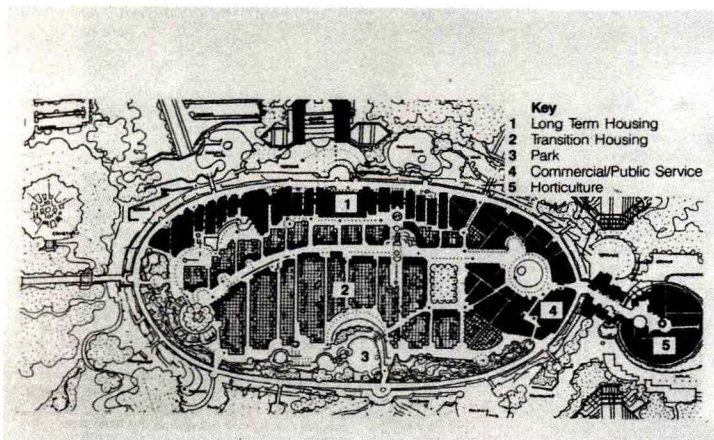
1_“北纬 58°”，罩体下的北极区城市，1980 年设计，预计外层覆盖 ETFE 气枕

虽然仍存在许多制约因素，但对于聚四氟乙烯 (PTFE) 玻璃纤维仍寄予了极大的期望，可当研究小组参观完几个采用充气式顶棚的体育场馆后，他们最终认为玻璃纤维膜并不理想，因为该材料透光率仅为 10%，而且膜面污染后会令光色偏黄。考察使我们更加坚定地认识到，覆盖在北极城市上空的膜材应当保证冬季有充足的可见光透射进来，并满足植物生长所需。除此之外，罩体还应至少是双层的，以避免寒冷气候条件下膜面内侧结霜。

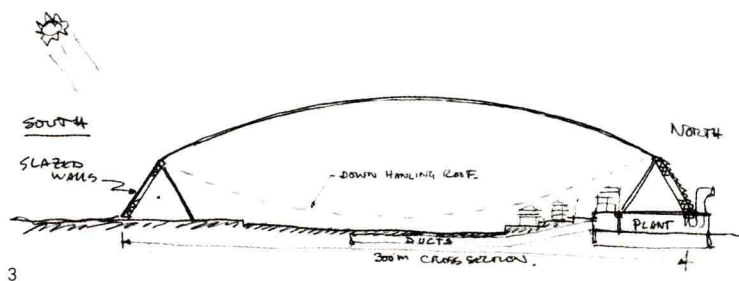
显而易见，作为可选材料无论是玻璃还是硬质透明塑料都不能满足要求，都存在不可避免的缺陷。一位来自瑞士杜邦公司 (DuPont) 的代表曾建议采用一种名为泰德拉 (Tedlar) 的聚氟乙烯薄膜。但因其耐火性差，最终未被采纳。特氟龙 (Teflon) -FEP 和被杜邦公司称作特氟泽尔 (Tefzel) 的乙烯 - 四氟乙烯聚合物 (ETFE) 材料最终成为当时可供选择的两种材料。FEP 曾应用于阿纳姆动物园，但时间不长便因撕扯而遭到

破坏。此后经杜邦公司代表介绍，研究小组才意识到 ETFE 优越的弹性及韧性似乎更能满足工程使用需求。于是针对该材料的张拉性能实验在城市大学迅速展开。试验发现，ETFE 的荷载 - 形变曲线非常神奇，材料的弹性范围很小，但在材料失效前其形变却可达到先前的四倍。除非遭到利器的破坏，通常情况下材料能承受极高的压力而不屈服。

研究小组最终决定采用乙烯 - 四氟乙烯聚合物 (ETFE) 来覆盖 150000m² 的场地。罩体采用索网结构支撑，其上附着 1.8m 宽的气枕形成的膜面，气枕沿宽度方向的边缘通过三元乙丙橡胶 (EPDM) 圈与不锈钢截面连接。该方案得到了阿尔伯达省公共工程与住房部部长汤姆·钱伯斯的大力支持。然而时隔不久，由于石油价格的下跌以及焦油砂采集被禁止，该研究项目进入停滞状态，当 10 年后重新启动焦油砂采集时，机器人技术的普及导致前往该地区工作的人员数量大为减少，因此北纬 58° 项目最终没有实施。



