

扩散连接空心瓦伦结构抗冲击强度分析*

Analysis to the Impact Strength of Diffusion-Bonded Titanium Warren Structures

柴象海 王志强 冯锦璋 / 中航商用航空发动机有限责任公司

摘要: 针对发动机空心叶片的钛合金三层空心瓦伦结构, 分析了不同瓦伦结构特征参数对抗冲击强度的影响试验。通过有限元数值模拟和逆向分析的手段, 估算出钛合金空心瓦伦焊缝的失效强度。对数值模拟结果进行分析, 得到在冲击载荷下相邻瓦伦夹角、焊缝长度与扩散连接焊缝失效强度之间的关系, 为空心风扇叶片等空心瓦伦结构零部件的设计和抗冲击强度分析提供参考。

关键词: 扩散连接; 碰撞试验; 数值模拟; 鸟撞; 瓦伦结构

Keywords: diffusion bonding; impact test; numerical simulation; bird-strike; warren structure

0 引言

20世纪80年代, 罗-罗公司采用超塑成形/扩散连接(SPF/DB)工艺, 研制出空心瓦伦结构钛合金宽弦空心风扇叶片, 并于1992年完成了整机试验。与带凸肩的窄弦实心风扇叶片相比, 空心瓦伦结构宽弦风扇叶片使得风扇转子叶片数量减少了大约1/3, 转子重量也减轻了10%~30%, 其空腔结构改善了叶片的抗振性能, 提高了叶片的气动效率, 增加了叶片的喘振裕度。伴随着空心瓦伦结构零部件的深入应用, 经研究发现, 在减轻发动机重量的同时, 还可以通过空心结构的优化设计改善零部件强度性能, 提升抗鸟撞性能^[1]。

焊缝失效是空心瓦伦结构在冲击载荷下最重要的失效模式之一。理想情况下, 扩散焊的焊缝强度与母体材料是非常接近的, 但在实际工程应用中有诸多因素对焊缝强度产生影响^[2]。一方面, 实际工艺过程中难以保证扩散连接

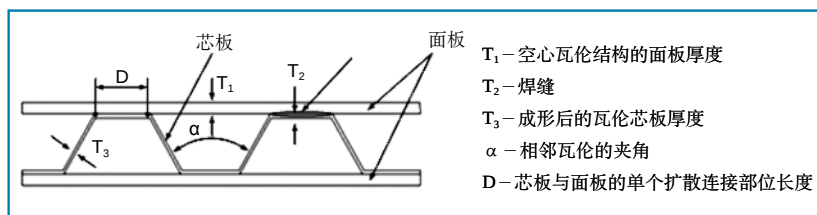
部位100%的焊合率, 而针对某一特定的工艺流程, 尽管这些空心瓦伦结构的焊合率实际已经在产品的检测许可范围内, 但不同空心瓦伦结构也会导致实际焊合率的不同。另一方面, 空心瓦伦结构的几何特征本身也会影响焊缝边缘的应力集中情况, 进而影响焊缝的失效模式^[3]。因此, 空心瓦伦结构的抗冲击失效强度是工艺过程与结构几何特征综合作用的结果。对于设计人员而言, 找到一个相对简单有效的空心瓦伦结构参数与抗冲击强度的关联关系对于提升设计水平十分重要。

1 扩散连接钛合金空心瓦伦结构几何特征分析

空心瓦伦结构的抗冲击强度很大

程度上取决于焊缝的强度。而后者与空心瓦伦结构的几何特征紧密相关。为了分析随着几何特征变化而产生的焊缝强度的变化规律, 需要考虑焊缝长度、沿弦长方向的几何形状以及超塑成形对焊缝受力特性的影响等因素, 本文所定义的钛合金空心瓦伦结构的几何特征参数如图1所示。

本文根据超塑成形/扩散连接工艺所能加工的钛合金空心瓦伦结构参数范围, 选取不同空心瓦伦结构参数, 设计了等长度直线焊缝钛合金三层空心平板冲击试验件。试验件采用超塑成形/扩散连接成形工艺加工。空心平板试验件如图2所示, 由上面板、芯板和下面板组成。



* 基金项目: 国家自然科学基金(51205377)项目资助。图1 空心瓦伦结构几何特征参数

2 扩散连接钛合金空心瓦伦结构冲击响应分析

2.1 扩散连接钛合金空心瓦伦结构试验件高速冲击试验

由于超塑成形/扩散连接瓦伦结构焊缝强度影响因素的复杂性, 本文通过对空心平板在不同载荷工况下进行冲击试验, 对焊缝在高速冲击载荷下脱焊失效的机理进行了研究。试验设备采用150mm口径高速气炮。平板冲击试验针对三种不同的空心结构进行。试验中, 空心平板以不同的初始速度垂直撞击铝合金靶板。试验件的几何参数以及试验条件如表1所示。空心平板在冲击载荷作用下, 呈现出沿焊缝撕裂, 面板向后卷曲的典型损伤情况, 如图3所示。



