

开孔三维编织复合材料强度预测及应力分析

梁双强¹, 张成龙², 陈革^{1,3}, 周其洪¹, KO Frank⁴

(1. 东华大学 机械工程学院, 上海 201620; 2. 东华大学 纺织学院, 上海 201620;
3. 新疆大学 纺织服装学院, 乌鲁木齐 830000; 4. 英属哥伦比亚大学 材料系, 温哥华 V6T1Z4)

摘要:由缺陷引起的应力集中是复合材料结构件使用时需要考虑的工程问题。三维编织复合材料相对于传统复合材料具有优异的损伤容限性能。首先对含缺陷前后三维(3D)编织复合材料的拉伸性能进行试验研究,并通过FGM(fabric geometry model)对其他方向材料性能进行预测。然后基于Abaqus有限元对开孔后孔周边应力分布进行分析,并和Lekhnitskii理论进行了对比,同时对沿孔垂直于在载荷方向应力分布进行了观察。分别基于传统平均应力准则和点应力准则以及基于不同失效准则的渐进失效理论对含开孔三维编织复合材料强度进行预测,并与试验结果进行了对比。结果表明,点应力准则可以很好的预测3D编织复合材料含缺陷拉伸强度,而渐进失效分析可以模拟拉伸过程中的损伤起始,损伤扩展和最终破坏模式。

关键词:三维编织;开孔;强度预测;渐进失效;应力

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2758(2020)04-0889-08

三维(3D)编织复合材料具有优异的损伤容限性能、冲击性能、抗分层以及结构一体化成型等优点,在复合材料领域具有广泛应用前景。

Camponeschi 和 Macander 等^[1-2]首先对不同编织工艺对复合材料力学性能进行了研究,发现采用3×1编织工艺时,3D编织复合材料具有最优的拉伸性能,同时发现切边效应对三维编织复合材料力学性能影响极大。Gause 等^[3]对三维编织复合材料的损伤容限性能进行了评估,发现含开孔时,三维编织复合材料可以保留最高的剩余强度,该发现使得三维编织复合材料得到了极大关注。Ko^[4-5]首次提出三维编织复合材料单胞模型以及FGM对材料的力学性能进行预测,使得三维编织复合材料的数值预测成为可能。Xu、Fang 和 Zhang 等^[6-8]基于有限元采用单胞模型对三维编织复合材料进行了均质化分析。Sun 等^[9]通过数字单元方法对三维编织复合材料材料性能进行预测。Carvelli 等^[10]对三维编织复合材料疲劳性能进行了分析,发现三维编织复合材料在所有纺织复合材料中具有最好的拉伸疲劳性

能。徐焜、李典森和曹海建等^[11-13]通过试验对三维编织复合材料拉伸和压缩性能进行了研究。郑锡涛等^[14]对三维编织复合材料冲击后压缩性能进行了研究。关志东等^[15-16]采用渐进失效对含开孔层合板在拉伸和压缩载荷下的失效进行了分析,发现其模型可以很好地预测含开孔层合板的损伤起始、扩展和失效强度。Xu 等^[17]尝试采用断裂力学方法对含开孔层合板强度进行预测。综上所述,关于三维编织复合材料的研究多针对材料性能试验研究或者单胞均质化研究,而关于三维编织复合材料含缺陷时的力学分析则鲜有报导。传统层合复合材料对于缺陷非常敏感,优异的损伤容限性能是三维编织复合材料得以应用的最重要的原因。因此开展缺陷对三维编织复合材料力学性能的影响研究,对三维编织复合材料工程应用具有重要参考价值。本文首先对拉伸载荷下开孔三维编织复合材料含强度进行试验研究,同时观察缺陷造成的应力再分布,并基于渐进损伤分析方法和传统含缺陷失效准则对开孔后三维编织复合材料缺陷强度进行了预测。