2



2__ 平面规划为 10000 名矿业工人提供住所

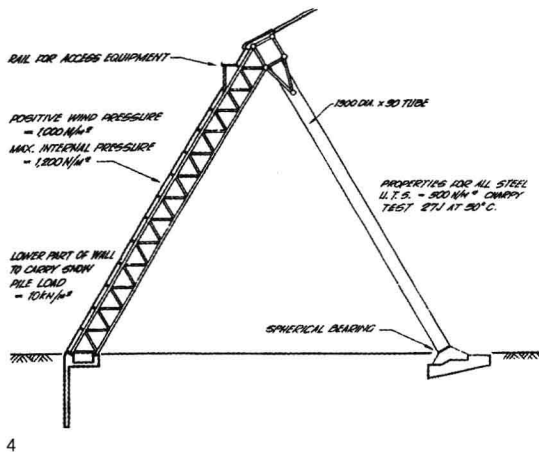
3__ 横截面草图

1987 年，布罗·哈珀德受邀作为伦敦切尔西和威斯敏斯特医院中庭及内部廊道加盖顶棚项目的顾问——那是我第二次有幸参与采用 ETFE 膜材的实际项目。最初，建筑师打算采用玻璃纤维顶棚，但我们建议采用铝合金框架结构支撑乙烯-四氟乙烯聚合物 (ETFE) 气枕顶棚的方案，以提高室内的透光量及保温性能。该中庭通过空气对流引入自然通风，从而成为半室外化的公共活动空间。医院部分房间向中庭开窗，以解决通风和采光。此前，乙烯-四氟乙烯聚合物 (ETFE) 薄膜已经应用于多个游泳池顶棚的建造中。福伊特克公司 (Vector Foiltec) 特意为该项目开发了可以支撑三层膜气枕的铝合金框架。该顶棚结构中，包含了排水管道以及为气枕充气的管道，顶棚铝合金拱架跨度达 18m。

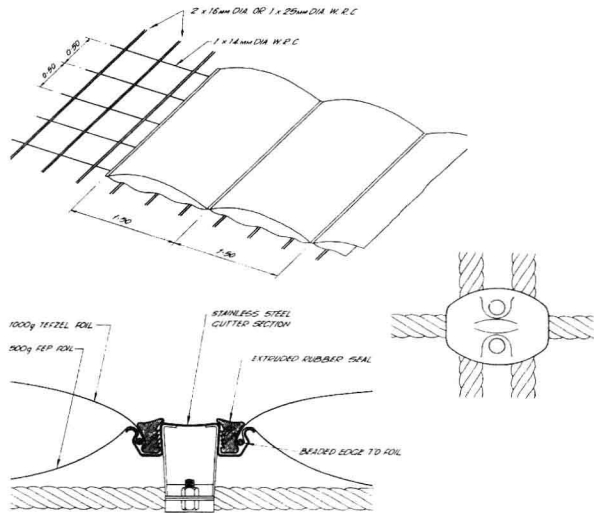
在城市建筑中，由于对新材料的认知不足，ETFE 气枕式膜结构建筑时常被拿来与那些采用钢或玻璃结合的传统钢结构进行比较。一份针对建筑全生命周期工程投资的调查表明，ETFE

气枕式膜结构相对低廉的维护成本较传统结构存有巨大优势。我们曾经参与设计的 ETFE 气枕式膜结构顶棚，至今仍正常发挥着作用。更为重要的是，该项目为我们铺平了在城市建筑中采用 ETFE 膜材的道路。作为项目设计师，本·莫里斯甚至转而投向铝合金支撑框架的构造研究，并最终加入并参与了福伊特克公司的发展。

