

配合条件对C/SiC在线铆接单元的力学性能影响

谭志勇 王捷冰 孟繁夫 李彦斌 钱逸星 刘小冲

Effect of fit conditions on mechanical properties of C/SiC online riveting unit

TAN Zhiyong, WANG Jiebing, MENG Fanfu, LI Yanbin, QIAN Yixing, LIU Xiaochong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220930.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

静力试验中C/SiC构件集成式热结构的声发射特性及与材料测试的对比静力试验中C/SiC构件集成式热结构的声发射特性及与材料测试的对比

Acoustic emission character and comparison with the material test of C/SiC thermal structure with component assembly style in strength experiment

复合材料学报. 2019, 36(6): 1464–1470 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180827.007>

碳纤维增强环氧树脂复合材料层合板结构及间隙尺寸对铆接性能的影响

Carbon fiber composite laminate structure and effect of clearance on riveting properties

复合材料学报. 2018, 35(12): 3280–3287 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180115.008>

GFRP复合材料-轻木夹芯梁弯曲疲劳性能试验

Experimental research on flexural fatigue behavior of GFRP–Balsa sandwich beams

复合材料学报. 2018, 35(5): 1114–1122 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170707.001>

ZrB₂–SiC复相陶瓷涂层制备及其保护C/C–SiC复合材料性能

Preparation and properties of ZrB₂–SiC compound ceramic coating for C/C–SiC composites

复合材料学报. 2018, 35(3): 640–646 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170519.002>

C/C–SiC缎纹编织复合材料孔隙缺陷的建模及其拉伸性能仿真

Modeling of void defects in C/C–SiC satin weave composites and simulation of their tensile properties

复合材料学报. 2020, 37(8): 1969–1980 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191216.001>

碳纤维增强树脂复合材料和铝合金温热自冲铆接工艺及接头力学性能

Joining process and mechanical properties of warm self-piercing riveting for carbon fiber reinforced polymer and aluminum alloy

复合材料学报. 2021, 38(11): 3563–3577 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210105.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

配合条件对 C/SiC 在线铆接单元的力学性能影响



分享本文

谭志勇¹, 王捷冰¹, 孟繁夫¹, 李彦斌^{*2}, 钱逸星³, 刘小冲⁴

(1. 空间物理重点实验室, 北京 100076; 2. 东南大学 机械工程学院, 南京 211189; 3. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191; 4. 西北工业大学 材料学院, 西安 710072)

摘要: 针对化学气相沉积(CVI)工艺 2D C/SiC 材料制备热结构中大量采用的在线铆钉连接形式及地面试验中表现出的特点, 研究了铆钉与平板开孔之间采用间隙或过盈配合不同形式对力学性能的影响。制备了典型含铆钉单元试件并进行了微观形貌观测, 通过铆钉顶出试验得到了不同配合条件下顶出静强度及疲劳规律; 通过不同配合条件下含铆钉试件与开孔试件的拉伸静强度试验, 获得了 C/SiC 在线铆接导致的面内连接强度性能下降的规律; 描述了纤维束变形和材料局部区域破坏的特点, 并依据形貌观测开展了数值计算验证。在此基础上, 针对 C/SiC 过盈配合铆接形式提出了考虑孔边应力集中影响的改进点应力失效准则。结果表明: 过盈配合可以改善铆钉与平板之间的连接可靠性, 显著提高铆钉顶出静强度和疲劳强度, 但过盈配合铆接的工艺过程使得孔边局部碳布纤维产生挤压偏折变形并导致了孔边预应力。

关键词: C/SiC; 在线铆钉连接; 强度性能; 疲劳试验; 配合条件

中图分类号: TB332; V414.8 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2023)07-4270-12

Effect of fit conditions on mechanical properties of C/SiC online riveting unit

TAN Zhiyong¹, WANG Jiebing¹, MENG Fanfu¹, LI Yanbin^{*2}, QIAN Yixing³, LIU Xiaochong⁴

(1. Science and Technology on Space Physical Laboratory, Beijing 100076, China; 2. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 4. School of Material, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: According to the on-line rivet connection forms widely used in chemical vapor infiltration (CVI) process 2D-C/SiC thermal structures and characteristics shown in ground tests, the effects of different forms of clearance or interference fit between rivets and flat openings on mechanical properties were studied. A typical test piece with rivets was prepared and the microscopic morphology was observed. Through rivet push-out test, the push-out static strength and fatigue rules under different matching conditions were obtained. By comparing the tensile static strength of the specimens with rivets and the specimens with holes under different matching conditions, the rule of in-plane strength performance degradation caused by C/SiC online riveting was obtained. The characteristics of fiber bundle deformation, hole edge pre-stress and local area damage of materials were analyzed, and numerical modeling calculation was carried out according to morphology observation. Then, an improved point stress failure criterion (PSC) considering the effect of stress concentration at the hole edge was proposed for C/SiC interference fit riveting. Research shows that interference fit can improve the connection reliability between rivet and hole, significantly improve the push-out static strength and fatigue strength of rivet. But the interference fit riveting process

收稿日期: 2022-08-11; 修回日期: 2022-09-13; 录用日期: 2022-09-22; 网络首发时间: 2022-10-08 15:23:00

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220930.004>

基金项目: 国家自然科学基金 (U20B2002; 52175220); 国防技术基础科研项目 (JSZL2019203 B003; 2021-JCJQ-ZD-054-11); 江苏省自然科学基金 (BK20211558); 东南大学“至善青年学者”支持计划 (2242021 R41109)

National Natural Science Foundation of China (U20B2002; 52175220); Basic Scientific Research Program of National Defense Technology (JSZL2019203 B003; 2021-JCJQ-ZD-054-11); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20211558); Zhishan Youth Scholar Program of SEU (2242021 R41109)

通信作者: 李彦斌, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为飞行器结构设计 E-mail: LYB@seu.edu.cn

引用格式: 谭志勇, 王捷冰, 孟繁夫, 等. 配合条件对 C/SiC 在线铆接单元的力学性能影响 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 4270-4281.

TAN Zhiyong, WANG Jiebing, MENG Fanfu, et al. Effect of fit conditions on mechanical properties of C/SiC online riveting unit[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 4270-4281(in Chinese).

makes the local carbon fiber at the hole edge extrude and deform, which leads to the prestress at the hole edge.

Keywords: C/SiC; online rivet connection; strength character; fatigue test; fitting condition

采用陶瓷基 C/SiC 复合材料制备的热结构已广泛应用于新型高速飞行器^[1]及航空发动机热端部件等^[2]，通过防热承力一体化的结构设计来实现极端使用环境下的性能。由于制备和工艺特点，复杂外形的 C/SiC 材料热结构无法采用传统金属结构的整体设计和制造方式，目前被国内外广泛采用的是基于构件单元组装集成的方法^[3-5]，即采取二维编织预制体增强的薄壁蒙皮与盒段、梁等构件进行集成，而连接是其中的关键性能环节。对连接性能的认识及连接设计的合理性是制约热结构成熟应用的重要因素^[6]。

关于树脂基复合材料连接已开展较多研究，获得了配合尺寸对连接性能影响^[7-8]、开孔的疲劳特性等^[9]，并形成了工程分析方法^[10]。这些虽对 C/SiC 连接问题具有一定借鉴意义，但两者在力学特点和影响机制上还存在较大区别。

对化学气相沉积 (CVI) 的 C/SiC 单元件进行同种材料的在线铆钉连接是制备复杂外形薄壁热结构广泛采用的一种连接形式，具有可适用于复杂形状、实现表面光滑平整、热适配性良好等优点。在多个单元件组装时，往往需要依据具体厚度使用大量不同尺寸的连接铆钉。根据工程需求牵引，学术界也开展了 C/SiC 在线铆钉连接试验、失效表征等研究^[11]，建立了连接模型^[12]并进行了数值仿真^[13]，分析了纤维体积分数对铆接单元性能的影响^[14]、铆接强度对板梁组合体的性能影响^[15]等静强度问题及这种铆钉连接的疲劳特性^[16]等。但这些研究尚未涉及连接配合条件带来的性能影响。

对这种构型的热结构实际应用表明：材料开孔与铆钉之间的接触状态对于连接可靠性具有敏感影响。在间隙配合下铆钉与孔壁之间完全依靠 SiC 填充基体形成的粘接力，而细长孔道间隙又往往难以保证可靠的沉积填充效果，这使连接铆钉由于界面结合力不足经常发生松动和脱落。为解决界面结合力不足的问题，热结构连接制备时常采用铆钉与开孔过盈配合的工艺设计方法，使铆钉装配后形成一定的钉孔初始挤压状态。