图2 钛合金三层空心平板试验件

表1 空心平板冲击试验参数

试验编号	芯板角度(°)	焊缝长度(mm)	芯板/面板厚度(mm)	空心平板质量(kg)	碰撞速度(m/s)	碰撞能量(kJ)
No.1	30	10	0.5/2	0.726		16.47
No.2	45	13	0.5/1.5	0.586	163	7.78
No.3	45	8	0.5/1.5	0.544	214	12.46



图3 钛合金三层空心平板试验件冲击后的损伤情况

2.2 空心瓦伦结构焊缝失效参数逆向分析

空心瓦伦结构焊缝失效应力的确定是本文工作的重点。由于结构的特殊性, 瓦伦结构的焊缝强度难以通过简单的试验直接测量。本文首先建立了不同试验工况下空心平板高速冲击试验数值仿真模型, 然后通过逆向分析拟合出钛合金空心瓦伦焊缝的失效参数, 即具有不同几何特征参数的各组试验件对应的扩散连接焊缝拉伸失效应力和剪切失效应力。

本文采用LS-DYNA显式动力学有限元计算模型对空心平板试验件扩散连接焊缝失效进行数值模拟, 考虑变形过程中的材料硬化现象和钛合金材料高应变率效应。在模型中, 焊缝采用LS-DYNA提供的固联接触方法进行模拟, 并将焊缝的拉伸失效应力和接剪切失效应力设置为变量, 通过寻优算法找出使得数值模拟结果与试验结果关联度最好的失效应力水平。

1) 逆向分析算法

为了提高逆向分析效果, 需要选择合适的寻优模型和算法, 本文采用

序列二次规划方法^[4]。根据工程经验, 选择芯板角度、芯板/面板厚度、非空心段焊缝长度作为影响试验件焊缝失效特性的主要影响因素进行分析。

a. 基于空心平板变形的优化目标函数

选择焊缝拉伸失效应力和剪切失效应力作为寻优的输入变量, 空心平板试验件的变形作为寻优目标函数的构成要素, 通过迭代计算使得模拟分析结果与空心平板试验变形形态相一致, 逆向得到焊缝拉伸失效应力和剪切失效应力数值。寻优问题由以下公式描述:

$$F(x) = \sum_{k=1}^m \omega_k \left(\frac{y_k - y_{obj}}{y_{obj}} \right)^2 \quad (1)$$

$$y_k = f(x_1, x_2, \dots, x_n), k=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$g_i(x) \leq c_i, i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$s_i^{l(m)} \leq x_i \leq s_i^{u(m)}, i=1, 2, \dots, p \quad (4)$$

公式(1)表示目标函数, 由空心平板不同位置变形量累加得到; 公式(2)描述了数值模拟输入变量与空心平板变形量之间的关系, 通过手动分析调试, 可以固化材料模型、网格密度、接触刚度等输入变量对模拟结果的影响, 而仅选择空腔处焊缝拉伸失效应力 σ_1 和剪切失效应力 τ_1 , 前后缘处焊缝拉伸失效应力 σ_2 和剪切失效应力 τ_2 作为输入变量; 公式(3)表示约束函数; 公式(4)给出了输入变量取值范围。其中, y_{obj} 是由试验得到的空心平板变形量, y_k 是数值模拟分析结果, ω_k 是权重。 $s_i^{l(m)}$ 和 $s_i^{u(m)}$ 是输入变量基于工程经验得到的上下限。当焊缝拉伸和剪切失效参数变化时, y_k 即空心平板试验件变形量随之改变。

b. 焊缝失效约束

对空心平板碰撞试验的数值模拟分析则通过平板变形量作为寻优目

表2 寻优变量初始值及取值范围

x_i	优化变量(Pa)	焊缝位置	初始值 ($\times 10^8$ Pa)	下限 ($\times 10^8$ Pa)	上限 ($\times 10^8$ Pa)
No.1 (σ_{11}, τ_{11})	拉伸/剪切失效应力 No.1	空腔	5.10/4.55	4.80/4.25	5.40/4.85
		前尾缘	5.25/4.75	4.95/4.45	5.55/4.95
No.2 (σ_{21}, τ_{21})	拉伸/剪切失效应力 No.2	空腔	5.35/4.85	5.05/4.55	5.65/5.15
		前尾缘	5.45/4.95	5.25/4.75	5.55/5.25
No.3 (σ_{31}, τ_{31})	拉伸/剪切失效应力 No.3	空腔	5.60/5.15	5.30/4.85	5.90/5.45
		前尾缘	5.75/5.35	5.45/4.95	5.95/5.55