第三个我想介绍的工程项目是由一家新兴公司委托的汉普郡网球俱乐部，他们希望设计方案能为俱乐部带来崭新的面貌。设计小组提议采用轻质、透明的 ETFE 膜材覆盖整个网球中心，从而营造一种类似于户外环境的效果，同时又可避免真正室外环境中存在的眩光、风雨等侵扰。通过与本·莫里斯的讨论，我们最终决定采用张拉索支撑 ETFE 气枕的方式形成罩顶。然而，当方案和资金投入均经过客户的认可，准备进行详细策划时，合同谈判却令该项目的启动日期一再延迟，最终只剩下很短时间对建筑方案进行详细推敲，项目最终于 1995 年竣工。事实证明，该工程



4-5__ETFE 围护结构的细部构造



5

仍然是非常成功的。

俱乐部气枕膜结构罩棚采用 50% 透光率的白色膜材。阳光直射在双层膜面上，太阳影像被减弱成一个小红斑。眩光的消除将俱乐部打造成为理想的网球场。夏天，所有的室内场地均被订购一空，而那些免费的室外场却无人问津。网球俱乐部的成功让我意识到，ETFE 气枕系统与索网结构的结合对于大跨空间的实现将起到至关重要的作用。令人遗憾的是，在技术和工期都允许的情况下，英国的千年穹顶却没有采用 ETFE 气枕式膜结构。

从上述早期案例中不难看出，ETFE 气枕式膜结构在强度与耐久性上的表现没有辜负人们的期望。即使存在风荷载的作用，局部的破坏也不会产生连锁反应，专用胶带可进行及时修复。不过在气枕上行走却是被严令禁止的。汉普郡网球俱乐部的顶棚就因穿着笨重工靴的维修工人的踩踏而留下了明显凹痕。

对于设计师来说，能够找到一种适合的材

料满足覆盖更大面积的场地的需求，是一件值得欣慰的事，我们甚至梦想借此可以实现笼罩整个城市。然而，ETFE 气枕式膜结构是否会被新技术所代替，新旧技术更替的故事是否会再一次上演？至少目前这种担心是多余的。因为全世界各地正在涌现出越来越多的 ETFE 气枕式膜结构项目，对于 ETFE 膜材产量的需求也在逐年增加。成本优势及环境效益无疑是最大的驱动力。当然，技术更迭的风险始终还是存在的，系统故障导致的高昂修补费用也不可避免。然而使该技术表现不尽如人意的，恰恰是那些项目管理者。同气承式膜结构相比，他们那些所谓的节约造价的要求，往往是由于降低了技术成本，为最终失败埋下了种子。虽然 ETFE 气枕式膜结构技术看似简单，但只有通过认真的工程监管及完备的细节处理才能最大限度避免问题的产生。因而工程师和承建商都应慎重选择。福伊特克公司作为这一方面的先驱者，致力于 ETFE 膜材特性的研究，通过他们不断的创新，这项技术已经日臻成熟。

引言

需求、权利和有效荷载

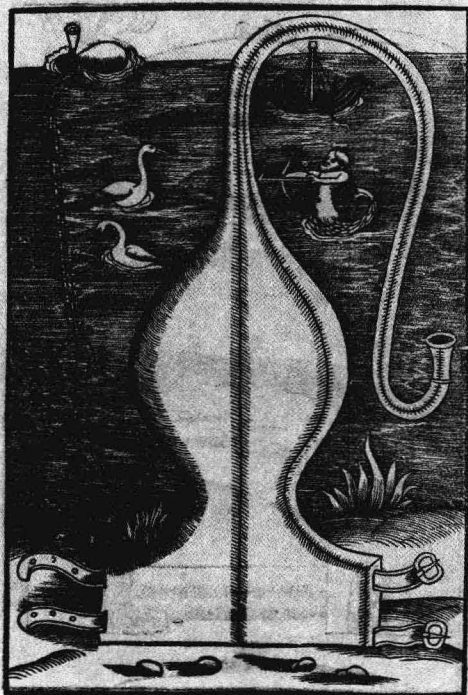
充气式结构——理念与技术

20 世纪前半叶，设计师曾畅想将气体作为一种建筑材料运用在建筑中，而那些极富创造力的建筑最终得以矗立起来却是近半个世纪的事。随着建筑与工程技术的不断进步，建筑构思与新的技术之间形成了互为促进、同步发展的关系。充气式结构作为一种新兴建筑形式，由于它超越了传统学科的范畴，因此在获得认同的过程中经历了一个漫长的历史阶段。

