

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.07.009

# 复合材料电梯层门强度特性研究\*

陈栋栋<sup>1</sup>, 毛翰宇<sup>2</sup>, 杨凯杰<sup>1</sup>

(1. 浙江省特种设备检验研究院 国家电梯产品质量监督检验中心, 浙江 杭州 310000;

2. 杭州市特种设备检测研究院 电梯检验所, 浙江 杭州 310003)

**摘要:**针对电梯层门应用复合材料的强度特性问题,对层门门扇及筋板进行了复合材料反对称正交铺层设计,利用复合材料有限元法与Tsai-Wu强度失效准则,对其结构强度特性进行了研究。在层门型式试验验证有限元模型有效的基础上,分别选取单轴玻璃纤维环氧树脂(E-G)和碳纤维环氧树脂(E-C)材料,详细对比了不同层门门扇厚度、筋板个数对层门强度特性的影响。研究表明:在反反对称正交铺层设计下,E-G与E-C复合材料层门均可满足电梯层门设计要求,E-G与E-C复合材料横向压缩强度幅值数倍于横向拉伸强度,门扇内侧区域面内受最大拉伸应力,而外侧区域受最大压缩应力,其层门强度特性主要由横向应力分布主导;提高复合材料性能、门扇厚度和筋板个数目均可有效改善层门整体强度特性。

**关键词:**复合材料;电梯层门;有限元法;Tsai-Wu强度准则;反对称正交铺层

中图分类号:TH114;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)07-0706-06

## Strength property of composite elevator landing doors

CHEN Dong-dong<sup>1</sup>, MAO Hang-yu<sup>2</sup>, YANG Kai-jie<sup>1</sup>

(1. National Elevator Product Quality Supervision and Inspection Center, Zhejiang Provincial Special Equipment

Inspection and Research Institute, Hangzhou 310000, China; 2. Elevator Inspection Office,

Hangzhou Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310003, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of the elevator landing doors strength properties of composite material application, door panels and ribs were designed by anti-symmetric orthogonal layer. Their strength properties were studied through the composite material finite element method (FEM) and the Tsai-Wu strength criterion. Under the landing doors finite element model effective verified by the type tests, uniaxial epoxy-glass fiber (E-G) and epoxy-carbon fiber (E-C) were used to compare the strength property influence of different landing doors panel thickness and number of ribs in details. The results indicate that the E-G and E-C composite landing doors with anti-symmetric orthogonal layering design can meet the requirements. The transverse compression strength of composite E-G and E-C is several times higher than the transverse tensile strength. The inner surface of the landing door panel is subjected to the maximum tensile stress, while the outer region is subjected to the maximum compressive stress. The lateral stress distribution dominates the landing doors strength failure. The strength index value near the inner region panel is the largest. Improvement of material properties, panel thickness and the number of ribs can effectively improve the door strength.

**Key words:** composite material; elevator landing door; finite element method; Tsai-Wu strength criterion; anti-symmetric orthogonal layering

## 0 引言

电梯层门由门扇、筋板、上下保持装置等组成,是

阻挡乘客坠入电梯井道的重要部件,其中门扇机械强度较轿厢薄板件有更高要求,层门需经过型式试验合格后方能投入市场。考虑传统钢材稳定性,GB7588-

收稿日期:2018-01-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1709210)

作者简介:陈栋栋(1987-),男,浙江丽水人,硕士,工程师,主要从事特种设备材料及检测技术方面的研究。E-mail:chendd@zjtj.org

2003 建议层门宜采用金属制造<sup>[1]</sup>。随着技术进步,《特种设备安全法》鼓励新材料、新技术、新工艺应用到特种设备中,以适应设备节能、安全性需求。复合材料相比较于传统钢材,具有高比强度、比模量,并兼具抗疲劳、减振等优点,在航空、建筑领域应用广泛<sup>[2-3]</sup>。层门主要为薄板结构,结构简单,适合复合材料应用与加工。