标,但仅仅通过变形量难以完全描述整个碰撞过程。通过在非接触区域的焊缝失效判定作为约束,以便于更加精确地再现整个碰撞过程。

2) 分析过程

通过寻优分析方法对拉伸失效应力和剪切失效应力进行量化分析。对应三组空心平板冲击试验,在芯板和前尾缘处的焊缝拉伸和剪切失效应力被设置作为输入变量。通过工程经验,设置了各变量的分析初值和上下限,如表2所示。

如上所述,目标函数由表3所述空心平板试验件三个位置处变形量累加得到,综合考虑其他结构参数对空心平板变形量的影响和试验过程中存在的随机因素,对不同位置的变形量赋予不同的权重系数。

$$F(x) = (0.2 \times (\$Opt1\$)^2 + 0.4 \times (\$Opt2\$)^2 + 0.4 \times (\$Opt3\$)^2)^{0.5}$$

$$\$Opt1\$ = (\$D1\$ - (\$Posx11\$ - \$Posx12\$)) / (\$Posx11\$ - \$Posx12\$)$$

$$\$Opt2\$ = (\$D2\$ - (\$Posx21\$ - \$Posx22\$)) / (\$Posx21\$ - \$Posx22\$)$$

$$\$Opt3\$ = (\$D3\$ - (\$Posx31\$ - \$Posx32\$)) / (\$Posx31\$ - \$Posx32\$)$$

表3 目标参数

y_i	寻优和约束参数描述	目标值(mm)
D1	距空心平板碰撞前缘0.9 mm位置变形量	2.5
D2	距空心平板碰撞前缘1.7 mm位置变形量	3
D3	距空心平板碰撞前缘2.75 mm位置变形量	1.75
Dd	距空心平板碰撞前缘5.0 mm位置变形量	0

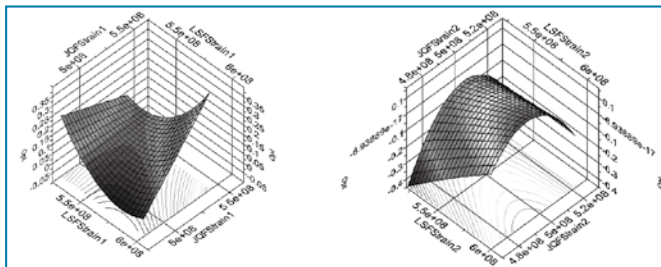


图4 响应面模型

式中, $F(x)$ 为目标函数, $\$Optk\$(k=1,2,3)$ 为空心平板变形量数值模拟分析结果与试验数据之间的误差。 $\$Dk\$(k=1,2,3)$ 为空心平板各部位变形量的试验结果, $\$Osk2\$(k=1,2,3)$ 为分析得到的空心平板上面板坐标值, $\$Osk2\$(k=1,2,3)$ 为分析得到的空心平板下面板坐标值,(\$Posxk1\$ - \$Posxk2\$)(k=1,2,3)即为分析得到的空心平板各部位变形量。

3) 分析结果

以表2所示的No.1试验为示例显示寻优分析过程。首先采用拉丁超立方方法进行参数相关度分析,对分析结果采用最小二乘法进行拟合^[5],得到图4所示焊缝拉伸/剪切强度与目标函数之间的响应面模型。对相应面模型进行分析,得到空腔处拉伸/剪切失效应力 σ_{11} 和 τ_{11} 为(5.50×10^8 Pa, 5.85×10^8 Pa)和(4.85×10^8 Pa, 5.10×10^8 Pa),前后缘处拉伸/剪切失效应力 σ_{12} 和 τ_{12} 为(5.75×10^8 Pa, 5.90×10^8 Pa)和(5.00×10^8 Pa, 5.20×10^8 Pa),以减小寻优分析的搜索范围。

基于响应面模型分析结果, σ_{11} 、 τ_{11} 、 σ_{12} 和 τ_{12} 分别取中值 5.68×10^8 Pa, 4.98×10^8 Pa, 5.83×10^8 Pa, 5.10×10^8 Pa作为寻优分析初始值。通过序列二次规划法进行寻优分析计算,寻优分析结果为[5.60×10^8 Pa, 5.10×10^8 Pa, 5.89×10^8 Pa, 5.33×10^8 Pa],寻优收敛过程及分析结果如图5所示。