亚述的几幅图片分别显示的是勇士正借助充气的山羊皮穿越河流的情形¹，以及希腊、罗马人用充气的动物皮制作的水下呼吸装置和士兵用于休息的气垫。² 13 世纪，作为圣芳济会的修道士，罗杰·培根曾经设想过比空气还轻的气球，他将神学、炼金术与流体科学结合到一起，设想“若是将巨型薄壳组成的金属球内注满稀薄气体，那么它可能将会升上天堂。”³

据称，15 世纪末，热衷于绘制飞行器的莱昂纳多·达芬奇，同其他许多艺术家一样使用猪膀胱储存颜料，他也许是最早认识到空气固有的美学价值的艺术家。因为他曾利用膨胀的猪膀胱制成一个密闭的小空间。⁴ 直到 17 世纪下半叶，神父弗朗西斯科·拉娜 (Francesco Lana) 在真空环境中利用薄铜片制造出一个球体，才最终将空气应用向前推动了一大步。⁵

1783 年，法国纸业制造商兼业余科学家孟高尔费兄弟 (Montgolfier) 将寻求飞翔在天空中的梦想最终变为现实。他们借助亚麻布内表面衬纸的方式制作了一个直径 107m 的口袋，通过向布袋内充入经火加热的空气，最终实现了“把云装入袋子”的构想。⁶ 实验的消息很快被传播开来，当他们在凡尔赛宫面对国王再次重复这个实验时，约有 10 万人前来观看，人们“如同朝圣一般涌向现场”。⁷ 这个由亚麻布内衬纸张制造的热气球，当时承载的是一只羊、一只



1



2

1-2__ 罗马人将兽皮缝合后改装成潜水呼吸器和气床

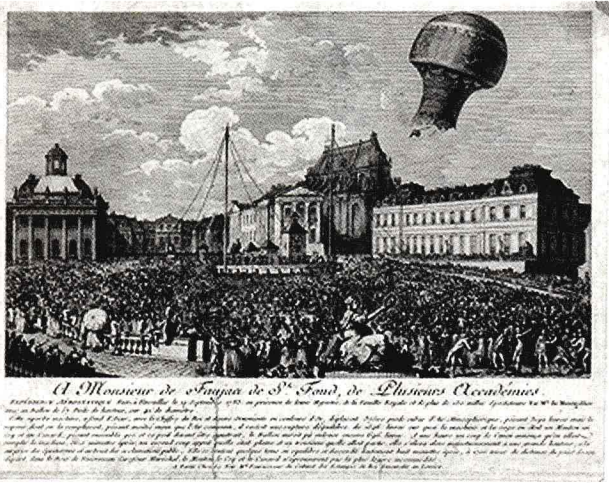
鸡和鸭的重量。几个月后，另一架孟高尔费气球实现了载人飞行，由雅克·查尔斯和尼古拉斯·罗伯特驾驶的氢气球则紧随其后进行了试航。他们当时所用的球胆皮是由浸过橡胶的丝绸制作而成。⁸此前，氢气球飞行还仅仅是个幻想，然而1783年还未结束，乘氢气球飞行便已成为一种流行的、浪漫的、大众化的冒险活动。⁹

一时间，氢气球成为娱乐与权威的混合体。尽管孟高尔费气球曾经装饰有金质鸢尾花形纹以取悦于国王，但当时的评论家却认为，小小的气球已经将世俗的、伦理的、政治的世界彻底颠覆了；科学开始凌驾于宗教之上，人类逐渐开始驾驭自然。当代历史学家西蒙·斯卡玛(Simon Schama)强调指出了凡尔赛气球背后隐含的影响力，“观看凡尔赛宫放飞的气球，再也不是某些人的特权。当天到场的所有人都分享了一切。在地面上，贵族们仍享有某种程度的特权，然而在空气中，飞行场面顷刻间民主化……这样的