但目前在应用和基础研究方面均还缺乏不同装配状态对 C/SiC 在线铆接性能的认识，包括铆钉结合性能及对孔边材料性能的影响。而现有文献^[17-18]对树脂基复合材料连接研究表明，不同

配合条件将显著影响孔边应力集中和残余应力分配，是重要的设计参数。

C/SiC 在线铆接具有特定的材料与力学特点，本文研究了其在不同配合条件下的连接性能。设计制备了含铆钉的典型单元试件并进行细观形貌观测，开展不同配合条件下铆钉顶出静强度和疲劳试验，获得材料顶出静强度和疲劳剩余强度；开展不同配合状态含铆钉试件的拉伸静强度试验，获得 C/SiC 在线铆接对面内连接强度性能的影响；描述了纤维束的变形和材料局部区域破坏特点，并依据形貌观测进行了数值计算验证；针对 C/SiC 过盈配合铆接形式，提出考虑孔边应力集中影响的改进点应力失效准则。

1 铆钉单元试件的设计与形貌观测

采用 CVI 工艺的 C/SiC 热结构在线铆钉连接制备过程如图 1 所示，当材料沉积到约 1.5 g/cm^3 中间密度状态时在壁板连接位置加工开孔，放置固定预加工的 C/SiC 铆钉；然后对产品外露表面适度打磨去掉上次沉积的 SiC 表面壳层后继续沉积，使孔与铆钉之间的缝隙形成 SiC 基体填充；当沉积至最终密度后再切除铆钉多余部分。

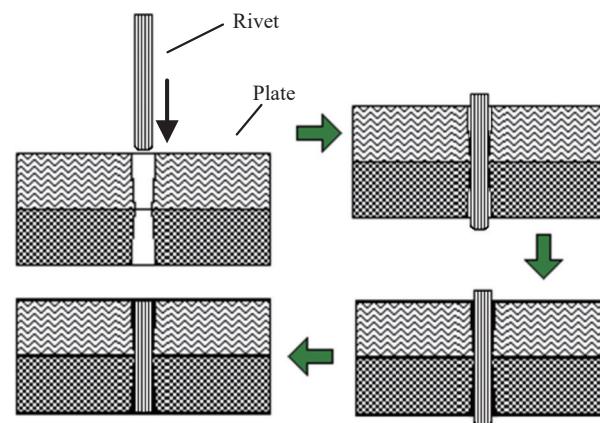
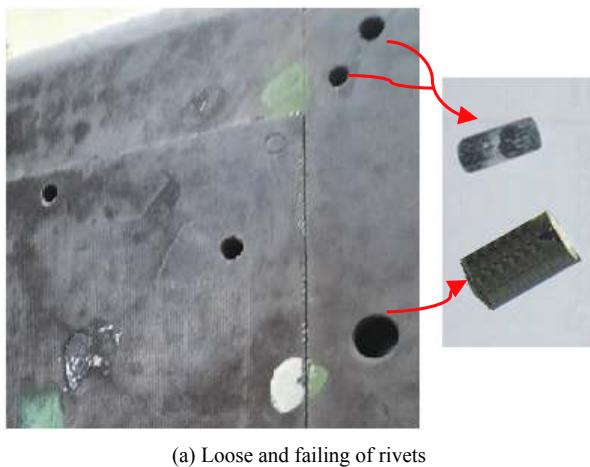


图 1 C/SiC 在线铆钉连接过程示意图

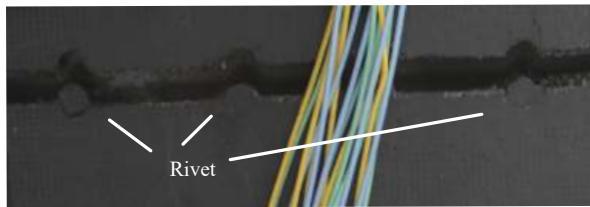
Fig. 1 Diagram of C/SiC online rivet connection process

热结构试验表明，这种在线连接部位的可靠性较低，往往是振动和静强度的薄弱环节，如图 2 所示。因此在研究及试件设计时，需要兼顾对铆钉紧固性及开孔位置的性能评价。

采用该工艺并由西北工业大学超高温复合材料实验室制备了过盈和间隙不同配合状态下的 C/SiC 含铆钉典型单元试件，如图 3 所示。试件



(a) Loose and failing of rivets



(b) Low stress failure of riveted position

Fig. 2 Failure phenomenon of C/SiC online rivet connection part in vibration and strength test

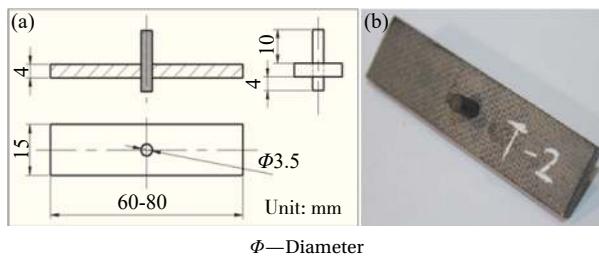
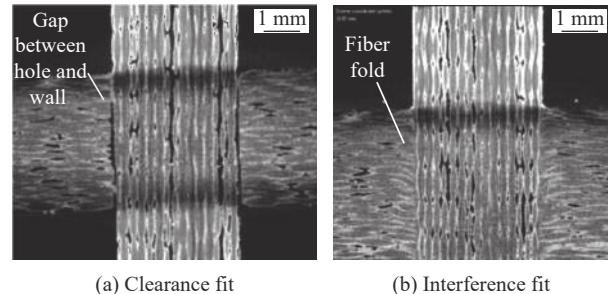


图3 典型铆钉单元试件的设计(a)及实物图(b)

Fig. 3 Design (a) and physical drawings (b) of typical unit specimen with rivets

采用1K规格的T300二维正交($0^\circ/90^\circ$)平纹碳布叠压成型预制体, 纤维体积含量约为40vol%, 最终密度为 1.92 g/cm^3 。铆钉由相同平板机加获得, 为适应装配在其一端加工圆角。C/SiC平板在中心位置采用机加方法, 开理论直径为3.5 mm的孔并进行铆钉装配, 装配时不考虑铆钉铺层方向性的影响。其中过盈装配试件的铆钉/孔之间过盈量控制在0.374~0.505 mm; 间隙装配试件的间隙量为-0.062~0.128 mm。此外还分别加工了单独平板、不同孔径的开孔平板用于对比试验。

对制备完成的试件进行了连接部位的微型计算机断层扫描(μCT)检测, 如图4所示。在间隙装配状态下孔壁/铆钉之间随机存在许多未填充区,



(a) Clearance fit (b) Interference fit

图4 C/SiC 铆接局部的微型计算机断层扫描(μCT)图像

Fig. 4 Partial computed tomography (μCT) images of C/SiC rivet specimen

但孔边的碳布纤维束基本未产生畸变; 而过盈装配状态下基本达到了局部区域的高密度状态, 但孔边的碳布纤维束在铆钉插入的强制挤压作用下发生了明显的偏折和褶皱变形。需关注这两种不同的局部状态对连接性能造成的影响。

2 不同配合条件下C/SiC在线铆接单元强度试验

2.1 C/SiC 铆钉顶出强度试验

由于铆钉难以采用夹持拔出, 而顶出载荷较易施加, 在未查到相关国内外标准的情况下进行的试验设计及现场如图5所示。采用美国Inston 8801型液压伺服疲劳试验机进行铆钉顶出静强度和疲劳强度试验。考虑孔边碳布纤维的偏折方向, 在正式试验前对过盈装配试件进行了不同加载方向的顶出静强度初步对比, 在插入端加载的强度略大但规律性一致, 用于设计时偏安全。由于铆钉插入端具有加工圆角的削弱, 施加载荷时更易造成铆钉的压溃破坏, 故正式试验时加载均选择在铆钉的另一端。

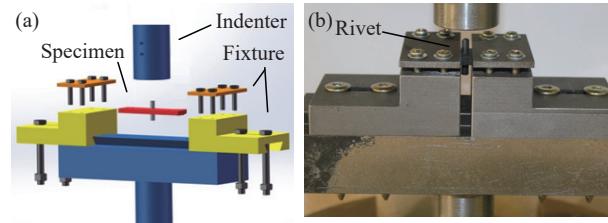


图5 C/SiC 铆钉顶出强度试验的设计(a)及现场情况(b)

