

金属表面微结构对CFRP/TC4界面黏结强度的影响分析



赵盼^{1,2}, 史恺宁¹, 史耀耀¹, 周菲³

1. 西北工业大学 航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室, 陕西 西安 710072

2. 西安明德理工学院, 陕西 西安 710124

3. 浙江安防职业技术学院, 浙江 温州 325016

摘要:CFRP/TC4异质材料黏结界面主要由金属表面、黏结剂以及复合材料表面组成,该界面是异质材料融合构件的核心部位,其界面黏结强度的优劣,对该类异质材料融合构件的长寿命和高可靠性会产生显著影响。本文主要针对TC4金属表面微结构对界面黏结强度的影响进行研究,基于Abaqus建立剪切力作用下的重叠黏结有限元模型,确定优选后的三角形结构主要参数为宽度、高度以及开槽方向与剪切受力方向之间的夹角,进而采用响应面Box-behnken法设计仿真试验并建立金属表面微结构与界面切应力之间的映射模型,并基于方差分析验证了该模型的有效性。通过该研究,揭示了金属表面微结构参数对界面切应力的影响规律。

关键词:异质界面黏结; 复合材料; 金属材料; 表面微结构

中图分类号:V263

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.03.006

风扇叶片是航空发动机的核心部件之一,减轻风扇端重量(质量)是提高发动机推重比及降低耗油率的关键手段^[1]。碳纤维增强树脂基(CFRP)复合材料叶片是风扇叶片减重的一种主要结构形式,主要由复合材料叶身与金属骨架组成^[2-3]。其中,胶结方法一般适用于传递均布载荷或承受剪切载荷的部位,复合材料叶身与金属骨架多采用胶结方式进行连接^[4-6]。CFRP/金属异质材料融合界面黏结强度的优劣,对该类CFRP/金属异质材料融合构件的长寿命和高可靠性产生显著影响^[7-9]。因此,如何精准可靠地预测与控制CFRP/金属异质材料融合界面黏结强度,引起了学术界与工业界的共同关注。

目前,国内外学者针对CFRP/金属异质材料融合构件界面黏结机理进行大量研究,异质黏结界面主要包括金属表面、黏结剂与复材表面。其中,金属表面与黏结剂的黏结质量是影响异质材料融合界面黏结质量的主要因素之

一,对光滑的金属表面进行预处理,改变金属表面粗糙度与表面形貌,进而扩大接触面积来促进接触表面形成机械互锁,提高异质材料融合的界面黏结强度。张功达等^[10]采用拉伸剪切试验、界面以及断面微观观测等方式,探究了微结构参数对焊接金属与塑料焊接接头强度的影响机制,结果表明,接头强度与微结构的填充效果,以及连接面积有关,随着微结构尺寸的增加,接头强度增加。肖冯等^[11]研究得出,表面粗化程度及其均匀度越好,得到的胶结接头强度及耐久性越好。刘元海等^[12]指出采用原位磷酸阳极化工艺处理的铝合金结构表面膜层中的氧含量较高,阳极化膜层较厚,体现了优良的抗腐蚀性和耐久性。Lambiasi等^[13]在研究钛合金与聚醚醚酮摩擦辅助连接工艺过程中,在钛板上进行了激光纹理化处理,以促进基材之间的机械连接,继而通过准静态单搭接剪切试验验证了融合界面黏结强度得到显著提高。Rodríguez等^[14]通过钢

收稿日期: 2023-09-17; 退修日期: 2024-01-03; 录用日期: 2024-02-02

基金项目: 航空科学基金(2020Z045053001); 陕西省自然科学基金(2023-JC-YB-431); 陕西省教育厅科学研究计划(23JP124); 教育部产学研合作协同育人项目(220906280183841); 西安明德理工学院科研基金(2022XY02L04); 西安明德理工学院教育教学改革研究资助项目(JG2022ZD03); 浙江安防职业技术学院校级重点项目(AF2023Z01)

引用格式: Zhao Pan, Shi Kaining, Shi Yaoyao, et al. The influence analysis of metal surface microstructure on CFRP/TC4 interfacial bonding strength[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(03): 47-54. 赵盼, 史恺宁, 史耀耀, 等. 金属表面微结构对CFRP/TC4界面黏结强度的影响分析[J]. 航空科学技术, 2024, 35(03): 47-54.