收稿日期:2019-10-20

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0303300)资助

作者简介:梁双强(1991—),东华大学博士研究生,主要从事纺织复合材料力学及疲劳性能研究。

通信作者:陈革(1967—),东华大学教授,主要从事新型纺织机械及机电一体化研究。E-mail: chenge@dhu.edu.cn

1 试验研究

1.1 试验设计

试验件采用 HEXCEL AS4-6K 碳纤维作为增强材料, WEST SYSTEM 105 系列环氧树脂作为基体材料。预制件为基本编织结构(三维四向),在四步法(1×1)三维编织机加工完成预制件,预制件如图 1 所示。3D 编织复合材料的制备采用 RTM 工艺(树脂传递成型)。



图 1 三维编织复合材料预制件

根据美国标准协会复合材料压缩性能测试标准 ASTM D3039^[18] 和复合材料含开孔压缩性能测试标准 ASTM D5766^[19] 制备标准试验件,无缺陷和含缺陷试验件的尺寸分别如图 2a) 和 2b) 所示,实际试验件如图 2c) 和 2d) 所示。对于无缺陷试验件,在加持端由于应力集中容易造成试验件断裂,应在试验件两端贴保护片,如图 2b) 所示。含缺陷试验件拉伸时未贴保护片。缺陷为机械加工圆孔,如图 2c) 所示,试验件孔直径为 5 mm。

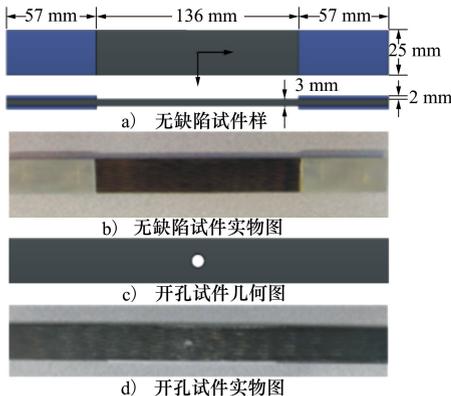


图 2 试件尺寸和几何形状

不含缺陷和含缺陷三维编织复合材料试验件的准静态拉伸试验步骤分别参照 ASTM D3039 和 D5766 进行。每组样品应取 5 个有效数据试验以获得其平均强度和弹性模量。试验机为 INSTRON 测试系统,试验过程中拉伸速率为 2 mm/min。

1.2 试验结果

试件拉伸性能如表 1 所示。可以看出,无开孔时试件强度为 1 279 MPa,失效应变为 1.76%;引入开孔缺陷后,试件强度降低为 951 MPa,断裂应变为 1.3%。引入缺陷后 3D 编织复合材料仍然可以保留高达 84%的剩余拉伸强度,但引入开孔后会加速试件失效。含开孔试件拉伸断裂形态和断裂截面如图 3 所示,含开孔 3D 编织复合材料在拉伸载荷下失效模式主要为沿孔横向断裂。

表 1 3D 编织复合材料拉伸性能

三维编织试件	E_x /GPa	σ_x^U /MPa	ϵ_x^U /%
无缺陷	72.32±2.5	1 279.41±80	1.76±0.12
缺陷		951.32±45	1.3±0.14

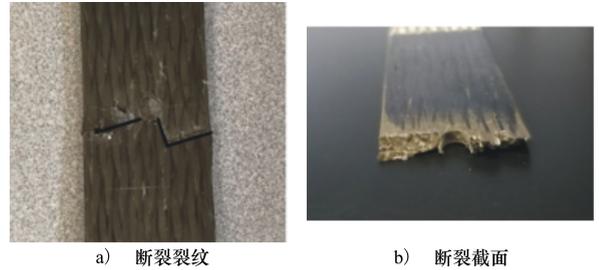


图 3 试件断裂形态

2 开孔三维编织复合材料强度预测模型

2.1 传统开孔强度准则判准

在层合板开孔板拉伸强度预测研究方面,研究方法主要有孔边应力法和逐渐损伤分析方法。而 Whitney 等^[20-21]提出的点应力失效准则(PSC)和平均应力失效准则(ASC),由于便于实施,虽然预测的强度一般小于实际的承载能力,但是在层合板强度预测中应用广泛。此处采用这 2 种准则对开孔三维编织复合材料板剩余强度进行预测,下面对这 2 种准则进行介绍。

应力分布从 B 点开始至无穷远处应力逐渐递减,其分布服从(1)式^[22]

