

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.05.002

# PEMFC 边框密封结构的仿真与优化

董帆, 杨代军, 李冰, 明平文, 张存满, 肖强凤

(同济大学 a. 汽车学院; b. 新能源汽车工程中心, 上海 201804)

**摘要:** 质子交换膜燃料电池的边框一般通过黏结剂黏接在质子交换膜上, 在保护质子交换膜的同时, 还起到密封作用。燃料电池长期工作在复杂的环境下, 边框和黏结剂的性能均会发生疲劳衰减, 导致被剥离或破坏, 进而影响燃料电池的气密性。因此, 以边框和黏结剂的搭接试件为对象, 结合内聚力模型和有限元软件设计了多种边框结构, 研究了新结构对黏结性能的影响。结果表明: 在低弹性模量的边框表面做三角形或梯形的凸形结构, 将有效提升黏结结构的分离位移, 但对于高弹性模量的边框, 新结构反而会降低黏结性能; 此外, 优化结构的尺寸、形状对搭接模型黏结性能也有影响, 当凸三角形底边长为 1.5 mm 时, 搭接模型有最好的黏结性能。

**关键词:** 汽车工程; 燃料电池密封件; 有限元法; 内聚力单元模型; 边框结构; 黏结性能

中图分类号: TM911.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)05-011-10

## Modeling and optimizing the frame structures of PEMFCs

DONG Fan<sup>a,b</sup>, YANG Daijun<sup>a,b</sup>, LI Bing<sup>a,b</sup>, MING Pingwen<sup>a,b</sup>,

ZHANG Cunman<sup>a,b</sup>, XIAO Qiangfeng<sup>1,2</sup>

(a. School of Automotive Studies; b. Clean Energy Engineering Center of Automotive,

Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China)

**Abstract:** The frames in PEMFCs are usually bound with membrane by the adhesive. The frames function as the rigid protecting structure for membrane and play an important role in sealing. However, due to the complex operation environment in fuel cells, the performance of the frame and adhesive could be degraded, which could endanger the gas tightness of the whole fuel cells. Therefore, with the help of finite element software and cohesive element model, series of new-type frames were designed and compared. Their effects on the frame-adhesive samples were investigated. The results show that by making convex structure (triangle or trapezoid) on the low elasticity modulus frames surface can effectively extend the separated displacement of the sample. On the contrary, these new structures can degrade the adhesive performance in high elasticity modulus frames. Moreover, the sizes and shapes of the optimized structures also have effects on the adhesive performance. Furthermore, among the optimized structures, the convex triangle structure with the 1.5 mm base shows the best adhesive performance.

**Keywords:** automotive engineering; fuel cell sealing structures; finite element method; cohesive element model; frame structure; adhesive performance

收稿日期: 2022-08-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1504502)。

Supported by the National Key Research and Development Program(2019YFB1504502).

作者简介: 董帆(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事燃料电池研究, (E-mail)792124721@qq.com。

通信作者: 杨代军, 男, 副教授, (E-mail)yangdaijun@tongji.edu.cn。

在中国提出的“2030年前碳达峰,2060年前实现碳中和”的“双碳”目标指引下,质子交换膜燃料电池(PEMFC, proton exchange membrane fuel cell)凭借高效、清洁等优点,获得了极大的关注。燃料电池若要在车用方向实现大规模商业化,除了需要较高的输出功率、较低的催化剂制作成本和氢气储运成本外,还需要有良好的耐久性和气密性,在极端工作条件下具有较长的使用寿命。目前,燃料电池密封结构的耐久性问题限制燃料电池使用寿命的一块“短板”,为解决该问题,各密封部件的性能需要进一步提升。

燃料电池中的密封结构由密封圈和边框组成,其中,边框一般通过直接接触和粘贴绑定的方式组装在质子交换膜(PEM, proton exchange membrane)活性区域的周围。由于质子交换膜自身机械强度低,边框的存在可保护其不被过压,且与密封圈一起发挥密封作用,即阻止阴阳极之间的气体窜漏及防止气体泄漏至外界环境中。PEMFC中边框密封件若长期在高温、高湿、强酸性和氟离子存在的工作环境下,容易出现破裂,开胶等现象,这将严重降低电池的气密性,影响其正常工作,因此,若要提升燃料电池的气密性,对PEMFC中边框密封结构的研究则尤为关键。

目前,国内外对于PEMFC边框气密性的研究较少,在提升燃料电池密封性方面,大多数成果是结合有限元模型,优化密封圈<sup>[1-3]</sup>或密封凹槽结构<sup>[4]</sup>获得的,对PEMFC边框的研究是在研究者发现MEA(membrane electrode assembly)中边框和气体扩散层(GDL, gas diffusion layer)之间的过渡区域存在较为严重的衰退现象后才陆续展开的。如Li等<sup>[5]</sup>在OCV和高温低湿(90 °C, 30%RH)的状态下对膜电极材料进行加速衰退试验研究时,发现催化层(CL, catalyst layer)边缘的膜容易遭受破坏。Crum等<sup>[6]</sup>在研究质子交换膜耐久性能的过程中发现湿度的改变会使质子交换膜因吸水脱水行为而膨胀收缩。Huang等<sup>[7]</sup>则在此基础上,利用有限元软件分析了湿度改变对膜电极的影响,发现质子交换膜膨胀收缩行为对MEA产生严重的拉伸压缩作用,在膜电极边缘区域易产生应力集中现象。Alizadeh等<sup>[8]</sup>结合有限元模型和试验验证的方法,发现MEA在密封件组装位置下的应力大小会产生突变,该处分布的应力值最大。Yang等<sup>[9]</sup>对质子交换膜在边框和GDL的过渡区域失效原因进行了总结,得出温度湿度改变导致在质子交换膜上产生的剪切应力和氧还原反应产生的氢氧自由基化学腐蚀作用均能导致质子交换膜在过渡区域发生损伤,造成膜与边框剥离的结论。因此,为缓解膜电极过渡区域发生的衰退现象,对组装在膜电极四周的边框结构进行研究和优化,可能会提升燃料电池的密封性和耐久性。