表面激光辐射进行结构化处理,以实现金属表面与聚合物表面黏结时的机械互锁,通过拉伸剪切试验得出,接触表面微几何结构的长宽比对黏结界面破坏模式具有显著影响。Boon等^[15]研究了喷砂和不同开槽表面处理方法对碳/环氧树脂复合材料与铝之间的黏结影响,并通过机械测试结果与有限元模拟结合,分析了界面的破坏和损坏机理。Genna等^[16]研究得出,金属表面激光预处理可扩大异质材料黏结面积并显著提高接头强度,在最佳条件下,其强度是参考样品的两倍以上。

从现有研究来看,国内外关于复合材料/金属异质材料融合界面黏结机理研究主要集中在通过化学工艺过程进行金属表面预处理等方面的研究。针对金属表面微结构对复合材料/金属异质材料融合界面黏结强度的影响机理方面的研究较少。因此,本文针对金属表面微结构对界面黏结的影响进行研究,基于剪切力作用下的重叠黏结有限元模型对金属表面微结构进行优选。随后针对优选后的三角形结构进行参数化,并建立金属表面微结构与界面剪切应力之间的映射模型,揭示表面微结构参数对界面切应力的耦合影响规律。

1 重叠黏结有限元建模与金属表面微结构优选

1.1 剪切载荷作用下重叠黏结有限元建模

针对 CFRP 复合材料与 TC4 钛合金重叠黏结的剪切强度标准试验进行有限元建模,该重叠剪切试验样件为: CFRP 复合材料与 TC4 钛合金板材宽 2.54cm、长 1.27cm、厚 0.16cm,AF555M 胶膜厚度为 0.33mm。

为获得其切应力分布,本节采用有限元法进行分析。由于本文主要针对金属表面微结构与胶膜表面的机械互锁对界面黏结的影响进行研究,因此假设复合材料 CFRP 板与胶膜均质,金属表面与黏结剂表面以及黏结剂表面与复合材料表面均为绑定接触,且为单向铺层纵向受力。CFRP 复材、钛合金与 AF555M 胶膜材料属性见表 1。网格类型为 C3D8R,网格尺寸为 0.003mm,下层金属左侧面全约束,上下金属在剪切力垂直方向约束,接触界面承受最大剪切力为 40MPa,换算后在上层金属右侧面施加 12.9kN。试件所受切应力如图 1 所示。

1.2 金属表面微结构优选

金属表面凸起结构,能够进一步增大黏结剂与金属的结合面积,从而对异质材料融合结构界面剪切强度起到一定的积极作用。针对常见的凸起结构进行三维建模,主要

表 1 材料属性

Table 1 Materials properties

材料类型	密度/(g/cm ³)	弹性模量/GPa	泊松比
CFRP 复材	1.7	130	0.28
TC4 钛合金	4.5	110	0.3
AF555M 胶膜	1.06	1	0.3

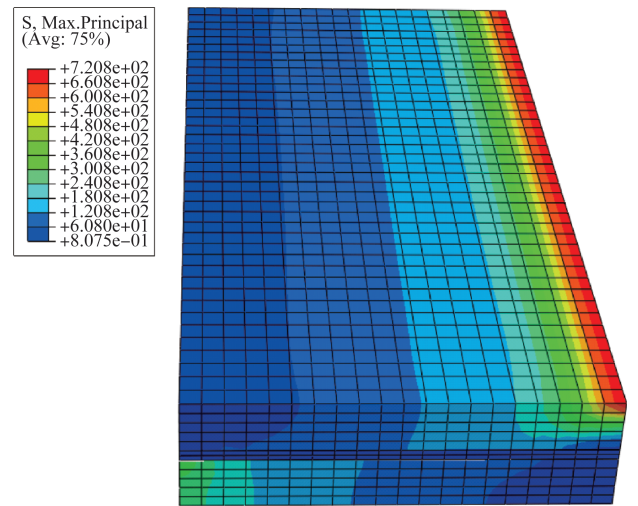


图 1 试件所受剪切应力

Fig.1 The shear stress of the specimen

包括连续以及带有间隔的三角形、梯形、圆弧表面结构,如图 2 所示。

基于重叠黏结界面剪切有限元模型,样件、材料属性等参数与 1.1 节中的模型保持一致,对剪切载荷作用下不同金属表面微结构的重叠黏结模型进行有限元分析。不同金属表面微结构时黏结剂所受剪切应力,如图 3 所示。不同金属表面微结构时黏结剂应力,见表 2。