2017 年,新加坡电梯公司在全球首次制成减重近 90% 的复合材料轿厢,相比于传统钢材轿厢,其具有更轻、更节能及更快速安装等优势,但是新加坡电梯公司并没有涉及层门复合材料的应用<sup>[4]</sup>;金建峰<sup>[5]</sup>通过建立动态能耗模型,说明了当轿厢质量减半,动能变化减少了 30%,证明了复合材料应用使得能耗下降明显。

纤维复合材料由基体及纤维组成。常用树脂基体热点低,耐热性差,我国 GB7588-2003 为了层门适应更多场合应用,并没有对层门耐火性作强制规定。由于欧洲及北美标准对层门有耐火性要求<sup>[6-7]</sup>,因对复合材料应用进行深入研究。LAICC 等<sup>[8]</sup>研究得出金属材料厚度增加对层门耐火性能提高并非十分显著,因此,通过设计金属薄板或选用金属基体或陶瓷基体来覆盖复合材料门扇可有效提高耐火性能。

国内外学者对电梯层门机械强度及耐火性能进行了研究。如 LAICC 等首次详细研究了厚度、筋板数及筋板结构对层门耐火性影响;贾薛铖等<sup>[9]</sup>对层门耐冲击性进行了分析,为合理设计层门提供了依据;卫伟<sup>[10]</sup>对电梯层门进行了 3D 参数化设计与分析。但是,目前鲜有学者研究电梯层门复合材料应用及其强度性能。

本文结合复合材料有限元法与 Tsai Wu 强度失效准则,对复合材料层门不同结构参数的强度影响进行分析,并对其失效强度性能进行研究。

## 1 层合板与失效强度理论

### 1.1 层合板理论

基于经典层合板理论,层合板刚度方程为:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: $N_x, N_y, N_{xy}$ —层合板单位宽度内力; $M_x, M_y, M_{xy}$ —层合板单位宽度内力矩; $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0$ —层合板中面应变, $\varepsilon_x^0 = \partial u^0 / \partial x, \varepsilon_y^0 = \partial v^0 / \partial y, \gamma_{xy}^0 = \partial u^0 / \partial y + \partial v^0 / \partial x; k_x, k_y, k_{xy}$ —层合板中面弯曲与扭曲率, $k_x = -\partial^2 w^0 / \partial x^2, k_y = -\partial^2 w^0 / \partial y^2, k_{xy} = -2\partial^2 w^0 / \partial x \partial y; u^0, v^0, w^0$ —层合板中面位移; $A_{ij}$ —拉伸刚度系数; $B_{ij}$ —耦合刚度系数; $D_{ij}$ —弯曲刚度系数。

则有:

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \overline{Q}_{ij}(1, z, z^2) dz (i, j = 1, 2, 6) \quad (2)$$

式中: $h$ —层合板厚度; $z$ —单层板到层合板中面距离; $\overline{Q}_{ij}$ —降刚度系数。

层合板面内应力与应变关系为:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [\overline{Q}_{ij}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ —层合板面内应力; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ —层合板面内应变。

### 1.2 Tsai-Wu 失效强度理论

Tsai-Wu 准则基于 Von Mises 准则得到,其耦合考虑各方向应力及材料抗拉与抗压强度。实验证实,其能准确预测多应力状态下的复合材料强度失效<sup>[11]</sup>。具体表达式为:

$$F_T = A + B \quad (5)$$

其中:

$$A = -\frac{(\sigma_{11})^2}{\sigma_{11}^{fT} \sigma_{11}^{fC}} - \frac{(\sigma_{22})^2}{\sigma_{22}^{fT} \sigma_{22}^{fC}} - \frac{(\sigma_{33})^2}{\sigma_{33}^{fT} \sigma_{33}^{fC}} + \frac{(\tau_{12})^2}{(\tau_{12}^f)^2} + \frac{(\tau_{23})^2}{(\tau_{23}^f)^2} + \frac{(\tau_{13})^2}{(\tau_{13}^f)^2} + \frac{C_{12} \sigma_{11} \sigma_{22}}{\sqrt{\sigma_{11}^{fT} \sigma_{11}^{fC} \sigma_{22}^{fT} \sigma_{22}^{fC}}} + \frac{C_{23} \sigma_{22} \sigma_{33}}{\sqrt{\sigma_{22}^{fT} \sigma_{22}^{fC} \sigma_{33}^{fT} \sigma_{33}^{fC}}} + \frac{C_{13} \sigma_{11} \sigma_{33}}{\sqrt{\sigma_{11}^{fT} \sigma_{11}^{fC} \sigma_{33}^{fT} \sigma_{33}^{fC}}}$$

$$B = \left( \frac{1}{\sigma_{11}^{fC}} + \frac{1}{\sigma_{11}^{fT}} \right) \sigma_{11} + \left( \frac{1}{\sigma_{22}^{fC}} + \frac{1}{\sigma_{22}^{fT}} \right) \sigma_{22} + \left( \frac{1}{\sigma_{33}^{fC}} + \frac{1}{\sigma_{33}^{fT}} \right) \sigma_{33}$$

式中: $\sigma_{11}^{fT}$ —沿复合材料纤维方向的抗拉强度; $\sigma_{11}^{fC}$ —沿复合材料纤维方向的抗压强度; $\tau_{12}^f$ —复合材料面内抗剪强度; $C_{12}$ —强度理论耦合系数,可为 -1<sup>[12]</sup>,其

它符号含义类推。

当强度指标值  $|F_T| > 1$  时,则视该结构强度失效,不满足强度要求。

## 2 层门有限元模型及验证

型式试验是检验机构对产品是否符合安全技术规范要求的安全性能试验<sup>[13]</sup>。本研究选取某电梯公司同系列里的宽层门与窄层门进行试验,层门为单筋板结构,常规 Q235 材料,门扇与筋板厚度均为 1.2 mm。

窄层门和宽层门型式试验如图 1 所示。



图 1 窄层门和宽层门型式试验

笔者选取试验 1 点,分别在  $5\text{ cm}^2$  圆面上与  $100\text{ cm}^2$  的方形面上作用 300 N 和 1 000 N。

层门试验点位置及有限元模型如图 2 所示。

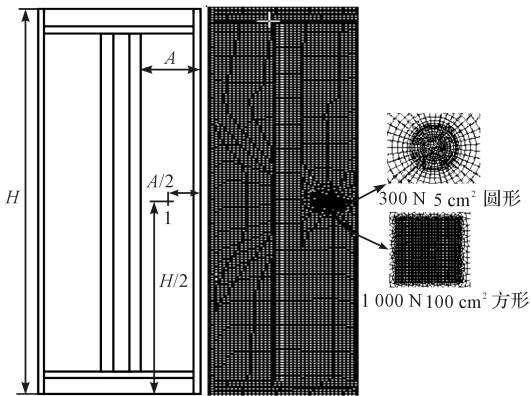


图 2 层门试验点位置及有限元模型

层门上下保持装置设计已成熟,力学性能保证。本文将上下保持装置去除以便模型简化。门扇上下边进行位移约束;在试验点 1 附近精细网格划分;对整体门扇网格大小控制最大尺寸 10 mm(多次有限元分析证明网格大小满足网格无关性,并兼顾计算精度与效率)。有限元模型选取 shell 181 单元,节点总数为 24 602 个。

宽层门试验及有限元分析变形情况下,试验点 1 变形如表 1 所示。

表 1 试验点 1 变形

测试力 /N	弹性变形/mm	有限元变形/mm	误差 / (%)	塑性变形/mm	有限元变形/mm	误差 / (%)
300	9.51	8.91	6.3	0.59	0.51	13.5
1 000	26.09	25.83	1.0	0.61	0.58	4.9

