三维编织复合材料强度的数值预报

卢子兴 刘振国 麦汉超 陈作荣
(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

摘 要: 在实验研究和有限元分析的基础上,提出了一种经验性强度失效判据,并利用刚度预报的模型和有限元分析的结果,进一步提出了强度预报的方法. 强度计算的结果表明: 预测值与拉伸实验的结果基本相符.

关 键 词: 失效判据; 纤维强度; 有限元分析; 复合材料
中图分类号: O 341; TB 332
文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2002)05-0563-03

三维编织复合材料(四向或五向)是一种新型的结构材料,由于其具有良好的综合性能指标,如强度、刚度、抗冲击性和耐烧蚀性等,因而在航空、航天领域倍受关注. 近些年来,虽然国内外已发表了不少编织复合材料力学性能的研究文献[1]~[3],但它们主要讨论了这类材料的弹性性质,对材料强度的研究仍处于探索阶段. 由于目前还没有很好地建立这种材料的强度失效准则,所以三维编织复合材料的强度预报问题仍然是国际上公认的一个难题. 为了满足工程的需要,本文在实验研究[4]和有限元分析[5]的基础上,基于工程观点提出了一种经验性强度失效判据,并且利用刚度预报的模型和有限元分析的结果,进一步提出了强度预报的方法.

1 强度失效判据的建立

对于三维编织复合材料来说,由于其细观失效机理尚不清楚,且无法求得解析形式的应力分布,所以很难建立解析形式的细观失效准则. 同时,由于宏观失效准则的确定一般也要依赖于大量复杂应力状态下的实验结果,所以,目前也不存在普遍适用的宏观失效准则. 因此,人们只能基于层板的相应理论来对三维编织复合材料进行强度分析,故而一般不能满足工程设计的实际需要.

考虑到国内外研究的现状,本文提出了一种适用于三维编织复合材料强度预报的经验性失效判据. 其基本思想是: 利用刚度预报中的典型体胞模型(图 1)进行有限元分析,由此可以确定出三维编织复合材料内各点的应力分布情况. 因此,可以认为三维编织复合材料基体内的应力和纤维束(作为整体)内的应力是已知的. 在体胞模型中,纤维束实际上是单向复合材料,故而可以看作是横观各向同性的. 如果分别就基体和纤维束来考虑它们的强度失效问题,则会使问题的分析得到很大的简化. 因为对基体材料通常假设是各向同性的,所以可用各向同性的强度理论作为失效准则. 通过比较研究证明: 采用米赛斯(Mises)破坏准则较为合适,它的具体形式为[6]

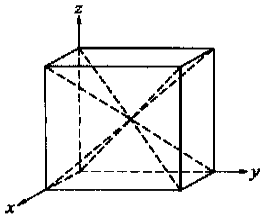


图 1 典型体胞模型

$$(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2+6(\tau_{12}^2+\tau_{23}^2+\tau_{31}^2)=2\sigma_m^2 \quad (1)$$

其中, σ_1, σ_2, σ_3 和 τ_{12}, τ_{23}, τ_{31} 代表材料内一点的应力状态; σ_m 为基体材料的强度. 对环氧树脂拉伸强度取为 80 MPa, 压缩强度取为 79 MPa. 因为纤维束是单向复合材料,认为是横观各向同性的,所以可以使用现有复合材料的强度理论作为准则. 通过各种宏观强度理论的比较,不难证明: 选用霍夫曼(Hoffman)强度理论比较合适,它的具体形式为[6]

$$C_1(\sigma_1-\sigma_2)^2+C_2(\sigma_2-\sigma_3)^2+C_3(\sigma_3-\sigma_1)^2+C_4\sigma_1+C_5\sigma_2+C_6\sigma_3+C_7\tau_{23}^2+C_8\tau_{31}^2+C_9\tau_{12}^2=1 \quad (2)$$

其中 $C_1=\frac{1}{YY'}-\frac{1}{2}\frac{1}{XX'}$ $C_2=C_3=\frac{1}{2}\frac{1}{XX'}$

收稿日期: 2001-02-22
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10072007)
作者简介: 卢子兴(1960-),男,河北枣强人,教授,100083,北京.

$$C_4 = \frac{X' - X}{XX'} \qquad C_5 = C_6 = \frac{Y' - Y}{YY'}$$

$$C_7 = \frac{1}{(S^*)^2} \qquad C_8 = C_9 = \frac{1}{S^2}$$

式中, X, X' 和 Y, Y' 分别为单向复合材料的轴向拉、压强度和横向拉、压强度; S^* 和 S 分别为单向复合材料的面内剪切强度和面外剪切强度. 考虑到单向复合材料力学的研究相对比较成熟, 已存在一些与实验符合较好的经验公式, 故在计算中可以直接引用. 下面列出有关的结果[7], [8], 其中拉伸强度

$$\left.\begin{aligned} X &= \sigma_f V_f + \sigma_m^* V_m \\ Y &= \left[1 - \left(\sqrt{V_f} - V_f\right)\left(1 - \frac{E_m}{E_{f2}}\right)\right]\sigma_m \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

