

重庆市工程建设标准

建筑膜结构检测技术标准

DBJ50/T-380-2021

Technical standard for inspection of building  
membrane structures

主编单位:重庆建筑工程职业学院

重 庆 大 学

批准部门:重庆市住房和城乡建设委员会

施行日期:2021年5月1日

2021 重 庆

# 重庆工程建设

重庆市住房和城乡建设委员会文件

渝建标〔2021〕5号

重庆市住房和城乡建设委员会  
关于发布《建筑膜结构检测技术标准》的通知

各区县(自治县)住房城乡建委,两江新区、经开区、高新区、万盛经开区、双桥经开区建设局,有关单位:

现批准《建筑膜结构检测技术标准》为我市工程建设地方标准,编号为 DBJ50/T-380-2021,自 2021 年 5 月 1 日起施行。

本标准由重庆市住房和城乡建设委员会负责管理,重庆建筑工程职业学院负责具体技术内容解释。

重庆市住房和城乡建设委员会

2021 年 2 月 10 日

重庆工程建设

## 前 言

根据重庆市住房和城乡建设委员会《关于下达 2018 年度重庆市工程建设标准制订修订项目计划(第一批)的通知》(渝建〔2018〕447 号)的要求,由重庆建筑工程职业学院和重庆大学负责,会同有关单位,共同制订了《建筑膜结构检测技术标准》。

标准制订过程中,编制组开展了广泛的调查研究,进行了相关试验研究工作,认真总结了膜结构建筑在国内外及重庆市内的工程实践经验,对主要问题进行了反复讨论,参考有关国内外先进标准,并与相关标准进行了协调,在充分征求意见的基础上完成了编制工作。

本标准共分 9 章,主要技术内容包括:1. 总则;2. 术语、符号;3. 基本规定;4. 膜材性能检测;5. 其它材料性能检测;6. 连接检测;7. 张力检测;8. 尺寸与偏差检测;9. 外观质量检测。

本标准由重庆市住房和建设委员会负责管理,由重庆建筑工程职业学院负责具体技术内容的解释。请各单位在执行本标准的过程中,注意总结经验,并将意见和建议寄送重庆建筑工程职业学院(重庆市南岸区梨花大道 857 号,邮编:400072),供修订时参考。

本标准主编单位、参编单位、主要起草人和审查专家：

主 编 单 位：重庆建筑工程职业学院

重庆大学

参 编 单 位：重庆市建筑科学研究院有限公司

北京睿拓时创科技有限公司

重庆建工第四建设有限责任公司

重庆渝邵实业有限公司

广州大学

宁波建工工程集团有限公司

四川泰宏膜结构工程有限公司

主要起草人：郑周练 张京街 刘长江 张 鹏 李科杰

张青华 李 栋 熊 刚 曹淑上 李江涛

陈火贵 阳江英 徐建华 骆文进 练永盛

余政兵 谢传喜 田 园 杨 睿 邱勇七

金祖斌 刘 坚 韩学兵 陈 杰

主要审查人：徐 革 邹时畅 杨再富 周水兴 张彬彬

杨经纬 魏奇科

## 目次

1	总则	1
2	术语、符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	4
3	基本规定	5
4	膜材性能检测	6
4.1	一般规定	6
4.2	基本性能	6
4.3	力学性能	7
4.4	建筑物理性能	8
4.5	防火性能	8
5	其它材料性能检测	10
6	连接检测	11
6.1	一般规定	11
6.2	膜面连接强度	11
6.3	膜面连接水密性和气密性	12
7	张力检测	13
8	尺寸与偏差检测	14
8.1	一般规定	14
8.2	金属构件尺寸偏差	14
8.3	膜面控制点几何偏差	14
9	外观质量检测	16
9.1	一般规定	16
9.2	缺陷与损伤	16

附录 A	取样方法	17
附录 B	膜材面密度的检测	18
附录 C	膜材抗拉强度及断裂延伸率的检测	19
附录 D	膜材撕裂强度的检测	27
附录 E	膜材弹性模量及泊松比的检测	30
附录 F	膜材剪切模量的检测	36
附录 G	膜材徐变性能的检测	40
附录 H	膜材耐候性能的检测	44
附录 J	膜片与膜片连接强度的检测	47
附录 K	膜面与刚性边界连接强度的检测	49
附录 L	膜面与柔性边界连接强度的检测	51
附录 M	膜顶和膜角连接强度的检测	53
附录 N	膜面现场淋水检验方法	56
附录 P	膜面张力的检测	57
附录 Q	数字散斑测量流程	61
	本标准用词说明	65
	引用标准目录	66
	条文说明	69



## Contents

1	General provisions .....	1
2	Terms and symbols .....	2
2.1	Terms .....	2
2.2	Symbols .....	4
3	Basic requirements .....	5
4	Performance testing of membrane Material .....	6
4.1	General requirements .....	6
4.2	Basic performance .....	6
4.3	Mechanical performance .....	7
4.4	Architecture physical performance .....	8
4.5	Fireproof performance .....	8
5	Testing of other material performance .....	10
6	Testing of membrane connection .....	11
6.1	General requirements .....	11
6.2	Strength of membrane connection .....	11
6.3	Water and air tightness of membrane connection ...	12
7	Testing of tension .....	13
8	Testing of size and deviation .....	14
8.1	General requirements .....	14
8.2	Size deviation of metal structures .....	14
8.3	Geometric deviation of membrane control points ...	14
9	Testing of appearance quality .....	16
9.1	General requirements .....	16
9.2	Flaw and damage .....	16

Appendix A	Sampling method .....	17
Appendix B	Testing of membrane area density .....	18
Appendix C	Testing of membrane tensile strength and rupture elongation .....	19
Appendix D	Testing of membrane tear strength .....	27
Appendix E	Testing of membrane elastic modulus and poisson's ratio .....	30
Appendix F	Testing of membrane shear modulus .....	36
Appendix G	Testing of membrane creep resistance .....	40
Appendix H	Testing of membrane weathering .....	44
Appendix J	Testing of membrane unit to membrane unit connection strength .....	47
Appendix K	Testing of connection strength between membrane and rigid boundary .....	49
Appendix L	Testing of connection strength between membrane and flexible boundary .....	51
Appendix M	Testing of connection strength of membrane apex and corner .....	53
Appendix N	Testing method for field drenching of membrane .....	56
Appendix P	Testing of membrane tension .....	57
Appendix Q	Measurement process of digital image correlation .....	61
	Explanations of Wording in this standard .....	65
	List of quoted standards .....	66
	Explanations of provisions .....	69

# 1 总 则

- 1.0.1 为规范建筑膜结构检测方法,保证检测结果的可靠性,制定本标准。
- 1.0.2 本标准适用于新建建筑膜结构和既有建筑膜结构的检测。
- 1.0.3 建筑膜结构的检测除应符合本标准外,尚应符合国家及重庆市现行相关标准的规定。

## 2 术语、符号

### 2.1 术语

- 2.1.1 膜结构 membrane structure  
由膜材、支承结构及附属构件共同组成的建筑结构。
- 2.1.2 膜材 membrane material  
由基材和聚合物涂层构成的涂层织物,或由高分子聚合物制成的薄膜,主要分为织物类膜材和 ETFE 膜材。
- 2.1.3 涂层 cover layer  
涂覆在基材上,保护基材的聚合物层。
- 2.1.4 织物类膜材 fabric membrane  
由玻璃纤维或聚酯纤维类基材涂覆涂层构成的膜材。
- 2.1.5 ETFE 膜材 ethylene-tetra-fluoro-ethylene membrane  
由乙烯-聚四氟乙烯共聚物构成的热塑化合物类膜材。
- 2.1.6 面密度 area density  
单位面积膜材的质量。
- 2.1.7 抗拉强度 tensile strength  
在规定条件下进行的拉伸试验过程中,截止至试样被拉断时记录的最大力或相应的应力。
- 2.1.8 撕裂强度 tear strength  
在规定条件下进行,使试样上初始切口扩展所需的力。
- 2.1.9 涂层剥离强度 coating adhesion force  
在规定的条件下,涂层织物类膜材在涂层和基材的剥离过程中,单位宽度上所能承受的平均力。
- 2.1.10 膜面连接强度 membrane connection strength  
在规定条件下对膜与膜的连接、膜与刚性边界的连接、膜与

柔性边界的连接以及膜顶和膜角连接等连接形式进行拉伸试验过程中,截止试样被拉断时记录的最大力或相应的应力。

**2.1.11 延伸率 tensile strain**

试样在拉伸试验时标距的增量与标距之比的百分率。

**2.1.12 徐变延伸率 creep strain**

相应于恒定张力作用时间段内的膜材延伸率。

**2.1.13 断裂延伸率 tensile strain at break**

试样在拉伸试验断裂时标距的增量与标距之比的百分率。

**2.1.14 老化率 aging ratio**

试样老化前后抗拉强度的变化率。

**2.1.15 经向试样 warp specimen**

膜材力学性能检测中,受力方向与膜材经向一致的试样。

**2.1.16 纬向试样 weft specimen**

膜材力学性能检测中,受力方向与膜材纬向一致的试样。

**2.1.17 等速伸长试验机 CRE constant rate of extension testing machine**

在整个试验过程中,夹持试样的夹具一个固定,另一个以恒定速度运动,使试样的伸长与时间成正比的一种试验仪器。

**2.1.18 隔距长度 clamp distance**

试验装置上夹持试样的两个有效夹持点之间的距离。

**2.1.19 负荷峰/谷 maximum/minimum loading**

试样在撕裂过程中负荷不断地变化下,当撕破的瞬间施加在试样上的力在记录图谱上所形成的峰/谷,其值即为峰值/谷值。

**2.1.20 刚性边界 rigid boundary**

膜面与钢、铝、混凝土等刚性支承结构之间的连接边界。

**2.1.21 柔性边界 flexible boundary**

膜面与索等柔性支承结构之间的连接边界。

**2.1.22 膜面张力 pretension force**

以机械或其他方法,预先施加于拉索或膜单元上的力。

**2.1.23 膜单元 membrane unit**

将数块膜经热合后形成的能适应一定支撑结构边界的膜材单元。

## 2.2 符 号

$F_b$	织物类膜材抗拉强度,单位为 $N/5cm$ ;
$F_{mm}$	膜片与膜片连接强度(织物类膜材的强度单位为 $N/5cm$ ,ETFE 膜材的强度单位为 $N/mm^2$ );
$F_{mr}$	膜面与刚性边界连接强度(织物类膜材的强度单位为 $N/5cm$ ,ETFE 膜材的强度单位为 $N/mm^2$ );
$F_{ms}$	膜面与柔性边界连接强度(织物类膜材的强度单位为 $N/5cm$ ,ETFE 膜材的强度单位为 $N/mm^2$ );
$F_{mp}$	膜顶、膜角连接强度(织物类膜材的强度单位为 $N/5cm$ ,ETFE 膜材的强度单位为 $N/mm^2$ );
$F_t$	撕裂强度,单位为 $N$ ;
$F_a$	涂层剥离强度,单位为 $N$ ;
$\sigma_\mu$	ETFE 膜材抗拉强度,单位为 $N/mm^2$ ;
$\epsilon_f$	织物类膜材断裂延伸率;
$\epsilon_\mu$	ETFE 膜材断裂延伸率;
$\epsilon_{cf}$	织物类膜材徐变延伸率;
$\epsilon_{c\mu}$	ETFE 膜材徐变延伸率;
$\gamma$	老化率;
$E_x$	织物类膜材经向的弹性模量,单位为 $N/mm^2$ ;
$E_y$	织物类膜材纬向的弹性模量,单位为 $N/mm^2$ ;
$G$	膜材剪切模量,单位为 $N/mm^2$ ;
$\nu_x$	织物类膜材经向的泊松比;
$\nu_y$	织物类膜材纬向的泊松比;
$t$	膜材厚度,单位为 $mm$ 。

### 3 基本规定

3.0.1 新建膜结构的检测应根据工程的规模和用途等确定具体的检测项目；膜材性能、连接、张力、尺寸与偏差以及外观质量的检测应按本标准执行。

3.0.2 既有膜结构的检测包含材料性能退化、膜面张力变化、位形变化以及外观质量，其检测应按照本标准执行。

3.0.3 支承结构的检测应符合国家及重庆市现行相关标准的规定。

3.0.4 膜结构工程质量的检测报告应作出所检测项目是否符合现行膜结构技术规程或相应验收规范规定的评定。既有膜结构性能的检测报告应给出所检测项目的评定结论，并能为膜结构的鉴定提供可靠的依据。

3.0.5 检测报告应结论准确、用词规范、文字简练，对于当事方容易混淆的术语和概念可以书面予以解释。

3.0.6 检测报告应包含以下内容：

- 1 委托单位名称；
- 2 膜结构工程概况，包括工程名称、结构类型、规模、施工日期及现状等；
- 3 设计单位、施工单位及监理单位名称；
- 4 检测原因、检测目的，以往检测情况概述；
- 5 检测项目、检测方法及依据的标准；
- 6 抽样方案及数量；
- 7 检测日期及报告完成日期；
- 8 检测项目的主要分类检测数据和汇总结果；检测结果、检测结论；
- 9 主检、审核和批准人员的签名。

## 4 膜材性能检测

### 4.1 一般规定

4.1.1 膜材的基本性能、力学性能、建筑物理性能和防火性能的检测应按本标准执行。

4.1.2 膜材的基本性能的检测项目包含膜材的厚度(总厚度和涂层厚度)、面密度、经纬密度、防污性、透水性和耐磨性。

4.1.3 膜材力学性能的检测项目包含抗拉强度及断裂延伸率、撕裂强度、涂层剥离强度、弹性模量及泊松比、剪切模量及徐变性能。

4.1.4 膜材的建筑物理性能的检测项目包含膜材的耐候性能、声学性能、光学性能以及热学性能。

4.1.5 膜材的防火性能的检测项目包含可燃性、难燃性、不燃性试验,以及膜材防火等级的评定。

4.1.6 膜材性能检测应选取同一厂家生产的同一型号、规格、批号的膜材作为一个检测批。

### 4.2 基本性能

4.2.1 膜材厚度应按下列规定进行检测:

1 织物类膜材的厚度检测包含总厚度检测和涂层厚度检测,应符合现行国家标准《增强材料机 织物试验方法 第1部分:厚度的测定》GB/T 7689.1,以及现行行业标准《涂层织物 厚度试验方法》FZ/T 01003 和《涂层织物 涂层厚度的测定》FZ/T 01006 的规定。



2 ETFE 膜材厚度的检测方法应符合现行国家标准《塑料薄膜和薄片 厚度测定 机械测量法》GB/T 6672 的规定。

4.2.2 膜材面密度的检测应按本标准附录 B 的规定执行。

4.2.3 织物类膜材经纬密度的检测应符合现行国家标准《增强材料 机织物试验方法 第 2 部分：经、纬密度的测定》GB/T 7689.2 的规定，且每个检测批的试样数量应不少于 5 个。

4.2.4 膜材的耐磨性能的检测应符合现行国家标准《塑料 滑动摩擦磨损试验方法》GB/T 3960 的规定。

4.2.5 膜结构用涂层织物防污性能的检测应符合现行行业标准《膜结构用涂层织物 防污性能试验方法》FZ/T 60038 的规定。

4.2.6 膜材透水性应按下列规定进行检测：

1 织物类膜材透水性的检测应符合现行国家标准《纺织品防水性能的检测和评价 静水压法》GB/T 4744，以及现行行业标准《涂层织物 抗渗水性的测定》FZ/T 01004 的规定。

2 ETFE 膜材透水性的检测应符合现行国家标准《塑料薄膜和片材透水蒸气性试验方法 杯式法》GB 1037 的规定。

### 4.3 力学性能

4.3.1 膜材抗拉强度及断裂延伸率的检测采用单轴拉伸试验方法，具体应按本标准附录 C 的规定执行。

4.3.2 膜材撕裂强度的检测采用梯形撕裂法，具体应按本标准附录 D 的规定执行。

4.3.3 织物类膜材的涂层剥离强度的检测应符合现行行业标准《涂层织物 涂层剥离强度的测定》FZ/T 01010 的规定。

4.3.4 膜材弹性模量及泊松比的检测采用双轴拉伸试验方法，具体应按本标准附录 E 的规定执行。

4.3.5 织物类膜材剪切模量的检测采用面内纯剪试验方法，ETFE 膜材剪切模量的检测采用单轴拉伸试验方法，具体应按本标

准附录 F 的规定执行。

**4.3.6** 膜材徐变性能的检测采用单轴拉伸试验方法,具体应按本标准附录 G 的规定执行。

#### **4.4 建筑物理性能**

**4.4.1** 膜材耐候性能的检测应按本标准附录 H 的规定执行。

**4.4.2** 膜材声学性能的检测包含隔声性能和吸声性能,其检测方法应分别符合现行国家标准《声学 建筑和建筑构件隔声测量》GB/T 19889 和《声学 混响室吸声测量》GB/T 20247 的规定。

**4.4.3** 膜材光学性能的检测包含可见光透光率以及太阳光的透射比、反射比和吸收率,其检测方法应符合现行国家标准《建筑玻璃 可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定》GB/T 2680 的规定。

**4.4.4** 膜材热学性能的检测为膜材的导热系数,其检测方法应符合现行国家标准《塑料导热系数试验方法 护热平板法》GB 3399 的规定。

**4.4.5** 膜单元热学性能的检测项目包含传热系数和遮阳系数,其检测方法应分别符合现行国家标准《建筑外门窗保温性能检测方法》GB/T 8484 和《建筑玻璃 可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定》GB/T 2680 的规定。