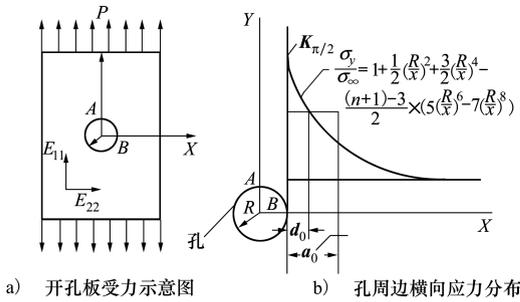


图 4 孔周边应力分析

$$\sigma_y(x, 0) = \frac{\sigma_\infty}{2} \left[2 + \left(\frac{R}{x}\right)^2 + 3\left(\frac{R}{x}\right)^4 - (K_T^\infty - 3) \cdot \left(5\left(\frac{R}{x}\right)^6 - 7\left(\frac{R}{x}\right)^8\right) \right] \quad x > R \quad (1)$$

此处

$$K_T^\infty = 1 + \frac{2}{\sqrt{A_{22}}} \left(\sqrt{A_{11}A_{22}} - A_{12} + \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{2A_{66}} \right) \quad (2)$$

K_T^∞ 为孔边缘应力集中系数; $A_{ij} (i, j = 1, 2, 6)$ 为面内刚度系数, 1 方向为平行于载荷方向, 2 方向为垂直与载荷方向。同时 K_T^∞ 可用工程常数来表示^[23]

$$K_T^\infty = 1 + \sqrt{2 \left(\frac{E_{22}}{E_{11}} - \nu_{12} \right) + \frac{E_{22}}{G_{12}}} \quad (3)$$

式中: σ_∞ 为沿 X 轴无穷远处应力, 即为载荷 P; E_{11} , E_{22} , ν_{12} , G_{12} 为三维编织复合材料性能参数, E_{11} 为最大弹性模量方向, 本例为拉伸载荷方向。

点应力失效准则 (PSC):

Nuismer 和 Whitney^[20-21] 通过 (1) 式获得点应力准则, PSC 假定试件应力 σ_y 距离开孔一定长度 d_0 时等于试件无缺陷强度, 即为

$$\sigma_y(x, 0) |_{x=R+d_0} = \sigma_0 \quad (4)$$

因为应力集中系数在点 $(d_0, 0)$ 针对不同孔尺寸是不同的, 因此该方法可以用来预测不同尺寸对缺陷强度的影响。则推导出含开孔缺陷时试件强度为

$$\sigma_N = \frac{2\sigma_0}{2 + \zeta_0^{-2} + 3\zeta_0^{-4} - (K_T - 3)(5\zeta_0^{-6} - 7\zeta_0^{-8})} \quad (5)$$

式中

$$\zeta_0 = \frac{a + d_0}{a}$$

平均应力准则 (ASC):

该应力准则考虑力在一定特征长度内的平均应力等于试件强度时则含缺陷试件失效, 即在距离开孔边界一定长度 a_0 内的平均 σ_y 等于或者大于无缺陷板的强度

$$\frac{1}{a_0} \int_R^{R+a_0} \sigma_y(x, 0) dx = \sigma_0 \quad (6)$$

则含开孔缺陷时试件强度为

$$\sigma_N = \frac{\sigma_0 \cdot 2(1 - \xi_2)}{2 - \xi_2^2 - \xi_2^4 + (K_T^\infty - 3)(\xi_2^6 - \xi_2^8)} \quad (7)$$

式中:

$$\xi_2 = \frac{R}{R + a_0}$$

σ_N, σ_0 分别为试件含缺陷强度和不含缺陷强度; d_0, a_0 为经验特征长度。

2.2 渐进失效开孔板强度预测

传统开孔板失效准则实施简单, 但该方法不能模拟构件失效过程。渐进失效分析方法在复合材料失效分析中被广泛采用, 其具体思路为采用一定的损伤失效判定准则和材料性能的刚度折减方法来模拟试件在外界载荷下的损伤起始、扩展和最终破坏模式。

