

高压物理学报

鸟撞冲击下TC4钛合金平板的变形和破坏

贾林 李从富 邹学韬 姚小虎

Deformation and Destruction of TC4 Titanium Alloy Plate under the Bird Impact

JIA Lin, LI Congfu, ZOU Xuetao, YAO Xiaohu

引用本文:

贾林, 李从富, 邹学韬, 等. 鸟撞冲击下TC4钛合金平板的变形和破坏[J]. 高压物理学报, 2020, 34(4):044102. DOI: 10.11858/gywlb.20200515

JIA Lin, LI Congfu, ZOU Xuetao, et al. Deformation and Destruction of TC4 Titanium Alloy Plate under the Bird Impact[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(4):044102. DOI: 10.11858/gywlb.20200515

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200515>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

压剪载荷作用下TB6钛合金的动态力学性能

Dynamic Behavior of TB6 Titanium Alloy under Shear-Compression Loading

高压物理学报. 2019, 33(2): 024206 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190713>

不同载荷下TA2钛合金柱壳爆炸碎裂的实验研究

Experimental Study of Fragmentation Behavior of Exploded TA2 Alloy Cylinders with Varied Charge

高压物理学报. 2017, 31(4): 382 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.005>

钛合金药型罩对纯铜及45钢靶的破甲特性

Performance of Titanium Alloy Shaped Charge Liner Penetrating Pure Copper Target and Carbon Steel Target

高压物理学报. 2017, 31(5): 535 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.05.005>

一种超高温动态力学行为测试及原位图像获取方法

A Method for Testing Dynamic Mechanical Behavior of Materials at Ultra-High Temperature and *in-Situ* Observation

高压物理学报. 2018, 32(1): 013202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170522>

落锤冲击下钢筋混凝土梁响应及破坏的数值模拟

Numerical Simulation of Responses and Failure Modes of Reinforced Concrete Beams under Drop-Weight Impact Loadings

高压物理学报. 2018, 32(3): 034102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170693>

AlCrFeCuNi高熵合金力学性能的分子动力学模拟

Mechanical Properties of AlCrFeCuNi High Entropy Alloy: A Molecular Dynamics Study

高压物理学报. 2020, 34(1): 011301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190762>

鸟撞冲击下 TC4 钛合金平板的变形和破坏

贾林¹, 李从富¹, 邹学韬², 姚小虎²

(1. 中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司, 上海 201108;

2. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要: 为了分析航空用 TC4 钛合金板材在鸟撞冲击下的动态响应, 通过 3D-DIC 动态变形场测试技术, 研究了鸟撞冲击过程中 TC4 钛合金平板变形场, 并基于显式有限元分析软件 ABAQUS, 建立了鸟撞数值计算模型。将考虑拉压不对称性的修正 von Mises 屈服准则引入 TC4 钛合金材料的 Johnson-Cook 动态本构模型和动态损伤模型中, 采用光滑粒子流体动力学方法 (SPH) 建立了鸟体模型。数值计算和鸟撞实验的对比结果表明, 计算应变与实验结果吻合很好, 验证了 TC4 钛合金鸟撞冲击数值分析模型的合理性和可靠性。

关键词: TC4 钛合金; 鸟撞; 光滑粒子流体动力学方法; 剪切破坏

中图分类号: O347.3

文献标识码: A

TC4 钛合金是一种 $\alpha+\beta$ 型中强度钛合金, 具有较高的强度和较优异的塑性, 在航空、航天、船舶以及兵器领域应用广泛^[1]。鸟撞问题是飞机结构在起降过程中面临的主要威胁之一。鸟撞发生时, 鸟体在毫秒级时间内瞬间冲击机体结构。高速冲击产生的巨大能量将导致机身结构严重损伤, 从而引发伤亡事故。因此, 国际适航标准要求所有向前部件在使用前必须分析其抗鸟撞性能。