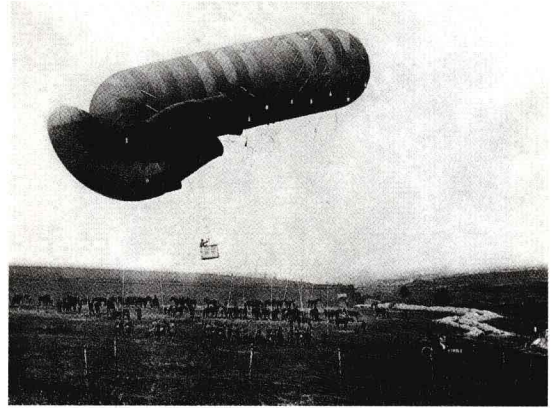
场面起先是不可预知的，人们是陆续、自发的聚集到一起……从某种意义上讲，一大群普通市民见证了人们可以解放自己、自由飞行的事实，他们获取的是一种与广阔空间瞬时结合的体验。”¹⁰

虽然气球的升空被视为是一场民主现象，然而其本身却一度沦为战争的工具。最初拿破仑的军队曾用它在空中侦察战场并指挥炮击。而后在包括第一次世界大战在内的多次战争中，都曾出现过氢气球的身影。1849年，因为不可预测的大风，奥地利人利用200个小型热气球轰炸威尼斯的计划收效甚微，使得人们对于气球承载力的要求开始大幅提高。¹¹在极地探险中，气球也曾被用作交通工具，但在变化无常的天气条件中，操作上稍有不慎便可能将整个探险毁于一旦。

截至1900年，为克服上述问题，孟高尔费的“圆形气球(globe aérostatique)”已演变成雪茄形飞船，这是一种带导向系统的飞艇。为减轻推进系统的重量，煤炭和蒸汽装置也被汽



3



4

3_1783年，孟高尔费的热气球在凡尔赛升空，推动了民主化进程

4_在第一次世界大战拿破仑指挥的战争中，飞艇开始用于敌方战地侦察

油和内燃机所替代。飞艇在军事中得以重用的同时，由于载重量的增加，在民用领域的应用开始上升，人们借助飞艇开始在数千公里长的大西洋航线上穿行。然而，充满氢气的飞艇极易引发火灾，1937年“兴登堡号”的失事最终迫使飞艇旅游停滞。尽管如此，二次世界大战期间，气球仍被用于侦察或是作为防御性的障碍物使用；而飞艇则用来扫雷和空中侦察；一些充气物充当假目标或临时建筑使用。

恩斯·马罗瑞 (Keith Mallory) 和阿维德·奥特 (Arvid Ottar) 在他们合著的《战争建筑》一书中写到，“1900 ~ 1945 年间，军事工程建设呈现两种明显的倾向：一种是新事物否定旧事物的进化发展方式，例如坦克就是堡垒轻型化的结果；另一种则是技术上真正从量到质的跨越，是一种完全创新性的发展方式。”¹² 显然第二种思维更具远见卓识，它并非仅仅局限在飞艇技术的研发上，而是为思想提供了更为肥沃的土壤，从而

催生了气承式支撑结构，其为此后的地面防御体系、高空科学研究以及日后的太空竞赛打下基础。而这些跻身于强大军事领域的技术的发展反过来又将对公共领域产生深远的影响。

伊甸园——理念与技术

充气式结构理论和技术的发展始终伴随着人类追求建立理想家园的努力。最为古老、久远的梦想可追溯到空中花园。记载于旧约之中的伊甸园，其名称最早源于希伯来文中的“喜悦”，如今已在许多古老的文化中形成特定概念。“天堂”一词本身包含花园、穹顶以及围墙的含义。无论是在伊甸园、还是天堂中，“花园”都是有边界的，花园内人与自然和谐相处，与之形成鲜明对比的是花园外残酷的现实环境。伊甸园是人类现实生活中的向往之地，特别是罗马人，他们通过各种方式给室内加温以创造有