压缩强度

$$\left.\begin{aligned} X' &= \bar{\sigma_f}\left(V_f + \frac{E_m}{E_f}V_m\right) \text{ 或 } \frac{E\varepsilon_{mu}}{\nu}(1 - V_f^{1/3}) \\ Y' &= \left[1 - \left(\sqrt{V_f} - V_f\right)\left(1 - \frac{E_m}{E_{f2}}\right)\right]\bar{\sigma_m} \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

剪切强度

$$\left.\begin{aligned} S &= \tau_f V_f + \tau_m V_m \\ S^* &= \left[1 - (\sqrt{V_f} - V_f)\left(1 - \frac{G_m}{G_{f12}}\right)\right]\tau_m \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

在式(4)中复合材料弹性模量 E 和泊松比 ν 可按照混合律模型进行计算, 其中纤维泊松比和基体泊松比分别取值为0.2和0.34; 并且上面各式中 V_f 和 V_m 分别代表纤维体积比和树脂体积比; E_f 和 E_m 分别代表纤维轴向弹性模量和基体弹性模量(取值为 220 GPa 和4.5 GPa); σ_f 为纤维拉伸破坏强度(取值为 3 GPa); σ_m^* 为对应纤维断裂应变的基体拉伸应力(取值为70.6 MPa); σ_m 为树脂拉伸断裂强度(取值为 80 MPa); E_{f2}为纤维的横向弹性模量(取值为13.8 GPa); G_{f12}为纤维的剪切模量(取值为9.0 GPa); $\bar{\sigma_f}$ 为纤维的压缩强度(取值为2.07 GPa); $\bar{\sigma_m}$ 为树脂压缩破坏强度(取值为 79 MPa); ε_{mu}为树脂的拉伸断裂应变(取值为1.7%); τ_f 和 τ_m 分别为纤维的剪切破坏强度和树脂的剪切破坏强度(取值分别为 943 MPa 和 46 MPa).

基于上面强度理论和有关公式, 利用有限元应力分析的结果即可对基体和纤维束的破坏进行判断, 这样就找到了一种判断编织复合材料是否失效的方法, 同时也提供了一种编织复合材料的强度失效判据. 即: 根据部分宏观实验的结果, 按照其极限强度给编织复合材料典型体胞加载, 由此便可确定该体胞内的应力分布; 然后, 利用基体内和纤维束内的应力分布, 由 Mises 准则和 Hoffman 准则来判断体胞内哪些单元内的应力违反了强度准则; 若违反了强度准则, 就认为该单元已经失效, 这样便可计算出编织复合材料破坏时失效单元的体积比 J_c. 若将此体积比 J_c 作为临界值, 则由有限次宏观实验的结果不难给出该临界值随工艺参数变化的曲线(见图 2). 利用这一曲线, 便可建立编织复合材料强度的一种失效判据. 显然, 对于任意给定编织角的复合材料, 均可由典型体胞模型计算出该复合材料在拉伸加载下的应力分布, 然后分别对基体和纤维束检查其违反准则单元的体积比 J 是否大于临界体积比 J_c, 若 $J \geqslant J_c$, 则认为编织复合材料已经失效. 否则, 复合材料还可以继续承载. 这样, 由编织复合材料失效时对应的应力分布, 便可确定材料的破坏载荷或极限强度.

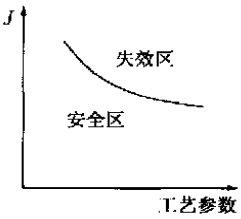


图 2 编织复合材料失效判据示意图

2 编织复合材料强度预报

基于上述方法, 编制了编织复合材料强度计算的软件. 这里需要说明的是, 在强度计算时可直接采用有限元模型计算的模量结果, 因为实验测得的弹性模量值与有限元数值预报的结果非常接近[5]. 另外, 通过有限次不同编织角、不同纤维体积含量的编织复合材料的拉伸实验便可确定它们的主要力学性能参数, 如弹性模量、断裂强度和断裂应变等. 拉伸实验所提供的断裂强度值为建立编织复合材料的宏观失效判据奠定了必要的实验基础. 这样, 将编织复合材料强度计算软件与刚度计算软件综合在一起, 通过与用户界面的结合便形成了完整的三维编织复合材料力学性能的预报系统. 关于编织复合材料刚度的预报以及与实验结果的比较已在文献[5]中进行了报道, 这里仅给出强度的预报结果.