由图 3 与表 2 得出,不同金属表面微结构时黏结剂所受应力,三角形<梯形<圆弧<平面;与此同时,随着各金属表面微结构的加入间隔后,三角形和梯形表面黏结剂所承受的应力呈上升趋势,圆弧表面呈下降趋势,且梯形表面黏结剂所承受的应力显著增大。由于三角形表面黏结剂所有应力最小,进而选择三角形作为异质材料融合构件金属表面微结构特征。

2 金属表面微结构与界面切应力的映射模型

2.1 分析过程规划

针对三角形金属表面微结构形式,选定对界面剪切作用影响最为核心的三个参数为金属表面微结构的关键参数,主要包括三角形的宽度 w 、高度 h 以及开槽方向与剪切

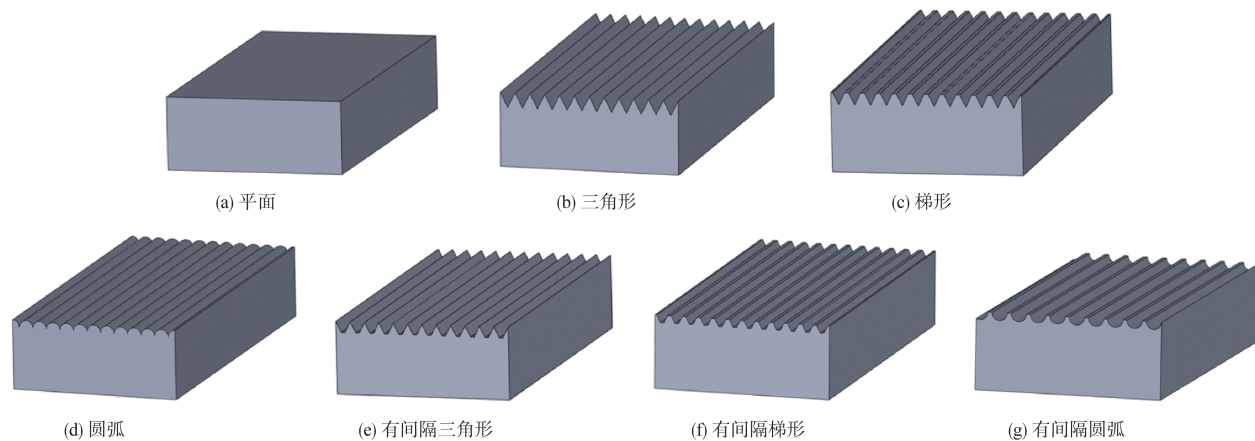


图2 金属表面微结构

Fig.2 Metal surface microstructure

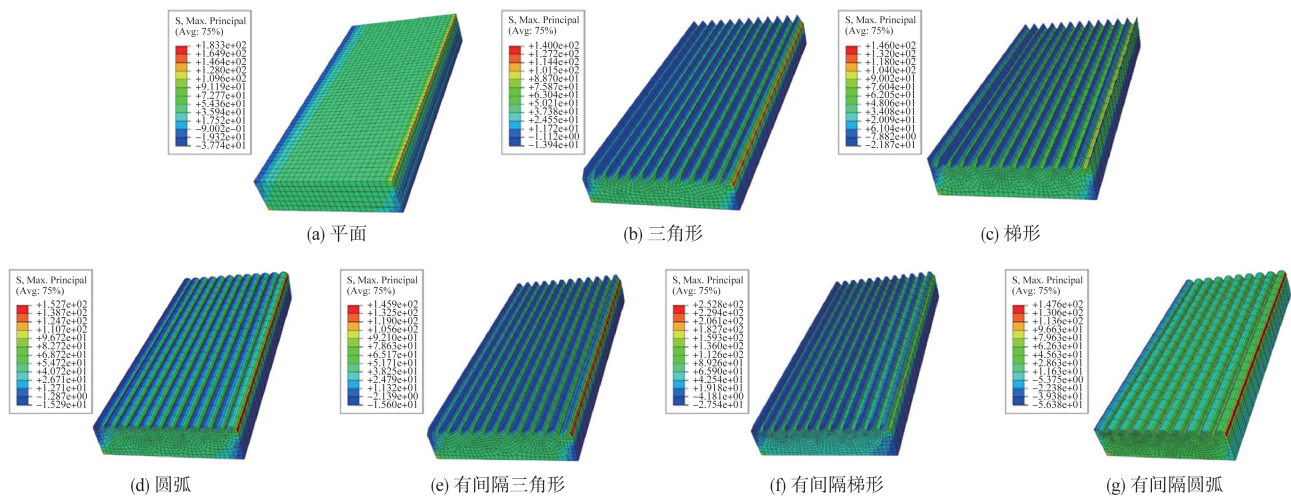


图3 不同金属表面微结构时黏结剂所受剪切应力

Fig.3 Shear stress of binder on different metal surface microstructure

表2 黏结剂应力

Table 2 Adhesive film stress

类型	应力/ e^{+02}MPa	类型	应力/ e^{+02}MPa
三角形	1.400	有间隔三角形	1.459
梯形	1.460	有间隔梯形	2.528
圆弧	1.527	有间隔圆弧	1.413
平面	1.833	—	—