5



6

5_1901年,一艘飞艇在30分钟内完成了往返圣克劳德与埃菲尔铁塔间的11km路程,因此受到褒奖

6_伊甸园内外决定着人与自然是共生还是对立的关系

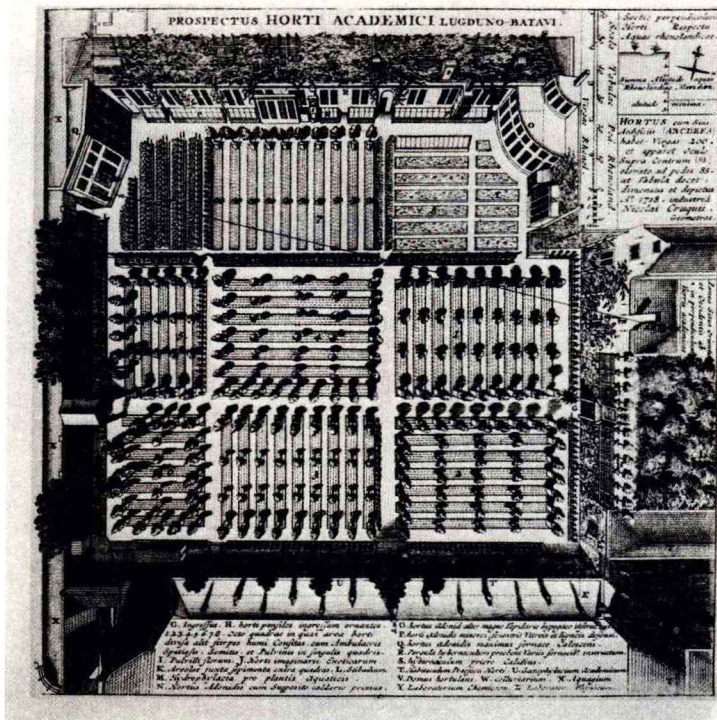
别于室外寒冷气候的温暖环境。¹³

文艺复兴时期,对于人本主义的关注唤醒了人类对理想世界的向往。1516年,托马斯·莫尔(Thomas More)在其撰写的《乌托邦》一书中指出,乌托邦就是完美社会、政治体系的代名词。无论如何,乌托邦的概念同伊甸园一样,实质上是根植于和谐社会,着眼于人与人的关系,有别于周边严酷的现实环境。文艺复兴时期对自然界进行的系统性研究促使第一座植物园于1534年在帕多瓦建成,该植物园力图将整个生态系统浓缩在一起。这些希望通过创造人工气候调节植物生长的科学实践,促进了伊甸园的概念向着早期科学温室的迈进。

1654年,修·普拉特(Sir Hugh Platt)在其《伊甸园》一书中关于温室园艺及其魅力的论述中提到,尽管“温室园艺仍然被视为一种巫术”¹⁴,但宗教理念似乎已经开始对现实屈服。从17世纪到18世纪,同充气式结构的发展

一样,众多技术更加容易为大众所接受。英国和荷兰开展了对于世界范围内的各种植物及其种子的采集工作,并在本国不断建造大量花样繁多的花园和温室,以容纳和观赏这些奇花异草,高效的“环境机器(environmental machine)”一词由此衍生而来。瑞典自然学家卡尔·林奈(Carl Linnaeus)将位于莱顿附近的一座私人动植物园誉为“具有艺术性的自然杰作”¹⁵。伊甸园中与世隔绝的完美世界正被人类努力地实现着。

直至1817年,投身这一新兴园艺业的企业家约翰·克劳迪斯·路登(John Claudius Loudon)这样赞美他的温室:“……在隆冬展现春夏的美景……是对人类驾驭自然的崇高赞颂。”伊甸园中和谐共生的理念至此已发生了转变。“这种环境幻想的文化”¹⁶,与1840年英国为鼓励玻璃大规模生产采取的取消玻璃税的经济手段一起,使玻璃产量大幅提高,该举直接刺激了大量温室暖房的建造——通过使用加热、