**4.4.6** 膜单元声学性能的检测包含隔声性能和吸声性能,其检测方法应分别符合现行国家标准《声学 建筑和建筑构件隔声测量》GB/T 19889 和《声学 混响室吸声测量》GB/T 20247 的规定。

#### **4.5 防火性能**

**4.5.1** 膜材防火性能的可燃性、难燃性、不燃性试验应分别符合

现行国家标准《建筑材料可燃性试验方法》GB/T 8626、《建筑材料难燃性试验方法》GB/T 8625 和《建筑材料不燃性试验方法》GB/T 5464 的规定。

**4.5.2** 膜材的防火等级应按现行国家标准《建筑材料及制品燃烧性能分级》GB 8624 评定。

重庆工程建筑

## 5 其它材料性能检测

5.0.1 膜结构中除膜材料以外的其它材料包括拉索和拉杆、金属连接件以及胶结材料和密封材料。

5.0.2 膜结构其它材料性能的检测,应选取同一厂家生产的同一型号、规格、批号的材料作为一个检测批,每批每个检测项目随机抽取试样数量按照相关规范执行。

5.0.3 膜结构中使用的拉索和拉杆的检测包含抗拉强度、伸长率和屈服强度,其检测方法应符合现行国家及重庆市标准的规定。

5.0.4 金属连接件的检测应符合现行国家及重庆市标准的规定。

5.0.5 胶结材料和密封材料的检测包含相容性能和粘结性能,应符合国家及重庆市现行标准的规定。

## 6 连接检测

### 6.1 一般规定

6.1.1 连接质量与性能的检测分为膜面连接强度、膜面连接水密性和膜面连接气密性。

6.1.2 膜结构的连接分为膜片与膜片的连接、膜面与刚性边界的连接、膜面与柔性边界的连接以及膜顶、膜角连接。

6.1.3 连接质量的检测抽样,应符合下列规定:

1 膜面连接质量的检测中,每类连接方式的试样应不少于3个;

2 重要节点应进行膜顶和膜角连接强度检测,且每类连接形式的试样应不少于3个;

3 膜面连接水密性和气密性的检测应选取典型节点进行检测,且每类连接形式的试样应不少于3个。

### 6.2 膜面连接强度

6.2.1 膜片与膜片连接强度的检测应按本标准附录 J 的规定执行。

6.2.2 膜面与刚性边界连接强度的检测应按本标准附录 K 的规定执行。

6.2.3 膜面与柔性边界连接强度的检测应按本标准附录 L 的规定执行。

6.2.4 膜顶、膜角连接强度的检测应按本标准附录 M 的规定执行。

### 6.3 膜面连接水密性和气密性

6.3.1 膜面连接的水密性和气密性检测应符合现行国家标准《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能检测方法》GB/T 7106 的规定。

6.3.2 对每种典型的膜面连接形式,应至少取一个试样。试样形状取正方形,其尺寸应满足检测装置的要求。

6.3.3 检测装置按《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能检测方法》GB/T 7106 的规定制作。在检查装置的外框上还应加设铝合金或钢夹具,使膜面与外框连接牢固并密封。

6.3.4 必要时,应对膜面连接水密性进行现场淋水试验,膜面现场淋水试验可按本标准附录 N 的规定确定。

## 7 张力检测

- 7.0.1 膜结构张力检测包括膜面张力、拉索和拉杆张力的检测。
- 7.0.2 膜结构张力检测只针对张拉膜结构、骨架支承式膜结构和索系支承式膜结构。
- 7.0.3 膜结构张力检测的抽样,应选择应力较大和较小的部位,应符合下列规定:
- 1 膜面张力的检测每  $100\text{m}^2$  或每个膜面单元不少于 1 处。
  - 2 拉索和拉杆张力检测的总数不少于 6 个,构件数量少于 6 个时应全部检测。
- 7.0.4 膜结构膜面张力的检测可按本标准附录 P 的规定执行。
- 7.0.5 拉索和拉杆张力的检测应采用专用仪器测试,且应分别测试 3 次,取平均值作为测试值。

## 8 尺寸与偏差检测

### 8.1 一般规定

8.1.1 膜结构尺寸与偏差的检测分为金属构件尺寸偏差、膜面控制点几何偏差和膜片裁剪及热合尺寸偏差。

8.1.2 膜结构尺寸与偏差检测的抽样,应符合下列规定:

1 金属构件尺寸偏差检测的抽样方案和抽样数量应符合现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 的规定;

2 膜面控制点几何偏差检测应选择膜顶点、膜角点、约束边界等固定连接部位;

3 膜片裁剪及热合尺寸偏差应全部进行检测。

### 8.2 金属构件尺寸偏差

8.2.1 金属构件的尺寸检测范围,应检测所抽样构件的全部尺寸,每个尺寸在构件的 3 个部位量测,取 3 处测试值的平均值作为该尺寸的代表值。

8.2.2 金属构件尺寸测量的方法以及尺寸偏差的评定指标,应符合相应的产品标准以及现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的规定。

8.2.3 对长度有严格要求的拉索,设计方和加工方应约定索长偏差。

### 8.3 膜面控制点几何偏差

8.3.1 膜面控制点几何偏差的检测应采用下列方法:



- 1 与设计图纸核对；
  - 2 使用全站仪等设备测量控制点空间坐标。
- 8.3.2 膜结构安装前应检查支座、钢构件、拉索间相互连接部位的各项尺寸。
- 8.3.3 膜片裁剪后,以及热合后的膜单元应进行各向尺寸偏差的检测。检测结果的误差范围由设计方和加工方共同约定。

## 9 外观质量检测

### 9.1 一般规定

9.1.1 膜结构外观质量的检测是指膜结构中膜面、拉索和拉杆以及连接件部位的缺陷与损伤检测。

9.1.2 膜结构外观质量检测的抽样,应符合下列规定:

1 缺陷与损伤的检测,宜选用全数检测方案;

2 连接构造的检测,应按各类连接方式总数的5%抽样检测,且每类连接方式的试样应不少于5个,试样总数少于5个时应全数检测。

### 9.2 缺陷与损伤

9.2.1 膜材的品种、规格与色彩应符合设计要求。膜面颜色应基本均匀,色差不应大于5CIELAB色差单位;色差采用专用色差仪进行测量。膜面划痕和擦伤应采用观察检查或卡尺测量。膜面不应有发霉、污秽、裂口和涂层脱落现象。

9.2.2 膜与膜连接拼缝外观检测用观察检查,拼缝宽度采用卡尺测量。

9.2.3 拉索和拉杆外观质量的现场检测,应在自然散射光条件下,目测检查。

9.2.4 金属连接件外观质量的现场检测应采用目测检查的方法。

9.2.5 胶结材料和密封材料外观质量的现场检测应采用目测检查的方法。

## 附录 A 取样方法

### A.0.1 取样原则

1 试样应具有代表性,应避开褶皱、疵点,试样距整卷布端至少 3m,距布边至少 100mm,保证试样均匀分布于样品上。

2 试样的剪取应尽可能顺着相邻两组纱线的中间进行,保证试样长度方向边缘必须与相应方向的纱线平行,注意试样两侧边不能有纤维纱线的散失。

### A.0.2 剪取试样示例。

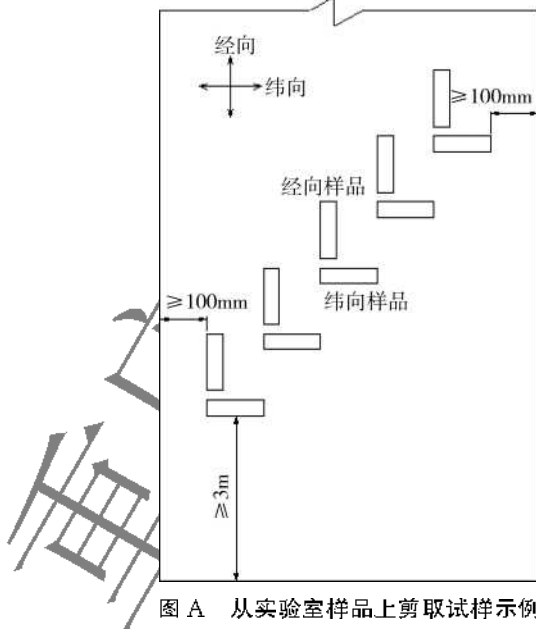


图 A 从实验室样品上剪取试样示例

## 附录 B 膜材面密度的检测

### B.0.1 试样

取正方形试样  $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ , 取样方法应按本标准附录 A.0.1 确定, 每个检测批抽样数应不少于 5 个。

### B.0.2 仪器

检测仪器采用分度值为  $0.5\text{mm}$  的钢尺和  $0.01\text{g}$  的称量天平。

### B.0.3 环境

织物类膜材, 试验温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 相对湿度为  $(65 \pm 4)\%$ , 按照现行国家标准《纺织品 调湿和试验用标准大气》GB/T 6529 规定对试样进行预调湿、调湿和试验。

ETFE 膜材, 试验温度为  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 相对湿度为  $(50 \pm 5)\%$ , 按照现行国家标准《塑料 试样状态调节和试验的标准环境》GB/T 2918 规定对试样进行预调湿、调湿和试验。

### B.0.4 方法

在试样无褶皱、无预张力的状态下, 用钢尺测量正方形试样两相邻边的边长, 精确至  $0.5\text{mm}$ ; 计算试样面积。在天平上称量试样质量, 结果精确至  $0.01\text{g}$ ; 分别计算每个试样的面密度, 单位为  $\text{g}/\text{m}^2$ 。

### B.0.5 结果

取五个试样面密度的平均值作为检测结果, 修约至  $1\text{g}/\text{m}^2$ 。

## 附录 C 膜材抗拉强度及断裂延伸率的检测

### C.1 织物类膜材抗拉强度及断裂延伸率的检测

#### C.1.1 原理

对规定尺寸的试样,以恒定伸长速率,沿试样长度方向拉伸至断裂,记录和计算抗拉强度和断裂延伸率。

#### C.1.2 试样

从每一个检测批样品剪取两组试样,一组为经向试样,另一组为纬向试样。每组试样至少应包括五个试样,另加预备试样若干。如有更高精度要求,应增加试样数量。取样方式应按本标准附录 A 确定。

试样为长条状,如图 C.1.2 所示,采用切割条样法准备试样,剪取试样的长度方向应平行于膜材的经向或纬向。每块试样的有效宽度应为 $(50 \pm 0.5)$ mm,其长度应能满足隔距长度 $(200 \pm 1)$ mm 的要求。一般取总长度为 $(300 \pm 1)$ mm,距端部 50mm 处为夹持线。按双方有关协议,试样也可采用其它宽度,在这种情况下,应在检测报告中说明。

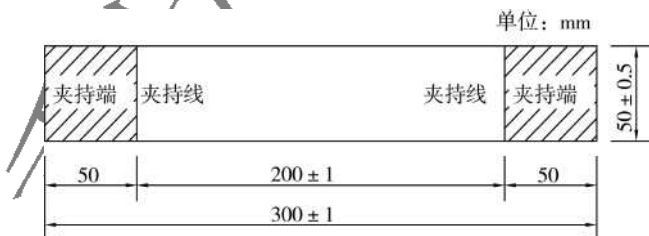


图 C.1.2 抗拉强度试样图

#### C.1.3 检测仪器

加载装置采用等速伸长试验机。恒定伸长速率为100mm/min,精度为-10%~+10%。隔距长度为(200±1)mm。如果使用数据采集系统采集力和伸长数值,数据采集的频率不小于8Hz。

应具有指示或记录加于试样上使其拉伸直至断脱的作用力以及相应的试样断裂延伸长度的装置。在仪器满量程内的任意点上,指示或记录断裂力的允许误差为+1%,指示或记录夹具间距的允许误差为±1mm。

两夹具的中点应位于拉伸轴线上,夹持线应垂直于拉伸线。两夹具的夹持面应在同一平面内,并略宽于所准备的试样。夹具应牢固地夹住试样使之不滑动,但不应夹断或损坏试样。夹具可采用加用衬垫材料的平面夹具,也可采用有线条槽或波纹面的夹具。

#### C.1.4 检测方法

1 检测温度为(20±2)℃,相对湿度为(65±3)%;按照现行国家标准《纺织品 调湿和试验用标准大气》GB/T 6529 规定对试样进行预调湿、调湿和检测。高温条件下的检测温度应按本附录C.1.6条确定。潮湿条件下膜材抗拉强度检测不要求预调湿和调湿。

2 开动等速伸长试验机,调整记录装置或负荷盘等装置的零点。

3 将等速伸长试验机隔距长度调整为(200±1)mm,在夹具中央夹上试样,使其纵向中心线通过夹持面的中心线,以保证拉力中心线通过试样的中线。

4 夹紧试样,试样应在全部幅面上被握紧。采用预张力夹持,设定膜材试样的预张力值为10N。

5 开启试验机,拉伸试样至断裂。记录最大力值和断裂伸长量。

6 对每一试样重复上述步骤。

当试样在钳口处不对称滑移或滑移量大于2mm时,则应舍

弃检测结果,并补充试样。当试样在距钳口 5mm 以内断裂时,则作为钳口断裂。当五个试样检测完毕,若钳口断裂的值大于最小的非钳口断裂的“正常值”时,可以保留;当小于最小的“正常值”时,应舍弃,另加检测以得到五个“正常值”。补充试样应尽量在相近部位裁取;当所有的检测结果都是钳口断裂,或得不到五个“正常值”时,应当报告单值,钳口断裂结果应当在报告中指出。当补充 10 个试样仍未达到 5 个检测结果时,可停止检测,取所有试样检测结果的平均值,并在检测报告中注明。

### C.1.5 结果分析

1 分别计算经向试样、纬向试样抗拉强度的平均值,以  $F_b$  表示,单位为 N/5cm,修约至 10N/5cm。

2 每个试样的断裂延伸率应按式(C.1.5)计算:

$$e_f = (\Delta L / L_0) \times 100\% \quad (\text{C.1.5})$$

式中:  $e_f$  织物类膜材断裂延伸率;

$\Delta L$  预张力夹持试样的断裂伸长量(见图 C.1.5),mm;

$L_0$  隔距长度,  $L_0 = 200\text{mm}$ 。

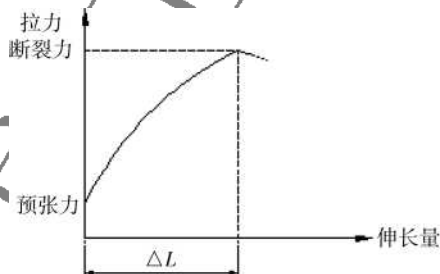


图 C.1.5 预张力夹持试样的拉伸曲线

3 分别计算经向试样、纬向试样断裂延伸率的平均值,修约至 0.5%。

### C.1.6 高温条件下抗拉强度检测

将试样置于规定的检测温度下保持 5min 以上使试样温度达到平衡,按本附录第 C.1.1~C.1.5 条的规定检测抗拉强度。对

于基材为玻璃纤维的网格膜材以及基材为玻璃纤维、涂层为聚四氟乙烯的织物类膜材,检测温度为 $(150\pm 5)^{\circ}\text{C}$ ;对于其它织物类膜材,检测温度为 $(60\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 。

#### C.1.7 潮湿条件下抗拉强度检测

将试件完全浸泡于温度 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的水中72h后,按本附录第C.1.1~C.1.5条的规定检测抗拉强度。

C.1.8 检测报告除应包括本标准第3.0.6条的内容外,还应包括:

- 1 检测温度、湿度条件;
- 2 样品名称、规格;
- 3 取样计划、试样数量、舍弃的试样数量及原因;
- 4 经向试样和纬向试样的抗拉强度平均值及断裂延伸率平均值;
- 5 任何偏离本标准的细节。

### C.2 ETFE膜材抗拉强度、屈服强度和断裂延伸率的检测

#### C.2.1 原理

对规定尺寸的试样,以恒定伸长速率,沿试样长度方向拉伸至断裂,记录和计算抗拉强度和断裂延伸率,并根据应力应变曲线计算屈服强度。

#### C.2.2 试样

成卷的ETFE膜材其长度方向标记为纵向,垂直方向为横向。从每一个检测批样品剪取两组试样,一组为纵向试样,另一组为横向试样。每组试样至少应包括五个试样,另加预备试样若干。如有更高精度要求,应增加试样数量。取样方式应按本标准附录A确定。

试样可采用哑铃型试样或长条形试样。哑铃型试样尺寸应按图C.2.2确定,总长度不小于115mm,隔距长度 $(80\pm 5)$ mm,



平行部分长度 $(33 \pm 2)$ mm,标线间距离 $(25 \pm 0.25)$ mm,平行部分宽度 $(6 \pm 0.4)$ mm,端部宽度 $(25 \pm 1)$ mm。长条形试样宽度10mm~15mm,总长度不小于150mm,隔距长度 $(100 \pm 5)$ mm,标线间距离 $(50 \pm 0.5)$ mm。

试样应按尺寸要求准确打印或画出标线,此标线应对试样不产生任何影响。试样可用冲刀冲制,试样边缘平滑无缺口,可用低倍放大镜检查缺口,舍去边缘有缺口的试样。

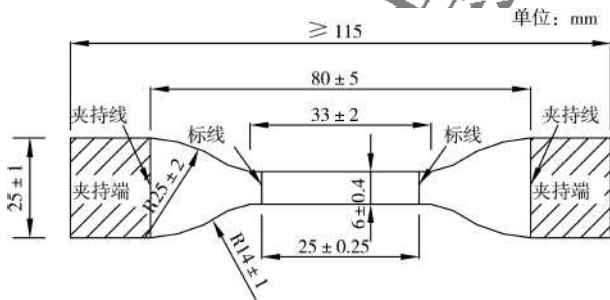


图 C.2.2 哑铃形试样

### C.2.3 检测仪器

加载装置采用等速伸长试验机。对哑铃形试样,恒定伸长速率为50mm/min,精度为+10%,隔距长度为 $(80 \pm 5)$ mm。对长条形试样,恒定伸长速率为100mm/min,精度为+10%,隔距长度为 $(100 \pm 5)$ mm。试验机其它性能应符合本标准附录 C.1.3 条的规定。