2.3 空心平板几何特征与抗冲击性能之间的相关度分析

采用相同的方法,对No.2和No.3试验进行寻优分析计算,得到三组空心瓦伦结构几何参数对应的焊缝拉伸/剪切失效应力

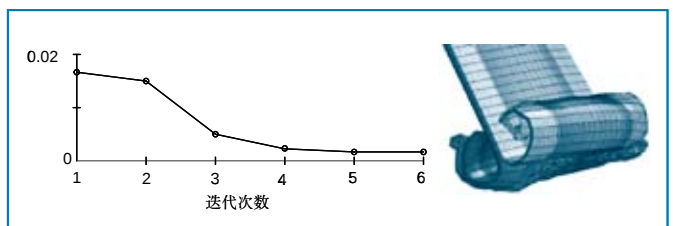


图5 寻优收敛曲线和分析结果

表4 焊缝结构参数和失效应力之间的关系

	结构参数	空腔处 拉伸失效应力($\times 10^8$ Pa)	空腔处 剪切失效应力($\times 10^8$ Pa)	前后缘 拉伸失效应力($\times 10^8$ Pa)	前后缘 剪切失效应力($\times 10^8$ Pa)
芯板角度	30°(10mm)	5.60	5.10	5.89	5.33
	45°(10mm)	5.23	4.58	5.59	4.90
焊缝长度	8 mm(45°)	5.13	4.52	5.49	4.83
	13 mm(45°)	5.37	4.67	5.74	5.00

值,分析结果为 $[5.13 \times 10^8 \text{Pa}, 4.52 \times 10^8 \text{Pa}, 5.49 \times 10^8 \text{Pa}, 4.83 \times 10^8 \text{Pa}]$ 和 $[5.27 \times 10^8 \text{Pa}, 4.57 \text{ Pa}, 5.64 \times 10^8 \text{ Pa}, 4.90 \times 10^8 \text{Pa}]$ 。对空心结构几何参数和焊缝拉伸/剪切失效应力进行相关性分析,面板厚度对焊缝失效影响很小,仅分析瓦伦夹角、焊缝长度与焊缝强度之间的相关度。

表1所示三组试验件几何特征参数中, No.2和No.3芯板角度相同,焊缝长度为8mm和13mm时焊缝强度值即为分析结果数值。由于试验样本点较少,只能根据经验假定焊缝长度对焊缝失效应力影响为线性,由8mm和13mm内插得到10mm处焊缝失效应力为 $[5.23 \times 10^8 \text{Pa}, 4.58 \times 10^8 \text{Pa}, 5.59 \times 10^8 \text{Pa}, 4.90 \times 10^8 \text{Pa}]$ 。No.1和内插得到的焊缝长度相同,得到芯板角度为30°和45°时的焊缝失效应力值,结果如表4所示。分析过程中的诸多假定因素,可以通过后续研究中更多的试验加以修正。

分析表明,在试验件空心结构设计参数变化范围内,焊缝长度和芯板角度对钛合金空心瓦伦结构焊缝强度影响敏感度较高,属于空心瓦伦结构零部件设计需要重点考虑的因素,且需要在工程设计许可范围内,尽可能减小芯板角度,增加焊缝长度,此外需要考虑面板厚度等次要因素的影响。

3 结束语

采用上述分析得到的扩散连接焊缝结构对焊缝强度影响规律,能够为

宽弦空心风扇叶片等空心瓦伦结构零部件设计提供参考,通过在设计过程中调整影响扩散连接焊缝强度的敏感因素,保证设计结果满足振动、强度等工程需求,对所设计的空心瓦伦结构零部件抗冲击强度分析中焊缝强度设置提供理论依据和数据支撑。

通过横向比对本文的分析结果,对工程设计所生成的空心瓦伦结构零部件几何结构特征参数进行分解。参考表4结构参数与焊缝拉伸失效应力和剪切失效应力之间的关系,能够估算出空心瓦伦结构零部件各部位的瓦伦焊缝强度值,提高零部件强度计算精度,为航空发动机零部件设计提供更加可靠地设计校核依据。

AST

参考文献

- [1] Javier B, Antonio G, Richard D, et al. Simulating superplastic forming[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(48): 6580–6603.
- [2] Li G Y, Tan M J, Liew K M. Three-dimensional modeling and simulation of superplastic forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 150:76–83.
- [3] Chen Y, Kibble K, Hall R, et al. Numerical analysis of superplastic blow forming of Ti–6Al–4V alloys[J]. Materials

and Design, 2001, 22(8): 679–685.

[4] Kurtaran H, Eskandarian A, Marzougui D, et al. Crashworthiness design optimization using successive response surface approximations[J]. Computational Mechanics, 2002, 29: 409–421.

[5] Forsberg J, Nilsson L. Evaluation of response surface methodologies used in crashworthiness optimization[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32: 759–777.

[6] Audic S, Berthillier M, Bonini J, et al. Prediction of bird strike in hollow fan blades[C]. Huntsville, Alabama: 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 16–19. July 2000.

作者简介

柴象海, 博士, 工程师, 主要从事航空发动机包容性与外物吸入损伤研究。

王志强, 博士, 高级工程师, 主要从事航空发动机适航安全性验证研究。

冯锦璋, 博士, 研究员级高级工程师, 主要从事航空发动机结构与强度分析研究。