考虑筋板等距 200 mm 点焊,有限元模型将筋板与门扇绑定,提高了层门刚度,导致变形偏小,误差符合工程要求,有限元模型及参数设置有效。

## 3 研究方案

### 3.1 反对称正交铺层及复合材料性能

本研究选取单轴玻璃纤维环氧树脂(E - Glass, E - G)和单轴碳纤维环氧树脂(E - Carbon, E - C)材料,单轴复合材料性能参数如表 2 所示<sup>[14]</sup>。

表 2 单轴复合材料性能参数

材料性能	E - G	E - C	材料性能	E - G	E - C
$E_{11}/\text{GPa}^1$	45	121	$\sigma_{11}^{Tt}/\text{MPa}$	1 100	2 231
$E_{22}/\text{GPa}$	10	8.6	$\sigma_{11}^{fc}/\text{MPa}$	-675	-1 082
$E_{33}/\text{GPa}$	10	8.6	$\sigma_{22}^{Tt}/\text{MPa}$	35	29
$G_{12}/\text{GPa}^2$	5.0	4.7	$\sigma_{22}^{fc}/\text{MPa}$	-120	-100
$G_{23}/\text{GPa}$	3.8	3.1	$\sigma_{33}^{Tt}/\text{MPa}$	35	29
$G_{13}/\text{GPa}$	5.0	4.7	$\sigma_{33}^{fc}/\text{MPa}$	-120	-100
$\vartheta_{12}^3$	0.3	0.27	$\tau_{12}^f/\text{MPa}$	80	60
$\vartheta_{23}$	0.4	0.4	$\tau_{23}^f/\text{MPa}$	46.1	32
$\vartheta_{13}$	0.3	0.27	$\tau_{13}^f/\text{MPa}$	80	60

E—弹性模量;G—剪切模量; $\vartheta$ —泊松比

由表 2 可知:单轴纤维布轴向强度性能明显优于横向,因而在结构设计时,应主要利用其轴向强度性能。

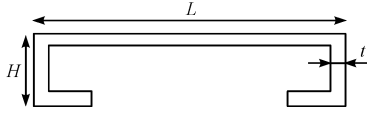
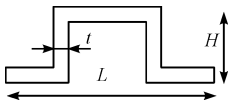
反对称正交铺层在轴向与横向交替铺层,铺层角  $\theta$  依次为  $0^\circ$  与  $90^\circ$  反复叠层(门扇宽度方向为  $0^\circ$ ),其一定意义上弥补了横向强度缺陷;同时,反对称正交铺层耦合弯曲刚度  $D_{16}$ 、 $D_{26}$  为 0,增强了结构性能,该铺层方案应用较为普及。

### 3.2 模型参数及研究方案

为便于复合材料铺层加工,去除表 1 模型上下筋板(该设计结构应用已广泛)。

门扇与筋板厚度、筋板数目、材料为层门性能主要影响因素,结合三因素变化,研究方案及模型参数(半层门)如表 3 所示。

表3 研究方案及模型参数(半层门)

方案	L/mm	H/mm	t/mm	门长/mm	材料	筋板数/个	层门截面形状
Base Case	620	37.5	1.5	2 200	Q235	1	
Case A1	620	37.5	2	2 200	E-G、E-C	1	
Case A2	620	37.5	3	2 200	E-G、E-C	1	
方案	L/mm	H/mm	t/mm	板长/mm	材料	筋板数/个	层门截面形状
Case B1	116	30	2	2 180	E-G、E-C	2	

### 4 仿真结果与讨论

层合板结构损伤机理复杂<sup>[15]</sup>,本文将复合材料层门进行冗余设计,假定层门层合板强度指标值大于1时,则判定该结构设计不合格。

#### 4.1 层门弹性变形

复合材料层门在试验点1处,试验点1弹性变形如表4所示。

表4 试验点1弹性变形

测试力/N	Base Case	Case A1	Case A1	Case A2	Case A2	Case B1
	Q235	E-G	E-C	E-G	E-C	E-G
	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm
300	5.48	24.35	11.87	10.42	5.05	13.88
1 000	16.89	74.30	36.05	32.60	15.78	40.90