### C.2.4 检测方法

1 检测温度为 $(23 \pm 2)$ ℃,相对湿度为 $(50 \pm 5)\%$ ;按照现行国家标准《塑料 试样状态调节和试验的标准环境》GB/T 2918 规定对试样进行预调湿、调湿和检测。高温条件下的检测温度按本附录 C.2.6 条确定。

2 按本标准第 4.2.1 条的规定测量试样厚度,用分度值为 0.1mm 的量具测量试样宽度。每个试样的厚度及宽度应在标距

内测量三点,取算术平均值,用毫米表示。厚度测量结果修约至 0.001mm,宽度测量结果修约至 0.1mm。哑铃型试样中间平行部分宽度可采用冲刀的相应部分的平均宽度。

3 将试样置于试验机的两夹具中,使试样纵轴与上、下夹具中心线相重合,并且要松紧适宜,以防止试样滑脱和断裂在夹具内。如用伸长仪,在施加应力前,应调整伸长仪的两侧测量点与试样的标距相吻合。伸长仪不应使试样承受负荷。

4 按规定速度开动试验机进行试验,记录负荷及标线间伸长值。试验至试样断裂,若试样断裂在标线外的部位时,此试样作废,另取试样重做。

5 对每一试样重复上述步骤。

#### C.2.5 结果分析

1 每个试样的抗拉强度按式(C.2.5-1)计算:

$$\sigma_u = \frac{p}{bt} \quad (\text{C.2.5-1})$$

式中: $\sigma_u$  ETFE 膜材抗拉强度, N/mm<sup>2</sup>;

$p$  最大负荷, N;

$b$  试样宽度, mm;

$t$  试样厚度, mm。

2 分别计算纵向试样和横向试样的抗拉强度的平均值,修约至 0.1N/mm<sup>2</sup>。

3 每个试样的断裂延伸率按式(C.2.5-2)计算:

$$\epsilon_u = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100\% \quad (\text{C.2.5-2})$$

式中: $\epsilon_u$  ETFE 膜材断裂延伸率;

$L_0$  试样原始标线间距离, mm;

$L$  试样断裂时标线间距离, mm。

4 分别计算纵向试样和横向试样的断裂延伸率平均值,修约至 1%。

5 作应力应变曲线,确定应力应变曲线两个转折点 B 和 C (图 C. 2. 5)。

作曲线初始段的切线  $a$ ,与两转折点间曲线的近似直线  $b$  相交于点 A;过点 A 作水平线  $d$  与拉伸曲线相交于点 B,B 点即为第一转折点,对应的应力为第一屈服强度。

过点 B 作直线  $b$  的平行线  $f$ ,与拉伸曲线第三段曲线初始段的切线  $c$  相交于点 C,C 点即为第二转折点,对应的应力为第二屈服强度。

分别计算纵向试样和横向试样的屈服强度的平均值,单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$ ,修约至  $0.1\text{N}/\text{mm}^2$ 。

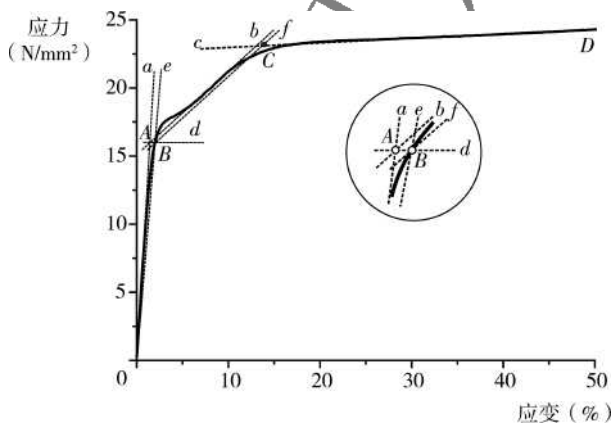


图 C. 2. 5 ETFE 膜材屈服强度确定示意图

### C. 2. 6 高温条件下抗拉强度和屈服强度检测

将试样置于  $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$  的温度下保持 5min 以上使试样温度达到平衡,并在  $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$  的温度下按本附录第 C. 2. 1~C. 2. 5 条的规定检测抗拉强度和屈服强度。

C. 2. 7 检测报告除应包括本标准第 3. 0. 6 条的内容外,还应包括:

- 1 检测温度、湿度条件;

- 2 样品名称、规格；
- 3 取样计划、试样数量、舍弃的试样数量及原因；
- 4 纵向试样和横向试样的抗拉强度平均值、第一屈服强度平均值、第二屈服强度平均值及断裂延伸率平均值；
- 5 任何偏离本标准的细节。

## 附录 D 膜材撕裂强度的检测

### D.1 织物类膜材撕裂强度的检测

#### D.1.1 原理

将画有梯形的条形试样,在其梯形短边中点剪一条一定长度的切口作为撕裂起始点,然后将试样沿夹持线夹于拉力试验机的上下夹具口内,对试样施加连续增加的负荷,使试样沿着切口撕裂并逐渐扩展直至试样全部撕断。记录其撕破过程的图谱,测定其撕裂强度。

#### D.1.2 试样

从每一个检测批样品剪取两组试样,一组为经向试样,另一组为纬向试样。每组试样至少应包括五个试样,另加预备试样若干。取样方式应按本标准附录 A 确定。

采用切割条样法准备试样,剪取试样的长度方向应平行于膜材的经向或纬向。试样制作应按图 D.1.2 取用,裁剪宽为 $(50 \pm 0.5)$ mm、长度不小于 180mm 的长条型试样,在试样上标记等腰梯形,梯形两腰为夹持线,在等腰梯形上底边中央处与边垂直方向切开切口,切口长度 $(25 \pm 0.5)$ mm。

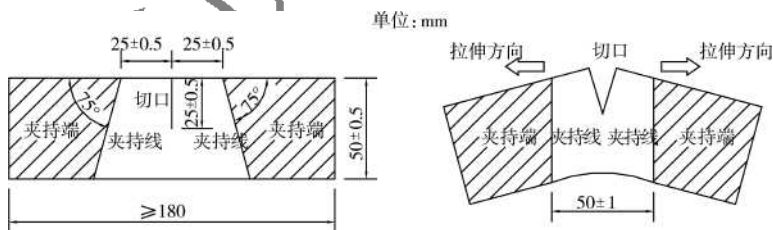


图 D.1.2 撕裂试验试样和夹持示意图

### D.1.3 检测仪器

加载装置采用等速伸长试验机。恒定伸长速率为100mm/min,精度为-10%~+10%,隔距长度为(50±1)mm。试验机其它性能应符合本标准附录C.1.3条的规定。

### D.1.4 检测方法

1 检测温度为(20±2)℃,相对湿度为(65±3)%。按现行国家标准《纺织品 调湿和试验用标准大气》GB/T 6529 规定的标准大气预调湿、调湿和试验。

2 设定隔距长度为(50±1)mm,拉伸速度为(100±10)mm/min,选择适宜的负荷范围,使撕裂强度落在满量程的10%~90%之间。

3 沿梯形不平行两边夹住试样,使切口位于两间距中间,保持梯形短边张紧,长边处于褶皱状态。

4 启动试验机,直至试样沿中间切口线全部撕裂,记录力位移曲线。

当试样从夹具中滑出或并非沿切口线撕裂时,此试验结果应剔除,并在样品上再裁取试样,重新试验。

### D.1.5 结果分析

试验记录的图谱由一系列负荷峰和负荷谷所组成,负荷峰和负荷谷表示涂层织物在撕裂过程中受力的变化。计算经向和纬向每块试样的试验记录的五个最大负荷峰峰值的平均值,以经向和纬向五个试样结果的平均值作为试样撕裂强度的检测结果,以 $F_t$ 表示,单位为N,修约10N。

D.1.6 检测报告除应包括本标准第3.0.6条的内容外,还应包括:

- 1 检测温度、湿度条件;
- 2 样品名称、规格;
- 3 取样计划、试样数量、舍弃的试样数量及原因;
- 4 经向试样和纬向试样撕裂强度平均值;

5 任何偏离本标准的细节。

## D.2 ETFE 膜材撕裂强度的检测

D.2.1 ETFE 膜材的撕裂强度的检测方法和检测规则应按现行行业标准《塑料直角撕裂性能试验方法》QB/T 1130 执行。

D.2.2 ETFE 膜材的撕裂强度的试样应按图 D.2.2 确定。

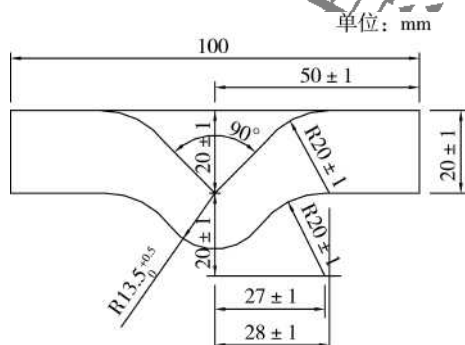


图 D.2.2 直角撕裂试样形状

## 附录 E 膜材弹性模量及泊松比的检测

### E.1 一般规定

**E.1.1** 织物类膜材弹性模量和泊松比检测应按本附录 E.2 节和 E.3 节的检测方法进行双轴拉伸试验。

**E.1.2** ETFE 膜材弹性模量和泊松比检测应按本附录 E.4 节的检测方法进行单轴拉伸试验。

### E.2 织物类膜材双轴比例加载法

#### E.2.1 原理

采用双轴拉伸试验机,对十字形切缝试样,沿膜材经向、纬向施加荷载,通过应变测量装置测得相应位置的应变,并结合双轴拉伸试验机同步记录的荷载,得到不同加载状况下膜材经向和纬向的荷载-应变曲线,计算得到工程中实用的膜材的经向、纬向的弹性模量和泊松比。

#### E.2.2 试样

采用十字形切缝试样,如图 E.2.2 所示。试样应按照膜材的经纬向对称取样,且试样核心区域的臂宽以及悬臂的臂长均不小于 160mm。沿悬臂方向间隔 30mm~50mm 做均匀切缝处理,试样过渡圆弧半径 5mm~15mm。每个检测批至少应包括 3 块试样。取样方法应按本标准附录 A.0.1 确定。



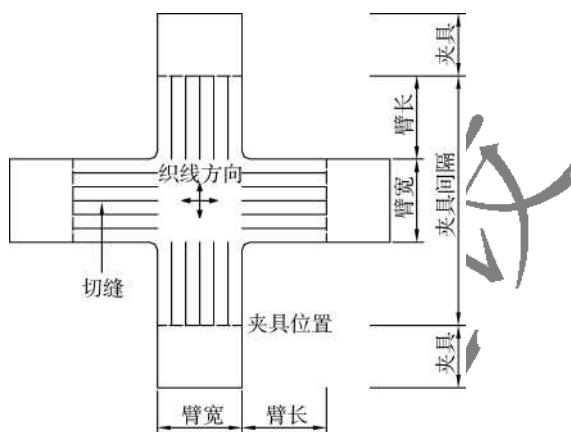


图 E. 2.2 切缝十字形试样

### E. 2.3 检测仪器

试验加载装置采用双轴拉伸试验机,试验机应能够按照一定的荷载比例同时在试样的经向、纬向两个方向上匀速加载,并实时记录试样经向、纬向的荷载值。经向、纬向两个方向的荷载应同时在试样两侧对称施加,以保证试样的中心点不发生位移。

应变测量装置可采用引伸计、应变片等接触式装置,也可按照附录 Q 采用 DIC 测量系统等非接触式装置,且须满足应变测量数据和试验机记录数据同步。其中,DIC 系统采用分辨率不低于 500 万像素相机,相机帧率不低于 10 帧;试样中间  $160\text{mm} \times 160\text{mm}$  的核心区域,按要求制作散斑。

### E. 2.4 检测方法

1 检测温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,相对湿度为  $(65 \pm 3)\%$ ;按现行国家标准《纺织品 调湿和试验用标准大气》GB/T 6529 规定的标准大气预调湿、调湿和检测。

2 最大荷载取抗拉强度的  $1/4$ 。当膜材经向、纬向的抗拉强度有所区别时,取其中较低值的  $1/4$  作为试验中的最大荷载。

3 试验中可采用变形控制或力控制。采用变形控制应保持

恒定速率拉伸,应取(2~10)mm/min;采用力控制应保持恒定力增速拉伸,应取(1~10)kN/(m·min)。

4 测量应变的装置标记点的原始距离应在 20mm~80mm 之间。

5 试样应仔细固定,使试样和夹具之间不发生滑动,保证张拉时外力方向与膜材经纬向保持一致。

6 试样固定于双轴拉伸试验机上,按如下步骤测量荷载-应变曲线:

- 1) 保持试样经向、纬向的张拉荷载比例为 1:1,沿标准张拉轴按照恒定张拉速率加载至抗拉强度的 1/4,并记录此时荷载-应变曲线。
- 2) 加载后立即卸载。卸载过程中保持和加载过程中相同的荷载比例及加(卸)载速率。当荷载到 0 后立即重复步骤 1)。
- 3) 重复以上步骤三次。
- 4) 按照恒定张拉速率,以预先确定的荷载比例,施加荷载,并记录荷载-应变曲线。
- 5) 重复步骤 1)~3)后,在下一组预先确定的加载比例下重复步骤 4)。
- 6) 依次按照所有的预先确定的加载比例,重复步骤 1)~5)。
- 7) 同一检测批的膜材至少选用三个试样进行试验。

标准拉伸轴与荷载较大的方向一致。当荷载比例为 1:1 时,与经向一致。

试验中使用的荷载比例按表 E. 2. 4 确定,对每块试样的荷载施加顺序是 1:1、2:1、1:2、1:0、0:1。

表 E. 2. 4 荷载比例

织线方向	荷载比例				
	经向	1	2	1	1
纬向	1	1	2	0	1

### E.2.5 结果分析

根据双轴拉伸试验中不同经纬向荷载比例下得到的荷载—应变曲线,计算经纬两向的弹性模量和泊松比。计算过程中用到的膜材的厚度应按本标准第 4.2.1 条确定。

用于计算的荷载-应变曲线范围:从 2kN/m 的荷载点到 1/4 抗拉强度的荷载点,1/4 抗拉强度的荷载点的位置根据不同荷载比例具体确定。

可采用应变项残差平方和最小的最小二乘法计算试样弹性模量和泊松比。取三次试验计算的平均值作为最终的试验结果。弹性模量的单位取 N/mm<sup>2</sup>,修约至 10N/mm<sup>2</sup>,泊松比修约至 0.01。

应变项残差平方和最小值的最小二乘法的计算步骤如下:

- 1) 假定膜材为正交各向异性弹性材料,本构关系按式 E.2.5-1 确定。

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{N_x}{E_x t} - \frac{N_y}{E_y t} \nu_y \\ \epsilon_y = \frac{N_y}{E_y t} - \frac{N_x}{E_x t} \nu_x \end{cases} \quad (\text{E.2.5-1})$$

式中:  $N_x$  十字形膜材试样经向荷载, kN/m;  
 $N_y$  十字形膜材试样纬向荷载, kN/m;  
 $\epsilon_x$  十字形膜材试样经向应变;  
 $\epsilon_y$  十字形膜材试样纬向应变;  
 $E_x$  膜材经向弹性模量, N/mm<sup>2</sup>;  
 $E_y$  膜材纬向弹性模量, N/mm<sup>2</sup>;  
 $\nu_x$  膜材经向泊松比;  
 $\nu_y$  膜材纬向泊松比;  
 $t$  膜材厚度, mm。

- 2) 按式 E.2.5-2 计算五条不同经、纬向荷载比例下得到的荷载—应变曲线的应变残差平方和。

$$S = \sum [(E_{11} N_{\bar{x}} + E_{12} N_{\bar{y}} - \epsilon_{\bar{x}})^2 + (E_{22} N_{\bar{y}} + E_{12} N_{\bar{x}} - \epsilon_{\bar{y}})^2]$$

$$+ \sum[(E_{11}N_{x1} - \epsilon_{x1})^2] + \sum[(E_{22}N_{y2} - \epsilon_{y2})^2] \quad (\text{E. 2. 5-2})$$

式中:  $E_{11} = \frac{1}{E_X t}$   $E_{22} = \frac{1}{E_Y t}$   $E_{12} = -\frac{\nu_X}{E_X t} = -\frac{\nu_Y}{E_Y t}$

式(E. 2. 5-2)的最后一项对应于荷载比例 0:1 的状况, 倒数第二项对应于荷载比例 1:0 的状况, 第一项平方和对应于 1:1、2:1、1:2 三种双轴拉伸状态。

- 3)  $E_{11}$ 、 $E_{12}$ 、 $E_{22}$  相互独立, 应用最小二乘法, 根据方程组 E. 2. 5-3 计算  $E_{11}$ 、 $E_{12}$ 、 $E_{22}$ 。

$$\frac{\partial S}{\partial E_{11}} = \frac{\partial S}{\partial E_{22}} = \frac{\partial S}{\partial E_{12}} = 0 \quad (\text{E. 2. 5-3})$$