Fig. 5 Design (a) and field situation (b) of C/SiC rivet push-out strength test

2.1.1 铆钉顶出静强度试验结果

试验加载速率取 0.5 mm/min , 分别得到钉孔与铆钉在间隙和过盈不同配合条件下的载荷-位移曲线如图6所示, 对应的破坏形貌如图7所示。

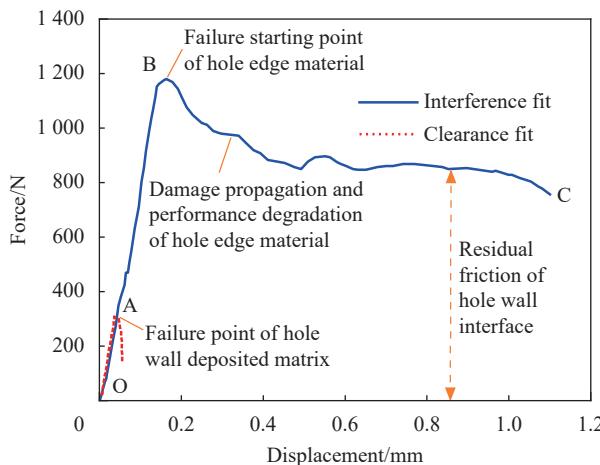


图 6 C/SiC 试件的铆钉顶出静强度载荷-位移曲线对比

Fig. 6 Comparison of static strength load-displacement curves of rivet push-out test pieces of C/SiC

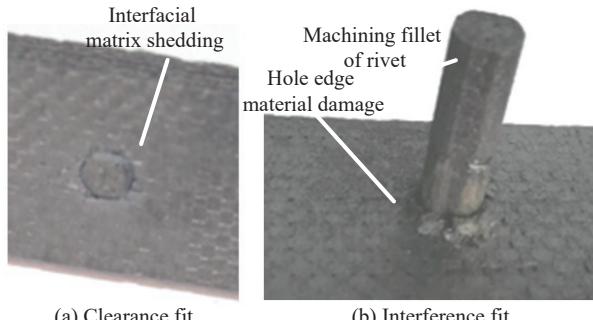


图 7 C/SiC 铆钉单元试件的顶出静强度破坏形貌对比

Fig. 7 Comparison of push-out static strength failure morphology of C/SiC test units with rivets

不同配合条件下试样的破坏形貌差异很大:间隙装配下破坏形式主要是钉孔与铆钉间沉积的 SiC 基体脱落;而过盈装配下的破坏除钉孔与铆钉间沉积 SiC 基体脱落外,主要是 C/SiC 板的孔边局部区域的材料破坏,其破坏具有整体渐进特征,在达到最大载荷之后铆钉仍具有较明显后续承载性能,当铆钉顶出距离为 1 mm 时仍可保持最大顶出强度的近 70%。

分析破坏曲线和破坏形貌得出,间隙装配的连接强度和刚度仅依赖于沉积的 SiC 基体,当发生基体脱落破坏后则瞬时失去承载能力;而过盈装配的顶出破坏可以分为 O-A、A-B、B-C 的 3 个不同阶段:O-A 阶段是由孔壁沉积的 SiC 基体和 C/SiC 板孔边局部区域材料共同承载, SiC 基体刚度较大因而起主要承载作用。在 A 点位置发生沉积基体破坏,并对应出现载荷-位移曲线的刚度变化拐点;A-B 阶段则主要依靠孔边局部区域的材料承载,当达到 B 点时发生距孔壁最近材料的弯

曲破坏;而 B-C 阶段则是孔边 C/SiC 材料破坏扩展和性能衰减。此外可以看出,在铆钉顶出距离增加、孔壁界面明显脱粘后仍然保持着一定的铆钉剩余顶出强度。分析认为这是过盈装配的挤压作用导致了板的孔边局部区域存在一定预应力,在孔边材料发生破坏后该预应力也未完全释放,继续作用在铆钉侧壁形成了界面剩余摩擦力,并提供顶出剩余强度。由于孔边材料损伤增大、预应力不断释放表现出摩擦力效果的逐渐衰减。

由于过盈装配下的破坏形式使孔边材料参与了承载和铆钉顶出过程,导致了更显著破坏且需要耗费更多能量,因而顶出强度比间隙装配下仅依靠界面间沉积 SiC 抗剪性能要明显提高,且韧性更好。间隙装配铆钉平均顶出强度仅为过盈装配的 25% 左右,按照完全填充状态可估算出沉积 SiC 界面剪切强度 τ 约为

$$\tau = \frac{F}{2\pi r_a t_0} \approx \frac{307}{2\pi \times 1.75 \times 4} = 7.0 \text{ MPa} \quad (1)$$

式中: r_a 、 t_0 分别为铆钉理论半径和开孔板厚度; F 为铆钉顶出载荷。

式(1)的结果与材料单位自行测试的 2D-C/SiC 与 2D-C/SiC 直接沉积强度相近^[2]。此外,对破坏极值载荷进行了有限子样条件下的初步统计,间隙装配试件的 3 个有效子样分布于 129.6~306.5 N,过盈装配的 4 个有效子样分布于 913.4~1 225.6 N,对应的离散系数 C_v 分别为 40% 和 14%。表明仅依赖于 SiC 沉积效果的铆钉连接可靠性过低,而过盈配合的铆钉连接性能散差与 C/SiC 材料本身相当。

2.1.2 铆钉顶出疲劳强度试验结果

通过确定性疲劳加载来模拟表征 C/SiC 铆钉连接在过盈及间隙不同装配条件的动力学性能。顶出载荷的加载频率为 1 Hz、应力比 $R=0.1$ 。在试验中发现,这种顶出式加载用于疲劳试验并不理想,随着循环次数的增加很容易导致铆钉加载端发生压溃破坏,这种非正常破坏往往又与铆钉的顶出过程相耦合,使较长循环下有效子样少、误差大。只有不断增大疲劳加载值,在低循环条件下才能得到较完整的顶出破坏。后续应进一步改进这种细小尺寸、脆性难以夹持试件的合理试验方法。

将获得的有限子样试验结果进行数据拟合如图 8 所示,其中间隙装配状态仅用于参考。试件的疲劳破坏形貌与静强度试验基本一致。试验结

果表明, 较间隙装配状态, 过盈装配铆钉的顶出静强度提升了约4倍, 顶出疲劳强度和持续时间分别提升了约3~4倍和1.5倍; 过盈装配下的疲劳寿命和疲劳强度值均明显大于间隙配合。Li等^[19]研究得出C/SiC材料具有在一定疲劳加载后应力强化即剩余强度增加的现象, 而本文结果表明: 铆钉顶出仅在过盈装配条件下, 即在涉及到孔边材料破坏时才具有疲劳剩余强度增加现象。这是由于过盈装配时孔边C/SiC材料在周期性外载荷作用过程中, 具有材料不同组分之间内应力释放、微裂纹均匀化的机制。而在间隙装配条件下是产生孔壁沉积SiC的剪切破坏, 单一组分SiC基体不具备疲劳强化的破坏机制。

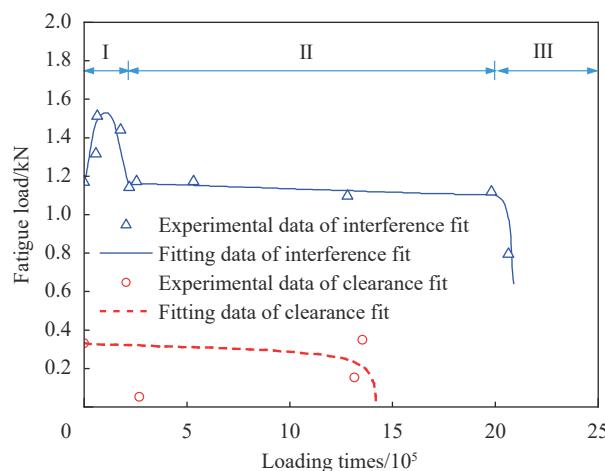


图8 C/SiC铆钉顶出疲劳强度试验测试结果及拟合曲线

Fig. 8 Test results and fitting curves of rivet push-out fatigue strength test of C/SiC

2.2 C/SiC铆钉单元试件的面内拉伸强度试验

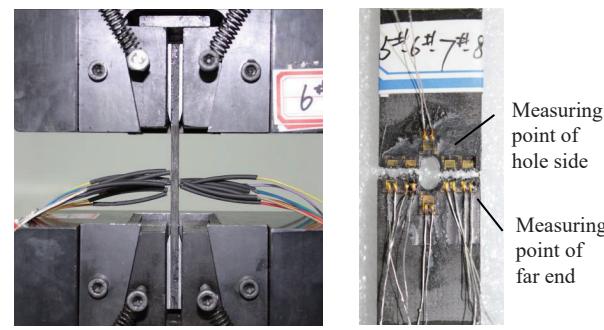
通过典型铆钉单元试件及单独开孔试件的面内拉伸来评价铆钉连接开孔及孔边应力集中影响。以往对树脂基复合材料的研究得出连接件与孔之间适度过盈配合可有效提高机械连接强度。其中多钉连接^[20]是采用过盈量调节不同连接点位的载荷分配; 而单钉连接^[21]则具有通过适当的干涉装配使孔边产生细微的纤维/基体裂纹, 达到缓解应力集中、钝化原有材料裂纹扩展的效果, 这些研究可对C/SiC在线铆接提供参考。