受力方向之间的夹角 α ,如图4所示。

为获得合理的映射模型所需的边界区域,需要确定金属表面微结构关键参数的待选区间。当三角形高度过高时,金属表面微结构尖端会刺破黏结剂而直接接触复合材料表面,使得两种异质材料无法有效黏结;而三角形高度过低时,无法有效增加金属表面与黏结剂的接触面积,因此三角形高度的参数区间设为 $1\sim 12\mu\text{m}$ 。当三角形宽度过小时,

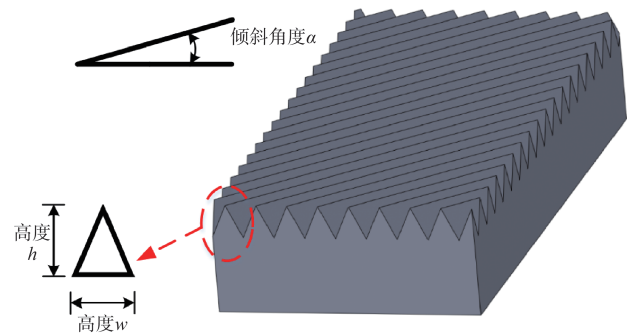


图4 三角形金属表面微结构的三个参数

Fig.4 Three parameters of microstructure on triangular metal surface

金属表面凹槽过深不利于黏结剂充分填满凹槽与金属有效接触;当三角形宽度过大时,金属表面单位面积上分布的凸

起过少,从而不能有效增大黏结剂与金属表面的接触,因此三角形宽度的参数区间设为8~24μm。凸起槽与剪切受力方向的倾斜角度,直接影响黏结剂与金属表面的摩擦力,进而影响界面剪切强度,因此倾斜角度设定为0°~90°。

基于金属表面微结构关键参数的待选区间,采用面向三因素三水平试验系统 Box-behnken 设计方法规划界面剪切试验的参数组合,见表3。

表3 界面剪切响应面试验规划

Table 3 Interface shear response surface experimental planning

试验序号	倾斜角度/(°)	高度/μm	宽度/μm
1	45	1	8
2	45	6.5	16
3	45	6.5	16
4	90	6.5	8
5	45	12	24
6	45	6.5	16
7	45	12	8
8	90	1	16
9	0	12	16
10	0	1	16
11	45	6.5	16
12	0	6.5	24
13	45	1	24
14	90	12	16
15	45	6.5	16
16	90	6.5	24
17	0	6.5	8

基于重叠黏结界面剪切有限元模型,对剪切载荷作用下不同金属表面微结构的重叠黏结模型进行有限元分析。重叠剪切样件保持与1.1节的模型一致,对各参数组合进行重叠剪切有限元仿真试验,获得相应的界面切应力,见表4。

表4 界面切应力仿真试验结果

Table 4 Interface shear stress simulation results

试验序号	应力 /e ⁺⁰² MPa	试验序号	应力 /e ⁺⁰² MPa
1	2.572	10	2.008
2	1.830	11	1.830
3	1.830	12	1.596
4	1.666	13	2.035
5	1.877	14	1.527
6	1.830	15	1.830
7	1.340	16	1.969
8	1.967	17	1.385
9	1.420	—	—

2.2 金属表面微结构与界面切应力映射模型建立与分析

采用试验分析处理工具 Design Expert v8.0 对各组参数对应的界面切应力结果进行多元二次函数拟合,从而获得界面切应力对金属表面微结构关键参数的映射模型,如式(1)所示

$$SS(\alpha,H,W) = -9.91e^{-5}\alpha^2 + 3.35e^{-3}H^2 + 3.87e^{-4}W^2 + 1.49e^{-4}\alpha H + 6.39e^{-5}\alpha W + 6.1e^{-3}HW + 8.93e^{-3}\alpha - 0.2H - 0.05W + 2.73 \tag{1}$$