相对而言,金属层门力学性能优于复合材料层门。比较 Case A2(E-C)与 Base Case 可知:复合材料层门刚度性能略高于金属层门,可是复合材料层门厚度较金属层门厚度增加了100%;其他组复合材料层门,厚度与筋板数目增加,而其刚度明显不如金属材料。尽管如此,根据 GB7588-2003 的指标,除了 Case A1(E-G)方案明显不满足国标外,其他组方案初步满足设计要求,但是最终设计结构符合与否还需进一步强度失效分析。

复合材料性能对层门影响大。E-C 与 E-G 横向强度上相当,但是 E-C 轴向强度是 E-G 3 倍左右。从表4可知:A1 与 A2 分别在各自方案下,对应 E-C 变形量为 E-G 的一半左右。由层合板理论可知:在同一铺层条件下,材料性能直接决定单元层合板弯曲刚度,而横向性能相当情况下,材料轴向性能参数对层门刚度影响起了决定性作用。

比较 Case A1(E-G)与 Case B1(E-G)方案,层门筋板数目提高了层门刚度。方案分别在 300 N 与 1 000 N 力下,Case A1 的筋板数为 Case B1 一半,但是 Case A1 的变形量约为 Case B1 的 1.75 倍与 1.82 倍。

筋板数增加明显提高了层门刚度。

综上所述,复合材料层门可符合实际使用要求。其力学性能受材料性能、层门厚度与筋板数影响,与金属材料层门结构趋势基本一致。

#### 4.2 层门强度指标分布特性

门扇、筋板由内向外依次铺设 0.2 mm 等厚度单层板。根据表3研究方案,分别铺设 10 层和 15 层,由内向外顺序铺层编号。

门扇试验点附件为变形最大处,试验点1的铺层强度指标如图3所示。

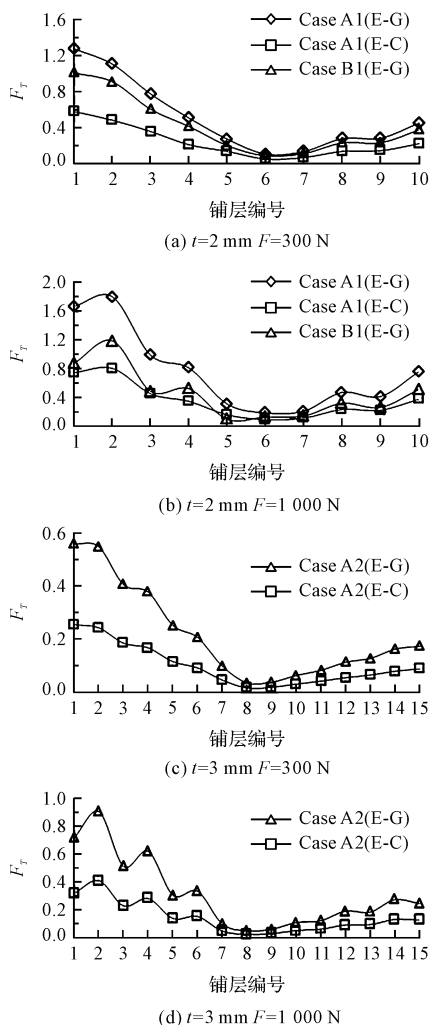


图3 试验点1的铺层强度指标



图 3 表明:门扇强度失效指标值在编号 1 或 2 达到最大值后在中间铺层降低到最小,后逐渐增大到较大值。由欧拉伯努利理论可知:门扇内侧区域面内受最大拉伸应力,而外侧区域受最大压缩应力。因此,门扇强度指标结果与理论保持一致,结果可靠。