间隙及过盈装配状态下C/SiC典型铆钉连接应力集中情况由几何应力集中和细观应力集中两部分组成。其中开孔的几何不连续性导致了几何应力集中, 可采用单独开孔状态的试件进行测试表征; 而细观应力集中主要是由于孔边材料性能

退化形成的, 对应采用不同状态的含铆钉试件进行测试表征。

2.2.1 C/SiC单独开孔条件下的拉伸静强度结果

按照图3的外形尺寸对C/SiC平板试件制备不同直径的通孔, 并在试件两端粘贴加强片进行开孔试样的拉伸测试。为评估不同开孔对材料初始性能的影响, 计算时取名义强度即包含了孔所在的截面面积。通过不同位置的应变片获取孔边的应力集中情况, 并取应变片损坏前的有效数据。加载速率为0.3 mm/min, 加载情况及破坏形貌如图9所示。开孔板拉伸破坏的有效子样均发生在开孔位置, 具有明显的基体开裂和纤维拔出等破坏现象。



(a) Experimental state (b) Failure morphology

Fig. 9 Experimental state and tensile failure morphology of C/SiC specimen with opening-hole

获得的强度值随开孔大小的变化趋势如图10所示。开孔拉伸强度与孔径/板宽的比例相关, 但破坏趋势看出开孔名义强度不发生快速下降, 表明C/SiC材料强度性能对普通圆形通孔不敏感, 具有良好的抵抗几何应力集中所致破坏的能力, 这与相关文献[2]的结论一致。

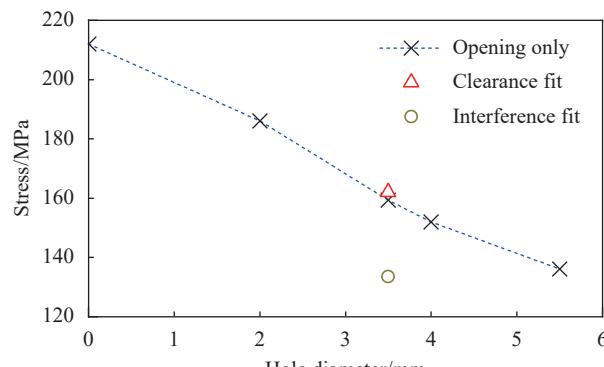


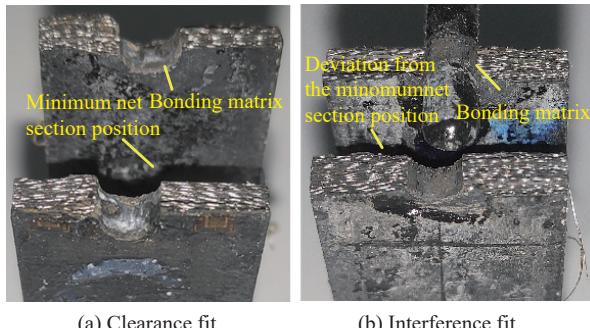
图10 C/SiC单独开孔及铆钉单元试件的拉伸测试性能比较

Fig. 10 Comparison of tensile test performance between opening-hole and rivet-test units of C/SiC

2.2.2 铆钉单元试件与单独开孔的性能对比

对图 3 间隙装配及过盈装配的两种不同状态的铆钉单元试件按照与开孔板相同的方法进行面内拉伸强度测试, 非夹持区有效破坏试样的强度分别为 162.1 MPa、133.5 MPa。间隙装配下的强度与单独开孔状态基本相同, 表明不改变孔边纤维的不连续情况时, 孔的填充基本不导致几何应力集中系数的变化。但由于铆钉单元试件具有二次沉积过程, 使其强度性能略有提高。而过盈装配试件相比单独开孔及铆钉间隙装配状态出现了较明显的强度下降。

图 11 为破坏形貌的对比, 间隙与过盈装配的孔边均有沉积的 SiC 粘接基体, 但过盈装配状态下粘接基体能更致密地附着于铆钉, 使拉伸破坏后铆钉依然保留在平板上; 而间隙装配试样在拉伸破坏后一般会出现铆钉脱落。这也验证了在铆钉顶出试验中得出的结论, 即过盈装配产生的夹持作用提高了铆钉安装的牢固性。



(a) Clearance fit

(b) Interference fit

图 11 C/SiC 铆钉单元试件拉伸破坏形貌

Fig. 11 Tensile failure morphology of C/SiC test units with rivets

铆钉间隙装配与过盈装配试件的拉伸破坏端口也具有较明显差异: 间隙装配状态与单独开孔的破坏形貌类似, 其断口较参差不齐, 一般出现在最小净截面位置, 表明破坏机制主要是均匀损伤模式, 几何应力集中对破坏的影响相对较小; 而过盈装配状态的断口较齐平、且有可能偏离最小净截面位置, 表明在几何应力集中和细观应力集中的共同作用下其破坏机制更接近于局部损伤扩展模式, 且细观应力集中占主要成份。而具体的损伤起始点和扩展途径与孔边纤维束偏折损伤状态的随机条件相关。

从图 12 的过盈装配铆钉单元试件与单独开孔的拉伸应力-应变曲线对比可进一步认识其破坏特征。在远端测点, 两者的应力-应变曲线基本一致, 说明开孔与铆钉填充不同状态的影响较小; 而对

孔边测点, 铆钉装配与单独开孔在低应力下差异不大, 但随着应力增大前者的应变与单独开孔的差距显著地不断增加。这两种试样的孔边应变差异反映了细观应力集中的影响程度。另外, 两者的破坏均是由孔边高应变区决定的, 单独开孔试件的拉伸断裂应变约为 0.46%。

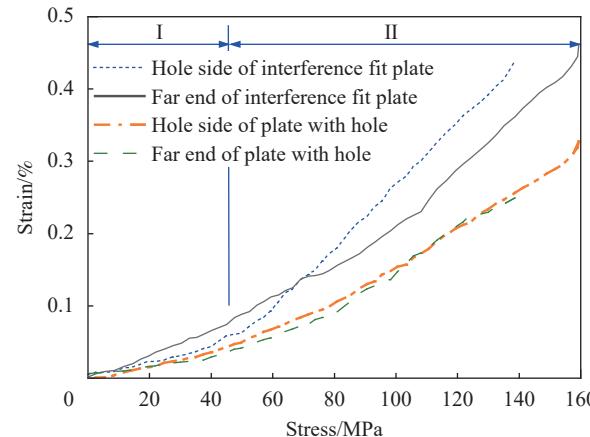


图 12 C/SiC 单独开孔与铆钉过盈装配试件的拉伸应力-应变曲线

Fig. 12 Tensile stress-strain curves of samples with opening-hole and interference fitting test units with rivets of C/SiC

按照孔边应变情况可将铆钉过盈装配试件的面内拉伸应力-应变曲线分为两个阶段: 在 I 阶段的应变增加较缓慢而在 II 阶段迅速增加, I、II 阶段之间存在明显的拐点。在 I 阶段, 低应力状态下材料的碳纤维束偏折区域未发生明显的损伤扩展; 而随着载荷增加, 该区域材料损伤不断加剧, 应力-应变曲线进入快速增长的 II 阶段。分析认为, 铆钉装配过盈量越大, 纤维束偏折及材料内部预应力和损伤将越明显, 从而细观应力集中越明显、面内强度性能的降低越明显。

3 过盈装配条件下孔边特征分析与模拟

依据试件 μ CT 检测及试验破坏形貌, 对过盈装配导致的碳布纤维束偏折情况进行分析。观察得出, 越靠近孔壁的碳纤维弯曲程度越大, 而受影响范围接近于纤维束的宽度 l_a 。本文试件 $l_a \approx 1.25 \sim 1.35 \text{ mm}$, 这与图 13 所示的孔边材料在铆钉顶出后的局部破坏区域基本吻合。厚度方向在铆钉插入面的纤维弯曲程度较大, 底面则由于装配时被支撑工装约束了弯曲变形。此外推断孔边碳纤维偏折应与装配过盈量 d 成正比。