式中,α为倾斜角度,H为高度,W为宽度,SS(α,H,W)为界面切应力预测值。

为了验证所得仿真试验数据的可靠性和回归模型的显著性,分别采用方差分析、残差分析及实际值与预测值对比,验证式(1)所示界面切应力对金属表面微结构关键参数的映射模型的准确性。由 Design expert 中的分析工具可获得映射模型的方差分析结果,见表5。

根据映射模型方差分析(ANOVA)结果,拟合所获得的映射模型F校验值为11.17,P校验值小于<0.05,说明此模型中值与回归方程的关系显著。从表5中得出,拟合的映射关系准确,能够作为界面切应力的映射模型,且误差较小^[17]。同时,从表5中可以看出,界面剪切应力对高度最为敏感。

表5 参数映射模型方差分析结果

Table 5 Variance analysis results of parameter mapping model

项目	平方和	自由度	均方	F校验值	P校验值
映射模型	1.33	9	0.15	11.17	0.0022
倾斜角度α	0.065	1	0.065	4.90	0.0625
高度H	0.73	1	0.73	55.23	0.0001
宽度W	0.033	1	0.033	2.50	0.1582
αH	0.0055	1	0.0055	0.41	0.5405
αW	0.0021	1	0.0021	0.16	0.7012
HW	0.29	1	0.29	21.79	0.0023
α ²	0.17	1	0.17	12.82	0.0090
H ²	0.043	1	0.043	3.26	0.1139
W ²	0.0026	1	0.0026	0.19	0.6722
残差	0.093	7	0.013	—	—
失拟项	0.093	3	0.031	—	—
纯误差	0.000	4	0.000	—	—
总和	1.42	16	—	—	—

采用概率分布图及散点图分析界面切应力与金属表面微结构参数映射模型的残差分布情况。界面切应力残差分布如图5所示,残差如图6所示。

依据残差正态概率分布图,各点形成近似为一条直线,

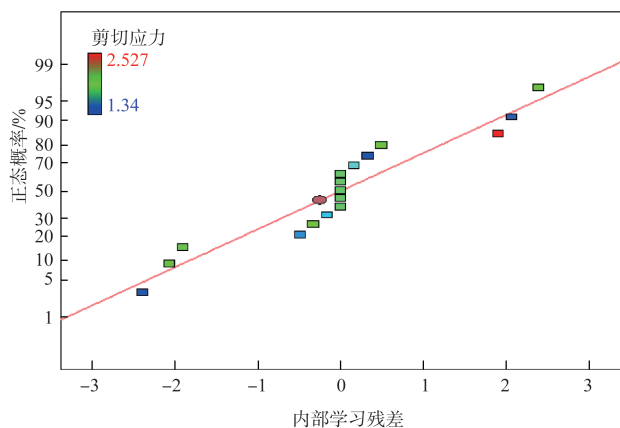


图5 界面切应力残差正态概率分布

Fig.5 Normal probability distribution of interface shear stress residuals

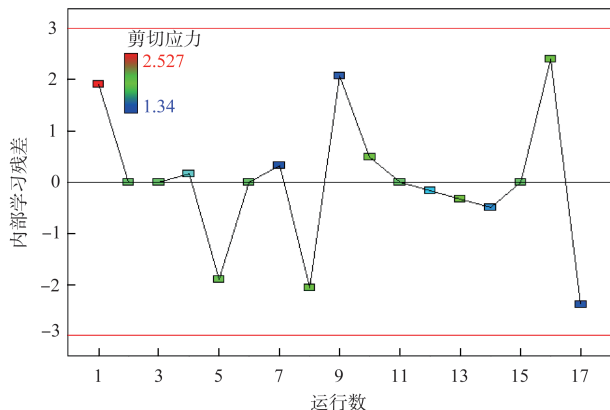


图6 界面切应力残差

Fig.6 Interface shear stress residuals

残差落入界面切应力区间内的频率与标准正态分布概率基本一致。同时,残差图所显示的各点分散且无特定分布规律,因此说明仿真试验数据服从常态分布,且无异常数据出现。模型预测值与实际仿真试验值对比如图7所示,预测值与实际值结果基本吻合,进一步验证了该二次回归模型的准确性。

