

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.11.019

纤维缠绕复合材料压力容器的多尺度分析与性能预测

刘长喜¹, 姜旭¹, 王佳杰², 王云龙³, 王晓宏¹, 毕凤阳¹, 周威¹

(1. 黑龙江工程学院机电工程学院, 哈尔滨 150050; 2. 黑龙江工程学院材料科学与工程学院, 哈尔滨 150050;
3. 黑龙江工程学院汽车与交通工程学院, 哈尔滨 150050)

摘要: 纤维缠绕复合材料压力容器由纤维、基体和界面组成, 其宏观性能会随着组成材料微观性能的变化而变化, 为了更加科学准确地对复合材料压力容器性能进行预测, 有必要建立多尺度性能预测与分析方法, 将ANSYS微观分析与ABAQUS宏观分析相结合, 以此指导设计, 提高其性能。此外, 通过微观脱黏试验、树脂和碳纤维的拉伸试验获得复合材料微观力学参数, 通过材料体系XSYT55G成形的缠绕层压板样品进行拉伸和剪切强度试验获得复合材料的宏观力学参数。采用提取的代表体积元素(RVE)进行微观失效分析, 并引入渐进均匀化理论, 实现微观到宏观的分析过程, 同时将该分析方法应用到纤维缠绕复合材料的压力容器算例分析中。分析结果表明: RVE模型进行拉伸失效分析, Weibull模量(m)值越小, 失效单元数越多, 模型承载力越低; 对不同纤维强度Weibull分布进行分析, m 值越大, 宏观模型模量峰值越晚出现, 变化越剧烈; 纤维强度离散性 m 值对爆破压力和失效过程有重要影响, 随着 m 值增大, 压力容器失效越晚, 载荷变化越剧烈, 爆破压力也随之增大。

关键词: 多尺度分析; 性能预测; 复合材料压力容器; 渐进失效; 爆破压力; 数值分析

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)11-0115-08

Multiscale Analysis and Performance Prediction of Filament-wound Composite Pressure Vessel

Liu Changxi¹, Jiang Xu¹, Wang Jiajie², Wang Yunlong³, Wang Xiaohong¹, Bi Fengyang¹, Zhou Wei¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China;

3. School of Automotive and Transportation Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China)

Abstract: The filament wound composite pressure vessel is composed of fiber, matrix and interface. Its macroscopic properties can change with the change of the microscopic properties of the constituent materials. In order to predict the performance of composite pressure vessels more scientifically and accurately, it is necessary to establish a multi-scale performance prediction and analysis method. ANSYS mesoscopic analysis and ABAQUS macroscopic analysis were combined to guide the design and improve its performance. In addition, the micro-mechanical parameters of the composites were obtained by micro-debonding test and tensile test of resin and carbon fiber. The macroscopic mechanical parameters of the composites were obtained by tensile and shear strength tests on the winding laminate samples formed by the material system XSYT55G. The extracted representative volume element (RVE) was used for meso-scale failure analysis, and the progressive homogenization theory was introduced to realize the excessive analysis from meso-scale to macro-scale. At the same time, the analysis method was applied to the example analysis of filament wound composite pressure vessel. The analysis results show that in the tensile failure analysis of the RVE model, the smaller the Weibull modulus (m) value, the more the number of failure units, and the lower the bearing capacity of the model. The tensile failure analysis of the RVE model shows that the smaller the m value, the more the number of failure units, and the lower the bearing capacity of the model. The Weibull distribution of different fiber strength was analyzed. The larger the m value, the later the modulus peak of the macroscopic model appears, and the more intense the change. The discreteness m value of fiber strength has an important influence on the burst pressure and failure process. As the m value increases, the pressure vessel fails later, the load changes more violently, and the burst pressure also increases.

Keywords: multiscale analysis; performance prediction; composite pressure vessel; progressive failure; bursting pressure; simulation analysis

基金项目: 国防科技重点实验室开放基金项目(JCKYS2023603C022), 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题研究基金项目(AWJ-23M23), 黑龙江省重点研发计划指导类项目(GZ20210098), 黑龙江省教育科学规划重点课题项目(GJB1423014), 黑龙江省自然科学基金项目(LH2023E114)

通信作者: 姜旭, 助理研究员, 主要研究方向为复合材料成型、先进制造技术等

收稿日期: 2023-09-07

引用格式: 刘长喜, 姜旭, 王佳杰, 等. 纤维缠绕复合材料压力容器的多尺度分析与性能预测[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(11): 115-122.

Liu Changxi, Jiang Xu, Wang Jiajie, et al. Multiscale analysis and performance prediction of filament-wound composite pressure vessel[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11): 115-122.