2.2.1 失效准则

本文采用了 Hashin、Tsai-Wu、Puck、Chang-Chang、LaRC02 等不同失效准则, 并对不同准则预测强度进行对比。鉴于 Hashin、Tsai-Wu、Puck 等失效准则已在相关论文中进行了大量介绍, 此处不再赘赘。而损伤演化则采用损伤变量累积的方法, 此处也不再详细介绍。本文主要详细介绍 LaRC02 失效准则^[24]。

LaRC02 准则标识单向复合材料中的纤维失效和基体开裂。纤维失效进一步分为 3 个可能的失效模式: 纤维拉伸失效、基体压缩下的纤维失效、基体拉伸下的纤维压缩失效。基体开裂也可分为 3 个可能的失效模式: 拉伸形式的基体开裂、压缩形式的基体开裂、适度双轴压缩下的基体开裂。如果失效指数 (F_I) 等于或超过 1.0, 则发生失效 (纤维失效或基体失效)。

纤维拉伸失效:

如果纵向法应力 (σ_{11}) 为正, 拉伸纤维失效准则为

$$F_{I_f} = \frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{1T}} \quad (8)$$

ε_{11} 是当前纵向应变, ε_{1T} 是纤维拉伸失效下的

纵向应变。

基体压缩下的纤维压缩失效有 2 种可能:

如果横向法向应力(σ_{22}^m) 为正,则

$$F_{I_F} = \left(\frac{\sigma_{22}^m}{Y^T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}^m}{S^L} \right)^2 \quad (9)$$

如果横向法向应力(σ_{22}^m) 为负,则

$$F_{I_F} = \left\langle \frac{|\tau_{12}^m| + \eta^L \sigma_{22}^m}{S^L} \right\rangle \quad (10)$$

此处

$$\sigma_{22}^m = \sin^2 \phi \sigma_{11} + \cos^2 \phi \sigma_{22} - 2 \sin \phi \cos \phi \tau_{12} \quad (11)$$

$$\tau_{12}^m = -\sin \phi \cos \phi \sigma_{11} + \sin \phi \cos \phi \sigma_{22} + (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi) \tau_{12} \quad (12)$$

$$\eta^L = -\frac{S^L \cos 2\alpha_0}{Y^C \cos^2 \alpha_0} \quad (13)$$

$$\phi = \frac{\tau_{12}(G_{12} - X^C) \phi^C}{G_{12} + \sigma_{11} - \sigma_{22}} \quad (14)$$

$$\phi^C = \tan^{-1} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - 4 \left(\frac{S^L}{X^C} + \eta^L \right) \left(\frac{S^L}{X^C} \right)}}{2 \left(\frac{S^L}{X^C} + \eta^L \right)} \right) \quad (15)$$

拉伸基体失效

表 2 3D 编织复合材料强度和性能常数

S_{11}/MPa (试验)	S_{11}/MPa	S_{22}/MPa	$-S_{11}/\text{MPa}$	$-S_{22}/\text{MPa}$	S_{12}/MPa	S_{23}/MPa
1 279.41	1 400.28	500.08	-700.07	600.14	350.13	101.13
E_{11}/GPa (试验)	E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	G_{12}/GPa	G_{23}/GPa	ν_{12}	ν_{23}
72.32	74.51	22.12	6.9	4.6	0.34	0.48

2.2.3 开孔板有限元模型

开孔板模型及其网格离散如图 5 所示。



图 5 有限元模型网格图

本文中有有限元分析基于商用软件 Abaqus/Standard 平台,通过用户子程序 UMAT 来定义材料属性、损伤准则和刚度折减方法。复合材料单元采用 C3D8R 实体单元,单元数目为 13 656。模型尺寸为 25 mm×250 mm×3 mm。由于三维编织无层间概

如果横向法向应力(σ_{22}) 为正,拉伸基体失效准则为

$$F_{I_M} = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (16)$$

$X^T = \sigma_{11}$ 为在纵向拉伸失效下的值, $X^C = \sigma_{11}$ 为在纵向压缩失效下的值, $Y^T = \sigma_{22}$ 为在横向拉伸失效下的值, $S^L = \sigma_{12}$ 为在纵向剪切失效下的绝对值。 α_0 为单轴压缩下破裂面的角度(设置为 53°), ϕ 为失效断裂面的角度。