7

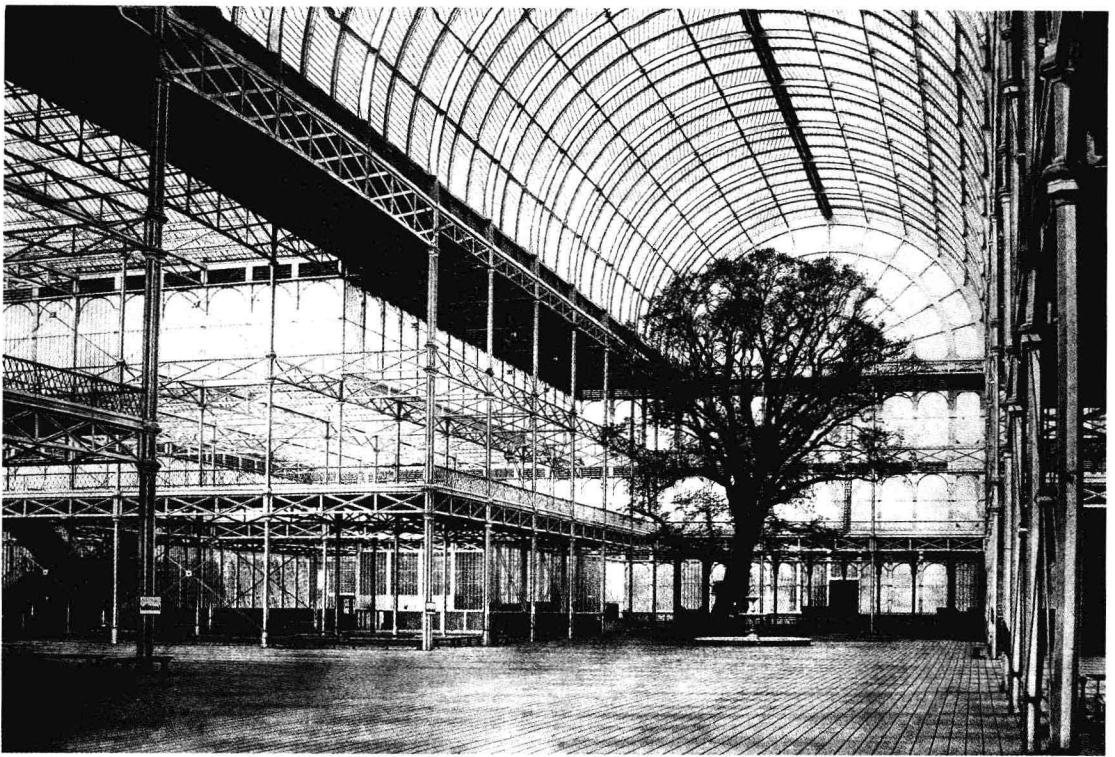
7__ 建于 1718 年的莱顿大学植物园见证了人类将自然纳入伊甸园的设计

通风以及遮阳装置创造适宜植物生长的人工环境——其原理同玻璃连廊或中庭给人类生活带来的好处如出一辙。

技术的进步催生出 19 世纪英国海德公园世界博览会中水晶宫的出现，这座由约瑟夫·帕克斯顿 (Joseph Paxton) 设计的伟大建筑代表着当时园艺温室的顶峰，它昭示着人类驾驭自然的能力已转化成政治和经济上的公开宣言。完美、和谐的伊甸园如帝国一般孕育出空前繁华的人造景观。当海德公园里许多大树被巨大的玻璃罩所笼罩时，自然也沾染了些许的商业成分。作为当时最为庞大的建造工程，水晶宫对环境围合所产生的深远影响被 19 世纪德国的评论家理查德·卢卡 (Richard Lucae) 记录了下来，“当我们身处透明的玻璃盒子中，室内室外的概念已经不复存在。我们与周围景物之间的屏障如同一层空气一般通透。如果我们将空气想像成液体，那么这层空气被模具凝固成有