大量的研究表明, 鸟体在高速冲击作用下表现出明显的流体流动飞溅特性。近年来, 诸多学者针对飞机结构的抗鸟撞性能开展了大量研究工作。普遍认为, 高速鸟撞冲击问题是一个应变率相关的流固耦合问题。目前结构抗鸟撞性能的数值分析方法主要有 3 种: 拉格朗日有限元法 (Lagrangian finite element)、任意拉格朗日-欧拉法 (Arbitrary Lagrange-Euler, ALE) 和光滑粒子流体动力学方法 (Smooth particle hydro-dynamic, SPH)。采用拉格朗日有限元法分析高速鸟撞冲击时, 因鸟体结构变形大, 致使单元发生畸变, 故拉格朗日有限元法只适合模拟低速鸟撞。SPH 方法是一种基于拉格朗日技术的自适应无网格粒子法, 将其与有限元方法进行耦合, 可在流固耦合问题求解中展现显著的优势^[2-3]。由于 SPH 粒子在空间相互独立, 因此 SPH 法比拉格朗日有限元法和 ALE 法更适于解决高速鸟撞冲击问题^[4]。例如: 刘军等^[5]通过对比鸟撞平板叶片实验结果和 SPH 法及拉格朗日有限元法数值分析结果, 发现 SPH 方法与实验结果更接近; 刘富等^[6]采用 SPH 方法进行了 2024-T3 铝合金平板抗高速鸟撞冲击性能研究, 得到了与实验结果相近的模拟结果; Liu 等^[7]通过不同速度的平板鸟撞冲击实验和数值分析, 研究了适用于不同鸟撞速度的鸟体模型; 姚小虎等^[8]通过鸟撞圆弧风挡实验和数值计算, 分析了风挡玻璃在鸟撞冲击过程中的损伤破坏。

本研究采用三维图像相关法 (3 dimensional digital correlate, 3D-DIC), 分析 TC4 钛合金平板高速鸟撞过程中的变形场, 基于 SPH 方法和 TC4 钛合金的 Johnson-Cook 动态损伤模型, 建立 TC4 钛合金平板鸟撞数值模型, 并将模拟结果与鸟撞实验进行对比验证。

* 收稿日期: 2020-02-24; 修回日期: 2020-03-17

基金项目: 国家自然科学基金 (11672110, 11472110)

作者简介: 贾林 (1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事发动机强度试验技术研究。

E-mail: jialin20060598@126.com

通信作者: 姚小虎 (1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事爆炸与冲击动力学研究。E-mail: yaoxh@scut.edu.cn

1 钛合金平板鸟撞实验

鸟撞实验装置由鸟弹发射系统、TC4钛合金靶板、速度测试系统、照明系统和高速摄像系统组成。实验装置如图1所示。本实验使用的鸟弹为长 $L=228\text{ mm}$ 、直径 $D=114\text{ mm}$ 的明胶弹。鸟弹由空气炮发射,利用激光测速仪记录发射速度,激光测速仪的系统误差小于0.5%。为了解析TC4钛合金靶板背面的三维变形场,在靶板背面设置两台I-SPEED 716型高速摄影机,拍摄帧率设置为 10^4 帧每秒。位于靶板正面的两台SA-X型高速摄影机记录鸟弹飞行轨迹和撞击靶板时的响应,保证鸟弹垂直撞击TC4钛合金靶板。实验开始之前,进行调焦、视场校准和同步设置。将4台高速摄影机的触发开关通过BNC线引至操作间,其中用于动态3D-DIC测量的两台相机使用转接头连接,以实现同步触发。高速摄影机布局如图2所示。

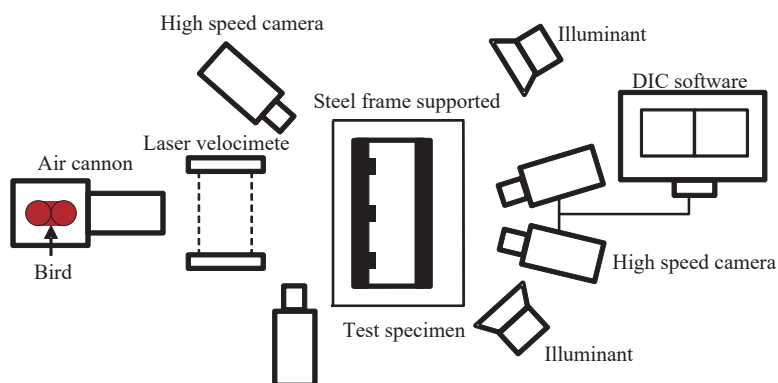


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

试件材料为TC4钛合金平板,尺寸为 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 1.6\text{ mm}$ 。通过均匀分布的16颗M10螺栓及4.0 mm厚的夹具,将试件固定在试验工装上,夹具尺寸与螺栓分布如图3所示。