因此, 认为过盈插入过程主要导致了 C/SiC 板的孔边纤维产生厚度方向的弯曲偏折, 偏折量仅受该铆钉的局部效应影响, 而铆钉本身由于刚

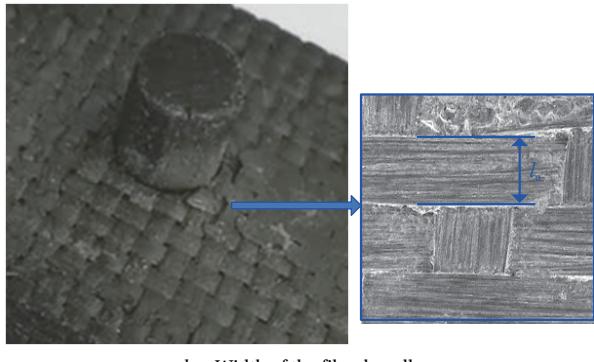
l_a—Width of the fiber bundle

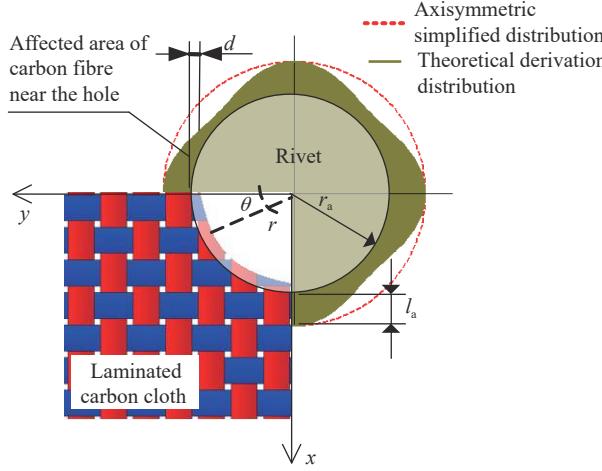
图 13 过盈装配 C/SiC 铆钉在静载荷顶出试验时的破坏局部特征

Fig. 13 Local failure characteristics of interference-fitting C/SiC rivet in static push-out test

度较大未产生明显变化，可提出纤维偏折分布特点如下：

$$\Delta z = \alpha_0 \lg \left(1 - \frac{d}{2r_a} \right) f(\theta) \left(\frac{t_0 - z}{t_0} \right)^{k_1} \{ \tan(k_2(r - r_a)) - \tan(k_2 l_a) \} \quad (2)$$

式中：z、 Δz 分别为开孔板厚度方向坐标及碳纤维在该方向的偏折变形量； α_0 为变形拟合系数； k_1 、 k_2 分别为与试件相关的几何和材料系数；d 为开孔与铆钉之间的过盈量； l_a 为铺层碳布纤维束的宽度；r 为距离铆孔中心的距离，且 $r_a \leq r \leq r_a + l_a$ 。涉及铆钉装配的相关几何参数见图 14。



d—Magnitude of interference; r—Distance from center of rivet hole;
 r_a —Theoretical radius of rivet; θ —Angle with the direction of carbon cloth layer

图 14 铆钉过盈装配的几何关系以及纤维偏折/材料破坏的绕中心轴分布示意图

Fig. 14 Geometry relation of rivet interference fit and fiber deflection/material failure distribution around central axis

采用本文试验数据，可拟合得到 $\alpha_0=17.8$ 、 $k_1=0.5$ 、 $k_2=5$ 。而 $f(\theta)$ 代表了纤维偏折在经、纬不

同方向的差异，其中 θ 是与碳布面内铺层方向的夹角。进一步推导了 $f(\theta)$ 的一般表达形式为

$$f(\theta) = [|\cos(\theta)|^{k_3} + |\sin(\theta)|^{k_3}]^{k_4} \quad (3)$$

式中，系数 k_3 、 k_4 与碳纤维束在面内 x、y 方向分布相关。当碳布为 $0^\circ/90^\circ$ 均匀铺层时有面内弹性模量 $E_x=E_y$ ，此时孔边碳纤维偏折和 C/SiC 材料破坏在围绕铆孔中心的经/纬方向主要受垂直方向纤维束的约束影响，产生的偏折宽度为 l_a 。而在绕铆孔中心的其他方向，经、纬向纤维共同分担铆钉过盈插入的挤压作用，发生偏折的宽度范围略小。通过对本文试件破坏形貌的具体测量可拟合出 $k_3=3$ 、 $k_4=0.5$ ，图 14 给出了按式 (3) 得出的碳纤维偏折和孔边材料破坏绕铆孔中心的分布情况，差异于 $f(\theta)=1$ 条件的绕圆周均匀分布。

按照式 (2) 对孔边不同厚度位置纤维进行 z 方向的偏折量求解，定义铆钉插入面为 $z=0$ 。按照试件单边过盈量均值取 $d=0.2 \text{ mm}$ ，并选择图 4 中的 $z=1.0 \text{ mm}$ 截面进行试件的纤维偏折量实测对比，从图 15 看出两者的吻合匹配较好。

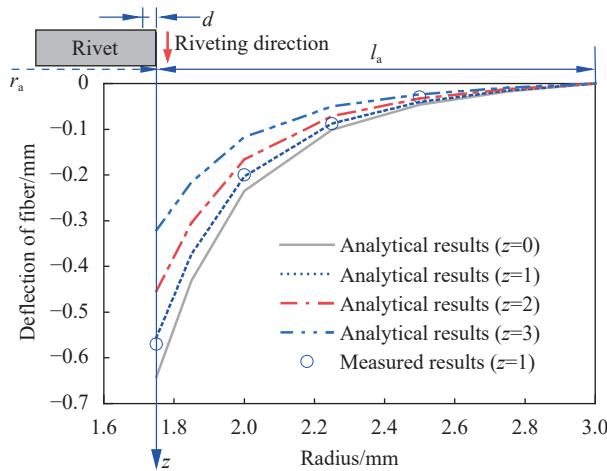


图 15 不同厚度位置孔边纤维偏折计算及与实测对比

Fig. 15 Calculation of fiber deflection at different thickness positions and comparison of measured results

进一步采用 Abaqus 软件建立虚拟纤维的细观模型来模拟铆钉过盈插入过程，定性验证上述分析的正确性。依据对称性只需建立 1/4 模型如图 16(a) 所示，其中铆钉采用解析刚体，以杆/梁为虚拟单元并设置转角刚度和压缩模量为零来模拟碳纤维在装配过程中的柔性效果。为减少计算量，将模型的 B31 杆/梁单元直径适当放大设置为 $28 \mu\text{m}$ 。由于装配状态下的材料密度不高，模型中忽略 SiC 基体贡献。分析步骤为对铆钉施加

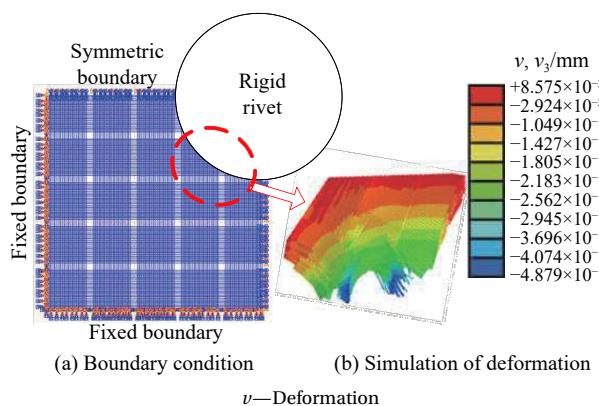


图 16 采用虚拟纤维的铆钉装配数值建模

Fig. 16 Numerical simulation of rivet assembly using virtual fiber

厚度方向的强制位移进行显式动力学计算。

获取碳纤维在装配中间状态的材料性能较困难, 因此计算也主要用于与试验变形现象及规律的定性对比。在此以 C/SiC 材料实测性能为基础, 按照材料混合率公式并参照相关资料^[2,11], 推算得出碳纤维就位性能及含孔隙 SiC 基体工程常数如表 1 所示。此时假设试件内部的空隙率为 20%, SiC 基体和碳纤维束体积分数均为 40vol%。表中对于 C/SiC 材料 x 、 y 分别表示试件的面内主方向, 而 1 为碳纤维的轴向, 2、3 为垂直方向。

表 1 C/SiC 材料及组分材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of the C/SiC and component materials