在对边框的研究之中,Ye等<sup>[10]</sup>对燃料电池密封结构进行了分类,将其分为PEM直接密封、边框包覆MEA密封、边框包覆PEM密封和刚性边框密封。在这4种密封结构中,边框包覆MEA密封方式集成简单、成本较低,相比其他密封手段有较大优势。此外,研究发现使用不同边框材料将影响膜电极上的应力分布大小和MEA的使用寿命。如Bogachev等<sup>[11]</sup>发现边框与膜的交界位置存在应力突变现象,在建立二维有限元模型对MEA进行受力分析后,发现边框与GDL不同的刚度是造成应力发生变化的原因。叶东浩等<sup>[12]</sup>选用多种边框材料、多种边框组装方式(齐边框组装、台阶式边框组装)和不同的边框—膜接触方式<sup>[13]</sup>,对膜电极及边框的应力分布进行二维仿真计算,结果发现在膜和边框的交界面上,质子交换膜出现了明显的应力集中现象,且集中应力随着边框模量减小而下降;与齐边框组装相比,台阶式边框组装下边框与膜交界面应力集中则不明显;不同接触方式中,粘贴绑定比直接接触在边框上产生的应力小。此外,外界环境也会影响边框的使用寿命,Yue等<sup>[14]</sup>通过多组边框的剪切、剥离及衰退试验,探究温度、水、酸性对边框稳定性的影响,发现边框中的黏结剂剥离强度在这些因素作用下有较大的衰退,这意味着长期处于燃料电池工作环境中,边框结构的使用寿命将会严重衰减。

基于以上研究可知,合理选取边框材料及组装方式能够减小燃料电池组装、工作过程中在膜电极上产生的应力;此外燃料电池工作的温度、湿度、酸性条件会严重降低边框力学性能,影响使用寿命,而且湿度改变引发的质子交换膜膨胀收缩现象,将在边框密封件附近产生一定的集中应力,长期工作后会使边框和膜疲劳受损,引发边框密封件与膜开胶、质子交换膜破损等现象,降低燃料电池密封性甚至工作性能。因此,笔者以边框和黏结剂组成的试件为对象,通过建立力学模型,并设计不同的边框结构以提升边框密封件的黏结性能,来改善模型的力学表现,同时探究新的边框结构在不同边框材料上的表现,为边框材料选择提供理论指导意义。

## 1 有限元建模原理

典型的质子交换膜燃料电池由阴阳极端板、集流板、流场板和 MEA 通过螺栓紧固的方式组成,其中 MEA 包括质子交换膜、催化层和气体扩散层,它与密封结构的组成示意图如图 1(a)所示,边框在气体扩散层附近通过黏结剂与质子交换膜的四周黏接,发挥固定支撑的作用;边框再与密封圈接触,完成质子交换膜与流场板之间的密封。根据对边框黏结性能研究的相关文献[14]以及黏结剂性能测试的国家标准,可将 2 个边框在黏结剂侧相互贴合,制成如图 1(b)所示的试件,在万能试验机上夹持两端后拉伸并测得牵引力一位移曲线,以考察材料的黏结性能。笔者以此试件为研究对象,通过有限元软件完成建模,优化边框结构,提升边框和黏结剂结构的黏结强度,以此提升边框密封件在燃料电池中的密封性能。

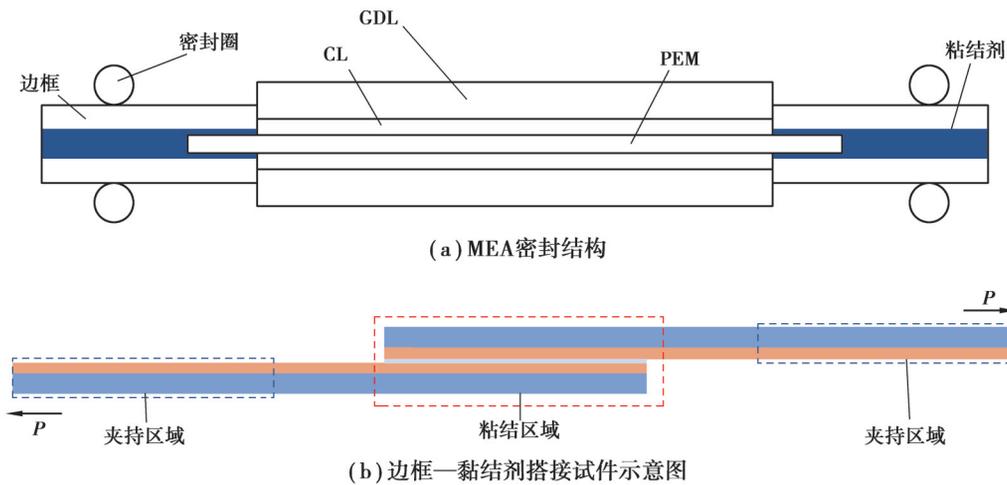


图 1 MEA 密封结构与边框黏结剂试件示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of MEA sealant structure and frame-adhesive test specimen