图2 高速摄影机布局

Fig. 2 High speed camera arrangement

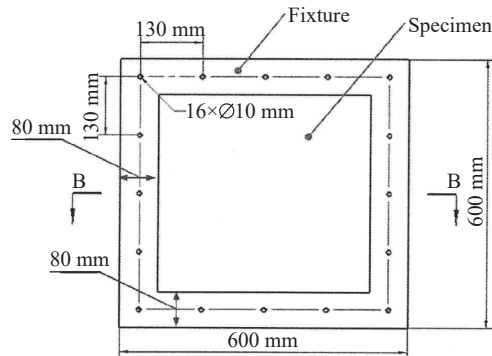


图3 靶板尺寸

Fig. 3 Size of target board

鸟撞实验共设3个发射速度,分别为149、167和180 m/s。每组进行4次重复实验。图4显示了3种速度工况下鸟撞实验结果。图4中第1行的3幅图为平板正面高速摄影图像,可以看出:鸟弹包裹在弹托中由炮管发射,在空气阻力和实验舱入射口的作用下,鸟弹和弹托在撞击TC4钛合金平板前完全分离。弹托保证了鸟弹在发射过程中的整体形状和结构不受炮管内高压气体的破坏,弹托与鸟弹的完全分离消除了弹托对TC4平板鸟撞响应的影响。图4中第2行和第3行图像分别显示了TC4钛合金平板的正面和背面鸟撞冲击结果。发射速度为149 m/s的4次实验中,TC4钛合金平板均未发生破坏;发射速度为167 m/s的4次实验中,2次发生破坏,2次未发生破坏;而发射速度为180 m/s的4次实验中,平板均发生破坏。

