

更新理念与技术措施的统一——基于ETFE膜气枕系统技术的既有建筑更新改造

Unity of Renewal Concept and Technology Measure: the Renewal Restoration of Existing Building Based on the Technology of ETFE Cushion System

撰文 姜忆南 葛建 王佳 李栋 北京交通大学

摘要 ETFE气枕系统作为一种建筑新技术,应用于既有建筑更新改造具有不可比拟的优势。从结构、安全、生态可持续性等方面阐述其在既有建筑更新改造中的适用性,从而丰富我国既有建筑更新改造工程设计的构思与方法。

关键词 ETFE气枕 既有建筑 更新 改造

1 ETFE膜气枕系统的技术性能指标

现代建筑膜材是多种涂层织物构成的复合材料的总称。依据其纤维织物基层和涂层的不同,制成的各种膜材的性能存在较大差异,尤其是在耐久性方面。随着膜材方面科学技术的不断发展,目前的膜材耐久性可达25~30年,成为永久性建筑的良好选材。膜材厚度一般为1mm左右,它应用于建筑中既是受力构件,又是围护构件,因此,膜材被誉为继石材、木料、钢材、玻璃和混凝土之后的“第六种建材”。ETFE(乙烯聚四氟乙烯)膜材则是一种全新型建筑膜材,它是一种聚合物挤出材料,各项性能均优于其他膜材产品,在耐火、耐久、透光等方面的性能与玻璃相当(表1)。应用ETFE膜材的膜气枕系统其结构形式推陈出新,在结构、安全、可持续性等方面具有显著的优势,2008年奥运会投入使用的北京国家游泳中心(水立方)即是国内ETFE膜气枕系统应用的著名实例(图1)。

ETFE膜气枕系统是以轻型钢结构为骨架支撑ETFE膜气枕而得名。气枕是构成该结构的主要部件,它由双层或多层ETFE膜面焊接或粘结而成,充气后形如枕形。2001年竣工的英国伊甸园工程(The Eden Project)是采用ETFE膜气枕系统的世界上最大的温室建筑,它使内部植物生长获得充足的阳光,很多评论认为该项目对于探索环境科学起到重要作用(图2)。ETFE膜气枕系统不仅适用于新建规模巨大的工程项目,在既有建筑改造更新中发挥的作用也是其他结构形式无法替代的。

2 ETFE膜气枕系统的优点

2.1 轻质,减少荷载

气枕系统中采用的膜材自重,在结构计算上几乎可以忽略不计。单个气枕单向受力跨度可达3~5m,双向受力时跨度高达11m,从而使每一个气枕无需次级结构,直接由主体结构支撑。相对覆盖同等跨度的空间,其结构自重约为传统结构的

表1 玻璃和ETFE膜材的材料性能

材料	性能				
	密度/kg/m ³	耐火性(融化温度/℃)	耐久性/年	透光率/%	再重复利用性
玻璃	12~48	600~700	>20	90	良好
ETFE	0.05~1.0	300~330	>25	96	极好



图1 北京国家游泳中心(水立方)



图2 英国伊甸园工程(The Eden Project)