### 1.1 黏结剂模型

为了对试件结构进行准确的力学分析,需要对其中的黏结剂选择合理的力学模型。大多数文献中黏结剂的力学模型是基于 Camanho 等提出的双线性内聚力模型<sup>[15]</sup>建立的,因为黏结剂在破坏过程中往往同时受到法向、剪切向的力,所以需要综合多种模式下的条件判断内聚力单元是否破坏<sup>[16]</sup>。混合模式下内聚力单元的应力一位移曲线( $\tau$ - $\delta$ )一般如图 2 所示,且应力和位移的计算关系为:

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-d)K & 0 & 0 \\ 0 & (1-d)K & 0 \\ 0 & 0 & (1-d)K + dKH(-\delta_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$H(\delta) = 1, (\delta > 0); H(\delta) = 0, (\delta \leq 0), \quad (1)$$

$$d = \frac{\delta_r^m (\delta^m - \delta_0^m)}{\delta^m (\delta_r^m - \delta_0^m)}, \quad (2)$$

式中: $\tau_1$ 和 $\tau_2$ 是分离平面的面内方向剪切应力, $\tau_3$ 是分离平面法向应力,且法向位移 $\delta_3$ 的方向决定了 $H(-\delta_3)$ 的值,继而影响了在该方向上的受力大小; $K$ 是内聚力单元的初始刚度; $d$ 是损伤因子,当内聚力单元位移超过起始损伤位移 $\delta_0^m$ 后,内聚力单元的初始刚度将产生折损。混合模式下的位移由式(3)~(5)定义

$$\delta_{shear} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}, \quad (3)$$

$$\delta_{normal} = \delta_3, \quad (4)$$

$$\delta_m = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2}, \quad (5)$$

式中: $\delta_{shear}$ 和 $\delta_{normal}$ 分别表示面内剪切方向位移大小和平面法向位移大小; $\delta_m$ 表示混合模式下合位移值。 $G_c$ 是临界应变能量释放率,当形变过程中单元应变能累积超过该值后(或是单元位移超过失效位移 $\delta_r^m$ 后),单元将

发生破坏,失去黏结作用,混合模式下内聚力单元的失效标准使用B-K律判断,为

$$G_c = G_{Ic} + (G_{IIc} - G_{Ic}) \left( \frac{r^2}{1+r^2} \right)^\eta, \quad (6)$$

$$r = \frac{\delta_{shear}}{\delta_{normal}}, \quad (7)$$

式中: $G_{Ic}$ 和 $G_{IIc}$ 分别为内聚力单元平面上和法向上的临界应变能释放率; $r$ 为模式比; $\eta$ 为B-K失效参数,在本模型中该值设置为 $2^{[17]}$ 。

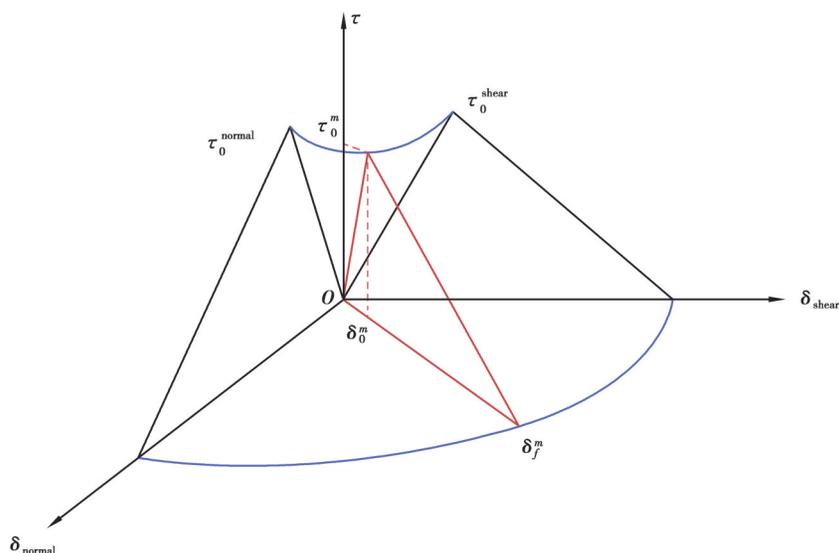
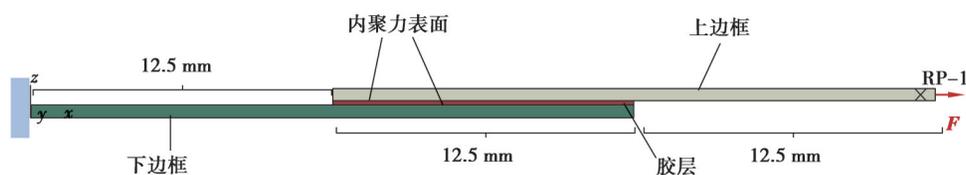


图2 混合模式下应力-位移曲线

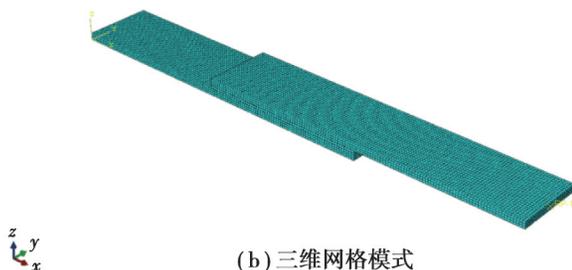
Fig. 2 The stress-displacement curve in mixed-mode

## 1.2 边框有限元模型

基于以上黏结剂模型的建模原理,在ABAQUS中对试件进行建模仿真:模型示意图由3部分组成(如图3(a)所示),从上到下依次为上边框、胶层和下边框;黏结区域长度为 $12.5\text{ mm}^{[14]}$ ,宽度为 $5\text{ mm}$ ,且胶层与边框接触表面设置内聚力表面单元,采用B-K破坏准则;下边框一侧端部固定,上边框一端施加位移载荷。试件的网格模型如图3(b)所示,采用六面体网格,其中胶层网格大小为 $0.1\text{ mm}$ ,边框网格大小 $0.2\text{ mm}$ 。由于目前市场上的边框及其黏结剂种类多样,导致它们的弹性模量、临界应力等材料属性差异较大,因此结合多篇文献使用的仿真数据 $^{[12,17]}$ ,文中采用的边框、内聚力单元的材料属性如表1所示。