- 4) 根据式(E. 2. 5-4)计算  $E_X$ 、 $E_Y$ 、 $\nu_X$ 、 $\nu_Y$ 。

$$\begin{aligned} E_X &= \frac{1}{E_{11} t} \\ E_Y &= \frac{1}{E_{22} t} \\ \nu_X &= -\frac{E_{12}}{E_{11}} \\ \nu_Y &= -\frac{E_{12}}{E_{22}} \end{aligned} \quad (\text{E. 2. 5-4})$$

**E. 2. 6 检测报告**除应包括本标准第 3. 0. 6 条的内容外, 还应包括:

- 1 检测温度、湿度条件;
- 2 样品名称、规格;
- 3 取样计划、试样数量、舍弃的试样数量及原因;
- 4 各种加载比例下经向和纬向的荷载—应变曲线;
- 5 膜材厚度;
- 6 弹性模量和泊松比的计算结果, 并注明其计算方法和弹性常数的残差平方和;
- 7 任何偏离本标准的细节。

### E.3 织物类膜材双轴比例伸长法

E.3.1 织物类膜材双轴比例伸长法,拉伸过程中膜材双向的伸长量按比例增加,而非荷载按比例增加。

E.3.2 织物类膜材双轴比例伸长法的其它内容应按本附录 E.2 节的规定执行。

### E.4 ETFE 膜材单轴拉伸法

E.4.1 本方法适用于 ETFE 膜材的弹性模量和泊松比的检测。

E.4.2 按本标准 C.2 节规定的试验方法进行试样的拉伸试验,得到 ETFE 膜材的应力-应变曲线和屈服应力,做通过应力-应变曲线上对应第一屈服强度点 B 点和起始点的直线 e,并计算该直线的斜率,该斜率即为弹性模量(图 E.4.2)。弹性模量以每组试样结果取算术平均值,单位取  $\text{N}/\text{mm}^2$ ,修约至  $10\text{N}/\text{mm}^2$ 。

E.4.3 泊松比取第一屈服强度时试验片宽度方向的应变值与长度方向的应变值之比的绝对值,计算结果修约至 0.01。

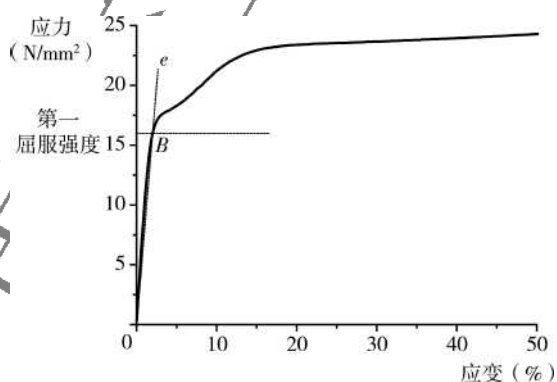


图 E.4.2 弹性模量计算简图

## 附录 F 膜材剪切模量的检测

### F.1 一般规定

**F.1.1** 织物类膜材剪切模量的检测应按本附录 F.2 节的检测方法进行面内纯剪试验。

**F.1.2** ETFE 膜材剪切模量应按本附录 F.3 节的检测方法进行单轴拉伸试验。

### F.2 织物类膜材面内纯剪试验法

#### F.2.1 原理

将试样固定在一个边框铰链而构成的正方形框架中,框架边平行于膜材的经向或纬向,并在膜材的经向和纬向导人与初期预应力相当程度的预张力。通过在框架对角线方向分别施加拉伸和压缩荷载,使膜材面内产生剪应力和剪应变,然后用两者的平均值计算膜材的面内剪切模量。

#### F.2.2 试样

试样为不小于  $160\text{mm} \times 160\text{mm}$  的正方形,裁剪方向平行于膜材经向或纬向。

每个检测批至少应包括 3 个试样。取样方法应按本标准附录 A.0.1 确定。

#### F.2.3 检测仪器

面内剪切变形检测装置为四角铰接的正方形框架,内部尺寸不小于  $160\text{mm} \times 160\text{mm}$ 。

加载装置采用等速伸长试验机。恒定拉压速率为  $10\text{mm}/\text{min}$ ,



### F.2.5 结果分析

按式(F.2.5-1)计算试样剪切模量,单位取  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。取三次试验计算的平均值作为最终的试验结果,修约至  $1\text{N}/\text{mm}^2$ 。

$$G = \frac{N_{xy1} + N_{xy2}}{(\gamma_1 + \gamma_2)t} = \frac{F_1 + F_2}{\sqrt{2}L(\gamma_1 + \gamma_2)t} \quad (\text{F.2.5-1})$$

$$\gamma_1 = 2 \left[ \frac{\pi}{4} - \cos^{-1} \left( \frac{\sqrt{2}L + \delta_1}{2L} \right) \right] \quad (\text{F.2.5-2})$$

$$\gamma_2 = 2 \left[ -\frac{\pi}{4} + \cos^{-1} \left( \frac{\sqrt{2}L - \delta_2}{2L} \right) \right] \quad (\text{F.2.5-3})$$

- 式中:  $G$  膜材的剪切模量,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;
- $t$  膜材的厚度,按照本标准第 4.2.1 条确定,  $\text{mm}$ ;
- $L$  正方形试样的边长,  $\text{mm}$ ;
- $F_1$  第二次和第三次拉伸过程中记录的拉力值的平均值,  $\text{N}$ ;
- $F_2$  第二次和第三次压缩过程中记录的压力值的平均值,  $\text{N}$ ;
- $N_{xy1}$  相应于  $F_1$  的单位宽度的面内剪切应力绝对值,  $\text{N}/\text{mm}$ ;
- $N_{xy2}$  相应于  $F_2$  的单位宽度的面内剪切应力绝对值,  $\text{N}/\text{mm}$ ;
- $\gamma_1$  相应于  $F_1$  的剪切变形角,其数值由式(F.2.5-2)确定,  $\text{rad}$ ;
- $\gamma_2$  相应于  $F_2$  的剪切变形角,其数值由式(F.2.5-3)确定,  $\text{rad}$ ;
- $\delta_1$  相应于  $F_1$  的在剪切变形检测器的对角线方向上的位移绝对值,  $\text{mm}$ ;
- $\delta_2$  相应于  $F_2$  的在剪切变形检测器的对角线方向上的位移绝对值,  $\text{mm}$ 。

当正方形试样边长  $L=160\text{mm}$  时,可根据预先设定的  $\delta_1 - \delta_2$  -



2.0mm,代入公式(F.2.5-2)和(F.2.5-3)分别求出  $\gamma_1=0.017757$  和  $\gamma_2=0.017600$ 。

**F.2.6** 检测报告除应包括本标准第3.0.6条的内容外,还应包括:

- 1 检测温度、湿度条件;
- 2 样品名称、规格;
- 3 取样计划、试样数量、舍弃的试样数量及原因;
- 4 膜材厚度;
- 5 剪切模量计算结果;
- 6 任何偏离本标准的细节。

### F.3 ETFE膜材单轴拉伸试验法

**F.3.1** 本方法适用于 ETFE 膜材剪切模量的检测。

**F.3.2** 按本标准附录 E.4 节规定的试验方法进行试样的拉伸试验,得到 ETFE 膜材的弹性模量和泊松比。由弹性模量和泊松比按式(F.3.2)计算得到剪切模量。剪切模量修约至  $1\text{N}/\text{mm}^2$ ,单位取  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{F.3.2})$$

式中:  $G$  剪切模量,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;

$E$  弹性模量,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;

$\nu$  泊松比。

## 附录 G 膜材徐变性能的检测

### G.1 织物类膜材徐变性能的检测

#### G.1.1 原理

采用单轴拉伸试验,在规定的温度、湿度条件下,沿膜材试样长向施加恒定的拉力,以规定时间段内膜材试样延伸率的变化量作为膜材徐变性能的检测结果。

#### G.1.2 试样

试样的取样方法、试样尺寸应按本标准附录 C.1.2 条确定。每个检测批应包含一组常温试样和一组高温试样。每组试样包含的经向试样、纬向试样应各不少于五条。

#### G.1.3 检测仪器

加载装置应能保持外荷载恒定,外荷载允许偏差为 $+1\%$ 。加载装置应具有足够的刚度,避免同时进行检测的试样相互影响;加载装置应能实现平缓加载,避免荷载的突然变化。指示或记录夹具或标线间距的允许偏差为 $+0.5\text{mm}$ 。

加温装置应能使装置内各部分的温度保持一致、恒定,加温装置内各部分的温度允许偏差为 $+2^{\circ}\text{C}$ 。

#### G.1.4 检测方法

1 常温试样,检测温度为 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $(65 \pm 3)\%$ 。沿试样长向施加的恒定张力应为该方向试样抗拉强度的 $1/4$ ,允许偏差为 $\pm 10\text{N}$ 。保持恒定张力 24h。

2 基材为玻璃纤维的网格膜材以及基材为玻璃纤维、涂层为聚四氟乙烯的织物类膜材高温试样,检测温度为 $(150 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $(65 \pm 3)\%$ ;其它织物类膜材高温试样,检测温度为

(60±2)℃,相对湿度为(65±3)%。沿试样长向施加的恒定张力为该方向试样抗拉强度的 1/10,允许偏差为±5N。保持恒定张力 6h。

3 启动加载装置,调整记录装置或负荷盘等装置的零点。

4 将加载装置隔距长度调整为(200±1)mm,在夹具中央夹上试样,使其纵向中心线通过夹持面的中心线,以保证拉力中心线通过试样的中线。

5 对各组试样,按规定的检测条件进行试验,分别测量施加恒定张力开始和结束时夹具间的距离。

6 对每一试样重复上述步骤。

7 如果施加恒定张力过程中试样断裂,应记录试样断裂时间。

#### G.1.5 结果分析

1 膜材徐变性能以试样的徐变延伸率表示,徐变延伸率按式(G.1.5)计算:

$$\epsilon_{ct} = \frac{L_2 - L_1}{L_0} \times 100\% \quad (\text{G.1.5})$$

式中: $\epsilon_{ct}$  织物类膜材徐变延伸率;

$L_0$  隔距长度, $L_0=200\text{mm}$ ;

$L_1$  恒定张力开始施加时两夹具间距离,mm;

$L_2$  恒定张力结束施加时两夹具间距离,mm。

2 分别计算经向试样、纬向试样的徐变伸长率平均值,修约至 0.1%。

3 如果出现试样断裂,则去掉断裂试样,补做相应的试验,再计算徐变伸长率平均值,并记录断裂试样的断裂时间、断裂位置。

G.1.6 检测报告除应包括本标准第 3.0.6 条的内容外,还应包括:

1 样品名称、规格;

- 2 取样计划、试样数量、舍弃的试样数量及原因；
- 3 徐变性能检测的检测条件，包括温度、湿度条件，恒定张力的大小、持续时间等；
- 4 每组试样各方向的徐变延伸率平均值；
- 5 恒定张力作用下发生断裂的试样的数量，及各断裂试样的断裂时间、断裂位置等；
- 6 任何偏离本标准的细节。

## G.2 ETFE 膜材徐变性能的检测

### G.2.1 原理

采用单轴拉伸试验，在规定的温度、湿度条件下，沿膜材试样长向施加恒定的拉力，以规定时间段内膜材试样延伸率的变化量作为膜材徐变性能的检测结果。

### G.2.2 试样

试样的取样方法、试样尺寸应按本标准附录 C.2.2 条确定。每个检测批应包含一组常温试样和一组高温试样。每组试样包含的纵向试样、横向试样应各不少于五条。

### G.2.3 检测仪器

检测仪器应符合本附录 G.1.3 条的规定。

### G.2.4 检测方法

1 常温试样，检测温度为  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度为  $(50 \pm 5)\%$ 。沿试样长向施加的恒定张力使试样中央部应力为  $10\text{N}/\text{mm}^2$ ，允许偏差为  $\pm 0.5\text{N}/\text{mm}^2$ 。保持恒定张力 24h。

2 高温试样，检测温度为  $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度为  $(50 \pm 5)\%$ 。沿试样长向施加的恒定张力使试样中央部应力为  $5\text{N}/\text{mm}^2$ ，允许偏差为  $\pm 0.3\text{N}/\text{mm}^2$ 。保持恒定张力 6h。

3 启动加载装置，调整记录装置或负荷盘等装置的零点。

4 将加载装置隔距长度调整为所定长度，在夹具中央夹上

试样,使其纵向中心线通过夹持面的中心线,以保证拉力中心线通过试样的中线。

5 对每组试样,按规定的检测条件进行试验,分别测量施加恒定张力开始和结束时标线间的距离。

6 对每一试样重复上述步骤。

7 如果施加恒定张力过程中试样断裂,应记录试样断裂时间。

### G.2.5 结果分析

1 膜材徐变性能以试样的徐变延伸率表示,徐变延伸率按式(G.2.5)计算:

$$\epsilon_{\infty} = \frac{L_2 - L_1}{L_0} \times 100 \% \quad (\text{G.2.5})$$

式中: $\epsilon_{\infty}$  ETFE 膜材徐变延伸率;

$L_0$  试样原始标线间距离,mm;

$L_1$  恒定张力开始施加时两标线间距离,mm;

$L_2$  恒定张力结束施加时两标线间距离,mm。

2 分别计算纵向试样、横向试样的徐变伸长率平均值,修约至 0.1%。

3 如果出现试样断裂,则去掉断裂试样计算徐变伸长率的平均值,并记录断裂试样的断裂时间、断裂位置。

G.2.6 检测报告应符合本附录 G.1.6 的规定。

## 附录 H 膜材耐候性能的检测

### H.0.1 原理

采用氙弧灯光源,连续光照,控制一定的温度、湿度、辐射能、降雨周期和时间,模拟和强化自然气候条件中的光、热、氧、湿气、降雨等主要环境因素,以加速试样的老化,并以试样在一定时间内的辐射能下的抗拉强度的差异作为膜材耐候性能的检测结果。

### H.0.2 试样

试样的取样方法、试样尺寸应按本标准附录 C 确定。

每个检测批应包含一组对照试样和一组耐候试样。

每组对照试样的试样数量经向、纬向(或纵向、横向方向)应各不少于五条,用以确定初始抗拉强度。

每组耐候试样的试样数量经向、纬向(或纵向、横向方向)应各不少于五条,用以确定人工气候老化后的抗拉强度。

### H.0.3 检测仪器

人工气候加速老化仪器,应符合国家相关标准规定,并应满足下列检测条件。

1 在正常条件下,试样受到 300nm~1050nm 波长的辐射,其辐照度应大于  $800\text{W}/\text{m}^2$ ,低于 300nm 主辐照度不应大于  $1\text{W}/\text{m}^2$ 。在整个试样的面积内,辐照度的允许偏差为  $+10\text{W}/\text{m}^2$ 。

2 黑板温度为  $(63\pm 3)^\circ\text{C}$ 。

3 相对湿度为  $(50\pm 5)\%$ 。

4 降雨周期为 18min/102min(降雨时间/不降雨时间)。

### H.0.4 检测方法

1 按本标准附录 C 的规定进行初始抗拉强度检测。

2 按本附录第 H.0.3 条的规定设定人工气候加速老化试验

条件。

试样固定于样架时,应避免在试验中膜面产生应力,同时应考虑到试样上下变换位置。

检查设备各项性能符合要求后,按其操作规程开动设备进行试验。

**3 曝露试验终止时,总辐照度应符合下列条件:**

对基材为聚酯纤维的织物类膜材,波长在 300nm~400nm 范围内的总辐照度不小于 270MJ/m<sup>2</sup>。

对基材为玻璃纤维的织物类膜材和 ETFE 类膜材,波长在 300nm~400nm 范围内的总辐照度不小于 1350MJ/m<sup>2</sup>。

**4 对完成人工气候加速老化试验的试样,按本标准附录 C 的规定进行抗拉强度检测。**

#### H.0.5 结果分析

采用老化率表示膜材的耐候性能。老化率应首先分别对试样经向和纬向(或纵向、横向方向)计算,并以各组试样经向、纬向(或纵向、横向方向)结果的均值的较小值为最终结果。

$$\gamma = \frac{F_{b1} - F_{b2}}{F_{b1}} \times 100\% \quad (\text{H.0.5})$$

式中:  $\gamma$  老化率,试样老化前后抗拉强度的变化率,修约至 0.1%;

$F_{b1}$  初始抗拉强度;

$F_{b2}$  人工气候加速老化试验后的抗拉强度。

**H.0.6 检测报告除应包括本标准第 3.0.6 条的内容外,还应包括:**

- 1 样品名称、规格;
- 2 取样计划、试样数量、舍弃的试样数量及原因;
- 3 有关曝露的资料(类型、曝露阶段等,如适用,应说明参照的国家标准);