综上所述,依据响应面法取得的界面切应力与金属表面微结构参数映射模型准确,拟合误差低。

3 金属表面微结构参数对界面切应力的影响规律

3.1 高度与倾斜角度耦合对界面切应力的影响

金属表面微结构凸起高度与倾斜角度耦合作用对界面切应力影响的响应面,如图8所示。

由图8可知,在倾斜角度接近 0° 时,金属表面凸起与界面剪切力方向近于平行,仅靠黏结剂与被黏表面的黏结

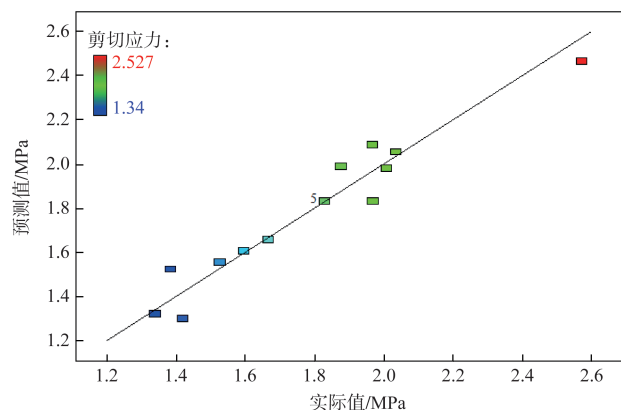


图7 界面剪切应力预测值与实际值对比

Fig.7 Comparison between the predicted value and the actual value of interfacial shear stress

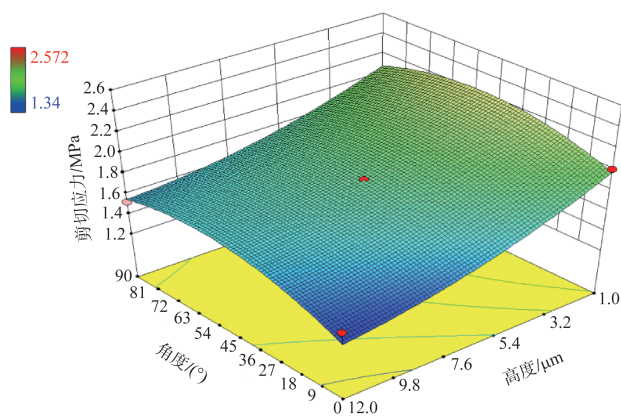


图8 高度与倾斜角度耦合作用响应面

Fig.8 Response surface of coupling effect of height and inclination angle

作用承受剪切力,不利于进一步降低黏结剂承受的界面剪切应力。随着倾斜角度的逐渐增大,金属表面凸起与界面剪切力方向逐渐接近垂直,界面黏结作用与凸起共同承受剪切力,黏结剂所承受的界面剪切应力逐渐降低,进而黏结界面承受的界面剪切强度逐渐升高。在倾斜角度适宜的情况下,金属表面凸起高度过小,不利于凸起部分承受切应力。而过高的凸起,虽能提高凸起部分微结构承受的切应力,但会增加自身的应力集中,过程中进而增大黏结剂承受的界面切应力,降低构件能够承受的界面剪切强度。

3.2 宽度与倾斜角度耦合对界面切应力的影响

金属表面微结构凸起宽度与倾斜角度耦合作用对界面切应力影响的响应面,如图9所示。

由图9可知,在适宜的倾斜角度下,较大的金属表面微结构凸起宽度会减小单位长度上分布的凸起数量,从而影

响单位长度上能够分担界面剪切力的凸起数量,增大黏结剂承受的界面切应力,进而减小构件所能承受的界面剪切强度。随着凸起宽度的减小,单位长度分布的凸起数量逐渐增加,黏结剂承受的界面切应力逐渐降低,构件能够承受的界面剪切强度逐渐增大。