(a) 试件力学模型



(b) 三维网格模式

图3 试件模型示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of the specimen model

表1 边框、内聚力单元材料属性  
Table 1 Properties of frame and cohesive element

	材料属性	值
边框	弹性模量 $E/\text{MPa}$	8 000
	泊松比 $\nu$	0.3
内聚力单元	$K/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	10
	$\tau_n^0/\text{MPa}$	0.5
	$\tau_s^0/\text{MPa}$	0.5
	$G_{ic}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.05
	$G_{isc}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.05

## 2 仿真结果与分析

### 2.1 仿真结果

通过以上力学理论的应用和模型的搭建,对图4中的初始模型和优化模型采用相同的边界条件和材料参数进行仿真计算。其中,优化模型为在初始模型的截面上设置连续的凸三角形结构得到的新搭接结构,三角形底边长  $L=1.5\text{ mm}$ ,高  $H=0.15\text{ mm}$ (占边框高度30%),两三角形之间间距  $D=1\text{ mm}$ 。

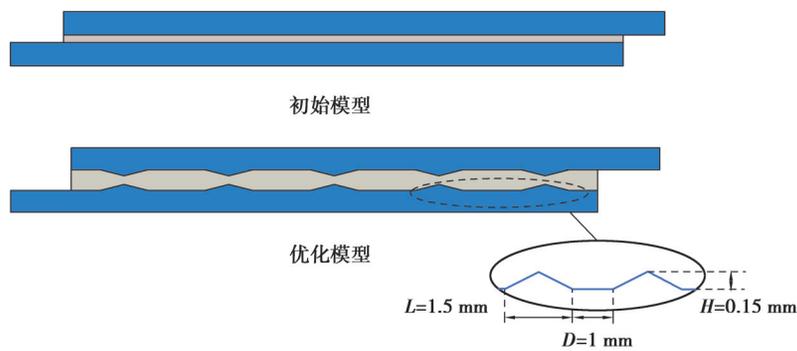


图4 试件初始模型和优化模型

Fig. 4 Original model and optimized model of the specimen

图5(a)和5(b)分别展示的是初始模型和优化模型中试件黏结剂的初始破坏时刻,黏结区域外侧的内聚力表面单元的CSDMG(scalar stiffness degradation for cohesive surfaces)值为1,图5(c)和5(d)为对应时刻两模型的Mises应力分布图,可以发现两模型中,2个边框在靠近黏结剂一侧的Mises应力较大,且胶层破坏位置的附近应力最大。两模型的牵引力一位移曲线如图6所示,可以发现初始模型所能承受的最大牵引力是30.5 N,分离位移为0.482 mm;优化模型所能承受的最大牵引力是26.1 N,分离位移是0.679 mm。从仿真结果可以发现;尽管引入凸形结构后,试件的最大承载力下降,但分离位移相对于初始模型延长了40.9%,这对燃料电池中质子交换膜膨胀收缩产生的位移载荷有积极抵抗作用。

### 2.2 优化结构对不同边框、黏结剂材料的影响

由于燃料电池中使用的边框及黏结剂材料种类较为多样,因此有必要对不同材料在加入优化结构后的黏结性能表现进行考察。图7(a)~(c)是不同边框材料<sup>[12]</sup>在加入凸三角形结构后试件的牵引力一位移曲线,从中可以发现高弹性模量(72 000 MPa和22 000 MPa)边框在加入凸形结构后,最大承载力和分离位移均比初始模型差,而低弹性模量(2 300 MPa)边框在加入凸形结构后分离位移提升。图7(d)~(f)是改变黏结剂不同属性后初始模型和优化模型牵引力一位移曲线对比,可以发现黏结剂材料的刚度、临界应力和临界应变能的材料属性改变后,优化结构都能提升试件的分离位移。

值得注意的是,图7(f)中当黏结剂临界应变能释放率从  $0.05\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$  提升至  $0.1\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$  后,优化模型

的最大承载力损失幅度由从 14.4% 降至 8.3%。针对该现象,在优化模型和初始模型中,保持黏结剂其他属性不变,仅改变临界应变能量释放率大小,计算模型的牵引力位移曲线,并比较该属性对优化结构的力学性能影响,结果如图 8 所示。从图中可以发现,随着临界应变能量释放率的增加,黏结剂在破坏前允许发生更大的形变,导致模型的分离位移均得到提高;然而,初始模型在达到分离位移前承载力已发生下降,说明黏结层中部分黏结单元已经受损,而优化模型的结构在发生分离前所需牵引力一直保持增大,黏结剂损伤较小,结构承载力较好。此外,随着临界应变能量释放率增加,3 组模型中优化模型的最大承载力损失幅度依次为 7.5%、7.4% 和 7.0%,逐渐递减,说明优化结构中使用高临界应变能量释放率的黏结剂能减小最大承载力的损失。