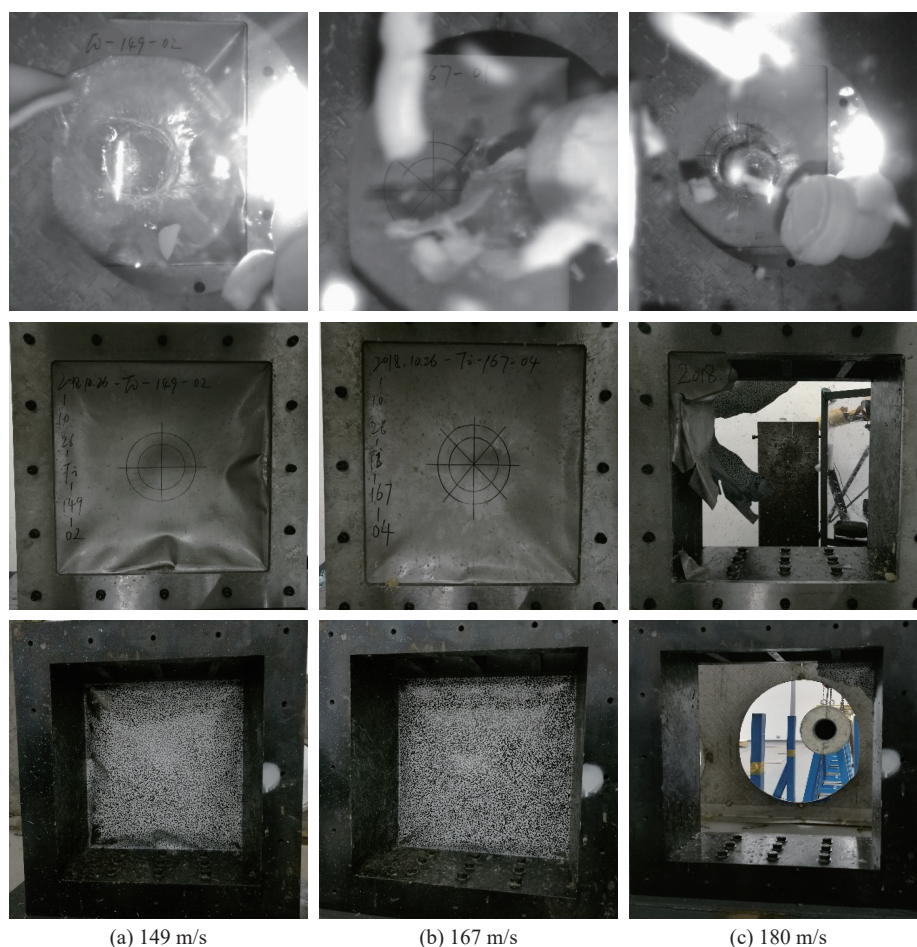


图 4 149、167 和 180 m/s 的鸟撞实验结果

Fig. 4 Results of bird strike experiments at the speed of 149, 167 and 180 m/s

图 5 为 TC4 钛合金平板破坏照片。鸟体撞击平板后产生的拉伸波向外传播, 在螺栓处产生剪切作用, 平板发生了剪切破坏。

2 钛合金平板鸟撞数值计算

2.1 计算模型

数值计算采用的鸟体几何模型与实验相同, 为两端半球状、中间圆柱体的胶囊状柱体, 长径比 $L/D=2$, 如图 6 所示。鸟体模型的质量为 1.8 kg。采用 SPH 单元模拟高速鸟撞冲击过程中的鸟体流体状飞溅, 鸟体材料参数列于表 1。

高速鸟撞实验过程中, 靶板夹具和支撑架的刚度足够大, 夹具和支撑架只发生线弹性变形, 因此采用钢材的线弹性本构模型描述。TC4 钛合金平板在高速鸟撞冲击载荷作用下发生了大变形和损伤破坏。实验发现, TC4 钛合金平板的主要破坏形式是剪切破坏, 因此在数值仿真计算中需要考虑剪应力的影响。大量实验表明, 钛合金材料



图 5 TC4 钛合金平板破坏照片

Fig. 5 Failure of TC4 titanium alloy plate

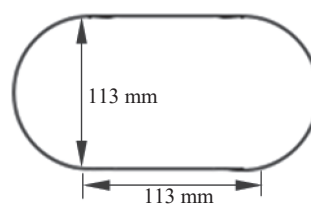


图 6 鸟弹的几何尺寸

Fig. 6 Geometry of bird ball

具有拉压不对称性,需要对 von Mises 屈服准则进行修正。本研究将 Johnson-Cook 动态本构模型和 Johnson-Cook 损伤失效模型引入邹学韬等^[9]提出的 von Mises 修正本构框架中。该本构可以表征 TC4 钛合金在强冲击载荷作用下的塑性流动应力和损伤破坏行为。Johnson-Cook 动态本构模型的表达式为

$$\sigma_s = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中: σ_s 为塑性流动应力; A 为参考应变率下的屈服应力; B 和 n 为应变强化系数; ε 为等效塑性应变; C 为应变率敏感系数; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$ 为无量纲温度, T 为温度, T_m 为材料熔化温度, T_r 为参考温度; m 为温度软化系数。

表 1 鸟体材料参数

Table 1 Material parameters of bird body

Density/(kg·m ⁻³)	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	Yield stress/MPa	Failure strain	Tangent modulus/MPa
928	0.068	0.49	0.69	1.25	5

考虑到 TC4 钛合金材料的拉压不对称性,引入拉压不对称因子 $G(\sigma)$ 修正 von Mises 屈服面,得到屈服函数为

$$\phi = f(\sigma)G(\sigma) = 1 \quad (2)$$

$$f(\sigma) = 3J/\sigma_s^2 \quad (3)$$

$$G(\sigma) = \exp[-c(\xi + 1)] = 1 \quad (4)$$

式中: $f(\sigma) = 1$ 为 von Mises 屈服面函数; $\xi = \cos(3\theta) = \frac{27}{2} \cdot \frac{J_3}{(3J_2)^{3/2}}$ 为 Lode 参数,其中 θ 为 Lode 角, J_2 为偏应力第二不变量, J_3 为偏应力第三不变量; c 为不对称系数,可以通过两种简单应力状态求解。本研究中,不对称系数 c 取

$$c = -2 \ln \left(\frac{\sigma_s}{\sqrt{3}\tau_s} \right) = -2 \ln \alpha, \quad \alpha = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}\tau_s} \quad (5)$$

式中: τ_s 为纯剪切加载的屈服应力。于是,根据相关联的流动法则,即屈服面函数等于塑性势函数 $g(\sigma)$,得到该本构的增量表达式

$$\begin{cases} d\sigma_{ij} = D_e(d\varepsilon_{ij} - d\varepsilon_{ij}^p) \\ d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \\ d\lambda = \frac{g(\sigma_{ij}^{\text{trail}}) + \frac{\partial g}{\partial \varepsilon} d\varepsilon}{\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} Y_{ij} - \frac{\partial g}{\partial \sigma_{eq}^p} H} \\ Y_{ij} = D_e \frac{3}{\sigma_s^2} \exp[2 \ln \alpha (\xi + 1)] \left(\frac{\partial J_2}{\partial \sigma_{ij}} + 2J_2 \ln \alpha \frac{\partial \xi}{\partial \sigma_{ij}} \right) \\ H = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: D_e 为弹性矩阵, $d\lambda$ 为塑性流动因子, ε_{ij}^p 为塑性应变, $\sigma_{ij}^{\text{trail}}$ 为试探应力, σ_{eq}^p 为等效塑性应力。