**4 性能试验方法、测试设备、测试条件及试样状态调节**

过程；

5 初始经向、纬向(或纵向、横向方向)抗拉强度的各个测定值和平均值；

6 人工气候加速老化试验后试样经向、纬向(或纵向、横向方向)抗拉强度的各个测定值和平均值；

7 老化率  $\gamma$ ,同时说明是按照经向还是纬向(或纵向还是横向方向)试验结果计算取值。



## 附录 J 膜片与膜片连接强度的检测

### J.0.1 检测试样

将具有相同的形式和尺寸的膜片与膜片连接作为一类连接方式,对每类连接按本标准第 6.1.3 条的规定确定取样数量,进行强度检测。

连接试样的膜材方向应与工程中保持一致。

### J.0.2 检测内容

1 对织物类膜材,当膜片与膜片连接为热合或者粘合时,试样尺寸应符合本标准附录 C.1.2 的规定,试样制作应按图 J 执行。

2 对织物类膜材,当膜片与膜片连接为螺栓连接、编绳连接、夹具连接时,取矩形试样,试样宽度、隔距长度均不应小于膜布螺栓孔或编绳孔间距的三倍。

3 ETFE 膜片与膜片应进行热合连接,沿与连接线垂直的截取膜片并加工成哑铃型或长条形试样,试样尺寸应符合本标准附录 C.2.2 的规定。

4 按照本标准附录 C 的检测方法检测膜片与膜片连接强度。

5 记录膜片与膜片连接试样断裂时的连接强度及连接破坏的形式。膜片与膜片连接连接强度以  $F_{mm}$  表示,对织物类膜材,单位为 N/5cm,修约至 10N/5cm;对 ETFE 膜材,按式 C.2.5-1 计算,单位为  $N/mm^2$ ,修约 0.1  $N/mm^2$ 。

6 高温条件下的连接强度可按以上 1~5 步骤进行。基材为玻璃纤维、涂层为聚四氟乙烯的织物类膜材应分别进行(150+5)°C 和(260+10)°C 的两种温度下的连接强度检测,其它织物类

膜材以及 ETFE 类膜材的检测温度为  $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。

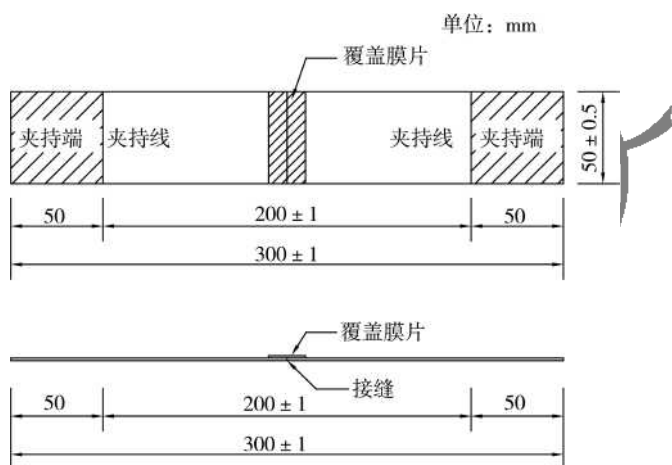


图 J 膜片与膜片连接试验试样图

**J.0.3** 检测报告除应包括本标准第 3.0.6 条的内容外,还应包括:

- 1 检测温度、湿度条件;
- 2 样品名称、规格;
- 3 连接形式、尺寸の説明;
- 4 各试样连接强度的检测值、该组的平均值;
- 5 各试样的破坏形式。

## 附录 K 膜面与刚性边界连接强度的检测

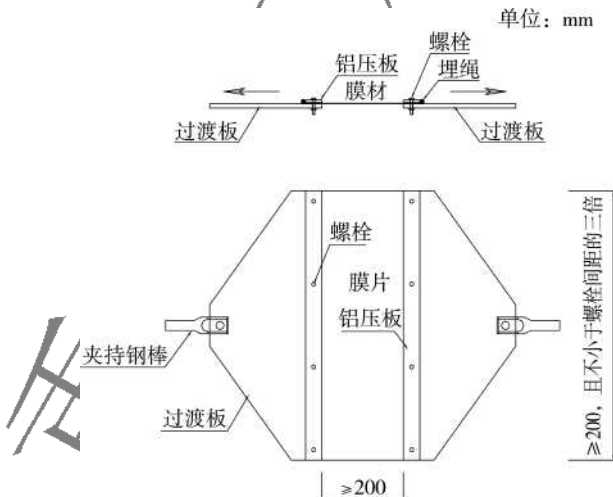
### K.0.1 检测试样

将具有相同的形式和尺寸的膜面与刚性边界连接作为一类连接方式,对每类连接按本标准第 6.1.3 条的规定确定取样数量,进行强度检测。

连接试样的膜材方向应与工程中保持一致。

试样的尺寸应符合下列条件:

- 1) 当膜面与刚性边界连接为螺栓连接、夹具连接时,试样宽度不应小于膜片螺栓孔或编绳孔间距的三倍;
- 2) 所有的试样膜片宽度、膜片自由长度均不应小于 200mm;
- 3) 试样的制作可按照图 K 执行。



### K.0.2 检测仪器

加载装置采用等速伸长试验机。试验机应具有指示或记录加于试样上使其拉伸直至破坏的作用力的装置。在仪器满量程内的任意点上,指示或记录断裂力的允许误差为 $\pm 1\%$ ,指示或记录夹具间距的允许误差为 $\pm 1\text{mm}$ 。仪器应可以进行恒定速率为 $20\text{mm}/\text{min}$ 的拉伸。夹具设置应使试样在被拉伸过程中不发生滑移。

#### K.0.3 检测方法

1 对织物类膜材,检测温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $(65\pm 3)\%$ ;按照现行国家标准《纺织品调湿和试验用标准大气》GB/T 6529 规定对试样进行预调湿、调湿和检测。对 ETFE 膜材,检测温度为 $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $(50\pm 5)\%$ ;按照现行国家标准《塑料试样状态调节和试验的标准环境》GB/T 2918 规定对试样进行预调湿、调湿和检测。

2 调整记录装置或负荷盘等装置的零点。

3 采用预张力夹持,设定预张力值为 $2\text{N}$ 。

4 开启试验机,恒定伸长速率为 $20\text{mm}/\text{min}$ ,精度为 $\pm 10\%$ 。

5 拉伸试样至破坏。

#### K.0.4 结果分析

试样开始拉伸至破坏过程中记录的最大作用力,作为该试样的检测值,取全组试样的平均值作为该类连接形式的连接强度,并记录连接破坏的位置。膜面与刚性边界连接强度以 $F_{mc}$ 表示。对织物类膜材,单位为 $\text{N}/5\text{cm}$ ,修约至 $10\text{N}/5\text{cm}$ ;对 ETFE 膜材,按式 C.2.5-1 计算,单位为 $\text{N}/\text{mm}^2$ ,修约至 $0.1\text{N}/\text{mm}^2$ 。

K.0.5 检测报告除应包括本标准第 3.0.6 条的内容外,还应包括:

1 检测温度、湿度条件;

2 样品名称、规格;

3 连接形式、尺寸的说明;

4 各试样连接强度的检测值、该组的平均值;

5 各试样的破坏形式。

## 附录 L 膜面与柔性边界连接强度的检测

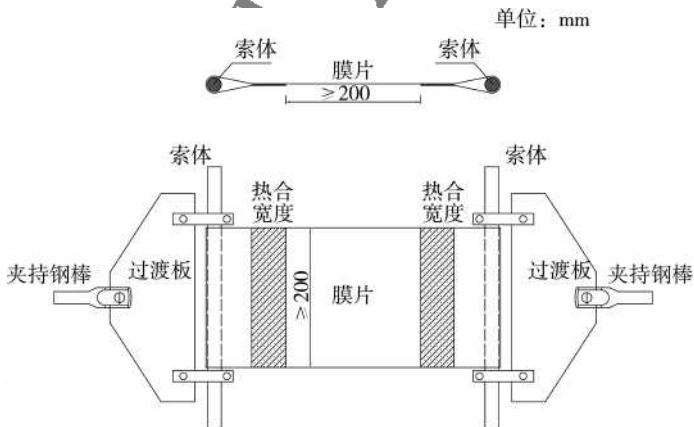
### L.0.1 检测试样

将具有相同的形式和尺寸的膜面与柔性边界连接作为一类连接方式,对每类连接按本标准第 6.1.3 条的规定确定取样数量,进行强度检测。

连接试样的膜材方向应与工程中保持一致。

试样的宽度应符合下列条件:

- 1) 当膜面与柔性边界连接为编绳连接、夹具连接时,试样宽度不应小于膜片螺栓孔或编绳孔间距的三倍;
- 2) 所有的试样膜片宽度、膜片自由长度均不应小于 200mm;
- 3) 试样的制作可按照图 L 执行。



### L.0.2 检测仪器

加载装置采用等速伸长试验机。试验机应具有指示或记录

加于试样上使其拉伸直至破坏的作用力的装置。在仪器满量程内的任意点上,指示或记录断裂力的允许误差为+1%,指示或记录夹具间距的允许误差为+1mm。仪器应可以进行恒定速率为20mm/min的拉伸。夹具设置应使试样在被拉伸过程中不发生滑移。

#### L.0.3 检测方法

1 对织物类膜材,检测温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $(65\pm 3)\%$ ;按照现行国家标准《纺织品的调湿和试验用标准大气》GB 6529 规定对试样进行预调湿、调湿和检测。对 ETFE 膜材,检测温度为 $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $(50\pm 5)\%$ ;按照现行国家标准《塑料试样状态调节和试验的标准环境》GB 2918 规定对试样进行预调湿、调湿和检测。

- 2 调整记录装置或负荷盘等装置的零点。
- 3 采用预张力夹持,设定预张力值为2N。
- 4 开启试验机,恒定伸长速率为20mm/min,精度为+10%。
- 5 拉伸试样至破坏。

#### L.0.4 结果分析

试样开始拉伸至破坏过程中记录的最大作用力,作为该试样的检测值,取全组试样的平均值作为该类连接形式的连接强度,并记录连接破坏的位置。膜面与柔性边界连接强度以 $F_{ms}$ 表示,对织物类膜材,单位为N/5cm,修约至10N/5cm;对 ETFE 膜材,按式 C.2.5-1 计算,单位为 $\text{N}/\text{mm}^2$ ,修约至 $0.1\text{N}/\text{mm}^2$ 。

L.0.5 检测报告除应包括本标准第3.0.6条的内容外,还应包括:

- 1 检测温度、湿度条件;
- 2 样品名称、规格;
- 3 连接形式、尺寸的说明;
- 4 各试样连接强度的检测值、该组的平均值;
- 5 各试样的破坏形式。

## 附录 M 膜顶和膜角连接强度的检测

### M.0.1 检测试样

将具有相同的形式和尺寸的膜顶或膜角连接作为一类连接方式,对每类连接按本标准第 6.1.3 条的规定确定取样数量,进行强度检测。

连接试样的经纬方向应与工程中保持一致。

膜顶、膜角连接强度的检测应采用足尺试验。

膜顶、膜角试样的制作可按图 M.0.1-1 和 M.0.1-2 执行。

单位: mm

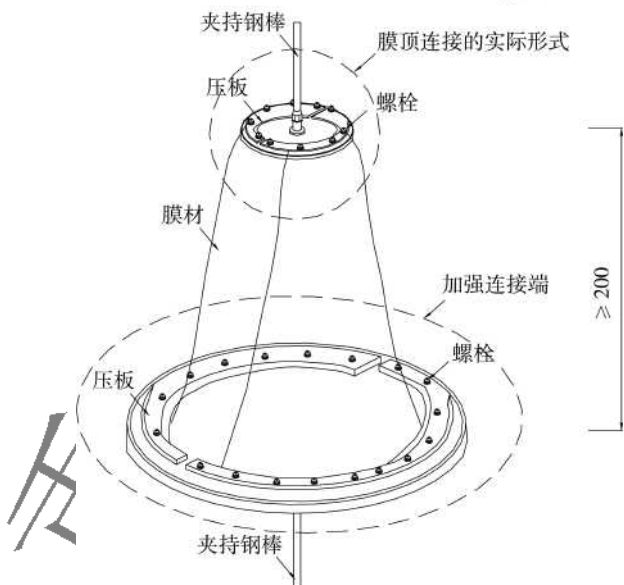


图 M.0.1-1 膜顶连接强度试样样图

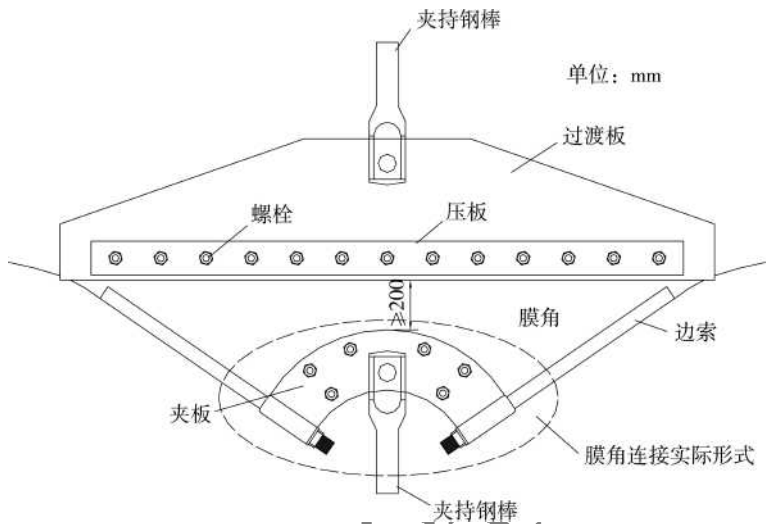


图 M.0.1-2 膜角连接强度试样样图

### M.0.2 检测仪器

加载装置采用等速伸长试验机。试验机应具有指示或记录加于试样上使其拉伸直至破坏的作用力的装置。在仪器满量程内的任意点上,指示或记录断裂力的允许误差为+1%,指示或记录夹具间距的允许误差为+1mm。仪器应可以进行恒定速率为20mm/min的拉伸。夹具设置应使试样在被拉伸过程中不发生滑移。

### M.0.3 检测方法

1 对织物类膜材,检测温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 $(65 \pm 3)\%$ ;按照现行国家标准《纺织品调湿和试验用标准大气》GB/T 6529 规定对试样进行预调湿、调湿和检测。对 ETFE 膜材,检测温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 $(50 \pm 5)\%$ ;按照现行国家标准《塑料试样状态调节和试验的标准环境》GB/T 2918 规定对试样进行预调湿、调湿和检测。

2 调整记录装置或负荷盘等装置的零点。



- 3 采用预张力夹持,设定预张力值为 2N。
- 4 开启试验机,恒定伸长速率为 20mm/min,精度为-10%~10%。
- 5 拉伸试样至破坏。

#### M.0.4 结果分析

试样开始拉伸至破坏过程中记录的最大作用力,作为该试样的检测值,取全组试样的平均值作为该类连接形式的连接强度,并记录连接破坏的位置。膜顶、膜角连接强度以  $F_{mp}$  表示,单位为 N,修约至 10N。

M.0.5 检测报告除应包括本标准第 9.0.6 条的内容外,还应包括:

- 1 检测温度、湿度条件;
- 2 样品名称、规格;
- 3 连接形式、尺寸的说明;
- 4 各试样连接强度的检测值、该组的平均值;
- 5 各试样的破坏形式。

## 附录 N 膜面现场淋水检验方法

**N.0.1** 将膜面淋水试验装置安装在被检膜面的外表面,喷嘴离膜面的距离不应小于 530mm,并应在被检膜面表面形成连续水幕。每一检验区域喷淋面积应为  $1800\text{mm} \times 1800\text{mm}$ ,喷水量不应小于  $4\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ ,喷淋时间应持续 5min,在室内应观察有无渗漏现象发生。

**N.0.2** 膜面淋水试验装置(图 N),在  $1800\text{mm} \times 1800\text{mm}$  范围内,单个喷嘴喷淋直径应为 1060mm,四个喷嘴喷淋面积应为  $3.53\text{m}^2$ ,淋水总量不应小于  $14\text{L}/\text{min}$ 。

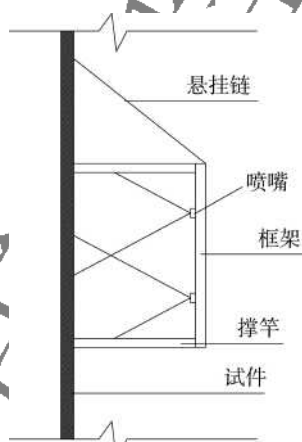


图 N 膜面淋水试验装置安装示意

**N.0.3** 喷嘴应安装在框架上,框架应用撑竿与被测膜面连接,水管应与喷嘴连接,并引至水源。水流量的监测可采用转子流量计或压力表两种形式。

## 附录 P 膜面张力的检测

### P.1 一般规定

- P.1.1** 膜面张力应按本标准附录 P.2 节的检测方法进行检测。
- P.1.2** 膜面张力应按本标准附录 P.3 节中表 P.3.2 中的公式计算。

### P.2 膜面张力检测方法

#### P.2.1 原理

通过外部荷载的激励,待测膜面发生振动。采用 DIC(digital image correlation),即数字散斑测量系统分析得到膜面振动的基本频率,进而计算得到膜面张力。

#### P.2.2 试样

待测膜面需要制作散斑(制作方法见附录 Q),对膜面反光较强的试样应进行适当的处理,使其表面粗糙不易反光。每个待测膜面至少进行 3 次检测。

#### P.2.3 检测仪器

激励加载采用专用仪器发射小球;小球质量 0.5g~1.5g,入射速度 15m/s~25m/s。小球速度根据膜面大小和目标距离进行设置,可多次尝试,使散斑膜面区域的膜面发生振动(DIC 测量装置可实时记录膜面振动图像),其他区域基本保持静止。测量装置采用 DIC 测量系统,DIC 系统相机分辨率不低于 100 万像素,相机帧率不低于 800 帧。

#### P.2.4 检测方法

1 对于一块待检测矩形薄膜结构,将 DIC 数字散斑测量装置放置于下方,高速摄像机镜头平面与待测膜面呈  $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ,方便采集散斑图样。沿着薄膜的纵向和横向方向分别布置散斑条(如图 P.2.4-1),待激励小球作用膜面后,用 DIC 数字散斑技术采集散斑条上的散斑图像,图像处理得到散斑条上的各点面外位移结果,确定振动的准确边界,即位移为零的点:A 点  $(b^*, 0)$  和 B 点  $(0, a^*)$ ,进而得到振动范围  $2a^* \times 2b^*$  (如图 P.2.4-2 虚线示意部分),计算长宽比  $\delta = b^*/a^*$ 。