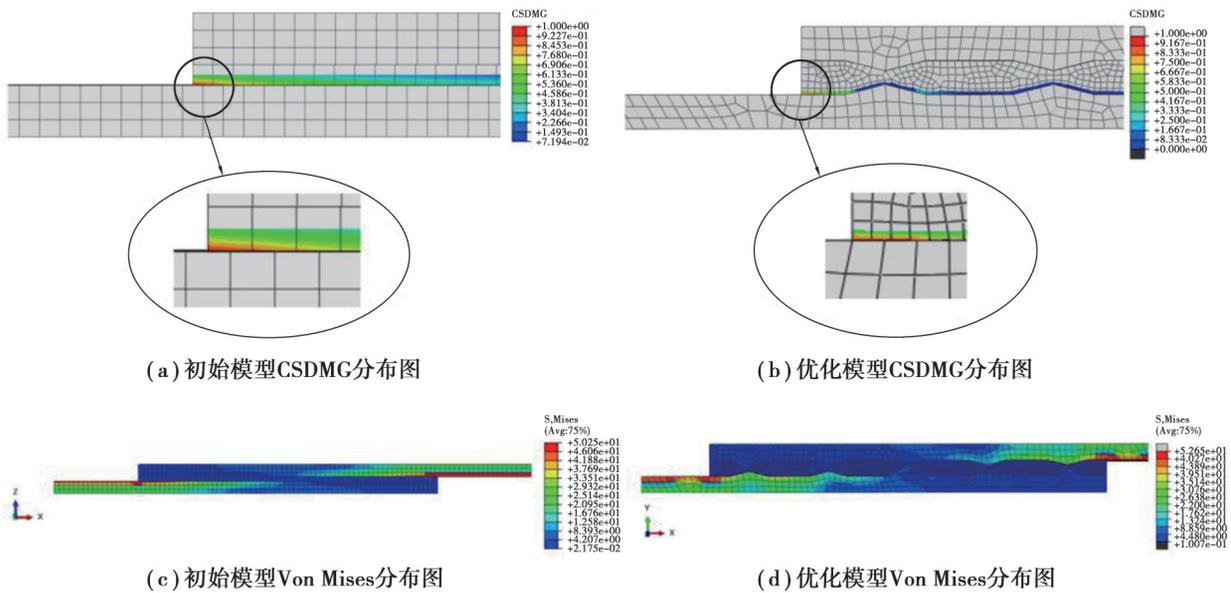


图 5 初始模型和优化模型的仿真计算结果

Fig. 5 The simulation results of the original model and the optimized model

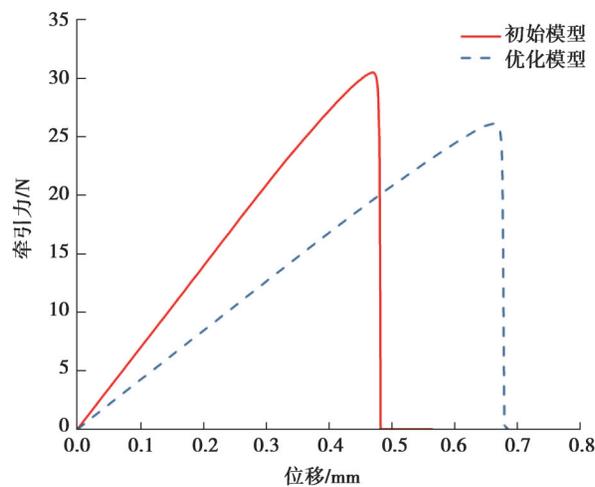


图 6 初始模型和优化模型牵引力一位移曲线对比图

Fig. 6 The traction-separation curves of the original model and optimized model

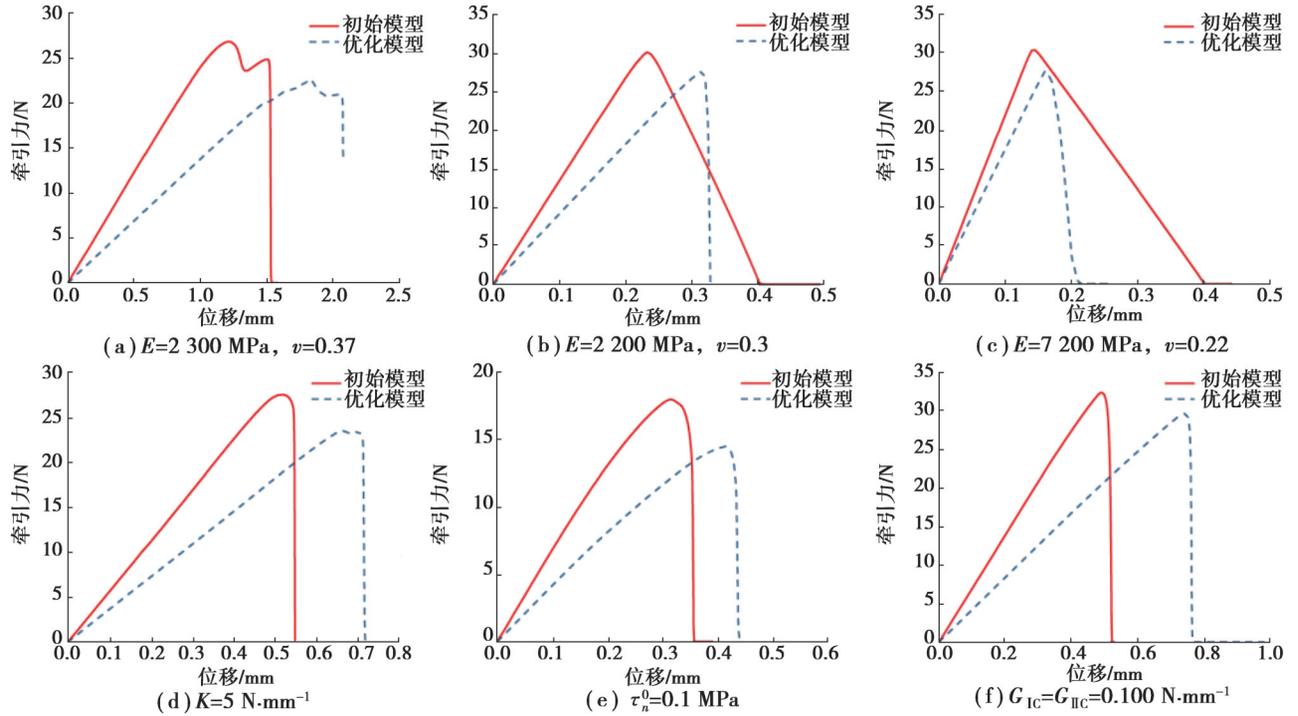


图 7 不同边框材料、黏结剂属性的牵引力位移曲线

Fig. 7 The traction-separation curves of the models with different frames and adhesive