Property	Value
Elastic modulus $E_x(E_y)$ of C/SiC/GPa	115
Elastic modulus E_z of C/SiC/GPa	35
Poisson's ratio μ_{xy} of C/SiC	0.05
Poisson's ratio $\mu_{xz}(\mu_{yz})$ of C/SiC	0.01
Shear modulus G_{xy} of C/SiC/GPa	35
Shear modulus $G_{xz}(G_{yz})$ of C/SiC/GPa	32
Elastic modulus E_1 of carbon fiber/GPa	124
Elastic modulus $E_2(E_3)$ of carbon fiber/GPa	14
Shear modulus G_{23} of carbon fiber/GPa	18
Shear modulus $G_{12}(G_{13})$ of carbon fiber/GPa	20
Poisson's ratio $\mu_{12}(\mu_{13})$ of carbon fiber	0.17
Poisson's ratio μ_{23} of carbon fiber	0.01
Elastic modulus E of SiC matrix with voids/GPa	150
Shear modulus G of SiC matrix with voids/GPa	70
Poisson's ratio μ of SiC matrix with voids	0.08

从图 16(b) 模拟铆钉过盈装配的虚拟纤维变形计算结果看出, 碳纤维偏折影响区域主要在单个纤维束范围内, 这与试验的主要特征相吻合。此外, 虚拟纤维在距铆孔中心不同距离的偏折变化

趋势也与试验观测具有较好的一致性。分析认为这是由于不同碳纤维束之间关联较弱、可近似看作“铰接”关系, 使应力和变形的传递可控制在单个纤维束范围内。而计算偏折量与实际试验的差异, 是由于该模型仅验证了偏折的机制, 并不能完全模拟真实材料性能及与真实纤维的尺寸差异。

为分析纤维偏折的单一因素对铆钉顶出强度的影响程度, 进一步采用虚拟纤维偏折和不偏折两种状态的装配模型计算铆钉顶出载荷。模拟最终试验状态的模型如图 17 所示, 包含了 SiC 基体参数(表 1)。采用最大应力准则为损伤判据以保证计算的收敛性, 铆钉与板之间按通用接触, 摩擦系数取 0.3。

图 18 给出了不同状态的铆钉顶出载荷-位移计算结果对比, 在仅考虑虚拟纤维是否偏折的不同状态差异下, 对于顶出强度和刚度的影响都很

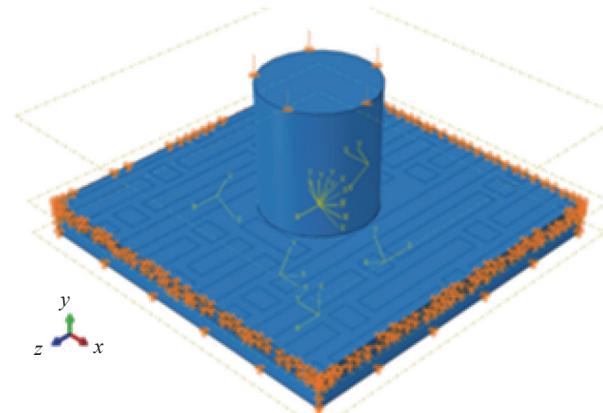


图 17 采用虚拟碳纤维和 SiC 实体建模的铆钉装配模型

Fig. 17 Rivet assembly model based on virtual carbon fiber and SiC solid

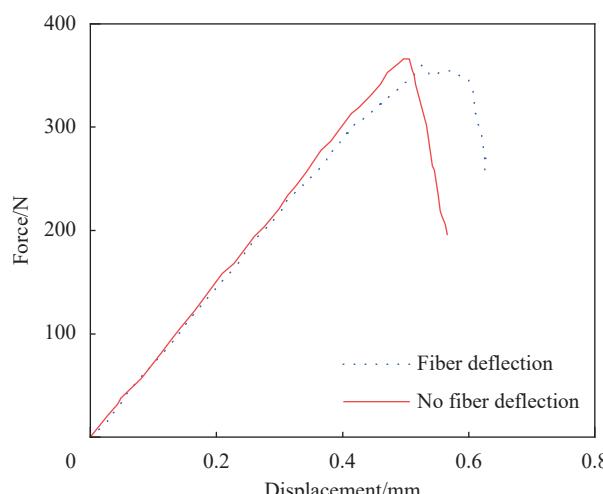


图 18 仅考虑虚拟纤维不同几何状态的 C/SiC 铆钉顶出计算结果

Fig. 18 C/SiC rivet push-out calculation results only considering different geometric states of virtual fiber

小。而计算结果与实测之间差异较大, 表明真实过盈装配并不是简单导致了碳纤维偏折, 更主要是在偏折区域产生了内应力, 形成对铆钉的辅助夹持作用。这种夹持作用不仅提高了铆钉顶出极限强度, 也是极限载荷损伤后仍保持一定剩余强度的主要因素。

4 过盈装配条件下 C/SiC 铆接单元强度计算

4.1 铆钉顶出疲劳强度计算

间隙装配主要依赖于铆钉与孔壁之间的 SiC 基体沉积效果, 试验结果离散性大、有效子样少, 拟合得出曲线的可信度低。因此这里主要对过盈装配的铆钉顶出疲劳强度规律进行分析。

总结图 8 铆钉过盈装配下的疲劳顶出强度规律可分为 3 个阶段: 在 I 阶段, 由于循环载荷导致孔边碳纤维偏折区域的初始内应力释放、纤维扭曲度有所降低且没有产生新的裂纹, 使剩余顶出强度出现了快速提升。对比 C/SiC 材料级疲劳性能, 由于钉孔附近在装配时碳纤维强制变形产生了更大的材料内部应力和扭曲损伤, 使铆钉顶出的疲劳强化具有高幅值、循环持续时间较短的特点; 在 II 阶段, 钉孔周围的材料内部随着循环加载次数的增加不会形成明显的大裂纹, 而是众多微小裂纹的逐渐累积, 该区域的已有损伤处于被钝化状态, 宏观表现为试件损伤不发展、剩余顶出强度下降不明显。但由于孔边材料性能较低, 使铆钉顶出的疲劳寿命持续时间明显低于 C/SiC 材料级疲劳性能; 在 III 阶段, 随加载次数继续增加, 在钉孔附近区域继续累积大量损伤导致了材料力学性能进一步退化, 此时剩余顶出强度随加载次数增加而快速下降。

按照上述分析和图 8 的曲线拟合, 以铆钉孔壁剪应力 τ 为表征量, 提出铆钉顶出疲劳剩余强度在 3 个不同阶段的宏观唯象公式如下:

$$\tau(n) = \begin{cases} \tau_0 \left\{ 1 + e^{kd} \left[1 + \left(\frac{n}{N} \right)^{a_1 + b_1 \tau_{\max}} \left(\frac{t_0}{2r_a} \right)^{\frac{\lg n}{\lg N}} \right] \right\} \\ \tau(n)_{\max} \left\{ 1 - e^{kd} \left(\frac{n}{N} \right)^{a_2 + b_2 \tau_{\max}} \right\} \\ \tau(n)_R \left\{ 1 - e^{kd} \left(\frac{n}{N} \right)^{a_3 + b_3 \tau_{\max}} \right\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\tau(n)$ 是疲劳加载 n 次后 C/SiC 铆钉连接的剩余顶出强度; τ_{\max} 是铆钉顶出的最大疲劳应力水平; τ_0 是铆钉的顶出静强度; N 是在最大疲劳应力水平 τ_{\max} 下铆钉对应的疲劳寿命; d 是铆钉

与钉孔之间的单边过盈量; k 是与配合过盈量相关的系数; a_i 、 b_i ($i=1, 2, 3$) 分别为 3 个阶段的试验参数, 均可由试验曲线的拟合获得; 应用时, 先由 I 阶段数据获得疲劳加载强化后的顶出最大剩余强度 $\tau(n)_{\max}$, 再通过 II 阶段数据获得疲劳加载的稳定剩余强度 $\tau(n)_R$ 。

4.2 C/SiC 铆接单元的拉伸强度计算

4.2.1 过盈装配导致的 C/SiC 铆孔边内应力

进一步分析铆钉过盈装配导致的试件孔边区域内应力, 由于铆钉过盈插入的挤压作用形成了环绕孔边的压力 σ_{ra} , 认为其面内分布区域与图 14 的纤维偏折情况相协调, 在厚度 z 方向满足 $\sqrt{(t_0-z)/t_0}$ 分布。将不同位置作用于铆钉的 σ_{ra} 简化为均匀分布, 并由此形成图 6 得出的铆钉/孔界面剩余摩擦力。考虑到铆钉初始顶出破坏会产生一定的 SiC 基体碎屑从而增加铆钉与钉孔之间的界面摩擦, 实际摩擦应大于理想状态, 因此这里取摩擦系数 $\mu_d \approx 0.60$, 估算得出 σ_{ra} 为

$$\sigma_{ra} = \frac{F}{\mu_d 2\pi r_a t_0} = \frac{800}{0.6 \times 2\pi \times 1.75 \times 4} \approx 30.3 \text{ MPa} \quad (5)$$

