

综 述 ·

ETFE 薄膜的材料性能及其工程应用综述<sup>\*</sup>

胥传喜 陈楚鑫

钱若军

(Right Tech(s) Pte Ltd 新加坡) (同济大学 上海 200092)

**摘 要** 就 ETFE 薄膜的材料性能、在膜结构工程中的应用形式、ETFE 气垫的工作原理、膜材连接方法、典型工程等进行综述。

**关键词** 膜结构 膜材料 ETFE 膜材 材料性能 应用

AN INTRODUCTION OF MATERIAL PROPERTIES AND ENGINEERING  
APPLICATIONS OF ETFE FOIL

Xu Chuanxi Stanley Tan C S

Qian Ruojun

(Right Tech(s) Pte Ltd Singapore) (Tongji University Shanghai 200092)

**ABSTRACT** This paper describes the material properties of ETFE foil, summarizes the working principle of ETFE foil cushion as well as the connection method the foils and reviews its applications in the field of architectural engineering.

**KEY WORDS** membrane structure membrane ETFE foil material property application

近年来,以薄膜为主要材料的膜结构得到了很大的发展。而这一发展在很大程度上取决于薄膜材料技术的进步。用于膜结构的薄膜材料可分为织物类膜材和非织物类膜材两大类。其中织物类膜材常用的有 PVC 涂层覆盖聚酯纤维织物(以下简称 PVC 膜材)以及 PTFE 涂层覆盖玻璃纤维织物(以下简称 PTFE 膜材)。PVC 膜材的价格比较便宜,加工也比较方便,目前国内的膜结构工程绝大部分采用 PVC 膜材。以上海 8 万人体育场看台屋盖为代表的几个 PTFE 膜材工程,其设计、加工及安装指导均由国外公司承担。在非织物类膜材中,以 ETFE 薄膜最具代表性和竞争性。国内目前尚无 ETFE 膜材工程,也鲜有介绍 ETFE 膜材的文献。

ETFE 是英文 Ethylene Tetra Fluoro Ethylene 的缩写,中文名称为乙烯-四氟乙烯共聚物。ETFE 是一种无色、透明的颗粒状结晶体,具有极好的耐擦伤性和耐磨性,耐高温、耐腐蚀,绝缘性能好,可用作电缆护套或管道护衬。

用于建筑工程上的 ETFE 膜材是由其生料加工而成的薄膜,厚度通常为 0.05 ~ 0.25 mm,非常坚固、耐用,并具有极高的透光性。欣闻 2008 年北京奥运会国家体育馆等场馆中将采用这种膜材料,因此,本文就 ETFE 薄膜的材料性能、在膜结构工程中的应用形式、ETFE 气垫的工作原理、膜材连接

方法、国外典型工程等作一介绍。

## 1 ETFE 薄膜的材料性能

### 1.1 ETFE 膜材的基本力学性能

#### 1) 厚度和质量

ETFE 膜材的厚度通常在 0.05 ~ 0.25 mm。随着厚度的增加,膜材将更硬更脆,难以加工。

ETFE 的密度约为 1.75 g/cm<sup>3</sup>。以 0.20 mm 厚的 ETFE 膜材为例,其质量约 350 g/m<sup>2</sup>。

#### 2) 抗拉强度

ETFE 膜材的抗拉强度大于 40 MPa。

#### 3) 应力-应变关系

常温下张拉应力在 20 MPa 以下时,ETFE 膜材呈完全弹性性质,张拉模量达 800 ~ 1 000 MPa;当张拉应力在 25 MPa 附近会出现屈服点,此后进入塑性强化阶段,直至破断。

#### 4) 破断伸长率

ETFE 膜材的破断伸长率达 300 % 以上。

### 1.2 ETFE 膜材的其他性能

#### 1) 耐久性

\*感谢德国 Eric Moncrieff 先生、Robert Hodann 先生、荷兰 M J de Grip 小姐等提供的宝贵资料和有益讨论。部分图片搜集自相关网站。

第一作者:胥传喜 男 1964 年 9 月出生 副教授

收稿日期:2003 - 09 - 01

ETFE 膜材具有极佳的抗老化能力,使用年限达 25 年以上。

#### 2) 颜色及透光率

ETFE 膜材通常为无色透明状,也可以做成白色。根据需要可在透明或白色膜材上印制各种图案。以 0.20 mm 厚的 ETFE 膜材为例,单层透明膜材的透光率高达 95%,白色膜材为 50%~55%。利用白色膜材或在透明膜材上印制不同的颜色和图案,可调节进入建筑物内的光线。