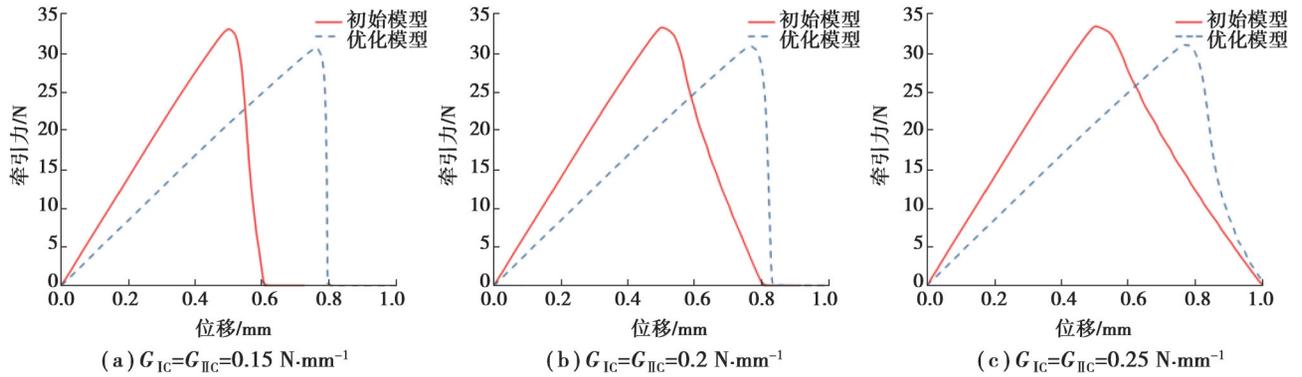


图 8 不同临界应变能释放率的模型牵引力位移曲线

Fig. 8 The traction-separation curves of the models with different energy release rates

### 2.3 边框凸形结构尺寸优化

对于 2.1 中凸三角形结构模型,三角形底边长 1.5 mm,且两两之间间隔 1 mm,若改变三角形底边长度 ( $L$ ),三角形之间的间距 ( $D$ ) 也会发生相应变化,因此建立一系列不同三角形底边长度的模型,进一步探究优化结构的尺寸对黏结性能的影响。模型和主要的计算结果如表 2 所示,表中  $F_{max}$  为最大承载力,  $S_{max}$  为分离位移。可以看出,这些结构的分离位移均较初始模型的分离位移为 0.482 mm;其中,底边 1.2 mm 和 1.5 mm 的模型分离位移均达到 0.684 mm,但 1.5 mm 的模型最大承载力在所有模型之中最高,达到 26.1 N,说明底边长 1.5 mm 的凸三角形结构有最好的黏结性能。

图 9(a)是三角形底边长度分别为 1.4 mm、1.5 mm 和 1.7 mm 的模型牵引力-位移曲线,与 1.5 mm 模型相比,1.4 mm 和 1.7 mm 底长的模型最大承载力分别下降了 19.9% 和 24.9%,分离位移分别下降了 17.1% 和 21.3%。结合图 9(b)中展示的 3 种模型在位移 0.52 mm 后胶层的 CSDMG 分布图,可以观察到三角形尺寸大小对相同位移下黏结剂破坏演变情况有不同的影响:与其他 2 种底边尺寸相比,1.7 mm 的模型中黏结剂破坏演变较快,因此分离位移更小,承载能力较差;由于凸三角形结构的引入,黏结区域变大,这导致凸三角形之

间的水平区域长度减小,对于1.7 mm的模型,黏结剂在受到牵引力后在水平区域产生应力集中,倾向于在该处发生破坏并扩展;对于1.5 mm的模型,在相同位移加载下,黏结剂所受破坏最小,因此力学性能最好。

表2 不同凸三角形尺寸模型的仿真结果

Table 2 The simulation results of models with different convex triangle sizes

编号	$L/\text{mm}$	$D/\text{mm}$	$F_{\max}/\text{N}$	$S_{\max}/\text{mm}$
1-1	1.0	1.5	23.0	0.639
1-2	1.1	1.4	25.3	0.666
1-3	1.2	1.3	23.7	0.684
1-4	1.3	1.2	20.8	0.579
1-5	1.4	1.1	20.9	0.567
1-6	1.5	1.0	26.1	0.684
1-7	1.6	0.9	23.5	0.650
1-8	1.7	0.8	19.6	0.538
1-9	1.8	0.7	21.6	0.616