随着社会的进步,先进复合材料产品应用越来越常见,而纤维复合材料被广泛地应用于国防军工、航天航空、汽车等领域。复合材料压力容器通常采用缠绕成型工艺或编制成型工艺进行制备,其中缠绕成型工艺制备的纤维复合材料压力容器更常见,主要结构一般由内衬层和复合材料纤维层组成,复合材料纤维层承受大部分内压,内衬起到密封、存储及防止化学腐蚀的作用^[1]。复合材料的压力容器相较于金属压力容器具有质量轻、强度高、耐腐蚀、设计灵活等优势^[2]。

虽然复合材料压力容器在高端产品应用市场更加受欢迎,但由于力学性能复杂,因此其设计和力学性能分析难度较大。复合材料压力容器优化设计作为一项基础性工作,最终的强度很大程度上取决于复合材料失效特性的影响^[3]。目前,科研界对复合材料结构失效损伤分析已经进行了大量探索,最近调查研究显示,预测容器爆破压力,以此进一步减小复合材料纤维层质量是研究的重点。通过研究发现,简单地承受内压的应力分析很难准确地获得复合材料压力容器的爆破压力,因为没有考虑到复合材料在加载情况下的基体裂纹、层间破坏和最终纤维断裂,因此提出了复合材料压力容器的多尺度渐进损伤分析,该方法是在复合材料微观力学基础上,通过建立RVE模型来研究纤维/基体失效对复合材料力学性能的影响,从而反映复合材料宏观等效刚度,能够更准确地预测复合材料压力容器的爆破压力^[4-6]。此外,几个常见的失效准则也可以进行复合材料复杂损伤破坏机制分析,如最大应力或应变失效准则,Hashin, Hoffmann, Tsai-Wu 和 Tsai-Hill 等^[7-8]。

对于复合材料压力容器多尺度失效分析,国内外已积累了一定的研究成果。众多学者提出了多种从微观力学特性中提取数据来反映宏观材料特性的方法,并采用了基于有限元分析的复合材料多尺度失效分析方法^[9-10]。Blassiau 等^[11-12]、Camara 等^[13]通过对体积元素(RVE)进行失效分析,实现了复合材料压力容器的全局/局部多尺度失效分析。然而他们的模型没有充分考虑基体的渐进损伤特性,也没有研究纤维与基体的界面性能。Liu 等^[14]和 Ren 等^[15]通过 RVE 建立了微观刚度退化模型,更准确地预测了复合材料压力容器的爆破压力。

笔者分别以纤维开裂、基体开裂和界面分离三

种不同失效模式建立 RVE 的刚度退化模型,并应用渐进均匀化理论,在微观分析的结果基础上表达损伤变量 D ,获得复合材料多尺度宏、微观分析模型,最后,在 Puck 准则的基础上,编写 UDSLFD 子程序引入刚度退化参数,基于 ABAQUS 对内压作用下的复合材料层进行渐进损伤分析,从而预测压力容器的爆破压力和爆破方式。该模型将渐进均匀化理论与有限元技术相结合,具有更高的计算精度,可为纤维缠绕复合材料压力容器的渐进失效分析提供一定参考价值,提升其压力容器结构整体性能。

1 材料性能参数测试

为了保证纤维增强复合材料宏、微观多尺度失效分析的准确度,分别设计了微观分析和宏观分析的材料性能参数测试实验。

1.1 微观分析材料性能参数测试

对于纤维增强复合材料微观性能分析,基于 AYASYS 建立了 RVE 的数值分析模型,进行微观失效性能分析,树脂基体为 W1306 环氧树脂,增强体选择中复神鹰 XSYT55G 的 T800 级碳纤维,纤维体积分数为 65%。设计微观力学性能实验,包括微滴脱黏试验、树脂拉伸性能试验以及纤维单丝强度试验,以便为微观数值模型提供相关的性能参数。其中微滴脱黏试验是通过制作实验用凹型纸卡,用以固定微滴脱黏实验的试件,通过测试并计算,获得界面相关性能参数列于表 1。通过树脂拉伸性能试验以及纤维单丝强度试验分别对复合材料基体和纤维力学性能进行测试,结果见表 2。

表 1 界面性能参数

最大切应力/MPa	最大切向跳变/ μm	加权参数
46	0.6	0.5

表 2 基体/纤维材料性能参数

材料	拉伸弹性模量/GPa	泊松比	拉伸强度/MPa
基体	3.37	0.4	86
纤维	240	0.3	4 410

1.2 宏观分析材料性能参数测试

对模拟分析中的宏观材料参数测试,选用材料体系 XSYT55G 的 T800 级碳纤维的层合板(缠绕成型)的拉伸、剪切性能进行测试,采用湿法缠绕工艺制作拉伸板试件,拉伸性能采用碳纤维复合材料单向板进行测试,试样制备过程中保障碳纤维丝均匀分布在树脂基体中,面内剪切性能采用 $\pm 45^\circ$ 层压板拉伸方法测定碳纤维增强复合材料,拉伸加载速度均为 2 mm/min,基本实验步骤包括模具装夹、纤维

缠绕、固化脱模、试件切分、性能测试,最终拉伸、剪切性能测试结果见表3。

表3 材料体系 XSYT55G 拉伸/剪切性能试验结果

拉伸强度/MPa	拉伸弹性模量/GPa	剪切强度/MPa	剪切模量
2 050.25	129.05	179.465	4.68

2 复合材料宏微观多尺度分析方法的建立

由于碳纤维复合材料宏观渐进损伤是由微观结构失效引起的,单纯的宏观失效分析不能准确地对材料结构性能进行预测,而单一从微观尺度出发,计算量又过于庞大^[16],因此,将渐进均匀化理论、损伤变量理论及有限元技术相结合,提出了一种碳纤维复合材料多尺度宏、微观分析预测方法。