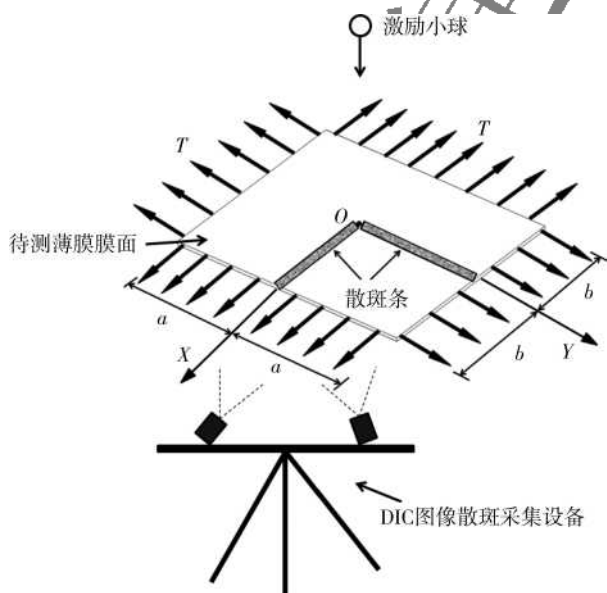


图 P.2.4-1 薄膜结构示意图

2 在振动区域  $2a^* \times 2b^*$  内,布置长方形散斑用于测试频率,尺寸为  $a^* \times b^*$ ,如图 P.2.4-3 所示。在激励小球作用于膜面后,DIC 数字散斑采集频率测试区图像,分析得到结构振动频率  $\omega$ 。

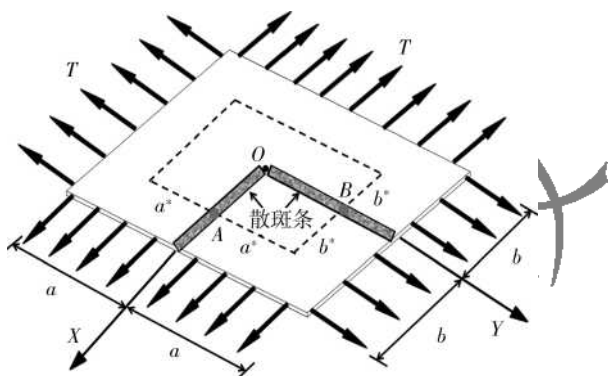


图 P.2.4-2 确定振动范围的示意图

3 将膜面密度  $\rho$ 、长度  $b^*$ 、长宽比  $\delta$ 、频率  $\omega$  等参量代入公式计算得到预拉力。重复测试三次，并记录每次频率结果，用于后续计算。

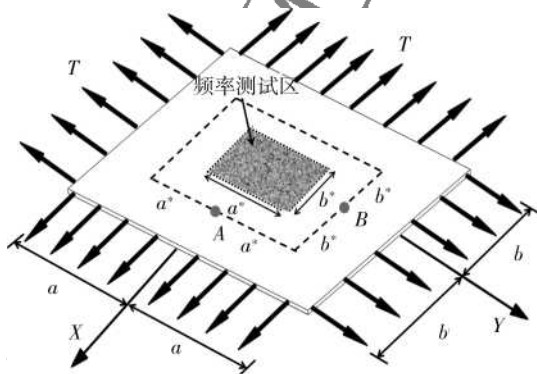


图 P.2.4-3 布置频率测量散斑的示意图

## P.3 膜面张力计算

### P.3.1 原理

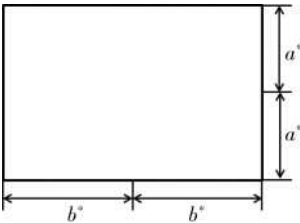
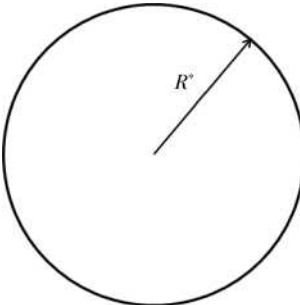
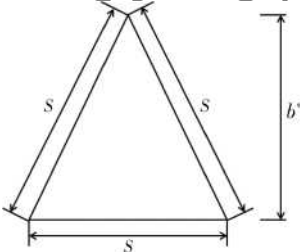
运用等高线振型方法，推导频率与膜面张力的显式函数关

系,通过计算得到膜面张力。

### P.3.2 方法

针对典型膜结构形式,分别给出相应的膜面张力计算式,如下表 P.3.2 所示。将测得的膜面振动频率及几何参数代入计算式,计算得到相应的膜面张力  $T$ 。

表 P.3.2 不同形状薄膜计算公式

形状	膜面张力
 <p>The diagram shows a rectangle with a vertical height labeled <math>a^*</math> on the right side, which is split into two segments of <math>a^*</math>. The horizontal width is labeled <math>b^*</math> at the bottom, also split into two segments of <math>b^*</math>.</p>	$T = \frac{\rho(b^* \omega)^2}{2.42(1+\delta^2)}$ <p>式中: <math>T</math> 表示膜面张力(N/m), <math>a^*</math> 表示矩形膜宽度的一半(m), <math>b^*</math> 表示矩形长的一半(m), <math>\delta = b^*/a^*</math> 为长宽比, <math>\rho</math> 为膜的面密度(kg/m<sup>2</sup>), <math>\omega</math> 表示膜振动的基频(rad/s)。</p>
 <p>The diagram shows a circle with a radius line drawn from the center to the top edge, labeled <math>R^*</math>.</p>	$T = \frac{\rho(R^* \omega)^2}{5.783}$ <p>式中: <math>T</math> 表示膜面张力(N/m), <math>R^*</math> 表示圆形膜的半径(m), <math>\rho</math> 为膜的面密度(kg/m<sup>2</sup>), <math>\omega</math> 表示膜振动的基频(rad/s)。</p>
 <p>The diagram shows an equilateral triangle with all three sides labeled <math>s</math>. A vertical line from the top vertex to the base is labeled <math>b^*</math>.</p>	$T = \frac{\rho(b^* \omega)^2}{11.58}$ <p>式中: <math>T</math> 表示膜面张力(N/m), <math>b^*</math> 表示等边三角形膜的高(m), <math>\rho</math> 为膜的面密度(kg/m<sup>2</sup>), <math>\omega</math> 表示膜振动的基频(rad/s)。</p>

## 附录 Q 数字散斑测量流程

### Q.1 散斑制作

#### Q.1.1 散斑要求

1 为了进行数字图像相关(DIC)的计算,需要在试样表面制作黑白对比度较高的随机散斑点,散斑点的尺寸要求在 5~10 个像素左右,黑点与白点各 50%的覆盖率。

2 制作任何散斑图案的第一步都是要先制作底层。一些材料本身的颜色足够浅或足够深,同时不会产生反光,所以基本上不需要底层。大多数情况需要使用哑光白色底层(黑色散斑点),哑光黑色底层(白色散斑)制作底层。

注意事项:对于应变量级超过 15%~20%,可使用底漆喷漆来制作底层。一般金属底漆可以承受住 40%的应变;对于应变量级超过 40%的应变,通常最好的方式是基于无底层和使用墨水制作的散斑,这样不会使得散斑图案本身产生裂纹或变坏。通常情况下聚合物的应变会很大,但其往往是浅颜色并且不会反光,此时可能不需要制作底层。

#### Q.1.2 散斑制作

1 采用散斑制作工具来制作散斑:当散斑滚轮和散斑印戳用到黑色墨水,需要制作白色底层;当滚轮和印戳用到白色墨水,所以需要制作黑色底层。适用于常规至大尺寸试样。

2 喷漆手动喷涂制作散斑:手动喷漆喷涂的散斑点大小有限,通常较小,适用于实验室较小的标准试样,更小的试样可采用喷笔制作散斑。

3 化学等特殊方法制作散斑:当试样需要在显微或者电镜

设备观测微观图像时,则需要化学等特殊方法制作散斑。

4 手动涂画散斑:当试样表面不平整,不规则时,可使用各种画笔、马克笔、毛笔等工具手动涂画制作散斑。

## Q.2 搭建采集子系统

Q.2.1 搭建调节采集系统的支撑子系统,使支撑子系统处于稳定的环境中。支撑子系统可以是三脚架、固定杆、支座等。

Q.2.2 安装 3D 采集头,根据试验现场环境、3D 采集头与试样表面距离以及待测试样视野大小选择合适的镜头(镜头主要用于补偿工作距离、视野大小以及试验光照情况)和支撑系统工作距离(相机焦平面到试样表面的距离可根据试样的大小进行调节)。

Q.2.3 将 3D 双采集头子系统与计算机连接,可根据具体采集头连接形式连接(USB、Fire Wire、CameraLink、GigE)。

注意事项:如果试验环境光照较暗,需要搭建无频闪光照子系统进行光照的补偿,光照子系统尽可能均匀照亮试样待测表面,保证 3D 采集头在采集明亮图像过程中有尽可能短的曝光时间(具有频闪的光照系统可能导致采集连续的图像出现明暗不同的变化)。

## Q.3 调节采集系统

Q.3.1 打开系统图像采集软件,调节采集头参数直到显示明亮视野。调节 3D 采集头距离以及方向,要求 3D 采集头的相对夹角在  $15^{\circ}$  至  $60^{\circ}$  之间,一般调节角度为  $30^{\circ}$ ,并使试样待测区域同时处于 3D 采集头视野范围内。精确调节 3D 采集头镜头焦距,使出现最清晰的散斑图像。

Q.3.2 使用系统图像采集软件综合评估光照、散斑质量、对焦等给出散斑区域全局的不确定性分布云图,全局平均不确定数值,



调节采集系统使全局不确定性达到当前实验条件下最小状态。

**Q.3.3** DAQ 数据采集系统与计算机线缆连接,同时连接试验机模拟信号输出接口与 DAQ 模拟输入通道,软件将显示试验机模拟电压信号以及输出对应的力或位移等数据曲线。根据试验机相关参数进行数值设置。

#### **Q.4 系统校正标定**

**Q.4.1** 选择合适的校正板,合适的校正板应占 3D 测量头视野范围的 80% 以上。

**Q.4.2** 校正板位置应处于被测试件平面位置,手动拍摄并保存 15 张以上校正图像。拍摄校正图像应包含校正板平面内旋转不同角度以及平面外的倾斜。获取校正结果,校正结果误差应控制在 0.05 像素范围内。

#### **Q.5 试件加载并同步采集图像**

**Q.5.1** 启动试验机并按试验流程操作。

**Q.5.2** 打开图像采集系统,设置图像采集时间间隔。图像采集时间间隔应根据试件变形速率,要求连续前后图像应变不超过总应变的 3%。进行试验加载以及连续图像和试验机力、位移等的同步采集。

#### **Q.6 实验数据 DIC 分析**

**Q.6.1** 打开后处理分析软件,导入校正图像,导入采集变形图像,分析校正图像。根据需要关注的区域,对采集图像第一组划分分析区域,定义子区域网格的大小,子区域网格要求每个网格包含 5 个散斑特征点。设置子区域网格 Subset 大小后,设置

Step 数值,一般可设为子区域网格大小的 1/4。

**Q.6.2** 进行参数设置后,开始图像分析,分析完成后,可展示相应的 2D/3D 变形云图,云图可保存为图像或变形过程动画。可使用提取工具进行点、线、区域、引伸计等数据的提取,绘制数据曲线以及输出。

## 本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

- 1) 表示很严格,非这样做不可的:  
正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;
- 2) 表示严格,在正常情况下均应这样做的:  
正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;
- 3) 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:  
正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;
- 4) 表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

## 引用标准目录

- 《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344
- 《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300
- 《膜结构技术规程》CECS 158
- 《膜结构检测技术规程》DG/TJ08
- 《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621
- 《混凝土结构现场检测技术标准》GB/T 50784
- 《木结构工程施工质量验收规范》GB 50206
- 《涂层织物 厚度试验方法》FZ/T 01003
- 《涂层织物 涂层厚度的测定》FZ/T 01006
- 《增强材料机织物试验方法 第1部分:厚度的测定》GB/T 7689.1
- 《塑料薄膜和薄片 厚度测定 机械测量法》GB/T 6672
- 《纺织品 调湿和试验用标准大气》GB/T 6529
- 《塑料 试样状态调节和试验的标准环境》GB/T 2918
- 《数值修约规则与极限数值的表示和判定》GB/T 8170
- 《增强材料 机织物试验方法 第2部分:经、纬密度的测定》GB/T 7689.2
- 《塑料 滚动磨损试验方法》GB/T 5478
- 《塑料 滑动摩擦磨损试验方法》GB/T 3960
- 《膜结构用涂层织物 防污性能试验方法》FZ/T 60038
- 《纺织品 防水性能的检测和评价 静水压法》GB/T 4744
- 《涂层织物 抗渗水性的测定》FZ/T 01004
- 《塑料薄膜和片材透水蒸气性试验方法 杯式法》GB/T 1037
- 《塑料薄膜和薄片水蒸气透过率的测定 电解传感器法》GB/T

21529

《塑料薄膜和薄片水蒸气透过率的测定 湿度传感器法》GB/T 30412

《塑料薄膜和薄片水蒸气透过率的测定 红外检测器法》GB/T 26253

《纺织品 织物拉伸性能》GB/T 3923

《塑料 拉伸性能的测试》GB/T 1040

《涂层织物 涂层剥离强力的测定》FZ/T 01010

《声学 建筑和建筑构件隔声测量》GB/T 19889

《声学 混响室吸声测量》GB/T 20247

《建筑玻璃 可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定》GB/T 2680

《塑料导热系数试验方法 护热平板法》GB 3399

《建筑外门窗保温性能检测方法》GB/T 8484

《建筑材料可燃性试验方法》GB/T 8626

《建筑材料难燃性试验方法》GB/T 8625

《建筑材料不燃性试验方法》GB/T 5464

《建筑材料及制品燃烧性能分级》GB 8624

《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》GB/T 228.1

《钢拉杆》GB/T 20934

《不锈钢拉索》YB/T 4294

《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85

《钢锻件超声检测方法》GB/T 6402

《锻轧钢棒超声检测方法》GB/T 4162

《铸钢件 超声检测 第1部分:一般用途铸钢件》GB/T 7233.1

《锻钢件磁粉检测》JB/T 8468

《铸钢铸铁件 磁粉检测》GB/T 9444

《承压设备无损检测 第5部分:渗透检测》JB/T 4703.5

《建筑密封材料试验方法》GB/T 13477

《建筑用硅酮结构密封胶》GB 16776

《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能检测方法》GB/T 7106

《城市桥梁检测与评定技术规范》CJJ/T 233

《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205

《塑料直角撕裂性能试验方法》QB/T 1130

重庆市工程建设标准

建筑膜结构检测技术标准

DBJ50/T-380-2021

条文说明

2021 重 庆

# 重庆工程建设



## 目次

1	总则	73
3	基本规定	74
4	膜材性能检测	75
4.1	一般规定	75
4.2	基本性能	75
4.3	力学性能	76
4.4	建筑物理性能	82
4.5	防火性能	83
5	其它材料性能检测	84
6	连接检测	86
6.1	一般规定	86
6.2	膜面连接强度	86
6.3	膜面连接水密性和气密性	89
7	张力检测	90
8	尺寸与偏差检测	91
8.1	一般规定	91
8.2	金属构件尺寸偏差	91
8.3	膜面控制点几何偏差	91
9	外观质量检测	93
9.1	一般规定	93
9.2	缺陷与损伤	93
附录 B	膜材面密度的检测	94
附录 P	膜面张力的检测	95

# 重庆工程建设

## 1 总 则

**1.0.1** 本标准中的膜结构是指建筑膜结构,其广泛应用于大型体育场馆、停车场、入口廊道、观光植物园、娱乐场、购物场、展览会场等建筑中。

膜结构检测得到的数据与结论是进行膜结构工程验收、评定有争议膜结构工程质量、鉴定既有膜结构性能的依据。但目前重庆市尚没有针对膜结构检测工作的技术标准,使得膜结构的检测工作标准不统一,不能与已有的膜结构技术规程相衔接。为重庆市膜结构工程质量的检测以及现有膜结构性能的检测与鉴定提供统一的检测数据和检测结论,制定本标准。

**1.0.2** 本条规定了本标准的适用范围。近年来,建筑用膜材的种类不断丰富,除了常用的织物类膜材以外,以 ETFE 膜材为代表的热塑化合物类膜材也日益受到重视和广泛应用。因此,本标准的编制对这两类膜材的膜结构检测分别作出了规定。

### 3 基本规定

**3.0.1** 本条给出了膜结构的检测应包含的内容和确定检测内容的原则。本标准的编制主要以《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 为依据,重点对膜结构特有的材料性能、连接、膜面张力、尺寸与偏差以及外观质量的检测方法进行了规定。对非膜结构特有的其它检测项目,检测方法和检测规则应按《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 以及其它现行相关标准执行。

膜结构的规模和用途有很大区别,既有面积在几十平方米的膜结构小品,也有面积数万平方米的大型膜结构。建议对覆盖面积大于或等于 3500 平方米的膜结构,或使用年限要求大于或等于 5 年的膜结构按本标准的规定进行检测。具体检测项目的确定应由相关管理部门、业主、设计和施工等各方共同确定。例如,对充气膜结构应进行连接与节点的气密性检测,对重要膜结构宜按本标准的规定进行全部项目的检测。