#### 3) 防火性能

ETFE 为阻燃材料。即使在火焰中,ETFE 膜材热熔后会收缩,但无滴落物。由于 ETFE 膜材很薄很轻,万一发生火灾,其危害性较小。

#### 4) 自洁性能

ETFE 膜材表面非常光滑,具有极佳的自洁性能。在用 ETFE 膜材建造的膜结构上,灰尘及污迹会随雨水冲刷而除去。外表的人工清洗一般 4 年才一次。

#### 5) 气候适应性能

ETFE 膜材的工作温度范围为  $-200 \sim 150$  ;材料熔点为  $275$  左右。ETFE 膜材具有极好的稳定性和气候适应性。实践表明,暴露在恶劣气候条件下 15 年以上的 ETFE 膜材,其力学和光学性能并没有改变。在多雪地区,即使玻璃屋面被冰雹砸碎了,ETFE 膜材屋面上也仅留下一些小小的凹痕。

#### 6) 抗撕裂性能、柔韧性和可加工性

ETFE 膜材具有良好的抗撕裂性能、柔韧性和可加工性。

#### 7) 可回收性

ETFE 膜材可以被热熔成颗粒状并重新整合。

## 2 ETFE 膜材的应用形式

### 2.1 单层张拉式

ETFE 膜材可以像 PVC 膜材或 PTFE 膜材一样,以单层张拉方式应用于膜结构中。尽管 ETFE 材料本身的抗拉强度并不低,但由于做成的膜材很薄(厚度小于织物类膜材的  $1/5$ ),因而 ETFE 以单层张拉方式应用于膜结构时,结构的跨度要比采用织物类膜材的结构来得小。

### 2.2 双层或多层气垫式

ETFE 膜材常被做成双层或多层气垫式而应用于膜结构中,即将 ETFE 膜材按设计的形状和层数裁剪、拼接在一起,向层间充气使之成为气垫(图 1)。气垫的形状可以是圆形、椭圆形、三角形、矩形、

六边形或其他任意的形状。通过铝合金构架或索网将多个气垫连接在一起,可组成大覆盖空间。

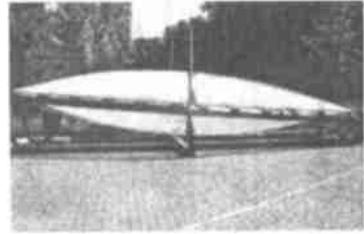


图 1 ETFE 膜材做成的气垫

## 3 ETFE 气垫的工作原理

### 3.1 ETFE 气垫中空气的作用

在 ETFE 气垫中,空气的作用主要有以下几点:

1) 稳定作用。气垫内的空气使表面的 ETFE 膜材形成张力,维持形状并提供刚度。

2) 传递外荷载。将作用于外表面的荷载传递给内表面或将作用于内表面的室内正压传给外表面的膜材料。

3) 隔热。气垫是良好的隔热层。对于多层气垫,通常外层用 0.20 mm、中间层用 0.05 mm、内层用 0.15 mm 厚的 ETFE 膜材。气垫的层数取决于隔热的要求。

### 3.2 外荷载的传递及气垫的承载能力

在内压作用下,气垫表面的 ETFE 膜材受拉,这个拉力将传递给支承气垫的边界构件(通常为铝合金构架)。

当外荷载(风压力、雪载等)作用于气垫表面时,气垫的外表面会发生变形,通过气垫内气压的作用,气垫内表面的张力将会增大;当作用于气垫外表面的风作用为吸力时,气垫外表面的张力则会增大。相应地,作用于边界构件上的力也会发生改变。

当多个气垫组合在一起时,相邻单元间的作用会相互平衡,仅在整个结构边缘处,支承结构承受气垫表面传来的作用力。

气垫的承载能力取决于所用 ETFE 膜材的厚度、气垫的跨度、矢高、形状和充气压力。以 5 m 跨度的长方形气垫为例,一般可承受  $2 \text{ kN/m}^2$  以上的风吸力和  $3 \text{ kN/m}^2$  的雪荷载。通过在气垫内部采用不锈钢支架或索网加强的方法,可获得更大的跨度或承载能力。