2.1 RVE 失效分析

(1) 微观失效分析。

纤维增强复合材料的宏观断裂失效是内部纤维损伤及破坏的演化结果,根据数值基体内部碳纤维的分布特征和体积分^[17],建立 RVE 模型,通过计算获得单向拉伸载荷作用下的微观结构损伤分析结果,主要损伤模型分为纤维断裂、基体开裂及界面分离3种。通过自定义的3种失效准则对碳纤维复合材料渐进损伤过程进行模型分析^[18]。

复合材料纤维断裂失效主要是受到纤维方向的受拉状态,纤维断裂失效遵循最大应力准则,纤维失效表达式如公式(1)所示:

$$e_{f-t} = \frac{\sigma_{11}}{X_f} \quad (1)$$

其中, e_{f-t} 为纤维拉伸失效起始阈值; σ_{11} 为纤维方向拉伸应力,受拉状态 $\sigma_{11} > 0$; X_f 为纤维方向拉伸强度,当 σ_{11} 值达到拉伸强度时,纤维材料发生失效。

各纤维单元服从最弱链理论的双参数 Weibull 分布,按照 Weibull 分布模型对碳纤维复合材料强度进行统计分析,Weibull 统计模型如公式(2)所示^[19-20]:

$$F(\sigma_f) = 1 - \exp\left[-\frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad (2)$$

其中, F 是纤维体积为 V 的应力为 σ_f 作用下的纤维失效概率函数; V_0 为纤维参考体积; σ_0 为尺度参数; m 为 Weibull 模量,即形状参数,当 m 值越大强度离散性越小。

在微观失效有限元分析时,假设纤维长度直径相同,可以用纤维长度 L 代替体积参数,简化后的公式(3)如下:

$$F(\sigma_f) = 1 - \exp\left[-L \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad (3)$$

纤维层间基体开裂失效遵循 Puck 失效准则,Puck 认为纤维间基体失效仅与断面的法向应力和切向应力有关,三维状态下纤维基体开裂失效应力分量表达式如公式(4)所示^[21-22]:

$$\begin{cases} \sigma_{nn} = \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2} + \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{2} \cos(2\theta) + \tau_{23} \sin(2\theta) \\ \tau_{nt} = -\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2} \sin(2\theta) + \tau_{23} \cos(2\theta) \\ \tau_{ln} = \tau_{12} \cos(\theta) + \tau_{13} \sin(\theta) \end{cases} \quad (4)$$

其中, σ_{nn} 为断面上法向应力; τ_{nt}, τ_{ln} 为断面上剪切应力; θ 为潜在断裂角度; σ_{22}, σ_{33} 为铺层坐标系下的法向应力。

对基体拉伸失效模式,断面上法向应力 $\sigma_{nn} \geq 0$,基体开裂失效准则表达式为^[23]:

$$e_{m-t} = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{nt}}{S_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{ln}}{S_L}\right)^2 \quad (5)$$

$$S_T = Y_c \cos(\theta_0) \left[\sin(\theta_0) + \frac{\cos(\theta_0)}{\tan(2\theta_0)} \right] \quad (6)$$

其中, e_{m-t} 为基体拉剪失效起始阈值; Y_T 为垂直纤维方向拉伸强度; Y_c 为垂直纤维方向压缩强度; S_T 为横向剪切强度; S_L 为纵向剪切强度; θ_0 为单项板横向压缩断裂面角度(该角度约为 53°)。

纤维与基体界面是重要的微观结构,界面失效会对碳纤维复合材料整体性能造成影响。内聚力模型(Cohesive)作为一种黏结单元,通过失效删除从而实现复合材料界面分层损伤的预测分析,主要用于分析界面裂纹的出现、扩展及积累的过程中,对于本研究模拟,采用了基于能量损伤演化形式,Cohesive 模型的非线性破坏准则表达式如(7)^[24]:

$$\left(\frac{G_1}{G_{1c}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_2}{G_{2c}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_3}{G_{3c}}\right)^\alpha = 1 \quad (7)$$

其中, G_1, G_2, G_3 分别是不同模式下的能量释放率; G_{1c}, G_{2c}, G_{3c} 分别为不同模式下的临界能量释放率;当3种能量 α 次方和大于1时,材料界面发生损伤破坏。

(2) RVE 数值模型建立。

碳纤维增强项在树脂基体中呈现周期性均匀的分布,通过建立的 RVE,提出周期性的假设^[25]。将纤维单元赋予 Weibull 分布的随机强度,设定纤维直径为 $7 \mu\text{m}$,模型总长度为 $8 \mu\text{m}$,共计 64 320 个单元,确定计算边界条件为一端单元固定 1~6 的自由度,另一端采用多点耦合技术施加位移载荷,RVE

网格及边界条件如图1所示。

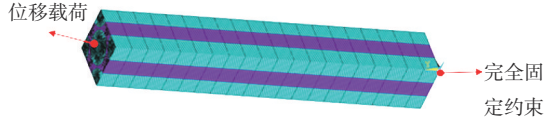


图1 RVE网格及边界条件

(3)分析结果及讨论。

使用APDL语言循环程序,将所失效的单元杀死并增加位移载荷,重复计算直至模型失效,短时间内判断模型是否失效,得出准确数值。图2为RVE微观分析模型计算结果,整个RVE模型在加载过程中,随着两端平均应力的增长,纤维和基体单元会逐步失效,当失效单元数目达到一定数量时,整个RVE模型会随之完全失效,即代表性体积单元模型的失效过程。