**3.0.2** 本条给出了既有膜结构的检测内容。既有膜结构在建设时若没有保存与膜面材料相同并经历类似环境的膜材,很难对膜面材料性能进行检测。因此既有膜结构检测的重点是张力、尺寸与偏差以及外观质量的检测。若建设时保存了膜面材料,并经历了与实际工程类似的环境,则按本标准规定进行既有膜结构膜材材性的检测。

**3.0.3** 支承结构一般包括钢结构、混凝土结构、木结构等分项工程。钢结构的检测应符合现行国家标准《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621 的规定,混凝土结构的检测应符合现行国家标准《混凝土结构现场检测技术标准》GB/T 50784 的规定,木结构的检测应符合现行国家标准《木结构工程施工质量验收规范》GB 50206 的规定。

## 4 膜材性能检测

### 4.1 一般规定

4.1.1 本条给出了膜材性能检测的主要项目,超出本标准规定的膜材性能检测项目可参照现行国家及重庆市相关标准执行。

4.1.2 膜材的基本性能检测项目中,涂层厚度和经纬密度是织物类膜材独有的检测项目,其它基本性能的检测项目是织物类膜材和 ETFE 膜材共有的。

4.1.3 膜材力学性能的检测项目中,涂层剥离强度是织物类膜材独有的检测项目,其它力学性能的检测项目是织物类膜材和 ETFE 膜材共有的。

4.1.6 膜材料的检测应按要求划分检测批,并根据规定的比例和规定的取样方法进行抽样检测。检测批抽样样本应随机抽取,满足分布均匀、具有代表性的要求,对于每个检测批的最小抽样数量,应符合现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300 的规定。

### 4.2 基本性能

4.2.4 膜材厚度较小,在与其它材料发生频繁摩擦时可能出现破裂,对织物类膜材可能出现基材裸露。本条规定了膜材的耐磨性能检测方法。

耐磨性能,对织物类膜材是指其表面涂层的抗磨损性能(基布不至于露出),对 ETFE 膜材则是指膜材自身的抗磨损性能。

4.2.5 防污性指材料抵抗沾污的性能,即材料具有不易粘附污

物,或即使沾污也易于去除的性能,以耐沾污性和易去污性表征。

**4.2.6 膜材**在应用中常常与雨水接触,因而膜材的透水性具有重要的实际意义。织物的透水性是液态水从织物一面渗透到另一面的性能。对于织物的防水和透水性,总体上来说主要受表面浸润性、织物涂层和环境条件等因素影响。织物透水性或防水性的测量,随织物实际使用情况不同而采用不同的方法,并且以各种相应的指标来表示织物的透水性或防水性,主要测量方法包括静压法、动压法、喷淋法、浸液法等。静压法是在织物的一侧施加静水压,测量在此静压下的出水量、或出水滴时间;或在一定出水量时的静水压值。静水压值可以是水柱高,也可以是压强。

目前,有关防水透气膜透水性测试方法有杯式法、电解法、湿度法与红外法,可参考的方法标准分别为《塑料薄膜和片材透水蒸气性试验方法 杯式法》GB/T 1037、《塑料薄膜和薄片水蒸气透过率的测定 电解传感器法》GB/T 21529、《塑料薄膜和薄片水蒸气透过率的测定 湿度传感器法》GB/T 30412、《塑料薄膜和薄片水蒸气透过率的测定 红外检测器法》GB/T 26253。

### 4.3 力学性能

**4.3.1** 本标准附录 C 给出了膜材抗拉强度及断裂延伸率的检测方法。检测结果应按国家及重庆市现行相关标准进行评定。

目前国内外尚无专门针对膜材抗拉强度及断裂延伸率的统一检测方法。对织物类膜材,通常参照织物类材料的检测标准;对 ETFE 膜材,通常参照塑料类材料的检测标准。因此,本标准主要参考国外以及现行国家标准《纺织品 织物拉伸性能》GB/T 3923 制定了膜材抗拉强度及断裂延伸率的检测方法。

对于织物类膜材,条样法和抓样法是两种常用的抗拉强度试验方法。其中,条样法又包括切割条样和拆纱条样两种试样制备方法。考虑到试验的方便性和一致性,本标准采用条样法进行抗

拉强度试验,并以切割条样准备试样。

试样的夹头需要特殊处理,避免夹持位置的断裂,处理方法有试样在夹持处加强、试验机夹头内贴塑料、橡胶等防护层,采用有线条槽或波纹面的夹具,或者缠绕式夹具、端承式夹具。使用缠绕式夹具时需要使用大变形引伸计测量试样变形。

膜材的抗拉强度是评价膜材力学性能最为重要的指标,而膜材在实际结构中经常处于高温或者潮湿条件下,研究表明温度、湿度变化对膜材的抗拉强度有较大影响,因此对重要工程,应进行膜材抗拉强度在高温条件以及潮湿条件下的检测。

ETFE 膜材的抗拉强度、屈服应力和断裂延伸率的检测根据现行国家标准《塑料 拉伸性能的测试》GB/T 1040 制定。试验的拉伸速度将对测试结果产生影响,国外测试方法一般选取应变速度为  $100\%/min$  的拉伸速度。当采用哑铃型试样时,为使试样中间标线间的应变速度为  $100\%/min$ ,拉伸速度应取  $57mm/min$ ,为便于试验,本标准取拉伸速度  $50mm/min$ 。

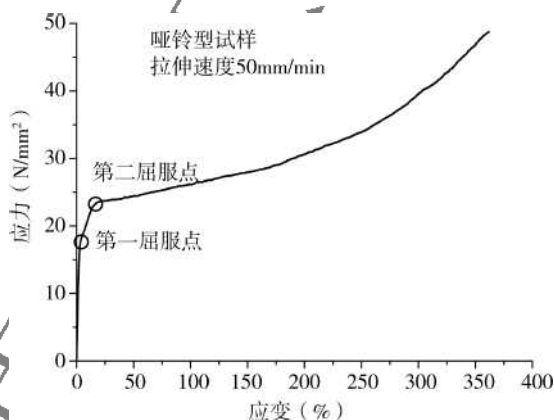


图1 ETFE膜材单向拉伸曲线

图1为ETFE膜材的单向拉伸试验曲线实例。从拉伸起始到最后断裂为止,应力应变曲线经历了两个比较明显的刚性变化

转折点,这两个转折点分别被定义为 ETFE 膜材的第一屈服点和第二屈服点。第一屈服点之前应力应变呈近似直线关系,可以认为材料处于弹性状态。经过第一屈服点后,应力应变曲线仍保持近似直线,但直线的斜率迅速减小,可以认为材料发生屈服。当应力超过第二屈服点后,材料迅速被拉长,随着应变的大幅度增加,逐渐出现应力强化并最终断裂。试验统计结果还表明,第一及第二屈服强度数据标准差较小,屈服强度是描述 ETFE 膜材强度值的可靠指标。

本标准附录 C 规定了试验确定 ETFE 膜材第一及第二屈服点的方法。

**4.3.2 膜材在鸟类、树枝等外来飞行物体作用下发生微小破损时,在完成修补之前膜面的破损可能会因强风而扩展。膜材的撕裂强度是衡量破损发生扩展的重要指标。**

常用的织物类膜材撕裂强度的检测方法有梯形撕裂法、单舌撕裂法、双舌撕裂法以及冲击摆锤法等。

其中,梯形撕裂法的撕裂模式与实际工程膜面撕裂破坏类似,撕裂模式简单,结果的一致性好。撕裂过程中,垂直于拉伸方向的纱线几乎不起作用,主要是平行于拉伸方向的纱线因应力集中逐渐被拉伸断裂。同时,梯形撕裂试验的测试方法简单、试样制备方便。考虑到试验的方便性和一致性,本标准采用梯形撕裂法检测膜材撕裂强度。各种撕裂试验结果由于撕裂模式的不同不具有可比性。

根据试验记录的荷载—伸长量曲线确定膜材的撕裂强度,国内外相关规程方法各不相同,或只考虑最大的负荷峰峰值、或考虑若干个最大负荷峰峰值的平均值、或通过荷载—伸长量曲线的有效面积进行折算。考虑到试验的一致性,本标准确定的结果计算方法为:计算经向、纬向每块试样的试验记录的五个最大负荷峰峰值的平均值,然后分别计算经向、纬向试样的平均值。不同的结果计算方式得到的撕裂强度也不具有可比性。



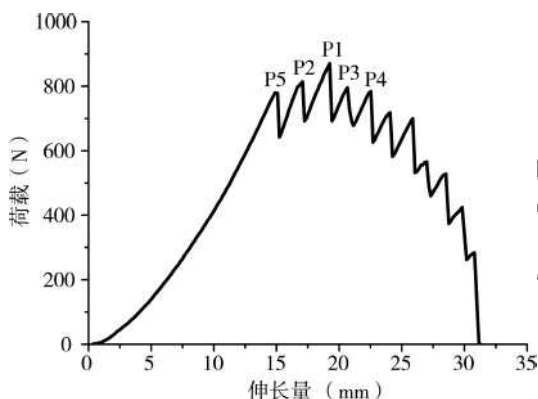


图 2 某织物类膜材撕裂曲线

**4.3.4 膜材的弹性模量和泊松比是膜结构设计、计算的重要参数。** 织物类膜材是一种各向异性材料，通常假定为以膜材经向和纬向为主轴的正交各向异性材料。而且由于膜材始终处于双轴拉伸的工作状态，因此采用双轴拉伸试验是检测膜材弹性模量及泊松比的较为准确的方法。目前国际上尚未有统一的试验方法，不同试验方法的检测结果有一定的差别。本标准参照日本标准制定检测方法。除本标准列出的检测方法，参照相关国外标准试验得到的膜材弹性模量和泊松比也可以用于膜结构设计、计算。但应在报告中注明所参照规范和试验方法，且各种试验方法得到的结果并不具有可比性。

织物类膜材经纬向纱线卷曲交替作用，使得膜材本身具有强非线性、大蠕变性等特征，很难认定为弹性材料。然而在实际的膜结构的应力、变形分析中，目前的结构计算方法通常以弹性理论为基础，因此，在本标准给出的弹性模量和泊松比的测试方法中，假定膜材为正交各向异性弹性材料。

理论上，正交各向异性弹性体的泊松比不会达到或超过 0.5；然而，织物类膜材由于经纬向纱线的卷曲交替作用，其泊松比有时会超过 0.5。

更进一步,在正交各向异性弹性材料中,经纬向的张拉刚度和泊松比之间应满足“互逆关系”。然而,多数情况下实际膜材以上各值的实测值并不满足“互逆关系”,这一点其实是与将膜材视为正交各向异性弹性材料的假定不相符的。

膜材有很强的非线性,但目前的膜结构分析中通常都将膜材在一定的应力范围内视为线性材料。本标准取初始张力到膜材抗拉强度的 1/4 的范围内对膜材荷载—应变曲线进行线性化。这与目前膜结构安全系数的取值也是基本吻合的。这是因为实际使用中考虑了安全系数的因素,膜材的实际应力一般最大只达到其抗拉强度的 1/4。

本标准对膜材双向按比例拉伸前进行的反复张拉,主要考虑到消除膜材的卷曲交替效应。这与实际中通常在膜结构安装前对膜材进行反复张拉以消除膜材纱线间的松弛是一致的。

膜材的弹性常数受荷载施加的顺序、比例、大小的影响比较明显。理论上,应针对每项工程确定不同的弹性常数,但是这并不现实。本标准确定了一组给定张拉比例和顺序下的双轴拉伸试验,可以统计得到比较通用的弹性常数。获得的结果并非完全和实际膜结构中用到的设计用膜材常数一致。

双向张拉试验中不同荷载比例下的各条荷载—应变曲线一般都不能满足织物类膜材的互逆关系。因此,试验获得的曲线必须由能满足互逆关系的曲线替代。使用最小二乘法完成此替代过程。这其中又包括应变项残差平方和最小的方法和应力项残差平方和最小的方法两种可行的方法。考虑到计算过程的简便性,本标准推荐使用前者。

数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)是一种测量物体表面形变的光学方法,通过在被测物表面制作特征点(散斑图),捕捉散斑特征在像素级别的移动,采用数字图像相关性运算法则,计算得出物体表面应变、位移及频率等相关信息。DIC 测量技术具有非接触性、全场性、高精度等特点,能较好的应用于膜

材力学性能的测量。

ETFE 膜材的弹性模量的计算方法有取材料应力应变曲线最初直线段的斜率(切线斜率)、应力应变曲线上对应于第一屈服强度的点与原点连线的斜率(割线斜率)等方法。由试验结果得到的割线斜率的数值比较稳定,因此本标准参考国外的检测方法,取应力应变曲线上对应于第一屈服强度的点与原点连线的斜率作为 ETFE 膜材的弹性模量。

ETFE 膜材在压延制作时,沿纵向和横向的材料应力应变曲线可能会有差异,但对于厚度为  $20\mu\text{m}\sim 250\mu\text{m}$  的膜材,一般可以认为是各向同性材料。当拉伸试验中得到的纵向和横向的拉伸应力应变曲线有明显差异时,应考虑材料的各向异性。

**4.3.5 膜材的剪切模量**是膜结构设计、计算的重要参数。目前国际上尚未有统一的试验方法,不同试验方法的检测结果有一定的差别。本标准参照日本标准制定检测方法。除本标准列出的检测方法,参照相关国外标准试验得到的膜材剪切模量也可以用于膜结构设计、计算。但应在报告中注明所参照规范和试验方法,且各种试验方法得到的结果并不具有可比性。

本标准确定的织物类膜材剪切模量的检测方法是基于使膜片产生纯剪变形,并通过测量剪应力和剪应变,计算膜材剪切模量的。

预张力的导入对于试验是必须的。因此,试件的制备过程中必须和膜材双向拉伸设备配合使用,导入确定的预张力。

实际工程的膜面预张力各有不同,虽然预张力的变化对膜材剪切模量的检测结果有一定的影响,但是为保证检测方法、结果的一致性,本标准规定预张力为  $3.0\text{kN}/\text{m}^2$ 。如针对具体工程采用其它的预张力值检测膜材剪切模量,应给予注明。

面内剪切装置的边框应能牢固、可靠的保持试样的预张力值,并避免试样边缘的滑移等。

面内剪切装置的对角线变形不应过大,以避免膜材试样可能

出现褶皱现象。本标准预定的位移设置成使试验平面的剪切变形角是 $+1^{\circ}\text{C}$ 时的位移,实际中取 $\delta_1 - \delta_2 - 2.0\text{mm}$ 。

**4.3.6** 无论是织物类膜材,还是 ETFE 膜材,在拉伸作用下都有显著的徐变现象。对于膜结构的裁剪分析和张力导入,膜材的徐变性能都非常重要。同时,温度条件对膜材的徐变性能影响很大。因此,本标准规定分别检测常温条件和高温条件两种情况下的徐变性能。

为使试验结果具有一致性,膜材徐变性能的试样与其相对应的断裂延伸率检测试样一致。

常温条件下,恒定张力为膜材同方向抗拉强度的 $1/4$ (织物类膜材)或 $10\text{N}/\text{mm}^2$ (ETFE类膜材),这与目前膜结构安全系数的取值是基本吻合的。高温条件下,恒定张力取值较小、保持时间较短,这是因为高温条件会加剧膜材徐变,而且实际中出现高温条件的情况相对较少。

高温条件下,部分试样在恒定张拉过程中可能断裂,应记录断裂出现的时间、位置等。

## 4.4 建筑物理性能

**4.4.1** 膜材耐候性能是指膜材暴露于日光、风雨、温度变化等自然条件下的耐久性。膜材耐候性能的检测通常有自然气候老化和人工气候老化两种试验方法。试验室检测通常采用人工加速气候老化试验,即氙灯老化试验。

为统一试验方法和膜材耐候性能的评判标准,本标准设定了氙灯曝露试验的终止条件。人工气候老化试验中,紫外线的照射是影响膜材性能老化的主要因素。因此,本标准设定的氙灯曝露试验的终止条件是以波长在 $300\sim 400\text{nm}$ 范围内的紫外线的辐照总量为衡量标准的。

许多因素都可能降低实验室光源加速试验和户外曝露间的

相关性,例如二者的光源光谱分布的差异、温度差异、光照强度的差异等。因此,人工气候老化的试验结果与自然气候老化的结果并不具备严格的换算关系。

ETFE 膜材具有很好的耐候性能,在欧洲已经有 30 年以上的使用业绩。用于 ETFE 膜材的耐候试验要求,与 PTFE 膜材相同。

**4.4.2** 为方便膜材吸声、隔声性能的检测,可以将膜材张紧于符合试验要求的钢制或木制边框上完成试验。

**4.4.3** 膜材的光学性能指膜材对各种波段光线的作用特性,包括对可见光、紫外线、红外线的反射、透射、吸收及散射系数。可根据不同要求,对相应的光学性能项目进行检测。超出本标准的检测项目可参照现行国家及重庆市相关标准进行检测。

## 4.5 防火性能

**4.5.1** 膜材具有较好的阻燃性能,其燃烧性能与基布材料、涂层材料等有关。玻璃纤维为不燃材料,聚四氟乙烯高温燃烧产生有毒烟气。由于聚四氟乙烯含量较少,基材为玻璃纤维、涂层为聚四氟乙烯的织物类膜材在日本等被评定为不燃材料。虽然玻璃纤维基布织物类膜材可以耐受 1000℃ 高温,其焊接连接部位在 250℃ 左右将会失效。