2.2.2 开孔板材料性能常数

在进行有限元分析时需要 3D 编织复合材料各个方向的材料性能常数。通过试验可以测得三维编织复合材料的纵向弹性模量和纵向拉伸强度,但很难获得材料的所有力学性能参数。此处采用 Ko 等^[5]提出的 FGM 模型来对三维编织材料性能参数进行预测。

试验所得结果与 FGM 所预测的三维编织复合材料的材料性能和强度如表 2 所示。可以发现所预测 1 方向的强度和模量与试验结果非常接近,其余方向所预测材料力学性能参数将用于渐进失效有限元模型中。

念,同时三维编织复合材料本身为一体化结构,因此采用宏观尺度进行建模。同时需要注意的是,本例施加载荷方向为最大材料性能方向。

3 开孔三维编织复合材料强度预测结果

3.1 孔周边应力分析

由图 4 和 Lekhnitskii 理论知,正交各向同性材料圆孔周边最大应力点位于沿 X 轴方向与孔交界处 B 点,应力集中系数 $K_{\sigma/2} = 5.45$ 倍最大载荷;最小应力处位移沿 X 轴与孔交界处,为 -0.71 倍外加载荷,受压应力载荷。由此可以预判在拉伸载荷下,

失效会起始于 B 点。基于 Abaqus 对沿孔周边应力进行分析。施加 40 MPa 载荷时,孔周边应力如图 6 所示。发现此时最大应力值为 275 MPa,为拉应力;最小应力值为 -1.4 MPa,压应力。而根据 Lekhnitskii 理论,最小应力应为 -28 MPa,最大应力应为 205 MPa。可以发现结果有一定误差,但全局应力分布态势较为吻合。后期需要相关试验予以验证,如 DIC 等检测方法。

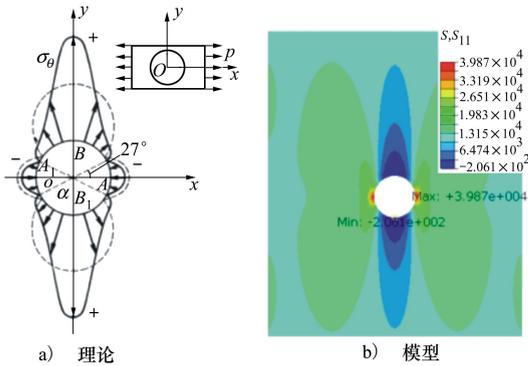


图 6 孔周边应力

三维编织复合材料沿孔边界垂直于载荷方向应力分布如图 7 所示。应力最大值靠近孔边界处,之

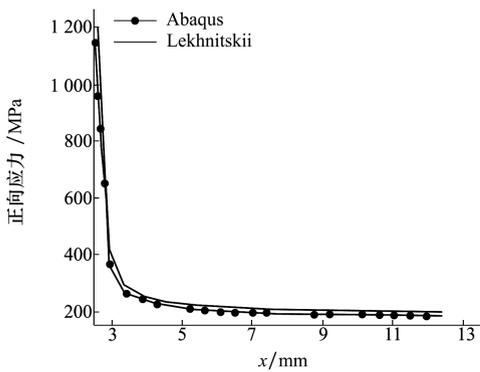


图 7 三维编织复合材料应力分布

后沿 X 轴方向迅速下降,在距离孔边界 6 mm 之后应力集中基本消失,应力值接近施加荷载值。可知, Lekhnitskii 理论分析模型与 Abaqus 模型所得起始端应力集中系数较为一致。

3.2 预测强度结果对比

图 8 为 3D 编织复合材料试验和有限元模型的应力应变曲线。可以看出,有限元模型强度值低于试验结果。主要原因为有限元模型中的计算所得应力集中系数高于试验观察和 Lekhnitskii 理论,会造成试件过早失效,因此有限元方法预测元度值会低于实际值。