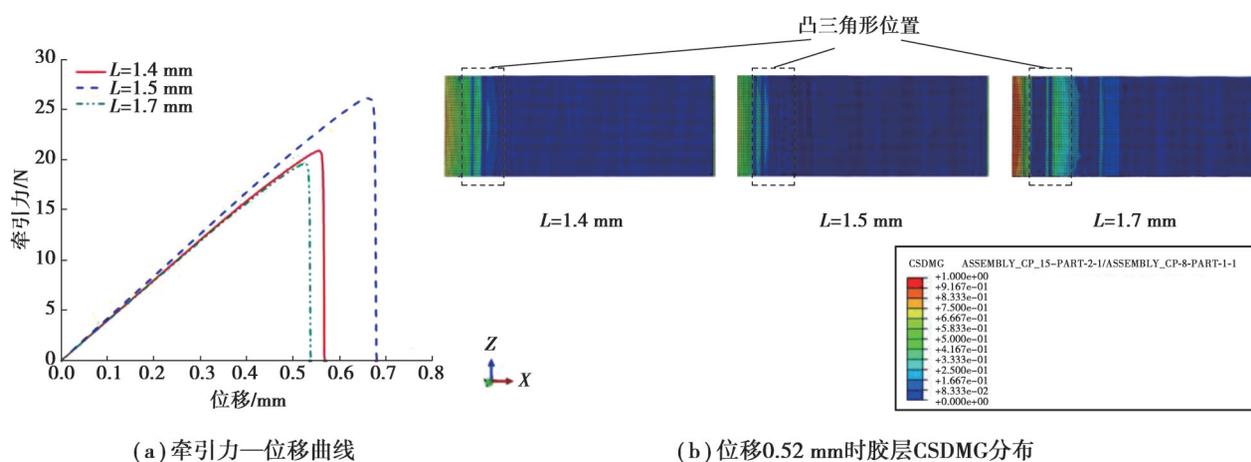


图9 不同凸三角形尺寸模型仿真结果

Fig. 9 The simulation results of models with different convex triangle sizes

## 2.4 边框截面形状优化

为进一步提升试件的黏结性能,对黏结区域处边框的截面形状进行了改变,如图10(a)所示,增加了凹三角形结构和梯形结构,并与初始模型和凸三角形结构模型在相同边界条件下进行力学仿真,得到的牵引力—位移曲线如图10(b)所示,可发现与初始模型相比,凸形结构的最大承载力下降,但分离位移均能得到提升,凸梯形结构最大承载力为19.5 N,分离位移为0.531 mm,黏结性能的提升效果比凸三角形结构差;而凹形结构引入后会同时降低最大承载力和分离位移,严重影响了试件的黏结性能。因此,仿真结果表明:不同的截面形状将对黏结性会有很大的影响,其中凹形结构较于凸形结构黏结性差,而三角形结构较梯形结构能同时改善承载能力和分离位移。

此外,凹三角形、凸梯形和凹梯形模型结构的尺寸对力学性能的影响亦进行了分析,其中对于相同底长(1.5 mm)的三角形和梯形结构,可将三角形视作梯形顶边长度为0的特殊形式,因此对于梯形结构,主要研究顶边( $B$ )对模型力学性能的影响。凹三角形模型的尺寸参数和计算结果如表3所示。在这些尺寸中,1.5 mm长的底边模型分离位移最长,为0.472 mm;1.3 mm长的底边模型承载能力最好,最大承载力达到25.2 N。与初始模型相比,这些尺寸的凹三角形结构均降低了边框搭接结构的力学性能。梯形模型的尺寸参数和计算结果如表4所示:对于凸梯形结构,顶边越小的结构力学性能越好,且当梯形顶边为0.2 mm长时,模型的最

大承载力为 23.6 N,分离位移为 0.620 mm,但力学性能仍然比同底边长度的凸三角形模型(模型 1-6)低;对于凹梯形结构,当顶边长为 0.6 mm 时,模型的力学性能最优,最大承载力和分离位移分别达到 21.1 N 和 0.439 mm,然而其力学性能较同底边长度的凹三角形模型(模型 2-6)和初始模型差。综合以上对各边框截面形状尺寸的探索结果可得出凸三角形是最佳的优化结构。

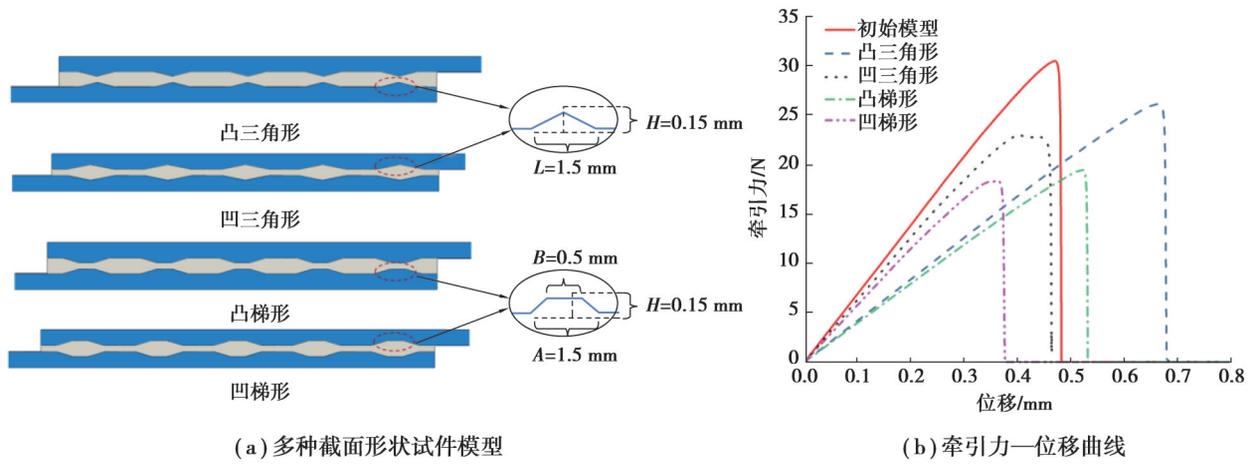


图 10 边框截面形状优化结果

Fig. 10 The optimized results of the specimens with different section shapes

表 3 不同凹三角形尺寸模型的仿真结果

Table 3 The simulation results of models with different concave triangle sizes

编号	L/mm	D/mm	$F_{max}/N$	$S_{max}/mm$
2-1	1.0	1.5	25.0	0.462
2-2	1.1	1.4	22.4	0.452
2-3	1.2	1.3	21.3	0.392
2-4	1.3	1.2	25.2	0.449
2-5	1.4	1.1	21.1	0.437
2-6	1.5	1.0	23.0	0.472
2-7	1.6	0.9	20.8	0.395
2-8	1.7	0.8	20.7	0.403
2-9	1.8	0.7	18.0	0.358