Johnson-Cook 损伤失效模型为

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)](1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 + D_5 T^*) \quad (7)$$

式中: ε_f 为失效应变; $D_1 \sim D_5$ 为材料参数; $\sigma^* = p/\sigma_{eq}$, 其中 p 为静水压力, σ_{eq} 为等效应力。

数值计算所使用的本构模型参数列于表 2^[10-11], 其中 E 为弹性模量, ρ 为密度, μ 为泊松比。

表 2 TC4 钛合金材料参数^[10-11]
Table 2 Parameters of TC4 titanium alloy^[10-11]

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	μ	T_m/K	A/MPa	B/MPa	n	C	m
4.430	0.33	1 878	1 060	1 090	0.884	0.011 7	1.1
E/GPa	$\dot{\varepsilon}_0/\text{s}^{-1}$	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	
135	4×10^{-4}	-0.090	0.270	0.480	0.014	3.870	

TC4 钛合金平板高速鸟撞的数值计算有限元模型如图 7 所示。TC4 靶板、夹具和 M10 螺栓均采用 C3D8R 六面体八节点减缩积分单元模拟。通过建立一般接触, 计算鸟体撞击 TC4 钛合金靶板以及螺栓和靶板之间的接触。夹具通过 16 颗 M10 螺栓固定在支架上, 在数值计算中对螺栓进行固支约束。鸟体速度分别设置为 149、167 和 180 m/s。

在 TC4 钛合金平板上选取 6 个具有代表性的观测点, 如图 8 所示, 其中观测点 S_1 、 S_2 和 S_3 沿轴向分布, S_4 、 S_5 和 S_6 沿对角线方向分布。

2.2 计算结果

图 9 为鸟撞速度为 149 m/s 时 TC4 钛合金平板的等效应力云图。鸟体撞击平板后, 鸟体前端受到冲击压缩后解体并呈流体状飞溅, 鸟体后端仍保持固体状态。平板受鸟体冲击后产生拉伸波, 并向平板四周传播。1.66 ms 时鸟体完全解体, 鸟体撞击的冲击能量完全耗散, 此时 TC4 钛合金平板的应力、应变和位移达到最大值, 随后开始一定程度回弹。

图 10 为鸟撞击后 TC4 钛合金平板变形的数值计算结果和 3D-DIC 实验结果对比。图 10 中 149 m/s 和 167 m/s 工况下的最大位移($S_{\max}$)图像选自未破坏实验, 180 m/s 工况下的最大位移图像选自平板破坏飞出前(2.00 ms 前)。鸟撞过程中, TC4 钛合金平板的变形大, 对角线方向隆起, 隆起处亮度明显增大, 使得平板部分区域被遮挡, 同时也遮挡了高速摄影机, 因此出现部分区域未追踪到变形场的问题。由图 10 可知, 计算得到的最大位移场与实验结果吻合较好。3 种工况下数值仿真和实验得到的观测点最大位移如表 3 所示。

图 11 为计算得到的 180 m/s 工况下 TC4 钛合金平板破坏过程中的等效塑性应变云图。从图 11 可以看出: 0.40 ms 时, 位于轴线上的 4 颗螺栓附近开始出现裂纹; 0.68 ms 时, 平板与夹具接触处进入塑性阶段; 1.04 ms 时, 平板对角线和夹具接触处开始起裂, 并沿着夹具边缘和对角线方向扩展; 2.00 ms 时, 最先起裂的 4 颗螺栓孔处裂纹贯穿。对比可见, 计算得到的螺栓孔处的损伤和破坏形式与实验结果基本一致。