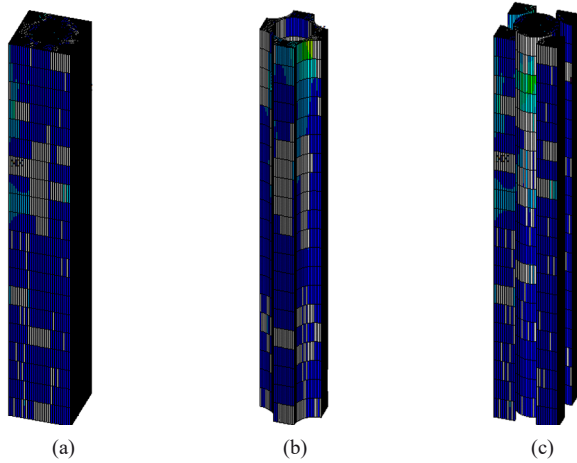


图2 微观计算结果

通过调整公式(3)的 m 值,从而改变纤维强度离散性,将得到不同 m 值的RVE单元加载过程载荷-位移曲线以及加载过程中RVE模型的失效单元数目,如图3所示。通过以上分析过程可以看出,随着纤维强度离散性的增大(即减小 m),加载过程中RVE中失效单元的数量逐渐增加,模型的刚度衰减,承载能力随之下降。通过统计加载端的平均应力与失效单元数目能够得出局部应力与失效单元数的关系并由此拟合出方程,此即宏、微观分析联系的纽带。

2.2 宏、微观多尺度失效分析

(1)渐进均匀化理论。

复合材料一般在宏观上表现出均质特性,而在微观结构往往表现为非均质性,微观尺度的重复RVE相较于宏观尺度是非常小的量,为了使微观模

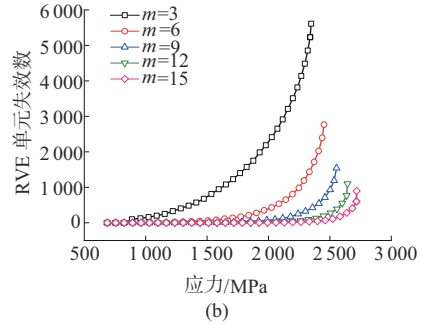
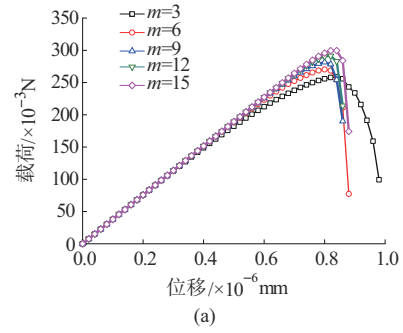


图3 不同 m 时RVE加载过程中的载荷-位移曲线及失效单元数的变化

图3 不同 m 时RVE加载过程中的载荷-位移曲线及失效单元数的变化

型有效地表达宏观结构,又通过宏观分析获得微观响应,本研究引入了渐进均匀化理论,从而建立了微观和宏观分析之间的联系^[26]。用小参数 ε 表征RVE特征尺寸,任意结构场变量 $\psi(x)$,及 ε 与宏观尺度变量 x 和微尺度变量 y 关系表达式如式(8)^[27]:

$$\psi(x) = (x, y), \varepsilon = \frac{x}{y} \quad (8)$$

将位移场变量 u 表示为小参数 ε 渐近级数展开,表达式如式(9):

$$u(x) = u(x, y) = u^0(x, y) + \varepsilon u^1(x, y) + \varepsilon^2 u^2(x, y) + O(\varepsilon^3) \quad (9)$$

其中, $u_i(x, y)$ 为基底函数; O 为高阶无穷小,计算时取值近似于0。

根据虚功原理,满足弹性力学基本理论,得到胞元控制微分方程如式(10)^[28]:

$$\int_{\Omega} E_{ijkl}^n \frac{\partial \mu_k}{\partial x_l} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega} f_i v_i d\Omega + \int_{\Gamma} t_i v_i d\Gamma \quad \forall v \in V \quad (10)$$

其中, Ω 为复合材料宏观结构基体部分参量; E_{ijkl}^n 为4阶弹性张量,可以表示不同方向弹性模量; i, j, k, l 为不同方向的坐标变量; Γ 为固定位移边界参量; f_i 为体积力; v_i 为任意虚位移; t_i 为面张力。

由公式(10)进一步推导均匀化等效模量计算公式(11):

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y (E_{ijkl} - E_{ijmn} \frac{\partial \chi_{klm}}{\partial y_n}) dY \quad (11)$$

广义位移位 χ_{klm} 满足条件:

$$\int_Y E_{ijmn} \frac{\partial \chi_{klm}}{\partial y_n} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dY = \int_Y E_{ijkl} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dY \quad (12)$$