表 4 不同梯形尺寸模型的仿真结果

Table 4 The simulation results of models with different trapezoid sizes

梯形形状	编号	B/mm	$F_{max}/N$	$S_{max}/mm$
凸梯形	3-1	0.2	23.6	0.620
	3-2	0.4	20.7	0.614
	3-3	0.6	15.8	0.449
凹梯形	4-1	0.2	17.6	0.369
	4-2	0.4	18.2	0.355
	4-3	0.6	21.1	0.439

### 3 结束语

在 ABAQUS 中对边框—黏结剂试件建立了三维有限元模型,模拟了在相同牵引载荷作用下,不同边框结构的试件因黏结剂破坏而发生分离的情况,通过牵引力—位移曲线比较了它们黏结性能的差异,并对优化

结构的尺寸和截面形状进行了进一步探索。结果表明引入凸形结构,能提升试件的分离位移,但会降低最大承载力;优化结构在低弹性模量的边框试件上能延长分离位移,但在高弹性模量的边框上有负面效果,而对不同属性的黏结剂均能提升分离位移;不同截面形状的边框结构对黏结性能也会产生影响,与其他截面形状相比,凸三角形的结构黏结性能最好,且当凸三角形底边长为1.5 mm时,优化结构的力学表现最佳。这对于提升边框结构在PEMFC中的密封性能有重要意义。

### 参考文献

- [ 1 ] 张智明, 胡淞, 李昆朋, 等. PEMFC密封胶接触压力的均匀性研究及改善方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(10): 30-37.  
Zhang Z M, Hu S, Li K P, et al. Study on uniformity of contact pressure of PEMFCs sealant and its improvement method[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2018, 45(10): 30-37.(in Chinese)
- [ 2 ] 张智明, 张娟楠, 潘涛, 等. PEMFC金属双极板密封设计的有限元仿真[J]. 中国科技论文, 2017, 12(16): 1895-1901.  
Zhang Z M, Zhang J N, Pan T, et al. Finite element method modeling on sealant design of PEMFC metal bipolar plate[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(16): 1895-1901.(in Chinese)
- [ 3 ] 肖文灵. 燃料电池密封结构优化设计与性能分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.  
Xiao W L. Performance analysis and optimization design of fuel cell sealing structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [ 4 ] Liang P, Qiu D K, Peng L F, et al. Structure failure of the sealing in the assembly process for proton exchange membrane fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(15): 10217-10227.
- [ 5 ] Li B, Kim Y S, Mukundan R, et al. Mixed hydrocarbon/fluoropolymer membrane/ionomer MEAs for durability studies[J]. ECS Transactions, 2010, 33(1): 913-924.
- [ 6 ] Crum M, Liu W. Effective testing matrix for studying membrane durability in PEM fuel cells: part 2. mechanical durability and combined mechanical and chemical durability[J]. ECS Transactions, 2006, 3(1): 541-550.
- [ 7 ] Huang X Y, Solasi R, Zou Y, et al. Mechanical endurance of polymer electrolyte membrane and PEM fuel cell durability[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2006, 44(16): 2346-2357.
- [ 8 ] Alizadeh E, Barzegari M M, Momenifar M, et al. Investigation of contact pressure distribution over the active area of PEM fuel cell stack[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(4): 3062-3071.
- [ 9 ] Yang D J, Tan Y L, Li B, et al. A review of the transition region of membrane electrode assembly of proton exchange membrane fuel cells: design, degradation, and mitigation[J]. Membranes, 2022, 12(3): 306.
- [ 10 ] Ye D H, Zhan Z G. A review on the sealing structures of membrane electrode assembly of proton exchange membrane fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2013, 231: 285-292.
- [ 11 ] Bograchev D, Gueguen M, Grandidier J C. Stress and plastic deformation of MEA in fuel cells: Stresses generated during cell assembly[J]. Journal of Power Sources, 2008, 180: 393-401.
- [ 12 ] 叶东浩, 李永静, 汪广进, 等. PEM燃料电池膜电极边框材料对膜干湿应力影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(10): 1-4.  
Ye D H, Li Y J, Wang G J, et al. Stress effect of membrane electrode frame on the membrane dry-wet cycling in PEM fuel cell [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(10): 1-4. (in Chinese)
- [ 13 ] 叶东浩. 膜电极压缩引起的燃料电池内部应力、内阻及水传输行为研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.  
Ye D H. Effects of MEA compression on fuel cell stress, resistances and water transmission[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [ 14 ] Yue W, Qiu D, Yi P, et al. Study on the degradation mechanism of the frame for membrane electrode assembly in proton exchange membrane fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46: 36954-36968.
- [ 15 ] Camanho P P, Davila C G, de Moura M F. Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 2003, 37(16): 1415-1438.
- [ 16 ] Banan R, Bazylak A, Zu J. Effect of mechanical vibrations on damage propagation in polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(34): 14764-14772.
- [ 17 ] 胡振虎. 基于内聚力模型的复合材料胶接头界面失效机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
Hu Z H. Research on interface failure mechanisms of composite adhesive joints based on the cohesive model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)