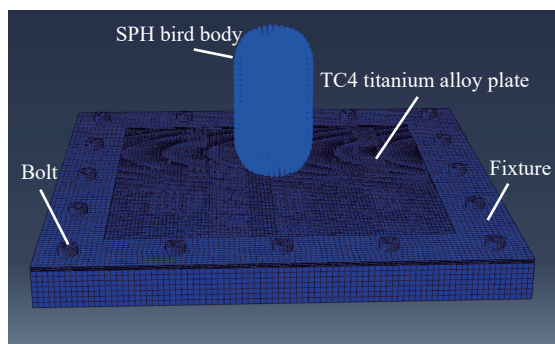


图 7 鸟撞数值计算模型

Fig. 7 Numerical model of bird strike

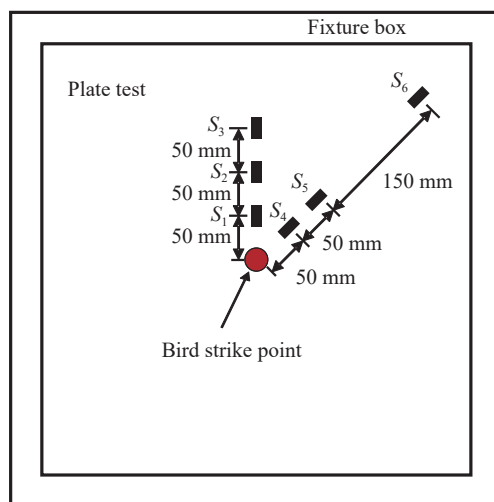


图 8 观测点布局

Fig. 8 Distribution of observation points

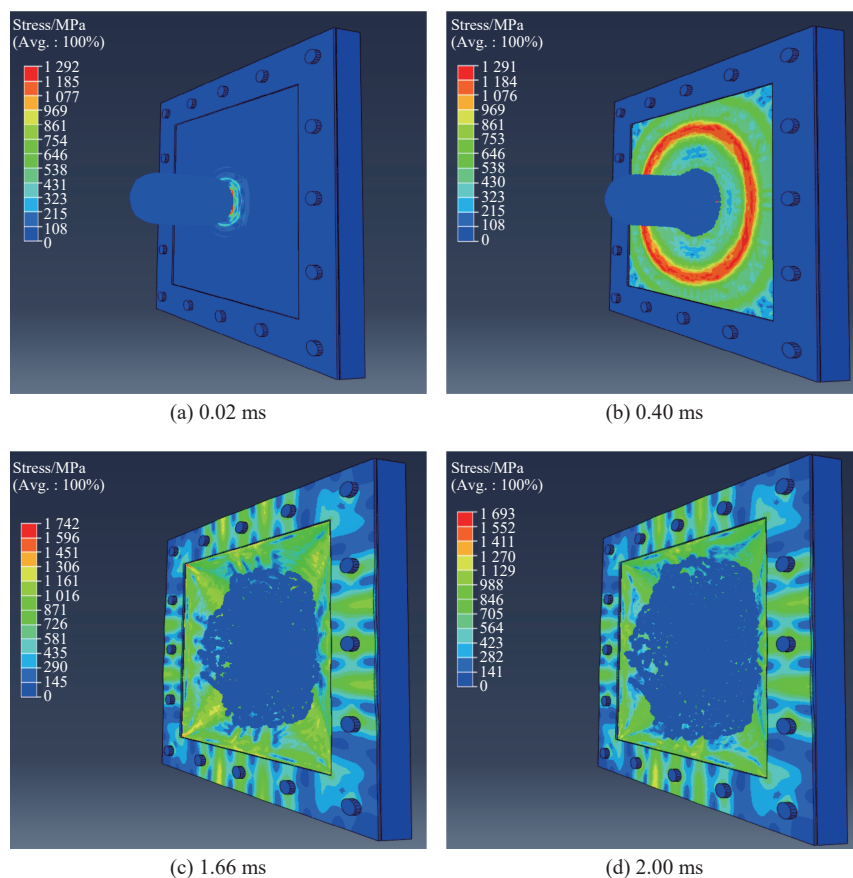


图 9 149 m/s 鸟撞等效应力云图

Fig. 9 Equivalent stress nephograms of bird impacting with the velocity of 149 m/s