将公式(12)经过有限元离散后,得到渐进均匀化有限元格式公式(13):

$$[E^H] = \frac{1}{|Y|} \int_Y ([E] - [E][B][\chi]) dY \quad (13)$$

$$\int_Y [B]T[E][B]dY[\chi_{kl}] = \int_Y [B]T[E]dY \quad (14)$$

其中, $[E]$, $[B]$ 分别为单元的弹性矩阵和几何矩阵; $[\chi_{kl}]$ 为单元节点的位移矩阵。

(2) 损伤变量。

通常材料结构损伤都是从微裂纹和微孔开始的,随着微观损伤扩大,会引起宏观结构的破坏,纤维增强复合材料失效过程是极其复杂的,但通常纤维承受大部分的载荷,而基体主要起到支撑作用。对于纤维增强复合材料结构损伤失效的预测与分析,渐进均匀化理论是通过小参数把宏观和微观分析联系起来,但是仅仅定性表达,因此,需要引入损伤变量 D 来表征复合材料结构劣化程度, D 表征结构的整体损伤(包含纤维、基体、分层的损伤),以此进行定量分析。

对于复合材料现有的损伤分析多集中于微观损伤和宏观损伤,而微观损伤是原子和分子尺度的分析,通过其推测宏观损伤行为尚处于起步研究阶段,纤维/基体失效是根据损伤变量 D 进行判定,它是表征材料结构损伤程度的变量,当 $D=1$ 时,表示材料结构已完全损伤且不具备承载能力; $0 < D < 1$ 时,表示材料结构已经开始发生损伤,当 $D=0$ 时,表示材料结构未发生损伤^[29]。单向纤维增强复合材料沿纤维方向受到拉伸载荷,其结构刚度主要取决于沿纤维方向有效弹性模量 E_1 , E_1 的计算公式可以简化为公式(15):

$$E_1 = E_1^0 \times (1 - D) \quad (15)$$

采用 Weibull 损伤演化率,形成损伤变量表达式如式(16)^[18]:

$$D = \lambda \times \frac{N_{m-f}}{N_{m-1}} \quad (16)$$

$$\lambda = [(\frac{N_{f-f}}{N_{m-f}}) \times (\frac{N_{m-1}}{N_{f-1}}) \times E_f^0 \times V_f + (1 - V_f) \times E_m^0] / E_1^0 \quad (17)$$

其中, λ 为常数,其值处于 $[0, 1]$, 大小与微观失

效模型和材料参数有关; N_{m-f} 为纤维失效单元数目; N_{m-1} 为基体失效单元数目; N_{f-1} 为纤维单元总数目; E_f^0 为纤维名义弹性模量; E_m^0 为基体名义弹性模量; E_1^0 为沿纤维方向名义弹性模量; V_f 为纤维体积分数。

(3) 分析结果及讨论。

在微观模型中,通过改变纤维强度 Weibull 分布的形状参数,可以影响复合材料整体刚度,因此进行多组计算分析,通过微观失效分析进行数据拟合,得到了不同 Weibull 模数下 D 的方程,列于表 4。

表 4 不同 Weibull 模数下 D 的方程

m	表达式
$m=3$	$\frac{N_{m-f}}{N_{m-1}} = \begin{cases} 0 & \sigma_1 \leq 822 \\ -25.84 + 20.3 \exp(2.365 \times 10^{-3} \sigma_1) & \sigma_1 > 822 \end{cases}$
$m=6$	$\frac{N_{m-f}}{N_{m-1}} = \begin{cases} 0 & \sigma_1 \leq 893 \\ 34.34 + 0.243 \exp(4.71 \times 10^{-3} \sigma_1) & \sigma_1 > 893 \end{cases}$
$m=9$	$\frac{N_{m-f}}{N_{m-1}} = \begin{cases} 0 & \sigma_1 \leq 1168 \\ 19.14 + 6.2 \times 10^{-5} \exp(6.63 \times 10^{-3} \sigma_1) & \sigma_1 > 1168 \end{cases}$
$m=12$	$\frac{N_{m-f}}{N_{m-1}} = \begin{cases} 0 & \sigma_1 \leq 1580 \\ 19.15 + 2 \times 10^{-9} \exp(1.01 \times 10^{-2} \sigma_1) & \sigma_1 > 1580 \end{cases}$
$m=15$	$\frac{N_{m-f}}{N_{m-1}} = \begin{cases} 0 & \sigma_1 \leq 1924 \\ 19.15 + 5.5 \times 10^{-13} \exp(1.28 \times 10^{-2} \sigma_1) & \sigma_1 > 1924 \end{cases}$

注: σ_1 为微观失效分析的纤维方向应力。

通过整理微观模型的分析结果,统计失效单元数与载荷,得出了 D ,进而得到了不同的纤维强度离散性下,宏观模型的 E_1 随应力 σ_1 的衰减关系,如图 4 所示。由图 4 可以看出,随着 σ_1 增大到一定值, E_1 会迅速衰减直到分析结束。 $m=3$ 时,宏观模型 E_1 峰值最早出现,变化最为平缓; $m=15$ 时,宏观模型 E_1 峰值出现最晚,变化最为剧烈。