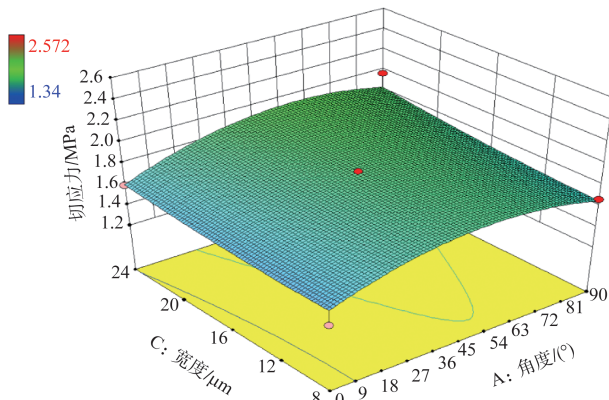


图9 宽度与倾斜角度耦合作用响应面

Fig.9 Response surface of coupling effect of width and inclination angle

3.3 宽度与高度耦合对界面切应力的影响

金属表面微结构凸起宽度与高度耦合作用对界面切应力影响的响应面,如图10所示。

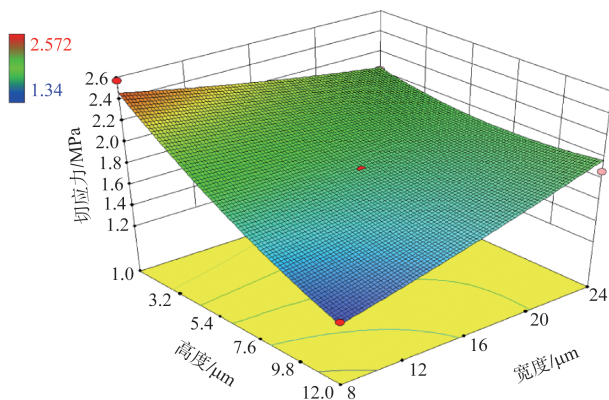


图10 宽度与高度耦合作用响应面

Fig.10 Response surface of width and height coupling

由图10可知,在金属表面微结构凸起高度较高、宽度较小的情况下,黏结剂承受的界面切应力逐渐减小,进而构件所能承受的界面剪切强度逐渐增高。随着凸起高度逐渐降低,凸起宽度逐渐增大,单位面积分布的凸起数量逐渐减小,每个凸起承受的界面剪切力也在逐渐减小,进而界面切应力逐渐增大,最终构件能承受的界面剪切强度逐渐减低。

4 结论

针对胶结成形CFRP/金属异质材料融合构件,本文针对金属表面微结构进行了优选,并对优选后的三角形结构进行参数化,进而设计仿真试验并建立金属表面微结构与界面切应力之间的映射模型,最终揭示了表面微结构参数对界面切应力的耦合影响规律。结论如下:

(1)通过对基于AF555M胶膜的重叠黏结CFRP/金属剪切强度试验进行分析,基于Abaqus建立剪切力作用下的重叠黏结有限元模型。并分析了不同金属表面微结构时黏结剂所受应力,结果显示三角形<梯形<圆弧<平面。

(2)针对优选的三角形金属表面微结构进行参数化,并采用Box-behnken设计方法规划界面剪切试验的参数组合。分析仿真试验结果从而获得界面切应力对金属表面微结构关键参数的映射模型,通过方差分析验证了该二次回归模型的准确性,并得出界面切应力对高度最为敏感。

(3)通过对三角形凸起的金属表面微结构形式对界面切应力的仿真试验结果进行分析,揭示了三角形金属表面微结构的宽度 w 、高度 h 以及开槽方向与剪切受力方向之间的夹角 α 三参数对界面切应力的耦合影响规律。

AST

参考文献

- [1] 李杰. 复合材料在新一代商用发动机上的应用与发展[J]. 航空科学技术, 2012(1): 18-21.
Li Jie. Application and development of composite materials for new generation of civil aircraft engines[J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(1): 18-21. (in Chinese)
- [2] 赵雷, 范顺昌, 李晓冲, 等. 一种混合结构复合材料叶片: 中国, CN108087318A[P]. 2018-05-29.
Zhao Lei, Fan Shunchang, Li Xiaochong, et al. A hybrid structure composite blade: China, CN108087318A[P]. 2018-05-29. (in Chinese)
- [3] 李顶河, 郭永刚, 孟宪明. 复合材料层合结构热压罐固化过程的多物理场-热流固解耦数值求解[J]. 航空科学技术, 2022, 33(2): 36-45.
Li Dinghe, Guo Yonggang, Meng Xianming. Numerical solution of multiphysics-thermo-fluid-solid decoupling for the curing process of composite laminated structure autoclave[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(2): 36-45. (in Chinese)
- [4] 王晓宏, 刘长喜, 毕凤阳, 等. 层压板单搭接胶结结构损伤失