图3 帕萨迪纳设计学院的艺术中心天窗及其骨架





图4 Frosilo Flats住宅楼吊装中的气枕式膜结构顶棚

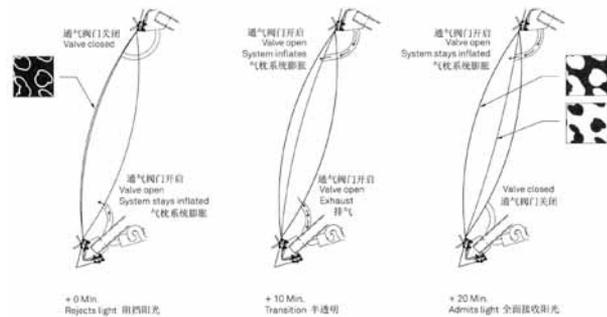


图5 可控性采光原理

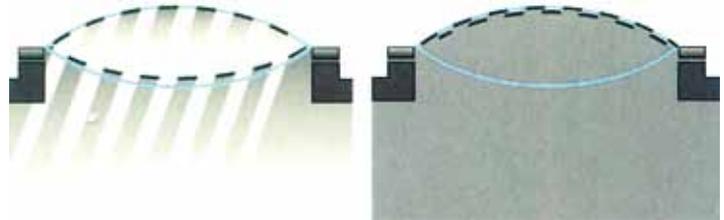


图6 调节不同气囊中气压实现调节透光度

1%。在既有建筑的改造更新中，工程面临的条件通常要求改建或加建要尽可能减少对原有结构的不利影响，因此结构自重轻的ETFE膜气枕系统可以最大限度地降低对既有建筑产生的破坏，大大提高改扩建结构的安全系数。如2004年竣工的帕萨迪纳设计学院艺术中心改造工程，项目要在混凝土墙上局部开口进行采光（图3）。设计要求加建天窗重量不得超过开洞的原有结构减少的重量。经过与包括玻璃在内的多种围护系统的比较研究，最终采用了3层印有图案的ETFE膜气枕系统，使得天窗钢框架用钢量大大减少。新加建的天窗呈非矩形造型，突出了学校的艺术氛围。天窗的每个面都由单个的ETFE气枕围合，取消中间的连接节点，不仅争取了最大的采光量，还满足了设计美学方面的考虑。天窗在自然采光及太阳能利用方面成为典范，雕塑般的形式成为一道风景。又如2005年在哥本哈根竣工的仓宅住宅楼（Frosilo Flats）中庭项目（图4）。作为一项废弃谷仓的改建计划，原有混凝土墙不能开大洞，因此设计师通过在谷仓上部加建ETFE气枕系统顶棚，将谷仓中间改造成巨大的入口门厅，垂直交通与服务设施设置其中。中庭顶棚取自球面体的一部分，支撑桁架从球心向外发散，以充气气枕取代桁架间的索网，防止上弦杆件发生侧向失稳。整体结构由于重量轻，不仅减少了对原有结构造成的不利影响，施工上还实现了整体吊装。

2.2 保温遮阳，节能环保

ETFE膜气枕具有较强的保温隔热能力，这是因为每个气枕即是一层或多层封闭的气囊，气囊中封闭的空气使其隔热保温性能随着空气层厚度的增加而增加，同时与玻璃温室相似，由透光性能良好的气枕围合的空间也同样产生温室效应。但不

同的是，气枕系统可以利用自身的特殊构造，方便而精确地调节透光度，将遮阳设计复合在气枕中。其原理是采用3层膜面形成两个独立的气囊，通过调节两个气囊中的充气量，控制一层膜面上镀银花纹相对另外两层膜面的开合，达到调节透光量的目的（图5，6）。因此，以ETFE气枕系统围合的空间冬季可以吸收、透射阳光并获取热量，用以补充建筑取暖的要求，降低能源消耗；夏季ETFE气枕系统则转化成一套遮阳系统，避免温室效应。例如帕萨迪纳设计学院的艺术中心改造项目中，印有特别设计图案的3层膜材构成的气枕天窗可以将透光量在20%~50%的范围之间加以调节。除此而外，由气枕围合的封闭空间通过设置可开启的通风窗孔，来组织室内自然通风，大大减少了夏季空调制冷所带来的能源消耗。

气枕式膜结构在节能环保方面的优势使越来越多的历史建筑改扩建项目倾向采用这种轻质结构。建于1917年的英国财政部大楼（Her Majesty's Treasury）的改扩建工程于2002年完工，该工程在原有5层楼之间的天井上加建由3层膜构成的ETFE气枕系统结构顶棚，形成了包括一个入口大厅、一座员工培训中心、一个图书馆以及一间咖啡厅在内的公共活动区，并通过气枕天窗将自然风和自然光引入其中（图7）。该项更新改造工程一方面使原有室外天井封闭后在空间使用价值上得到提升，并使传统建筑适应现代化办公的要求；另一方面，封闭原有天井后，围合天井的外墙转化成内墙，建筑耗能也随之大幅降低。同时，封闭后的天井具有烟囱效应，当天井周围的原有建筑窗户打开时，新鲜空气在气压的作用下从建筑外侧被抽入室内，废气则经由天井上的排气孔排出。覆盖有ETFE膜气枕系统的天井成为产生热压差、推动室内气体交换的原动力。事实证