### 3.3 气垫内空气压力的变化与调节

气垫内的空气压力决定了气垫的刚度和承载能

力,即气垫内的压力越大,气垫表面的 ETFE 膜材张得就越紧,气垫的刚度就越大。在强风或降雪时,需要增加气垫内的气压,以增强气垫的刚度和承载能力,防止外层膜因受压而发生曲面翻转。

ETFE 气垫的内压可以随外荷载的不同在 200 ~ 800 Pa 之间变化。

另一方面,由于太阳光的照射,气垫内的空气温度会升高,体积膨胀,导致压力增大。为保证气垫的安全,当气垫的内压超过限值时,需要排气减压;当没有阳光照射、温度下降后,又需要充气补气。

### 3.4 控制系统及充气设备

由于 ETFE 气垫内的空气压力需要不间断地监控、调节,每个气垫上都要有连通管连接到控制系统及充气设备上,见图 2 所示。控制系统及充气设备包括动力(含应急动力供应)、气泵(至少 2 台,一用一备)、控制柜、空气净化器(除湿、除尘)、感应器、减压阀、单向阀、连通管等等。由于气垫内、外表面的温度不同,湿空气进入气垫后会在气垫内结露,影响气垫的透光率及外观,故要进行除湿处理。

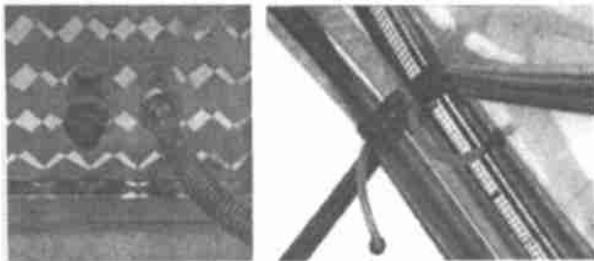


图 2 气垫上的连通管

由于气泵的作用仅仅是维持气垫内的气压,因而消耗的能量非常低。以总面积 1 000 m<sup>2</sup> 的 ETFE 气垫为例,一般需要一台功率为 220 W 的备用气泵,一台功率为 100 W 的工作气泵。工作泵在压力感应器控制下工作,运行时间为额定时间的 50% 左右,即实际能量消耗约 50 W。

## 4 ETFE 膜材的裁剪与加工制作

### 4.1 ETFE 膜材的裁剪

与织物类膜材相类似,ETFE 膜材也是以卷材形式供应的(幅宽为 1.5 m 左右),要根据所需的形状,将膜材裁剪、拼接成整体。合适的裁剪式样和正确的应变补偿,是避免膜面出现褶皱的保证。对于任意造型的复杂曲面,裁剪式样尤为重要。

### 4.2 ETFE 膜材的加工制作

ETFE 膜材可通过热熔焊接在一起。高频焊接或超声焊接并不适用于 ETFE 膜材。焊缝宽度通

常为 8 mm,远低于织物类膜材的焊缝宽度。合适的加热温度、压力和加热时间以及恰当的冷却程序,是焊接质量的重要保障。

尽管 ETFE 膜材具有良好的柔韧性,但折叠会在膜面留下折痕,影响外观。加工成型后的 ETFE 膜材,需要放在特制的保护容器内保存和运输。

## 5 ETFE 膜材的典型工程

ETFE 膜材在国外已有 20 多年的应用历史。由于其极好的透光性能,特别适合建造需人工模拟自然环境的建筑如植物园以及运动场馆等。下面对几个典型工程作一介绍。

### 5.1 荷兰 Arnhem 动物园(Arnhem Zoo, Holland)

荷兰 Arnhem 动物园共有 4 座用 ETFE 气垫作屋顶的建筑物。最早的一座(jungle house)建造于 1981 年,通过悬索将气垫连接在一起。继 1988 年建造了另一座小规模建筑(bush house)后,1994 年又建造了两座较大规模的工程,用来模拟沙漠和热带雨林的生态。



图 3 Arnhem 动物园

### 5.2 英国的 Hampshire 网球与健身俱乐部(Hampshire Tennis and Health Club, Southampton, U K)

英国的 Hampshire 网球与健身俱乐部为两座相邻的用 ETFE 气垫建造的建筑物,覆盖面积为 36 m × 78 m。每个 ETFE 气垫单元的尺寸为 18 m × 3 m,由三层 ETFE 膜材组成,气垫内气压为 250 Pa。在屋脊及檐口处设有钢索,通过室外的立柱与拉索支承整个结构。由于气垫外层膜为白色,因而室内光线特别柔和,见图 4。该工程建成于 1992 年。