复合材料层合板受力复杂,但在宏观上力学表现与常规材料类似。门扇铺层正交对等分布,层门宽度方向特征尺寸是层门长度方向特征尺寸 1/3 不到,门扇内侧弯曲正应力最大,而编号 2 铺层为 90°铺层,其面内横向弯曲正应力大,加之横向拉伸强度低,所以,门扇在试验点 1 处最靠近内侧附近,横向拉伸强度最容易先发生失效,从而强度失效指标值最大。具体强度研究,还需对门扇应力分布进行研究。

根据上文层合板冗余设计要求,Case A1(E-G)方案和 Case B1(E-G)方案不符合要求。最后,综合变形结果,Case A1(E-G)与 Case B1(E-G)设计不符合要求。由于冗余设计假定,虽然 Case B1(E-G)不符合设计要求,但并不代表该层门实际应用就不符合国标要求,需结合损伤强度准则可准确预测“塑性变形”结果。对比其他方案,提高材料性能或者层门厚度可达到层门复合材料应用要求。

#### 4.2.1 应力分布分析

在 Case A1 方案下,试验点 1 作用 1 000 N 时面内应力分布如图 4 所示。

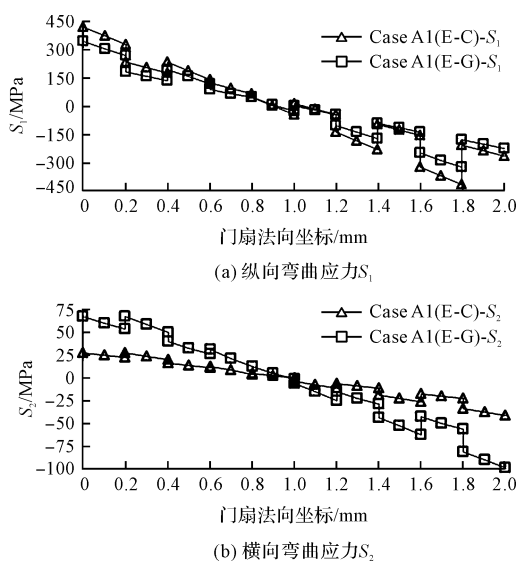


图 4 试验点 1 作用 1 000 N 时面内应力分布

靠近内侧受拉面由图 4(b)说明:编号 2 号附近  $S_1$  降低,因而强度指标值贡献降低, $S_2$  升高则贡献提

高;由于  $S_1$  与  $S_2$  在门扇中面受力最小,因而强度指标值最小(编号 5,6);门扇外侧受压面同理分析。可见特征点处,图 4(a)应力分布并不与图 3 强度指标值一致,反观图 4(b)横向弯曲应力分布则与图 3(b)强度指标值趋势基本一致,由于层合板面内无切应力,初步认为门扇强度指标主要由面内横向弯曲应力所主导。

在编号 2 处,图 3(b)强度失效指标值与图 4 横向应力  $S_2$  值都最大,证明了上文对强度指标分布特性的研究情况(即横向拉伸强度最容易先发生失效,强度指标值最大)。虽然门扇外侧横向弯曲压应力幅值高于内侧拉应力,但是强度失效指标外侧却低于内侧。由公式(5)及表 2 性能参数可推断,横向压缩强度幅值数倍于横向拉伸强度,导致其失效强度指标值反而较小。所以,证实了门扇强度指标主要由面内横向弯曲应力所主导。

#### 4.2.2 弯曲刚度分析

层合板理论表明:优化层合板弯曲刚度,可整体提高结构刚度。

由层合板理论求出弯曲刚度,反对称正交层合板弯曲刚度如表 5 所示。

表 5 反对称正交层合板弯曲刚度

材料	Lay-up angle	$D_{11}$	$D_{12}$	$D_{22}$	$D_{66}$
E-G	[0/90/0/90/0/90/0/90]	18 707	2 041	18 707	3 333
E-C	[0/90/0/90/0/90/0/90]	43 425	1 556	43 425	3 133