对比图 10 获得的 C/SiC 材料原始状态下拉伸强度为 212 MPa, 可知铆接孔边的预应力对材料强度具有较明显影响。另外, 模拟过盈装配状态数值模型的预应力计算如图 19 所示, 获得的孔边最大预应力约为 30 MPa 与试验推导一致, 且验证了其主要分布在 $r_a \sim (r_a + l_a)$ 的孔边径向范围内。

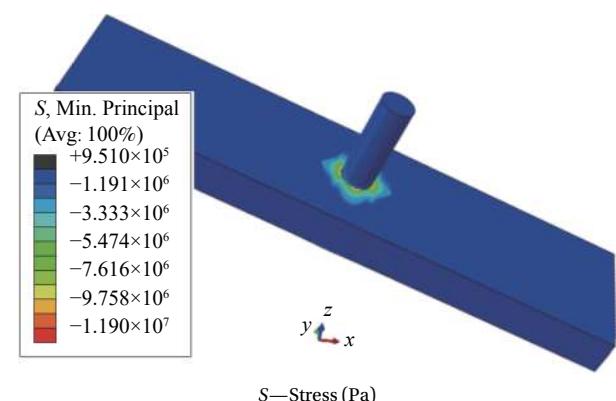


图 19 铆钉过盈装配的 C/SiC 孔边预应力数值模拟结果

Fig. 19 Numerical simulation results of pre-stress around hole

in C/SiC rivet interference fitting model

4.2.2 开孔板及铆接单元的面内拉伸失效准则

通过上述数据和规律, 进一步给出在考虑铆钉过盈装配所致孔边预应力效应下的强度判据。

图 4 的初始细观形貌表明铆接单元经过二次沉积后一般不存在明显初始裂纹, 且图 11、图 12 的破坏形貌和应力-应变曲线表明其符合应力集中影响下的强度破坏特征, 因此适于强度准则而非断裂力学准则进行分析。

对复合材料开孔拉伸强度预测, 多位学者提出了孔周边应力的失效评估方法^[22-23], 表明点应力失效准则 (PSC) 和平均应力失效准则 (ASC) 便于实施且具有满意的精度。此处仍基于 PSC 准则分析开孔及过盈装配含铆钉平板的面内拉伸强度。

对于如图 20 所示承受均匀拉伸载荷的开孔板, 点应力准则认为当 x 轴距离开孔位置 d_a 的拉伸正

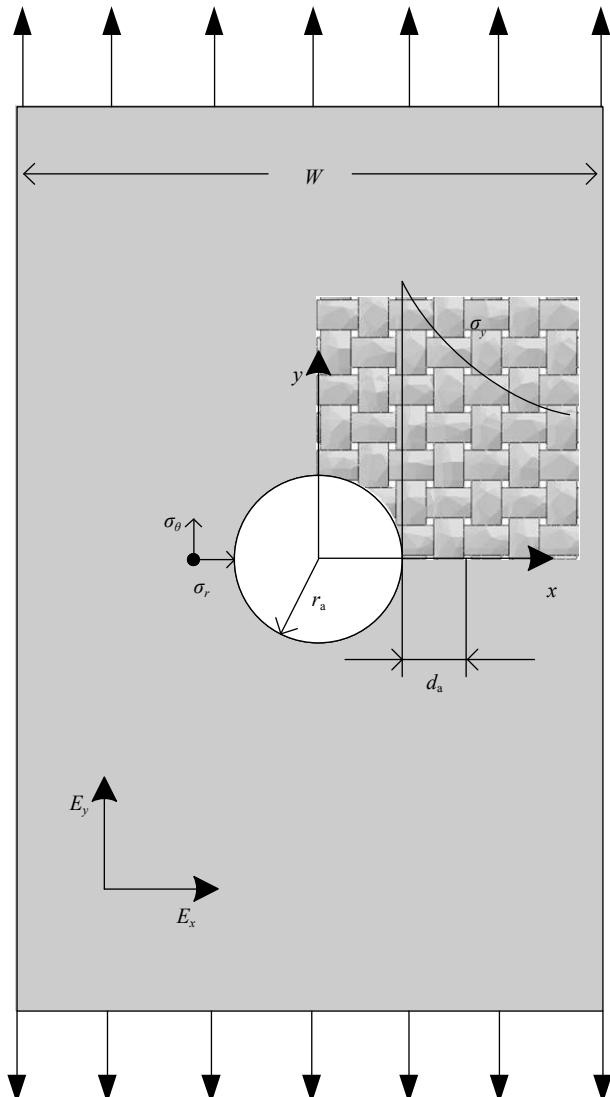


图 20 C/SiC 开孔和含铆钉试样的孔边拉伸应力分布

Fig. 20 Tensile stress distribution near hole edge of opening-hole and rivet fitting C/SiC specimen

应力 σ_v 与无开孔板拉伸破坏应力 σ_0 相同时, 达到强度破坏条件。即有

$$\sigma_y(x, 0)|_{x=r_a+d_a} = \sigma_0 \quad (6)$$

对不同开孔尺寸在点 $(r_a+d_a, 0)$ 具有不同的应力集中系数, 因此该准则可用于预测不同开孔条件下的强度性能。由弹性力学得到含圆形开孔正交各向异性板的应力分布方程, 代入式 (6) 可得到无限板宽条件下的开孔板 PSC 计算公式为

$$\frac{\sigma_N^\infty}{\sigma_0} = \frac{2}{2 + \xi_1^2 + 3\xi_1^4 - (K_T^\infty - 3)(5\xi_1^6 - 7\xi_1^8)} \quad (7)$$

式中: $\xi_1 = r_a/(r_a+d_a)$; σ_N^∞ 为无限板宽条件下的开孔破坏强度; K_T^∞ 为对应的无限宽正交各向异性板的应力集中系数, 有

$$K_T^\infty = 1 + \sqrt{2 \left(\sqrt{\frac{E_y}{E_x}} - \mu_{xy} + \frac{E_y}{2G_{xy}} \right)} \quad (8)$$

式中: μ_{xy} 为面内泊松比; G_{xy} 为面内剪切模量。对有限板宽为 W 的开孔强度 σ_N 可进一步换算如下:

$$\sigma_N = \left(\frac{K_T^\infty}{K_T} \right) \sigma_N^\infty \quad (9)$$

而有限与无限板宽的应力集中系数比为

$$\frac{K_T^\infty}{K_T} = \frac{[2 - (2r_a/W)^2 + (2r_a/W)^4]}{2} \quad (10)$$

从式 (7)~(10) 看出, 进行点应力准则强度预测的关键在于获取不同开孔尺寸下的有效特征长度 d_a , 根据图 10 试验结果, 相应计算出 d_a 值如表 2 所示。表明其稳定在 1.3~1.4 mm 之间, 略大于碳纤维束的宽度 l_a 。

表 2 C/SiC 单独开孔状态下的强度特征长度

Table 2 Strength characteristic length of C/SiC under the condition of opening

Hole radius r_a/mm	Tensile strength σ_N/MPa	σ_N/σ_0	Characteristic length d_a/mm
0	212.0	1	—
1.0	186.0	0.877	1.38
1.75	159.3	0.751	1.32
2.0	152.0	0.717	1.32
2.75	136.1	0.642	1.39

Note: σ_0 —Tensile failure stress of no opening-hole.