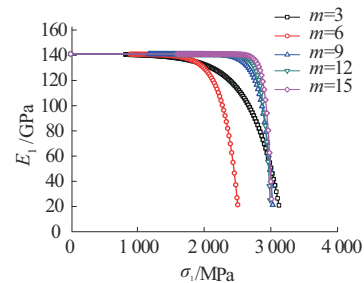


图 4 宏观模型 E_1 随应力 σ_1 的衰减关系

3 算例分析

3.1 纤维缠绕复合材料压力容器模型建立

为了验证复合材料多尺度宏、微观损伤预测方法的正确性,对碳纤维缠绕成型复合材料压力容器进行试算分析,压力容器长 754.5 mm,筒体直径为

228 mm, 基于 ABAQUS 参照实际设计尺寸进行参数化建模, 并加以适当优化, 优化后结构尺寸如图 5 所示。通过 USDFLD 自定义子程序将材料参数输入, 随后定义模型载荷、边界条件等信息, 最后设置分析步并开始计算, 复合材料压力容器宏、微观渐进失效流程如图 5 所示。

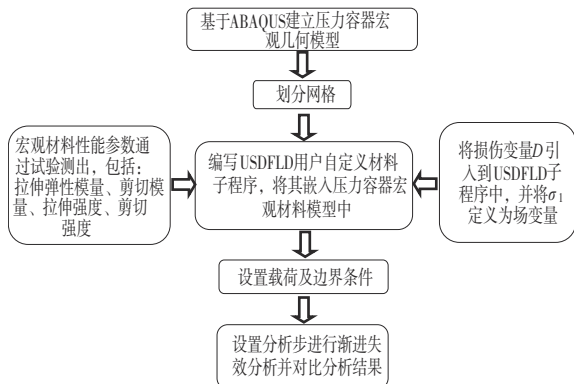


图5 复合材料压力容器宏微观渐进失效分析过程

建立模型时将压力容器模型分割为两部分, 以便于划分网格, 网格单元类型为连续壳单元 CS8R, 单元数量为 4 316, 模型及网格划分如图 6 所示。在 USDFLD 子程序中定义单元所受拉应力为 σ_1 , 损伤变量方程为 $F(\sigma_1)$, 纤维方向模量为 E_1 。通过损伤变量方程, 计算出宏观模型中复合材料在不同应力水平下的 E_1 。在计算 E_1 时采用线性插值运算, 因此 $\Delta\sigma$ 要尽可能减小, 但为减少计算量, 要选取一适当值。设置材料行为时, 需引入一个非独立变量, 同时设置用户定义场材料行为。材料失效准则选用 Hashin 准则, 限制模型绕轴线方向旋转和沿轴线方向位移, 载荷以均匀压强的形式, 分布在压力容器内表面上。

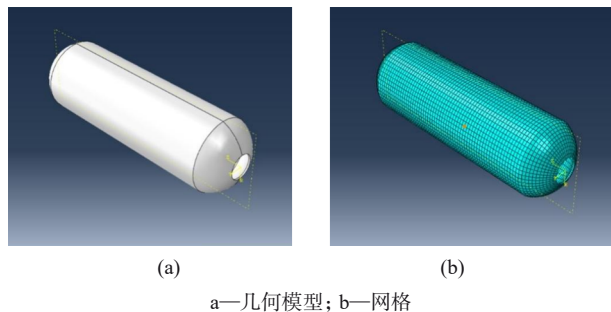
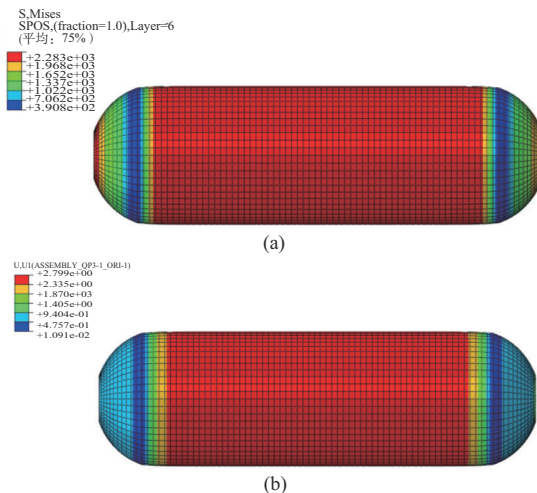


图6 宏观压力容器几何模型和网格划分

3.2 分析结果及讨论

采用标准静力分析, 选用完全牛顿迭代法求解, 调用 Fortran 语言子程序, 进行每次迭代分析。在分析过程中可以发现, 每次迭代完成后, USDFLD

内置功能, 将压力容器沿纤维方向的应力场 σ_1 赋予场变量 FIELD, 再随着 D 变化, 即可实现纤维方向模量 E_1 随 D 的衰减。通过分析计算得到不同 m 值模拟结果, 不同 m 值位移及应力分布相似, 由图 7 可知, 由于压力容器是旋转对称结构, 位移量和 Mises 应力呈环向均匀分布, 压力容器筒体的位移量和 Mises 应力都要高于封头部位, 在筒体和封头交界处位移量和 Mises 应力最低, 位移量分布与应力分布相似, 同样是从压力容器中心到交界处逐渐降低。



a—Mises 应力云图; b—位移量云图

图7 压力容器 Mises 应力及位移量分布云图

不同 m 值压力容器的宏观内压-应变曲线分析结果如图 8 所示。根据分析结果可知, 随着纤维强度离散性的减小, 压力容器损伤起始阶段逐渐延后, 失效过程呈缩短趋势。 $m=3$ 时, 压力容器刚度较早出现下降, 下降趋势较为缓慢, 整体失效过程较长、较平缓; 当 $m=15$ 时, 失效起始较晚, 失效过程剧烈, 压力容器在达到最大压力时迅速失效。