抵抗弯曲变形的纵向与横向弯曲刚度为  $D_{11}$  和  $D_{22}$ ,由于 E-C 材料性能优于 E-G,所以其 E-C 弯曲刚度明显高于 E-G。在 Case A1 方案下,表 5 与图 3 对比可知:表 5 中,E-C 的  $D_{11}$ 、 $D_{22}$  为 E-G 的 2.3 倍,而图 3 中对应铺层强度失效指标值则降低一半左右,这与上文材料性能对层门弹性变形影响一致。可见,优化弯曲刚度可显著提高层门刚度。

## 5 结束语

本文对复合材料层门不同结构参数的强度影响进行分析,并对其失效强度性能进行研究。结论如下:

(1) 电梯层门型式试验与有限元模型结果进行了对比,最大误差符合工程需求,验证了有限元模型及参数设置的有效性;

(2) 单轴 E-G 与 E-C 复合材料反对称正交铺

层设计层门弹性变形不超过 15 mm,层门设计符合国标要求,复合材料性能、门扇厚度、筋板数对层门强度影响都较大;

(3)单轴 E-G 与 E-C 复合材料横向压缩强度幅值数倍于横向拉伸强度,其失效强度指标值反而较小,导致对应材料层门强度失效主要由横向应力分布主导;提高材料性能,可提高层门弯曲刚度;提高层门厚度及筋板个数,可使复合材料应用得到满足。

### 参考文献 (References):

[1] GB 7588—2003. 电梯制造与安装安全规范[S]. 北京:中国标准出版社,2003.

[2] 沈观林,胡更,刘彬. 复合材料力学[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2013.

[3] 姚兆祯,王秉熙,张丽艳,等. 安注箱用不锈钢复合钢板成形工艺模拟及评价[J]. 压力容器,2016,33(8):20-26.

[4] 威锋网. 全球首部复合材料电梯现身:减重 90% [J]. 塑料科技,2017(2):49.

[5] 金建峰. 曳引式电梯的能耗建模及节能研究[D]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2009.

[6] CEN/TC 10. The european commission and the european free trade association, safety rule for the construction and installation of lifts-lifts for the transport of persons and goods-part 20:passenger and goods passenger lifts [S]. Brussels:European Technical Committee,2014.

[7] CSA Group. The american society of mechanical engineers, safety rule for the construction and installation of lifts-lifts for the transport of persons and goods-part 20: passenger and goods passenger lifts [S]. New York: ASME,2016.

[8] LAI C C, LIN C S. An analysis of the design of a fire-resistant elevator landing door[J]. **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, 2017,40(5):428-440.

[9] 贾薛斌,朱明,张鹏,等. 基于 ANSYS 的电梯层门受冲击有限元分析[J]. 机械设计与研究,2016,32(3):134-137.

[10] 卫伟. 电梯厅门参数优化设计与系统开发[D]. 天津:天津大学机械工程学院,2007.

[11] SODENP D, HINTON M J, KADDOUR A S. Recommendations for designers and researchers resulting from the worldwide failure exercise[J]. **Composites Science and Technology**, 2004,64(3-4):589-604.

[12] MARK E T. Structural analysis of polymeric composite materials [M]. New York: CRC Press,2003.

[13] TSG T7007-2016. 电梯型式试验规则[S]. 北京:中国标准出版社,2016.

[14] ANSYS, Inc. ANSYS mechanical APDL material reference [M]. Canonsburg: Ansys workbench 17,2016.

[15] 韩文钦. 复合材料层合板损伤演化的实验和数值分析[D]. 镇江:江苏大学机械工程学院,2017.

[编辑:周昱晨]

### 本文引用格式:

陈栋栋,毛翰宇,杨凯杰. 复合材料电梯层门强度特性研究[J]. 机电工程,2019,36(7):706-711.

CHEN Dong-dong, MAO Hang-yu, YANG Kai-jie. Strength property of composite elevator landing doors[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(7):706-711.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>