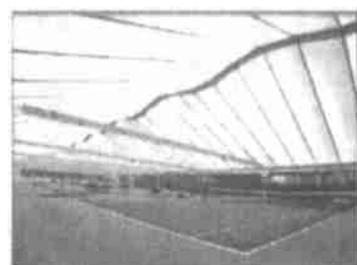


图 4 Hampshire 网球与健身俱乐部

### 5.3 英国的伊甸园(The Eden Project, U K)

在著名伊甸园项目中,ETFE 气垫的总面积达 29 200 m<sup>2</sup>。气垫单元由三层膜组成,形状有六边形、五边形及三角形,其中六边形单元的对角尺寸达 11 m。通过轻质钢构架将气垫连接在一起覆盖 8 个穹顶。气垫内的气压平时为 250 Pa,降雪时增加至 400 Pa。该工程建成于 2001 年,见图 5。



图 5 伊甸园

### 5.4 德国的“Moby Dick”游泳池(Swimming Pool “Moby Dick”, Rülzheim, Germany)

在 2000 年翻新的“Moby Dick”游泳池也采用了由三层 ETFE 膜材组成的气垫。每个气垫单元的尺寸为 4 m × 20 m,由木拱支承,覆盖 1 570 m<sup>2</sup>的面积,见图 6。内外两层膜的厚度均为 0.20 mm,中间层为 0.08 mm,外层膜印有图案以减少热量透过。



图 6 游泳池“Moby Dick”

### 5.5 瑞士苏黎世的 Masoala 雨林(Masoala Rain Forest, Zoo Zurich, Switzerland)

2003 年 6 月建成开放的瑞士 Masoala 雨林长 120 m、跨度为 90 m,屋顶连同墙面的 ETFE 气垫总面积达 14 600 m<sup>2</sup>,见图 7。气垫由三层 ETFE 膜材组成,外层膜材厚 0.20 mm,中间层厚 0.10 mm,内层膜厚度为屋顶 0.18 mm、墙面 0.15 mm。

### 5.6 在建体育场馆项目

为迎接 2006 年的世界杯足球赛,德国新建或翻新了一些比赛场馆,其中不少场馆采用了 ETFE 膜材。2002 年 8 月开工建设的 Allianz Arena 将应用

1 000 多个 ETFE 气垫,建成后将以会变色的透明场馆成为慕尼黑的又一标志性建筑(图 8);而汉诺威足球场(The Hannover Soccer Stadium)在重建后则将以 10 000 m<sup>2</sup>的面积成为世界上最大的单层 ETFE 膜材建筑物。



图 7 Masoala 雨林

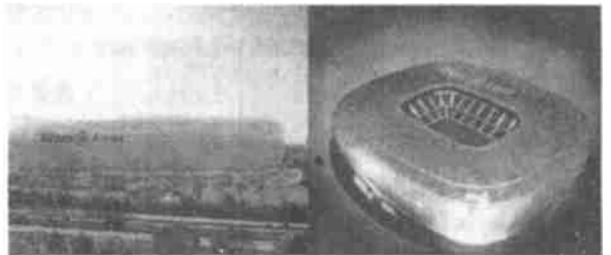


图 8 Allianz Arena

## 6 结 语

ETFE 膜材常以气垫的形式应用于建筑中,气垫的经济跨度一般在 3~5 m。通过钢结构、铝合金结构或索网可以将多个气垫连接在一起组成大覆盖空间。就每一个气垫而言,都是一个充气结构;而就整个结构而言,每一个气垫单元又相当于围护结构。

相对于织物类膜材而言,ETFE 膜材的加工要求更为精确,且建成后需要不间断地监控和补充气压。目前世界上有能力生产与加工 ETFE 膜材的厂家较少。

ETFE 膜材价格较高,但由于其非常轻,因而支承结构及基础工程的造价可以大大节省。就整个项目而言,利用 ETFE 气垫作屋盖较之传统透明材料如玻璃等,其初始投资仅为传统材料的 65% 至 70%;虽然 ETFE 气垫需要不停地充气以维持压力,但其在清洁费用方面的节省足以抵消其运行费用。作者相信在不远的将来,ETFE 气垫将在很大程度上取代高性能玻璃而得到更广泛的应用。

中国钢结构协会房屋建筑钢结构分会欢迎广大从事钢结构教学、科研、设计、施工、生产的企事业单位及个人加盟。

联系电话:010-82228055/7235