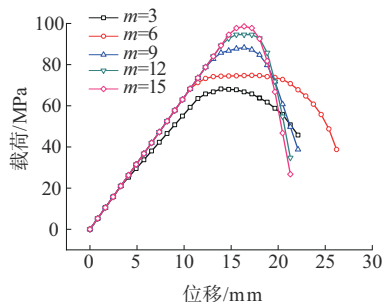


图8 不同 m 值压力容器的宏观内压应变曲线

对于不同 m 值气瓶的宏观爆破压力分析结果如图 9 所示。根据分析结果可知, $m=3$ 时, 爆破压力值为 68.15 MPa; $m=15$ 时, 爆破压力值为 98.55 MPa。

可以看出,随着纤维强度离散性的减小,压力容器的爆破压力呈增长趋势,爆破压力逐步升高。比较 $m=3$ 和 $m=15$ 时压力容器爆破压力,可以看出爆破压力相差巨大。

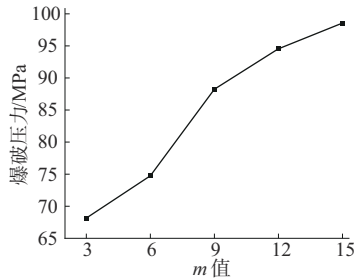


图9 不同 m 值气瓶的宏观爆破压力

4 结语

(1)基于 ANSYS-APDL 对复合材料 RVE 模型进行拉伸失效分析,可以看出,随着 m 值减小,失效单元数量逐渐增加,模型承载能力有所下降。

(2)结合渐进均匀化理论,改变微观模型的纤维强度 Weibull 分布进行分析,结果显示,随着 m 值增加,宏观模型模量 E 随应力 σ_1 增大衰减增加剧烈,峰值出现更晚。

(3)纤维强度的离散性会极大地影响压力容器的宏观爆破压力与失效过程。当纤维强度离散性小时,压力容器的失效起始早、失效过程长、爆破压力低;当纤维强度离散性大时,压力容器失效起始阶段延后、失效过程剧烈、爆破压力高,在达到峰值载荷后迅速失效,因此为了提高压力容器的爆破压力,应重点提高纤维的性能,即极大程度地增大其强度的离散性。

参考文献

- [1] 王婉君,张鹏,贺政豪,等.碳纤维复合材料压力容器的研究进展[J]. 现代化工,2020,40(1):68–71.
Wang Wanjuan, Zhang Peng, He Zhenghao, et al. Research progress on carbon fiber composites-based pressure vessels[J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(1):68–71.
- [2] 薛姝楠,张国,朱海洋,等.复合材料压力容器金属内胆自紧后的屈曲可靠性分析[J]. 复合材料学报,2022,39(10):5 032–5 040.
Xue Shunan, Zhang Guo, Zhu Haiyang, et al. Buckling reliability analysis of the metal liner of composite pressure vessel after autofrettage[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2022, 39(10):5 032–5 040.
- [3] Wang L, Zheng C X, Wei S, et al. Micromechanics-based progressive failure analysis of carbon ber/epoxy composite vessel under combined internal pressure and thermomechanical loading[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 89:77–84.
- [4] Zhang Q, Xu H, Jia X, et al. Design of a 70 MPa type IV hydrogen storage vessel using accurate modeling techniques for dome thickness prediction[J]. Composite Structures, 2020, 236. DOI:10.1016/j.compstruct.2020.111915.
- [5] Hong J H, Han M G, Chang S H. Safety evaluation of 70 MPa-capacity type III hydrogen pressure vessel considering material degradation of composites due to temperature rise[J]. Composite Structures, 2014, 113:127–133.
- [6] Halm D, Fouillen F, Laine E, et al. Composite pressure vessels for hydrogen storage in fire conditions: Fire tests and burst simulation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(31): 20 056–20 070.
- [7] Rafiee R, Torabi M A. Stochastic prediction of burst pressure in composite pressure vessels[J]. Composite Structures, 2017, 185: 573–583.
- [8] Leh D, Saffre P, Francescato P, et al. A progressive failure analysis of a 700-bar type IV hydrogen composite pressure vessel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(38):13 206–13 214.
- [9] Li Z, Ghosh S. Developing space-time dependent boundary conditions for composite RVEs at high strain-rates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2019, 166:197–212.
- [10] Raju B, Hiremath S R, Mahapatra D R. A review of micromechanics based models for effective elastic properties of reinforced polymer matrix composites[J]. Composite Structures, 2018, 204: 607–619.
- [11] Blassiau S, Thionnet A, Bunsell A R. Micromechanisms of load transfer in a unidirectional carbon fibre-reinforced epoxy composite due to fibre failures: Part 3. Multiscale reconstruction of composite behaviour[J]. Composite Structures, 2008, 83(3): 312–323.
- [12] Blassiau S, Thionnet A, Bunsell A R. Micromechanisms of load transfer in a unidirectional carbon fibre-reinforced epoxy composite due to fibre failures. Part I : micromechanisms and 3D analysis of load transfer : The elastic case[J]. Composite Structures, 2006, 74(3):303–318.
- [13] Camara S, Binsell A R, Thionnet A, et al. Determination of lifetime probabilities of carbon fibre composite plates and pressure vessels for hydrogen storage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(10):6 031–6 038.
- [14] Liu P F, Chu J K, Hou S J, et al. Micromechanical damage modeling and multiscale progressive failure analysis of composite pressure vessel[J]. Computational Materials Science, 2012, 60: 137–148.
- [15] Ren M F, Chang X, Xu H Y, et al. Trans-scale analysis of composite overwrapped pressure vessel at cryogenic temperature[J]. Composite Structures, 2016, 160:1 339–1 347.
- [16] 雷友锋,宋迎东,高德平,等.纤维增强复合材料结构的宏微观一体化分析方法[J]. 机械科学与技术,2002(4):617–619,632.
Lei Youfeng, Song Yingdong, Gao Deping, et al. A unified method for macroscopic and mesoscopic analysis of fiber reinforced