图3 给出了 2 种不同体积比情况下编织复合

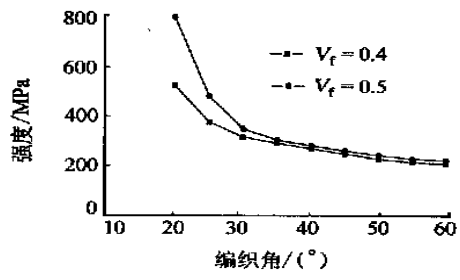


图 3 编织复合材料强度随编织角的变化

材料的强度随编织角变化的曲线, 可见编织角对材料强度的影响是明显的, 并且编织角小于 30° 时, 这种影响非常强烈. 但是, 当编织角超过 30° 后, 材料的强度变化趋于平缓. 因此, 30° 左右的编织角对应编织复合材料强度发生剧变的一个过渡区. 过渡区两边所对应的材料强度及其失效的机制是不同的, 即小编织角的复合材料强度较高, 但比较脆; 而编织角大的复合材料强度较低, 但变形能力明显增加. 这些结果与实验观察得到的结论是一致的[4]. 此外, 由图 3 的曲线不难看出, 纤维体积比对强度的影响在小编织角范围内较明显, 并且随编织角减小其影响反而增大. 图 4 给出了 2 种不同编织角情况下复合材料的强度随纤维体积比的变化曲线, 可见编织角小于 30° 的复合材料的强度随纤维体积比变化的规律与编织角大于 40° 的复合材料存在着明显不同. 大编织角(大于 40°) 复合材料的强度随纤维体积比的变化有逐渐减弱的趋势(类似于软化), 而小编织角(小于 30°) 复合材料的强度随纤维体积比的变化有逐渐增强的趋势(类似于硬化). 图 4 的结果也表明, 30° ~ 40° 之间的区域确实是编织复合材料强度性质发生剧变的一个过渡区域. 另外, 通过与现有实验资料的比较也证明了本文强度预报的有效性, 即该预报系统预测的结果与拉伸强度的实验值基本上是一致的(见表 1).

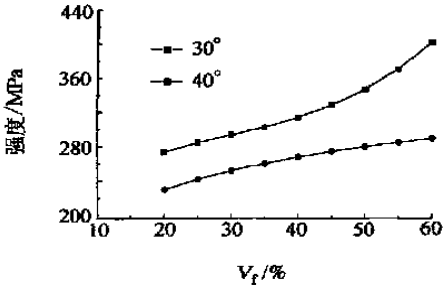


图 4　编织复合材料强度随纤维体积比的变化

表 1　三维四向编织复合材料强度预报值与实验值的比较

编织角/(°)	纤维体积比/%	实验值/MPa	预测值/MPa
21	44	627	588
42	42	224	262
47	45	238	245

3　结　论

1) 基于工程观点和现有复合材料强度理论提出了一种适用于三维编织复合材料强度数值预报的经验性失效判据.

2) 按照所提出的强度预报方法, 编制了计算软件, 与刚度预报软件相结合形成了一套完整的三维编织复合材料力学性能的预报系统.

3) 该系统给出的计算结果表明, 预测结果与三维编织复合材料的拉伸强度实验值基本相符.

致谢: 感谢北京材料工艺研究所冯志海高级工程师对本工作的支持!

参　考　文　献

[1] Yang J M, Ma C L, Chou T W. Fiber inclination model of three-dimensional textile structural composites[J]. J Comp Mater, 1986, 20(5): 472~484.

[2] 吴德隆, 郝兆平. 五向编织结构复合材料的分析模型[J]. 宇航学报, 1993, 14(3): 40~51.

[3] 孙慧玉, 吴长春, 黄传奇. 编织结构复合材料力学性能分析[J]. 航空学报, 1997, 18(4): 458~461.

[4] 卢子兴, 冯志海, 寇长河, 等. 编织复合材料拉伸力学性能的研究[J]. 复合材料学报, 1999, 16(3): 129~134.

[5] 刘振国, 陆　萌, 麦汉超, 等. 三维四向编织复合材料弹性模量数值预报[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(2): 182~185.

[6] 姜稚清, 陈忠安. 复合材料强度[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1993.

[7] 陈华辉, 邓海金, 李　明, 等. 现代复合材料[M]. 北京: 中国物资出版社, 1998.

[8] 王山根, 潘泽民, 邵毓俊, 等. 先进复合材料力学性能与实验技术[M]. 北京: 光明日报出版社, 1987.

Numerical Prediction of Strength for 3D Braided Composites

LU Zi-xing　LIU Zhen-guo　MAI Han-chao　CHEN Zuo-rong

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics)

Abstract: Based on experimental investigation and finite element analysis (FEA) of braided composites, an empirical failure criterion of strength was proposed to meet the need of engineering application. A strength prediction method of 3D braided composites was introduced by using the model of modulus prediction and the results of FEA. Numerical calculation results indicate that the predicted strength of 3D braided composites agrees quite well with the results of tensile experiment.

Key words: failure criteria; fiber strength; finite element analysis; composite materials