形的固体。我们自己也身陷其中。身处有形的空气中，人们却很难对其形式和体积形成明确的概念。”¹⁷

卢卡的评论除了阐述人类已经具有建造天穹的经验以外，也预示了充气式结构这个 20 世纪将得到长足发展的特殊技术的雏形。同样，6 个月便矗立起来的水晶宫，在 5 个月的博览会之后被拆除，如同孟高尔费的气球一样，看似自发而短暂。然而这种新型轻盈的建筑形式，既实用又具有开拓精神，为建筑领域最终出现充气式膜结构作出了巨大贡献。20 世纪，人类对充气式结构的构想¹⁸与对于完美世界的憧憬交织在一起，促使新理论和建造人工环境动议的产生。无论是理论还是工程都在满足人们对于娱乐的追求，或是政治和军事的需求，或是经济方面的需要。



8

8_1851 年建成的水晶宫昭示着轻质结构将统治整个 20 世纪

- 1_Adriaan Beukers 和 Ed van Hinte.《轻质》(鹿特丹: 010 出版商) 1998, p.157.
- 2_Leonard C. Bruno.《传统技术》(华盛顿: 美国国会图书馆) 1995, p.18.
- 3_Roger N. Dent.《充气式建筑原则》(纽约: Halstead 出版社, John Wiley & Sons 有限公司)1972, p.24.参考 B. Clark 的《飞艇的历史》。
- 4_W. Sharp. “空气艺术.”《建筑设计》(1968 年 3 月) p.99.
- 5_Dent, 上述索引, p.24.
- 6_Bruno, 上述索引, p.209.
- 7_Simon Schama.《公民: 法国大革命史》(纽约: Alfred A.Knopf 出版社) 1989, p.124.
- 8_Bruno, 上述索引, p.209.
- 9_同上, p.209.
- 10_Schama, 上述索引, p.131.
- 11_Beukers 和 van Hinte. 上述索引, p.131.
- 12_Keith Mallory 和 Arvid Ottar.《战争中的建筑》(美国: 万神殿书局) 1973, p.269.
- 13_John Hix.《玻璃房子》(伦敦: Phaidon 出版社) 1974, p.9.
- 14_同上, p.10.
- 15_同上, p.13.
- 16_同上, p.19.
- 17_John Mckean.《水晶宫》(伦敦: Phaidon 出版社) 1994, p.32.
- 18_短语“充气式结构的构想”来自 Marc Dessauce 刊登在《充气时刻》上的文章“On Pneumatic Apparitions”。(纽约: 普林斯顿出版社和纽约建筑协会) 1999, p.13.

充气式膜结构构想： 建筑理念与应用

1917年，英国工程师弗雷德里克·威廉·兰彻斯特(Frederick William Lanchester)首次将充气式结构引入战地医院设计的方案中。这是一个用纤维织物构成的表皮封闭的帐篷，内部充入较低气压的气体将其支撑起来，完全摆脱了梁柱组成的传统结构体系，帐篷出入需经过气锁门。20年后，他同自己的建筑师兄弟设计了一座由气压支撑、索网束缚、直径300m的展厅。¹1942年，源于美国战时生产委员会(War Production Board)的需要，工程师赫伯特·H·史蒂文(Herbert H.Stevens)和设计师布什(Al Bush)开展了一项用于飞机制造厂房的设计，他们提出利用气压支撑1.2mm薄钢板的方案，实现净跨度366m的空间。²然而，技术的滞后最终导致这些天才般的构想未能实现。

轻质

巴克敏斯特·富勒(Buckminster Fuller)的远见卓识令他在设计、科技以及工业领域一直担当着企业和政府的顾问，在轻型结构设计及建造方面他同样贡献卓著。富勒经过比对船舶、飞艇以及飞机相对自重的空间有效性后，对于以轻质建筑结构为题的研究产生了兴趣；其一生的几个机遇促使他在军用领域展开了关于易于运输的轻型结构的研究。二战后，富勒的研究则转向将这些军事技术转化为民用技术。

结构的有效性是富勒进行技术攻坚的主题。出于对工业生产效率与环境保护双重责任方面的考虑，富勒将“轻质”的概念定义为：“少费多用”，即采用尽可能少的材料获得尽可能大的空间。1951年，先于可持续概念提出的很多年以前，富勒便提出了“宇宙飞船地球”(Spaceship Earth)³的概念，在他看来，地球作为一个世俗