- composite structures[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2002(4):617-619, 632.
- [17] 刘涛,刘丰华,蔡长春,等.单向纤维增强铝基复合材料轴向剪切损伤与失效行为的微观力学分析[J].塑性工程学报,2022,29(7):171-180.
- Liu Tao, Liu Fenghua, Cai Changchun, et al. Micromechanics analysis of axial shear damage and failure behavior of unidirectional fiber-reinforced aluminum matrix composites[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(7):171-180.
- [18] 侯少静. 铝内衬碳纤维增强复合材料储氢气瓶多尺度失效性能分析[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- Hou Shaojing. Multiscale failure analysis of aluminum-lined carbon fiber composite cylinders[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [19] 吴毅彬. 基于Weibull概率分布的纤维增强复合材料损伤演化分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(8):49-53.
- Wu Yibin. Damage evolution analysis of fiber reinforced composites based on Weibull probability distribution[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(8):49-53.
- [20] Lei W S. Statistics of single-fibre tensile strength incorporating spatial distribution of microcracks[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2016, 39(11):1 337-1 351.
- [21] 李力,黄哲峰,杨增钦,等.基于三维Puck失效准则及唯象模量退化的复合材料臂杆屈曲分析[J].复合材料学报,2019,36(2):304-314.
- Li Li, Huang Zhefeng, Yang Zengqin, et al. Buckling analysis of composite arm based on 3D Puck failure criterion and phenomenological modulus degradation method[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2019, 36(2):304-314.
- [22] Puck A, Schürmann H. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models[J]. Failure Criteria in Fibre-Reinforced-Polymer Composites, 1998, 58(7): 1 045-1 067.
- [23] 李玺,李亚智,磨承杰,等.基于连续损伤力学的复合材料多钉连接失效分析和试验研究[J].机械强度,2022,44(4):911-920.
- Li Xi, Li Yazhi, Mo Chengjie, et al. Failure analysis and experimental study of composite multi-pin connections based on continuum damage mechanics[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4):911-920.
- [24] 田达,傅宏俊,吴利伟,等.增韧复合材料的G_I断裂韧性有限元模拟[J].玻璃钢/复合材料,2018(1):18-22.
- Tian Da, Fu Hongjun, Wu Liwei, et al. Finite element simulation of G_I fracture toughness of toughened composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(1):18-22.
- [25] 朱子剑,孙耀宁,巴吾东·依不拉音,等.纤维增强复合材料风机叶片宏观一体化有限元分析[J].计算力学学报,2016,33(3):377-380.
- Zhu Zijian, Sun Yaoning, Bawudong·Yibulayin, et al. An unified FEM for macroscopic and mesoscopic analysis of fiber reinforced composite fan blades[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2016, 33(3):377-380.
- [26] Pinho-da-Cruz J, Oliveira J A, Teixeira-Dias F. Asymptotic homogenisation in linear elasticity. Part I: Mathematical formulation and finite element modelling[J]. Computational Materials Science, 2009, 45(4):1 073-1 080.
- [27] 张延林,姜雪光.基于渐进均匀化理论的复合材料力学性能预测[J].沈阳工业大学学报,2017,39(5):507-512.
- Zhang Yanlin, Jiang Xueguang. Mechanical property prediction of composites based on asymptotic homogenization theory[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2017, 39(5): 507-512.
- [28] 谢桂兰,赵锦泉,田杰,等.均匀化有限元法预测复合材料层合板宏观有效弹性性能[J].玻璃钢/复合材料,2014(7):23-27.
- Xie Guilan, Zhao Jinxiao, Tian Jie, et al. Homogenization finite element method to predict the macroscopic effective elastic properties of composite laminates[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(7):23-27.
- [29] 薛普,秦绪国,苏伟,等.局部冲击下复合材料蜂窝夹芯结构的失效行为与吸能机理[J].导弹与航天运载技术,2022(5):126-131.
- Xue Pu, Qin Xuguo, Su Wei, et al. Damage behavior and energy absorption mechanisms of composite honeycomb sandwich structures under local impacts[J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(5): 126-131.