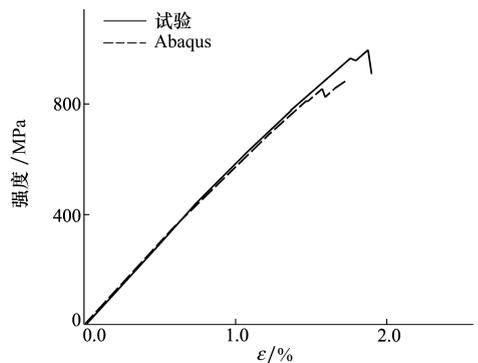


图 8 三维编织复合材料应力-应变曲线

关于含开孔三维编织复合材料强度预测方面,基于 PSC 和 ASC 准则时,特征长度 d_0, a_0 分别取 1.38 mm^[25] 和 3.75 mm^[21];渐进失效分析中材料性能常数基于试验和 FGM 预测结果,见表 2。基于不同失效准则的渐进失效预测强度, PSC 和 ASC 预测强度与试验结果对比如表 3 所示。可以看出所有预测结果均低于试验值,但误差均在 20% 以内。基于 PSC 准则所预测结果最为接近试验值,误差仅为 5%。有限元分析中,基于 LaRCO2 强度准则所得结果误差最小,为 10%。

表 3 3D 编织复合材料试验和理论预测强度对比

无缺陷(试验值)	缺陷(试验值)	Tsai-Wu	Hashin	Puck	LaRCO2	PSC	ASC
1 279.41	951.32	707.25	724.37	746.08	850.17	899.46	687.28

基于 Tsai-Wu 失效准则的三维最终失效形态如图 9 所示。在 Tsai-Wu 失效准则下的开孔试件试件形式为严格横向断裂。基于不同失效准则的失效形态如图 10 所示,可以发现失效形态均较为接近。缺陷均起始于孔周边并沿孔横向演化最终导致试件断裂。基于 LaRCO2 强度准则的三维编织复合材料损

伤演化如图 11 所示。损伤首先为树脂断裂造成,起始于孔周边与载荷方向垂直交界处,然后沿孔横向扩展,最后导致纤维拉伸断裂并导致试件突然断裂失效。该失效准则下试件仿真断裂形态最接近试验结果。