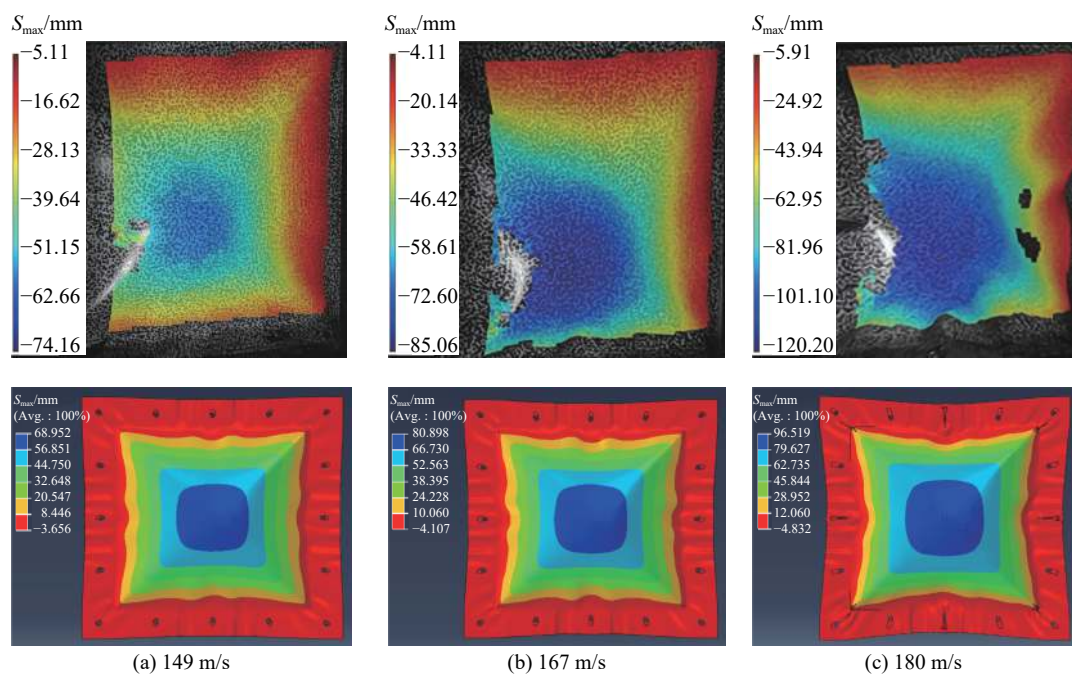


图 10 TC4 钛合金平板鸟撞变形结果

Fig. 10 Deformation of TC4 titanium alloy plate under the bird impact

表 3 TC4 钛合金平板鸟撞最大位移

Table 3 Maximum displacement of titanium alloy plate impacted by a bird

Velocity/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Method	Maximum displacement/mm					
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
149	Sim.	65	51	36	64	55	23
	Exp.	68	60	38	63	53	25
167	Sim.	75	60	48	76	65	27
	Exp.	80	59	47	76	63	24
180	Sim.	119	101	63	118	103	54
	Exp.	117	90	53	103	95	50

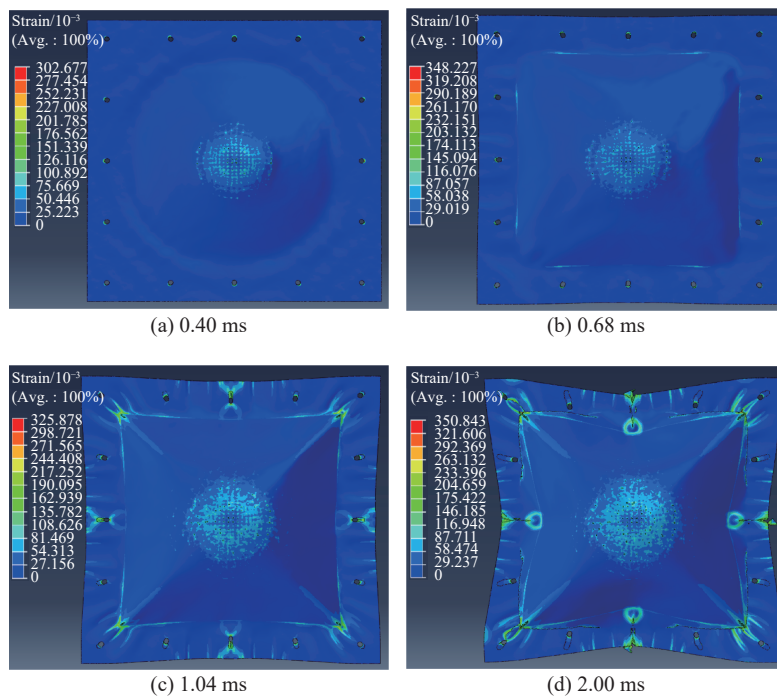


图 11 180 m/s 工况下计算得到的 TC4 钛合金平板破坏过程

Fig. 11 Failure process of TC4 titanium alloy plate calculated at 180 m/s

计算与实验得到的位移-时间曲线对比如图 12 所示。从图 12 中可以看出, 计算得到的位移变化趋势及大小与实验结果基本吻合, 表明本研究使用的 Johnson-Cook 动态本构和损伤失效模型对于模拟 TC4 钛合金高速鸟撞冲击问题是比较准确的。