- 效行为表征分析[J]. 天津科技大学学报, 2021, 36(3): 39-45+59.
- Wang Xiaohong, Liu Changxi, Bi Fengyang, et al. Characterization and analysis of the damage and failure behavior of the single lap bond laminates structure[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2021, 36(3): 39-45+59. (in Chinese)
- [5] 胡春幸, 侯玉亮, 铁瑛, 等. 基于遗传算法的碳纤维增强树脂复合材料层合板单搭接胶结结构的多目标优化[J]. 复合材料学报, 2021, 38(6): 1847-1858.
- Hu Chunxing, Hou Yuliang, Tie Ying, et al. Multi-objective optimization of adhesively bonded single-lap joints of carbon fiber reinforced polymer laminates based on genetic algorithm [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(6): 1847-1858. (in Chinese)
- [6] 唐玉玲. 碳纤维复合材料连接结构的失效强度及主要影响因素分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- Tang Yuling. Failure strength and main factors analysis of of carbon fiber composites bolted joints[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [7] Zhang Dawei, Zhang Qi, Fan Xiaoguang, et al. Review on joining process of carbon fiber-reinforced polymer and metal: methods and joining process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(12):3686-3696.
- [8] 牛芳芳. 复合材料连接技术研究现状[J]. 粘接, 2021, 45(1): 58-60.
- Niu Fangfang. Research advances of connection techniques for composites[J]. Adhesion, 2021, 45(1): 58-60. (in Chinese)
- [9] Zhang Dawei, Zhang Qi, Fan Xiaoguang, et al. Review on joining process of carbon fiber-reinforced polymer and metal: applications and outlook[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(1):44-54.
- [10] 张功达, 朱琦, 刘亚运, 等. 表面微结构对铝合金与 PA66 激光焊性能影响[J]. 焊接学报, 2023, 44(8): 28-33+48.
- Zhang Gongda, Zhu Qi, Liu Yayun, et al. Effect of surface microstructure on laser welding properties of aluminum alloy and PA66[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(8): 28-33+48. (in Chinese)
- [11] 肖冯, 李国琛, 王红光, 等. 金属结构复材胶结修理表面处理影响研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(3): 91-96.
- Xiao Feng, Li Guochen, Wang Hongguang, et al. Research on effects of surface treatment for composite repair of metallic structure[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(3): 91-96. (in Chinese)
- [12] 刘元海, 邱实. 飞机金属结构胶结修理前的原位表面处理技术研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(3): 134-139.
- Liu Yuanhai, Qiu Shi. Research on surface treatment technology applied in bonding-repair of aircraft structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(3): 134-139. (in Chinese)
- [13] Lambiase F, Paoletti A. Friction assisted joining of titanium and polyetheretherketone (PEEK) sheets[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 130: 254-261.
- [14] Rodríguez-Vidal E, Sanz C, Lambarri J, et al. Experimental investigation into metal micro-patterning by laser on polymer-metal hybrid joining [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 104: 73-82.
- [15] Boon Y D, Joshi S C, Ong L S. Interfacial bonding between CFRP and mechanically-treated aluminum liner surfaces for risers[J]. Composite Structures, 2018, 188: 374-386
- [16] Genna S, Lambiase F, Leone C. Effect of laser cleaning in laser assisted joining of CFRP and PC sheets[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 145: 206-214.
- [17] 徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert, SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- Xu Xianghong, He Mingzhu. Experimental design and design-expert, SPSS application[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)

The Influence Analysis of Metal Surface Microstructure on CFRP/TC4 Interfacial Bonding Strength

Zhao Pan^{1,2}, Shi Kaining¹, Shi Yaoyao¹, Zhou Fei³

1. Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero Engine, Ministry of Industry and Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. Xi'an Mingde Institute of Technology, Xi'an 710124, China

3. Zhejiang Institute of Security Technology, Wenzhou 325016, China

Abstract: The bonding interface of CFRP/TC4 heterogeneous material is mainly composed of metal surface, binder and composite material surface. The interface is the core part of the heterogeneous material fusion component. The quality of the interface bonding strength will have a significant impact on the long life and high reliability of the heterogeneous material fusion component. In this paper, the influence of TC4 metal surface microstructure on interface bonding strength is studied. Based on Abaqus, the finite element model of overlapping bonding under shear force is established. The main parameters of the optimized triangular structure are determined to be width, height and the angle between the groove direction and the shear force direction. Then, the response surface Box-behnken method is used to design the simulation test and establish the mapping model between the metal surface microstructure and the interface shear stress, and the validity of the model is verified based on variance analysis. Through this study, the effect of metal surface microstructure parameters on interfacial shear stress is revealed.

Key Words: heterogeneous interface bonding; composite; metal materials; surface microstructure

Received: 2023-09-17; **Revised:** 2024-01-03; **Accepted:** 2024-02-02

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2020Z045053001); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (2023-JC-YB-431); Scientific Research Program Funded by Education Department of Shaanxi Provincial Government (23JP124); University-Industry Collaborative Education Program(220906280183841); Scientific Research Fund of Xi'an Mingde Institute of Technology (2022XY02L04); Pedagogical Reform and Research Fund of the Xi'an Mingde Institute of Technology (JG2022ZD03); Key Projects of Zhejiang College of Security Technology (AF2023Z01)