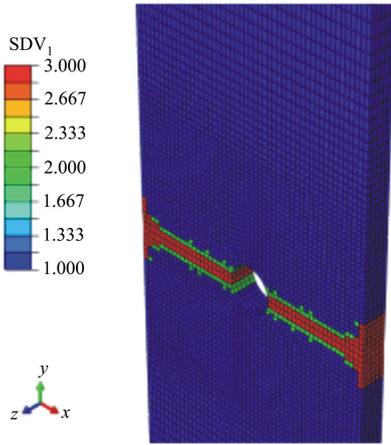


图 9 基于 Tsai-Wu 失效准则失效形态

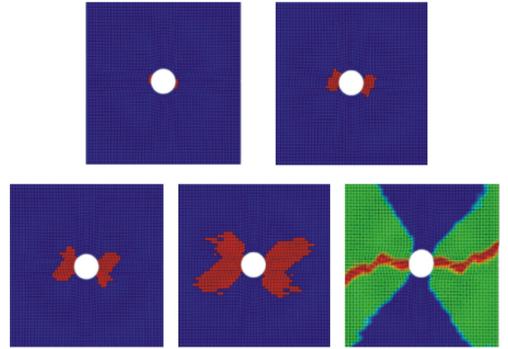


图 11 3D 编织复合材料损伤演化云图

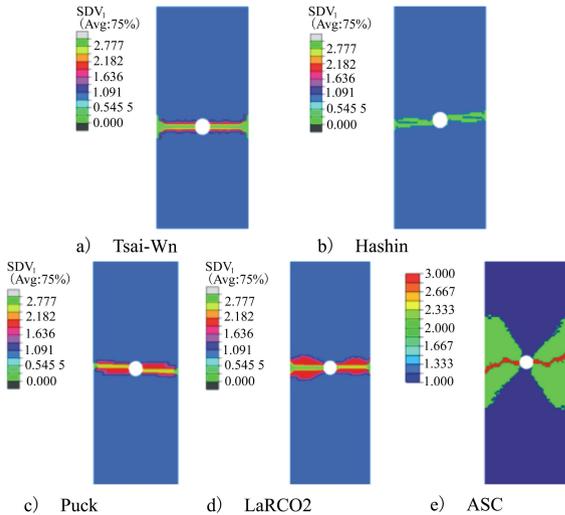


图 10 基于不同失效准则的 3D 编织复合材料失效形态

4 结 论

- 1) 本例中三维编织复合材料引入开口后时够保留 84% 的保剩余拉伸强度。
- 2) 基于 Abaqus 的孔周边和沿孔垂直于载荷方向应力分布与 Lekhnitskii 理论预测较为吻合, 应力集中点位于垂直于载荷方向与孔交界处。
- 3) 含开口三维编织复合材料在拉伸载荷下失效模式为裂纹沿应力集中点萌生并横向扩展, 最终导致结构件失效, 与有限元分析失效形式一致。
- 4) PSC 准则相对 ASC 准则可以更为准确地预测三维编织复合材料含缺陷时的拉伸强度。渐进失效分析时, 基于 LaRC02 失效准则可以较为准确地预测含开口时 3D 编织复合材料的拉伸强度及损伤演化过程。

参考文献:

[1] CAMPONESCHI E T, WALL L, CRANE R M. Theoretical and Experimental Analysis of Multidirectionally-Braided Composites [R]. AB-A172694, 1986

[2] MACANDER A B, CRANE R M, CAMPONESCHI E T. Fabrication and Mechanical Properties of Multidimensionally (XD) Braided Composite Materials[C]//Seventh Conference on Composite Materials: Testing and Design, 1986

[3] GAUSE L W, ALPER J M. Structural Properties of Braided Graphite/Epoxy Composites[J]. Journal of Composites, Technology and Research, 1987, 9(4) : 141-150

[4] KO F K. Tensile Strength and Modulus of a Three-Dimensional Braid Composite[C]//Seventh Conference on Composite Materials: Testing and Design, 1986

[5] KO F K. Three-Dimensional Fabrics for Composites[M]. Philadelphia, Elsevier Science Publishers, 1989: 129-171

[6] XU K, XU X. Finite Element Analysis of Mechanical Properties of 3D Five-Directional Braided Composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 487(1/2) : 499-509

[7] FANG G, JUN L, WANG B L, Progressive Damage and Nonlinear Analysis of 3D Four-Directional Braided Composites under Unidirectional Tension[J]. Composite Structures, 2009, 89(1) : 126-133

[8] ZHANG C, CURIEL-SOSA J, BUI T Q. A Novel Interface Constitutive Model for Prediction of Stiffness and Strength in 3D Brai-