图7 英国财政部大楼改造后的中庭



图8 热阻丝将气枕切割开的实验



图9 伦敦帝国田中商学院

明，通过合理的技术化改造，历史建筑同样可以贯彻可持续发展理念。

2.3 安全，有利防灾

除了上述特性外，气枕系统作为一种柔性结构被广泛接受的另一关键因素还在于其安全性。首先，ETFE膜材本身具有较高的拉伸强度，这意味着膜面虽然可能被利器刺破，但破损不易向更大范围发展。其次，多层气枕还具备自我修复破损的能力，如果外层被刺破，中间层会在压力推动下一定程度地自动封堵外部漏洞；另外，与玻璃顶棚系统不同，ETFE气枕破损后不会脱离支撑框架，避免玻璃坠落，安全系数大大提升。

ETFE膜气枕系统良好的防火性能是其安全性的又一方面。构成ETFE的主要化学元素氟是一种难燃物，只有当温度超过800℃时，ETFE才会产生微不足道的有毒气体。作为围护结构的ETFE气枕系统，在充气状态下ETFE膜面受到张拉，高温气焰会使膜材萎缩，原本封闭的空间瞬间转化成为开放空间，使热焰顺利排入大气。泄气后的气枕不会对使用者造成伤害。此外，最近研发的热丝排烟口是将直径为4mm的电阻丝结合到气枕边缘节点中。电阻丝由连接到建筑中央控制器的烟感应装置控制，当

感应装置被激活，加热的电阻丝将像刀片一样迅速割开膜材，从而使着火点与大气相连（图8）。气枕系统所具有的这种非机械排烟系统的效率是其他排烟装置无法比拟的。竣工于2004年的伦敦帝国商学院项目是首个应用热丝排烟技术的实际项目（图9）。该校舍的局促用地上拥挤着多个建于20世纪60年代的建筑。由玻璃幕墙和ETFE气枕系统顶棚围合的中庭将原本独立的各个建筑统一起来，围合后的大厅既是学校社交活动中心，也是学校的主要入口之一。由于ETFE膜气枕系统在防火方面的表现，设计将封闭后的中庭视为室外空间，原有建筑中所有面向中庭的门窗均未更换，与中庭保持自然通风。项目中气枕系统的加入节省了一大笔用于购置防火设施和新型机电控制系统的费用，同时满足了中庭作为公共活动空间的安全需求。

3 结语

传统技术在既有建筑更新改造中存在的局限性促使人们不断探索新的技术手段。事实证明，ETFE气枕系统是一种新型结构体系，更是众多建筑新技术的良好载体。它应用于既有建筑更新改造领域中，在结构、安全、施工以及生态可持续性方面的突出表现已经得到了越来越多的认可。相信随着膜结构技术的不断发展，其必将为既有建筑改造提供更为丰富的技术手段。

参考文献

- [1] 张家臣，张蓉. 历史建筑保护及利用发展研究[J]. 建筑技艺，2010（7）.
- [2] Annette Le Cuyer. ETFE Technology and Design[M]. Birkhauser, 2008.
- [3] 克劳斯 迈克尔·科赫. 膜结构建筑[M]. 卢昀伟，刘向峰，徐良等译. 大连理工大学出版社，2007.
- [4] 杨庆山，姜忆南. 张拉索-膜结构分析与设计[M]. 科学出版社，2004.

图片来源：

- 图1见www.baidu.com
- 图2见blog.hideall.co.uk
- 图3~9 见Annette Le Cuyer. ETFE-Technology and Design. Birkhauser Verlag AG, 2008



第一作者简介

姜忆南，北京交通大学建筑与艺术系副教授，一级注册建筑师。主要研究方向：新型结构技术、居住建筑设计。