聚酯纤维为难燃材料,聚氯乙烯高温燃烧产生有毒烟气。基材为聚酯纤维、涂层为聚氯乙烯的织物类膜材在日本等被评为准不燃材料,当热源离开时火焰会迅速自行熄灭。聚酯纤维基布织物类膜材在 70℃ 左右产生较大的蠕变,100℃ 左右膜单元之间的焊缝产生滑移失效,250℃ 左右材料出现熔化。局部的火焰可以烧穿膜单元形成孔洞,孔洞使得膜材离开火焰源时膜材火焰将自行熄灭,聚氯乙烯涂层添加物可防止产生燃烧滴落物。

ETFE 膜材是一种阻燃材料,不会自燃,在 250~270℃ 时材料出现熔化。着火时材料熔化收缩,无滴落物,火焰不会出现蔓延。

## 5 其它材料性能检测

5.0.1 除膜材以外,拉索和拉杆、金属连接件以及胶结材料和密封材料也是膜结构中比较特殊和重要的建筑材料。因此,对这三类建筑材料的性能检测项目和检测方法单独列出。

5.0.2 膜结构其它材料性能的检测,应按要求划分检测批,并根据规定的比例和规定的取样方法进行抽样检测。

5.0.3 膜结构中采用的钢索包括钢丝束、钢丝绳等。钢索和钢拉杆的力学性能主要包括抗拉强度、伸长率和屈服强度等指标。应按照现行国家标准《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》GB/T 228.1 和《钢拉杆》GB/T 20934 检测钢索和钢拉杆的力学性能。对本标准未包括的检测项目,应按《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 进行检测。

不锈钢拉索和不锈钢拉杆力学性能检测,主要包括抗拉强度、伸长率、屈服强度指标,应按照现行国家行业标准《不锈钢拉索》YB/T 4294 和《钢拉杆》GB/T 20934 检测。

5.0.4 膜结构中使用的金属连接件是指与膜面连接的金属连接件。金属连接件力学性能和材料质量的检测可统一按照金属材料的试验方法或各自材料的试验方法进行检测,评定标准应按各自的材料、产品标准执行。

钢索锚具的检测方法和检测规则应按《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ85 执行,其它金属连接件的力学性能检测方法和检测规则应按现行国家标准《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》GB/T 228.1 执行,评定标准应符合相应产品标准的规定。

锚具应按设计要求进行无损探伤,内部质量检测应按现行国

家标准《钢锻件超声检测方法》GB/T 6402、《锻轧钢棒超声检测方法》GB/T 4162、《铸钢件 超声检测 第1部分：一般用途铸钢件》GB/T 7233.1 的规定执行；合金钢、碳素钢、铸钢锚具表面质量检测应按现行标准《锻钢件磁粉检测》JB/T 8468、《铸钢铸铁件磁粉检测》GB/T 9444 的规定执行；不锈钢锚具表面质量检测可按现行标准《承压设备无损检测 第5部分：渗透检测》JB/T 4703.5 的规定执行。

**5.0.5** 膜结构中的胶结材料和密封材料主要包括 PVC 胶、硅酮结构胶和密封胶。相容性和粘结性是胶结材料和密封材料的主要材料性能。其检测方法应符合现行国家标准《建筑密封材料试验方法》GB/T 13477 和《建筑用硅酮结构密封胶》GB 16776 的规定。

## 6 连接检测

### 6.1 一般规定

6.1.1 本条给出了连接质量检测的主要项目,超出本标准的连接质量检测项目可参照国家和重庆市现行相关标准的规定进行检测。各项目的检测结果应按现行国家或重庆市相关标准评定。

6.1.2 膜结构连接形式复杂多样,根据现有的工程经验,膜结构连接与节点是整个结构的薄弱位置,膜结构的破坏往往从节点处开始出现。为保证膜结构的安全性和使用性,应针对各种形式的膜结构连接进行检测。

6.1.3 膜结构连接质量的检测抽样数量应根据连接的形式和检测项目的不同而不同。对膜片与膜片连接、膜面与刚性边界连接、膜面与柔性边界连接的强度检测,由于这几类膜面连接的数量多、形式较单一,分别作为检测批按规定的要求进行抽样检测。膜顶和膜角连接,由于其形式多样,因此可选取受力大、位置重要的部位进行强度检测。不同的膜结构、不同的连接位置对膜面连接水密性和气密性的检测有不同的要求,因此应选取有水密和气密设计要求的膜面连接进行检测。

### 6.2 膜面连接强度

6.2.1 本标准附录J给出了膜片与膜片连接强度的检测方法。

膜片与膜片连接的主要功能是将不同的膜片单元拼接成膜片整体以及必要的膜片加劲补强,其连接方式主要有:热合、夹板、粘合、缝合、束带以及组合方式等,其中前三种是目前工程中



常用的膜片与膜片连接方式,而且每种连接方式又有基本形式和连接方法的不同。例如,热合膜连接常用的基本形式有三种,搭接、单面背贴、双面背贴;热合方法有高频热合、热空气热合、热烙铁等。本标准图 J 只是给出单面背贴一种形式的连接强度检测试样图,对其它膜片与膜片连接形式,试样应与实际连接形式保持一致。

工程中采用的具有相同形式和尺寸的膜片与膜片连接,均应作为一类连接方式,按规定方法和数量抽样检测。

为便于比较膜材连接对膜材抗拉强度的影响,膜片与膜片连接强度的检测条件应尽量与膜材抗拉强度检测条件一致。对膜片与膜片的热合连接、粘合连接的试验结果表明,连接强度随连接宽度的增大而增大,但当连接宽度超过 80mm 以后,连接强度基本不变,且能达到膜材抗拉强度的 85%。膜片与膜片的热合连接、粘合连接的破坏形式主要包括连接区的滑移撕裂破坏和连接接缝处的断裂两种形式。前者主要发生在连接宽度较小的试样,后者主要发生在连接宽度较大的试样。在试验报告中应注明连接试件的破坏形式。

ETFE 膜材之间通常采用热合进行连接。热合时将膜片端部重叠,以膜材熔点相近的温度(约 260°C)进行适当时间的压合,使膜片熔化后连接成整体。膜片的热合可以是双层,也可以是多层。热合时膜片重叠部分的接合宽度不应小于 10mm。热合不包括粘接剂,其连接部分材料经熔化后成为一体,因此连接部分的材料特性与母材是一致的。但热合过程中因加压等会使连接端部的膜材厚度变小,从而导致连接强度下降。一般情况下连接强度保持率应在 50% 以上。

**6.2.2** 本标准附录 K 给出了膜面与刚性边界连接强度的检测方法。

膜面与刚性边界连接应用于膜面与膜结构刚性支承部分的连接,如钢结构、铝合金结构、混凝土、木结构等。本质上,主要是

膜面与金属构件通过特有的金属连接件进行直接连接。目前,常用的膜面与刚性连接是压板连接、U型夹连接和金属扣件连接。本标准图 K 只是给出压板连接一种形式的连接强度检测试样图,对其它膜面与刚性边界连接形式,试样应与实际连接形式保持一致。

工程中采用的具有相同形式和尺寸的膜面与刚性连接,均应作为一类连接方式,按规定方法和数量抽样检测。

对压板连接和 U 型夹连接强度试验结果表明,连接最终破坏总是出现在螺栓附近的膜套热合/粘合的边缘线上。平行于受力方向,膜片各部分的变形不均,导致螺栓附近的膜条受力集中,膜套热合/粘合边缘线上的应力突变以及螺栓开孔对附近膜材基层纤维造成的损伤是直接原因。同时,对于连接区刚度不足的连接,例如压板间距过大、压板过薄,埋绳过细等连接,试验过程中会出现局部的埋绳被拉伸挤入压板之间的现象,并加剧膜片的受力不均,降低连接强度。试验报告中应明确注明出现的破坏形式和破坏位置。

**6.2.3** 本标准附录 L 给出了膜面与柔性边界连接强度的检测方法。

膜面与柔性边界连接主要指膜面与索等柔性支承结构之间连接形式,包括膜套连接、U型夹、束带等。本标准图 L 只是给出膜套连接一种形式的连接强度检测试样图,对其它膜面与柔性边界连接形式,试样应与实际连接形式保持一致。

工程中采用的具有相同形式和尺寸的膜面与柔性连接,均应作为一类连接方式,按规定方法和数量抽样检测。

**6.2.4** 本标准附录 M 给出了膜顶和膜角连接强度的检测方法。

膜顶和膜角的连接形式复杂多样,但其基本连接方式多为膜与硬边界连接的形式,应选取主要节点进行拉伸试验检测节点连接强度。本标准图 L 只是分别给出一种形式的膜顶、膜角连接强度检测试样图,对其它膜顶、膜角连接形式,试样应与实际连接形

式保持一致。

膜顶和膜角连接处的膜面受力是处于多向受力状态,试样的设计应能模拟膜顶和膜角实际连接的多向受力状态。

### 6.3 膜面连接水密性和气密性

**6.3.1** 膜面连接水密性检测针对封闭膜结构或对防水性能有要求的膜结构连接。膜面连接的气密性的检测针对充气式膜结构。本标准按照现行国家标准《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能分级及检测方法》GB/T 7106 对膜面连接水密性和气密性进行检测。可在同一个膜面连接水密性或气密性检测试样中设置不同形式的膜面连接,通过一次水密性或气密性检测即可检测不同形式的膜面连接的水密或气密性能。膜面焊缝朝向应符合工程实际情况。

## 7 张力检测

7.0.2 膜结构张力是保证膜结构工程的实际状态与设计状态一致的重要指标,直接影响膜结构工程的质量与安全性。膜结构张力主要包括膜面张力以及拉索和拉杆的张力。由于膜材和钢索的松弛、徐变等,既有膜结构在使用过程中往往会出现膜面张力以及拉索和拉杆张力损失或张力过大的现象,对膜结构安全造成隐患。因此,不论是对于膜结构工程质量的检测还是对既有膜结构性能的检测,膜结构张力都是非常重要的检测项目之一。

7.0.3 膜结构张力检测的抽样可根据工程具体情况,选取有代表性的位置以及经计算分析张力较大和较小的位置。

7.0.4 目前国内工程中通常采用凭经验判断膜面张力的方法使得工程质量存在很大的安全隐患。基于不同的原理,国内外已有的检测膜面张力的方法和仪器有几种,包括面外变形法、振动测试法、拉曼光谱测试法等。所有通过计量检定或校准的方法都可用于膜面张力的检测。

附录 P 的检测方法通过外部荷载的激励,待测膜面发生振动。采用 DIC 测量系统分析得到振动膜面的频率,经过分析得到基础频率。通过频率与膜面张力的函数关系,进而计算得到膜面张力。

7.0.5 拉索和拉杆张力直接反映膜结构持久状态下的内力状态,是评价膜结构工程安全性和适用性的重要指标,需对其进行检测评定。既有膜结构拉索和拉杆张力现场检测时可采用振动法,所用测振传感器的频响范围应覆盖被测拉索第 5 阶特征频率的 2 倍以上,测试时应解除减震装置和其他附属装置。一般拉索和拉杆的张力值在其抗拉强度的 1/10 以上,因此,和膜面相比,对拉索和拉杆张力的实测值与设计计算值的相对误差要求更为严格。

## 8 尺寸与偏差检测

### 8.1 一般规定

8.1.1 膜结构尺寸与偏差检测主要包括金属构件的尺寸偏差、膜面控制点几何偏差和膜片裁剪及热合尺寸偏差。其中,金属构件是指拉索和拉杆、金属连接件以及其它钢构件等。膜面控制点几何偏差主要为膜顶点、膜角点、约束边界等固定连接部位的几何偏差。膜片裁剪及热合尺寸偏差主要为膜片裁剪后各向尺寸偏差和热合缝宽度误差。

8.1.2 与其它结构不同,膜结构由于膜曲面的复杂性等原因,且膜面与吊杆或撑杆连接点属于弹性连接,很难进行几何控制。因此应选择膜顶点、膜角点、约束边界等固定连接部位作为膜结构的几何偏差检测的控制点。

### 8.2 金属构件尺寸偏差

8.2.1~8.2.2 由于《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344、《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 以及相应的材料、产品标准已有对金属构件尺寸偏差的检测方法和评定标准,因此本标准按其相关规定执行。

### 8.3 膜面控制点几何偏差

8.3.1 膜面通常是空间曲面,通过控制膜结构顶点、角点、约束边界等固定连接部位控制点的几何偏差是进行膜结构几何偏差

检测的有效方法,也便于指导膜结构工程和钢结构构件安装的衔接。

在膜面上较为平坦部位可浇水观察是否会形成积水。膜面张力不足或设计不合理,可能导致局部膜面的积水、松弛等,尤其是膜面上较为平坦的部位,应在施工完毕后重点检测。

## 9 外观质量检测

### 9.1 一般规定

9.1.1 对膜结构其它部位的外观质量的检测可参照国家及重庆市现行相关标准进行。

9.1.2 由于膜结构的缺陷与损伤对膜结构质量的影响最为直接和明显,而且多采用现场观察的方法进行检测,因此宜选用全数检测的方案。而连接构造的检测应按要求划分检测批,并根据规定的比例进行抽样检测。

### 9.2 缺陷与损伤

9.2.1 色差一般需要专用色差仪进行检测,可以采用最常用的分光测色仪(d/8 度积分球观察方式)。

9.2.1~9.2.5 膜结构缺陷与损伤的检测主要包括膜面、膜与膜连接拼缝、拉索和拉杆、金属连接件以及胶结材料和密封材料项目。本节给出了各检测项目的检测方法。

## 附录 B 膜材面密度的检测

**B.0.5** 数值修约规则是指在进行具体的数字运算前,通过省略原数值的最后若干位数字,调整保留的末位数字,使最后所得到的值最接近原数值的过程。确定有效位数后按现行国家标准《数值修约规则与极限数值的表示和判定》GB/T 8170 的规定处理多余数值。



## 附录 P 膜面张力的检测

### P.3 膜面张力计算

**P.3.2** 以矩形薄膜为例,给出计算公式(原理)的推导过程,及具体算例。运用等高线振型法推导矩形薄膜振动频率与其预张力的关系。建立一阶固有频率(基频)与薄膜预张力的关系式。

考虑面密度为  $\rho$  的矩形膜结构,长度为  $2a$ ,宽度为  $2b$ ,如图 P.3.2-1 所示。单位长度的预拉力  $T$  沿简支边界均匀分布。只考虑基本振型,整个膜在任意时刻  $t$  都以同一方向振动; $w$  定义为单位单元  $dxdy$  处的横向位移,如图 P.3.2-2。

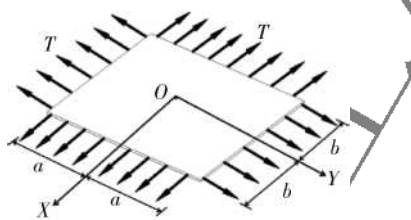


图 P.3.2-1 矩形膜结构模型

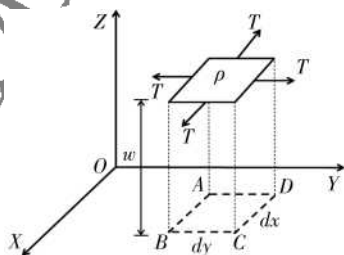


图 P.3.2-2 膜结构振动单元

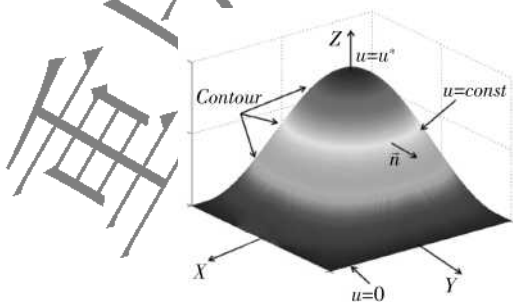


图 P.3.2-3 基本模式的等高线

将基本模态的等高线方程代入运动方程,可以根据方程中频率解析解的存在性,求出膜面拉力与频率的关系:

$$T = \frac{\rho b^3 \omega^3}{2.42(1+\delta^2)} \quad (\text{P. 3. 2-1})$$

在式(P. 3. 2-1)中,以  $b^*$  代替  $b$ ,即得到表 P. 3. 2 中矩形薄膜的张力计算公式。圆形和等边三角形膜面预张力的计算公式可以用同样理论方法得到。

以工程中常用的 PVC 膜材为例,进行矩形膜面的算例分析。某试验中膜面张力实际值分别为 250N/m 和 500N/m。为了验证该检测方法,需要先确定相关参数为:膜材的面密度为 1.25kg/m<sup>2</sup>,经向  $b^* = 0.5\text{m}$ ,纬向  $a^* = 0.5\text{m}$ 。然后采用 DIC 测量系统测得膜面振动频率分别 9.71Hz 和 13.52Hz。最后,将各参数代入式(P. 3. 2-1)得膜面张力的检测值:

$$\textcircled{1}. T = \frac{\rho b^3 \omega^3}{2.42(1+\delta^2)} = \frac{1.25 \times 0.5^3 \times (2\pi \times 9.71)^3}{2.42 \times (1+1^2)} \approx 240\text{N/m}$$

$$\text{误差: } T = \frac{250 - 240}{250} = 4\%$$

$$\textcircled{2}. T = \frac{\rho b^3 \omega^3}{2.42(1+\delta^2)} = \frac{1.25 \times 0.5^3 \times (2\pi \times 13.52)^3}{2.42 \times (1+1^2)} \approx 466\text{N/m}$$

$$\text{误差: } \frac{500 - 466}{500} = 6.8\%$$