- ded Composites[J]. *Composite Structures*, 2017, 163: 32-43
- [9] SUN X, SUN C. Mechanical Properties of Three-Dimensional Braided Composites[J]. *Composite Structures*, 2004, 65(3/4): 485-492
- [10] CARVELLI V, PAZMINO J, LOMOV S V, et al. Quasi-Static and Fatigue Tensile Behavior of a 3D Rotary Braided Carbon/Epoxy Composite[J]. *Journal of Composite Materials*, 2012, 47(25): 3195-3209
- [11] 徐焜, 许希武, 汪海. 三维六向编织复合材料力学性能的实验研究[J]. *复合材料学报*, 2005, 22(6): 144-149
XUN Kun, XU Xiwu, WANG Hai. Experimental Investigation of the Mechanical Properties of 3D 6-Directional Braided Composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2005, 22(6): 144-149 (in Chinese)
- [12] 李典森, 刘子仙, 卢子兴, 等. 三维五向碳纤维/酚醛编织复合材料的压缩性能及破坏机制[J]. *复合材料学院*, 2008, 25(1): 133-139
LI Diansen, LIU Zixian, LU Zixing, et al. Compressive Properties and Failure Mechanism of Three Dimensional and Five Directional Carbon Fiber/Phenolic Braided Composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(1): 133-139 (in Chinese)
- [13] 曹海建, 钱坤, 徐文新, 等. 三维全五向编织复合材料的压缩性能[J]. *纺织学报*, 2013, 34(8): 68-70
CAO Haijian, QIAN Kun, XU Wenxin, et al. Compressive Properties of Three-Dimensional Full Five-Directional Braided Composites[J]. *Journal of Textile Research*, 2013, 34(8): 68-70 (in Chinese)
- [14] 张迪, 郑锡涛, 杨超. 三维编织复合材料损伤容限性能试验[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(5): 1048-1054
ZHANG Di, ZHENG Xitao, YANG Chao. Damage Tolerance Property Tests of 3D Braided Composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(5): 1048-1054 (in Chinese)
- [15] 关志东, 黎增山, 刘德博, 等. 复合材料层板开孔压缩损伤分析[J]. *复合材料学报*, 2012, 3: 167-172
GUAN Zhidong, LI Zengshan, LIU Debo, et al. Damage Analysis of Open-Hole Compression Laminates[J]. *Acta Materiae Composite Sinica*, 2012, 3: 167-172 (in Chinese)
- [16] 黎增山, 关志东, 何为, 等. 复合材料层板开孔拉伸损伤分析[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(1): 169-175
LI Zengshan, GUAN Zhidong, HE Wei, et al. Damage Analysis of Open-Hole Tension Laminates[J]. *Acta Materiae Composite Sinica*, 2012, 29(1): 169-175 (in Chinese)
- [17] XU X, TAKEDA S I, AOKI Y, et al. Predicting Notched Tensile Strength of Full-Scale Composite Structures from Small Coupons Using Fracture Mechanics[J]. *Composite Structures*, 2017, 180: 386-394
- [18] ASTM. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials[S]. D. 3039/D3039M-11, 1995
- [19] ASTM. Standard Test Method for Open Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates[S]. D5766/D 5766M-11, 2011
- [20] WHITNEY J M, NUISMER R. Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations[J]. *Journal of Composite Materials*, 1974, 8(3): 253-265
- [21] NUISMER R, WHITNEY J M. Uniaxial Failure of Composite Laminates Containing Stress Concentrations Fracture Mechanics of Composites[M]. USA, ASTM Special Technical Rublication, 1975: 117-138
- [22] LEKHNITSKII S G. Anisotropic Plates[M]. New York, Gordon and Breach, 1968
- [23] TAN S C. Stress Concentrations in Laminated Composites[M]. Ohio, CRC Press, 1994
- [24] DAVILA C, NAVIN J, SANJIB G. Failure Criteria for FRP Laminates in Plane Stress[C]//44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2003
- [25] KIM J K, KIM D S, TAKEDA N. Notched Strength and Fracture Criterion in Fabric Composite Plates Containing a Circular Hole [J]. *Journal of Composite Materials*, 1995, 29(7): 982-998

Open-Hole 3D Braided Composites Strength Prediction and Stress Analysis

LIANG Shuangqiang¹, ZHANG Chenglong², CHEN Ge^{1,3},
ZHOU Qihong¹, KO Frank⁴

(1.College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2.College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China;
3.College of Textile and Clothing, Xin Jiang University, Urumchi 830000, China;
4.Department of Material Engineering, University of British Columbia, Vancouver V6T1Z4, Canada)

Abstract: The stress concentration caused by notches is a common engineering issue for composite structure application. 3D braided composite possess excellent damage tolerance compared to common laminates. The tensile properties of 3D braided composite with open-hole and un-notched were experimentally examined. The mechanic properties of 3D braided composite in other directions are predicted using FGM (Fabric Geometry Model) and finite element analysis. The stress distributions around the hole and perpendicular to the loading direction are analyzed based on Abaqus software. The simulation results were compared with Lekhnitskii's analytical study. The open-hole strength of 3D braided composite was predicted respectively using Average stress failure criteria, Point stress failure criteria (PSC), and also the progressive failure analysis based on different failure criteria. The predicted strength results were compared to the experimental values. The results show the PSC predicted strength matched the experiment, while the progressive failure analysis can predict the failure initiation, propagation and final failure mode.

Keywords: 3D braided composite; open-hole; strength prediction; progressive failure; stress; simulation; FGM