对于含铆钉的铆接单元试件, 间隙装配状态对开孔不会产生额外的细观应力集中, 而几何应力集中特点与单独开孔状态相同, 因此拉伸强度校核可沿用上述失效准则及相应的特征长度值。

对于铆钉过盈装配状态试件，则受到明显的孔边细观应力集中因素影响，在距离孔边的 r 处，铆钉挤压产生的径向压应力 σ_r 与环向应力 σ_θ 近似满足弹性力学的比值关系：

$$\sigma_r = -\frac{r_a^2}{r^2} \sigma_{ra}, \quad \sigma_\theta = \frac{r_a^2}{r^2} \sigma_{ra} \quad (11)$$

即 σ_r 与 σ_θ 两者大小相等，在强度分析时可将孔边预应力与板的拉伸受载应力直接叠加。据此给出过盈装配状态下铆接单元承受面内拉伸载荷时的点应力强度准则修正公式：

$$\sigma_N = \sigma_0 \left(\frac{K_T^\infty}{K_T} \right) h_{PCL} - \sigma_{ra} \quad (12)$$

式中： (K_T^∞ / K_T) 由式 (10) 求出； h_{PCL} 为式 (7) 右端的板宽特征尺寸相关量，即

$$h_{PCL} = \frac{2}{2 + \xi_1^2 + 3\xi_1^4 - (K_T^\infty - 3)(5\xi_1^6 - 7\xi_1^8)} \quad (13)$$

在考虑铆钉过盈装配细观应力集中情况时，采用式 (12) 进行强度预测的关键是获取特征长度 d_a 及孔边附加应力 σ_{ra} 。当取 $d_a = l_a$ 即碳纤维束宽度上限时，计算得出 $\sigma_N = 125.5 \text{ MPa}$ 略小于图 10 试验实测结果的 133.5 MPa ，相对误差约 6%，偏保守地作为特征长度取值具有满意的精度。其相应物理意义为铆钉过盈装配时的面内强度是由孔边挤压预应力影响区域的外包络尺寸决定的。

而孔边预应力 σ_{ra} 可认为是与铆钉装配时的过盈量对数相关，推导给出

$$\sigma_{ra} = c_0 \lg \left(1 - \left(\frac{d}{2r_a} \right)^m \right) \quad (14)$$

式中， c_0 、 m 分别定义为开孔挤压强度系数和灵敏度因子参数。按上述试验数据在 $m=1$ 情况下可初步推算出 $c_0 \approx -1.3 \times 10^3 \text{ MPa}$ 。

5 结论

(1) 对于 C/SiC 在线铆钉连接形式，采用间隙装配时钉孔与铆钉之间的连接强度完全依赖于 SiC 基体沉积，但由于狭窄通道条件使沉积效果难以保证。通过本文试验得出，采用过盈装配产生的孔边预应力效应明显提高了铆钉顶出静强度和疲劳强度，并提升了铆钉连接的可靠性。较间隙装配状态，过盈装配铆钉的顶出静强度提升了约 4 倍，顶出疲劳强度和持续时间分别提升了约 3~4 倍和 1.5 倍。表明材料单位采用适度过盈装配工艺来改善铆钉连接在使用时的松动与脱落问题

具有一定的合理性；本文的顶出静强度，尤其是疲劳试验还存在非正常破坏多、有效子样有限的问题，后续还应进一步改进铆接单元尚不成熟的试验方法。

(2) 通过对间隙和过盈装配状态下铆接单元试件的面内拉伸强度试验，得出间隙装配的性能基本与 C/SiC 开孔试件性能相同；而过盈装配试件则由于孔边碳纤维偏折/弯曲、孔边预应力导致的材料细观形貌变化和应力集中影响，使其面内拉伸强度明显低于间隙装配条件，破坏时从铆钉孔周边扩展的模式也区别于单独开孔和间隙装配条件下的均匀损伤模式。因此，在进行复杂热结构的集成设计时，需综合匹配装配条件对铆钉顶出强度与面内强度的影响，进行连接方案优化。

(3) 基于试验数据总结和建模仿真，系统给出了过盈装配导致的孔边预应力影响规律，修正了面内拉伸载荷下的点应力强度计算公式及铆钉顶出疲劳强度拟合公式。由于复合材料影响因素的复杂性，还需要对不同尺寸、不同织物构造条件的普适性进一步试验验证，进而揭示过盈装配参数与材料性能之间更深刻全面的相关性。同时，过盈装配铆钉试件的面内疲劳载荷性能、多铆钉连接条件下的性能规律也是需要进一步开展的研究。

参考文献：

- [1] 韩国凯, 解维华, 孟松鹤, 等. 防隔热一体化复合材料整体性能优化设计方法[J]. 复合材料学报, 2019, 36(2): 450-460.
HAN Guokai, XIE Weihua, MENG Songhe, et al. Optimization design method of integrated thermal protection/insulation composite material[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(2): 450-460(in Chinese).
- [2] 张立同. 纤维增韧碳化硅陶瓷复合材料: 模拟、表征与设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
ZHANG Litong. Fiber-reinforced silicon carbide ceramic composites: Modelling, characterization and design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009(in Chinese).
- [3] 孟松鹤, 杨强, 霍施宇, 等. 一体化热防护技术现状和发展趋势[J]. 宇航学报, 2013, 34(10): 1295-1302.
MENG Songhe, YANG Qiang, HUO Shiyu, et al. State-of-arts and trend of integrated thermal protection systems[J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(10): 1295-1302(in Chinese).
- [4] ZHANG Q M, LI G S. A review of the application of C/SiC composite in thermal protection system[J]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2009, 5(2): 199-203.

- [5] HUDSON L D, STEPHENS C A. X-37 C/SiC ruddervator subcomponent test program[C]//NASA 2009 Annual Meeting. Houston: NASA, 2009.
- [6] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. *复合材料学报*, 2007, 24(1): 1-11.
- DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(1): 1-11(in Chinese).
- [7] ZOU P, CHEN X M, CHEN H, et al. Damage propagation and strength prediction of a single-lap interference-fit laminate structure[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2020, 15(4): 558-570.
- [8] 邹鹏, 曲凡. 复合材料衬套螺栓干涉连接安装过程损伤机制[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(5): 2449-2459.
- ZOU Peng, QU Fan. Damage mechanism of composite sleeve-type bolt interference fit structure during the installation process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(5): 2449-2459(in Chinese).
- [9] 宋祚禹, 王西昌, 曹正华, 等. 碳纤维/聚脂亚胺树脂基复合材料开孔件的连接力学性能[J]. *航空制造技术*, 2009(z1): 139-140, 144.
- SONG Zuoyu, WANG Xichang, CAO Zhenghua, et al. Joint mechanical properties of open-hole carbon fiber reinforced polyimide composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009(z1): 139-140, 144(in Chinese).
- [10] 赵丽滨, 徐吉峰. 先进复合材料连接结构分析方法[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- ZHAO Libin, XU Jifeng. Analysis method for advanced composite joints[M]. Beijing: Beihang University Press, 2015(in Chinese).
- [11] 张毅. CVI-2D C/SiC复合材料铆接单元的力学行为与失效机制[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
- ZHANG Yi. Mechanical behaviors and failure mechanisms of z-pinned joints for 2D C/SiC composite prepared by chemical vapor infiltration[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017(in Chinese).
- [12] ZHANG Y, ZHANG L T, HE J Y, et al. Modelling shear behaviors of 2D C/SiC Z-pinned joint prepared by chemical vapor infiltration[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(6): 6433-6442.
- [13] LEONE F A, DAVILA C G, CIROLAMO D G. Progressive damage analysis as a design tool for composite bonded joints[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 77: 474-483.
- [14] LI G D, WU X F, ZHANG C R, et al. Theoretical simulation and experimental verification of C/SiC joints with pins or bolts[J]. *Materials & Design*, 2014, 53: 1071-1076.
- [15] HE Z B, ZHANG L T, ZHANG Y, et al. Microstructural characterization and failure analysis of 2D C/SiC two-layer beam with pin-bonded hybrid joints[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015, 57: 70-78.
- [16] ZHANG X Y, SUO T, WANG B, et al. Fatigue behavior and residual strength evolution of 2D C/SiC Z-pinned joints prepared by chemical vapour infiltration[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39: 3575-3582.
- [17] ZOU P, ZHANG K F, LI Y, et al. Bearing strength and failure analysis on the interference-fit double shear-lap pin-loaded composite[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2016, 27(2): 179-200.
- [18] ZOU P, LI Y, ZHANG K F, et al. Mode I delamination mechanism analysis on CFRP interference-fit during the installation process[J]. *Materials & Design*, 2017, 116: 268-277.
- [19] LI Y, XIAO P, LUO H, et al. Fatigue behavior and residual strength evolution of 2.5D C/C-SiC composites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, 36(16): 3977-3985.
- [20] 杨晔楠, 赵美英, 周银华. 过盈配合对复合材料多钉连接强度的影响研究[J]. *航空工程进展*, 2012, 3(3): 311-316.
- YANG Yenan, ZHAO Meiying, ZHOU Yinhua. Study on effect of interference fit on joint strength for multi-fasteners in composites[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2012, 3(3): 311-316(in Chinese).
- [21] 邹鹏. 复合材料干涉螺接结构损伤萌生与扩展机理研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
- ZOU Peng. Research on the damage initiation and evolution mechanism of composite interference-fit bolted structures[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017(in Chinese).
- [22] HWAN C L, TSAI K H, CHEN W L, et al. Strength prediction of braided composite plates with a center hole[J]. *Journal of Composite Materials*, 2011, 45(19): 1991-2002.
- [23] TAN Z Y, DONG W L, MEI J, et al. Strength and mechanical response of C/C composite open-hole and bolted plates[J]. *Materials Testing*, 2017, 59(9): 774-778.