图 13 对比了 6 个观测点的应变时程曲线。数值计算得到的 6 个观测点应变与实验数据的整体吻合度较高。从图 13 中可以看出, 最靠近鸟撞点的观测点 S_1 和 S_4 的等效应变在 $0\sim 0.2$ ms 内增大, $0.2\sim 1.0$ ms 内保持平稳, $1.0\sim 1.4$ ms 再次增大, 1.4 ms 后再次保持不变, 呈现双台阶模式。其余观测点均未表现出此双台阶模式。观测点 S_1 和 S_2 的等效应变出现双台阶的原因在于这两个点位于鸟弹半径范围之内。鸟弹撞击 TC4 钛合金平板瞬间, 应变瞬间增大; $0.2\sim 1.0$ ms 内应力波向边界传递并在边界处反向, 此时 S_1 和 S_2 区域内材料包裹着鸟弹运动, 因此应变出现平台段; 1.0 ms 时, 边界反射的应力波再次到达 S_1 和 S_2 区域, 使得应变再次增大。

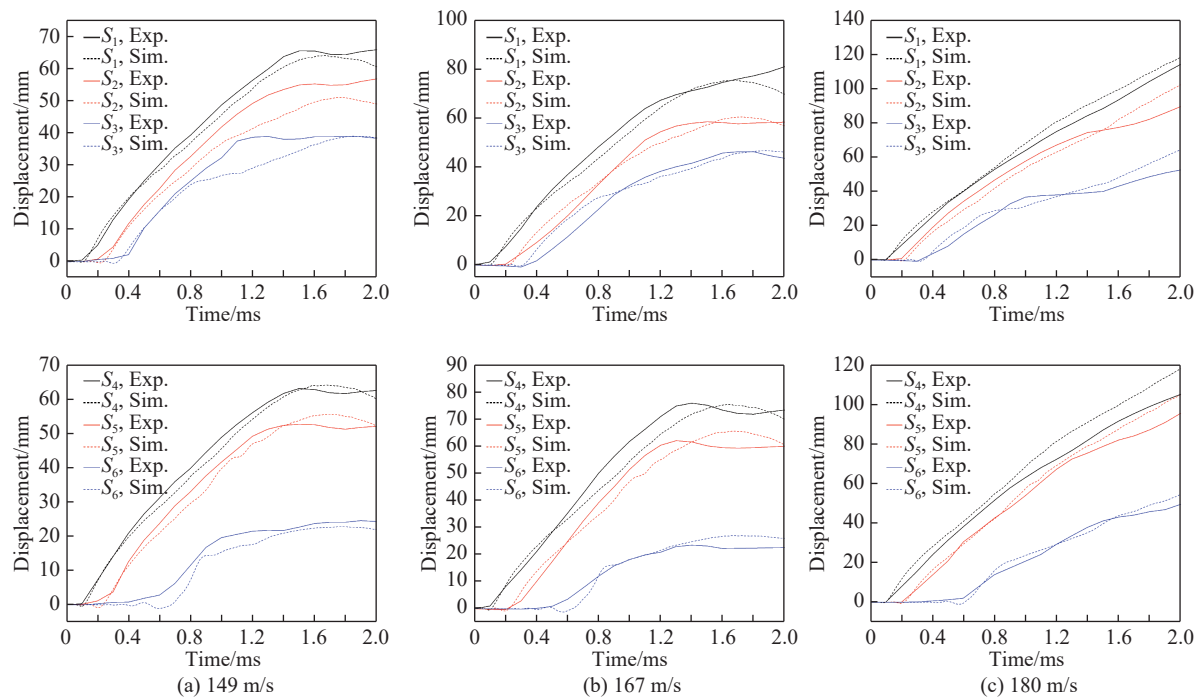


图 12 位移-时间曲线的计算和实验结果对比

Fig. 12 Comparison of calculated displacement-time curves with experimental results

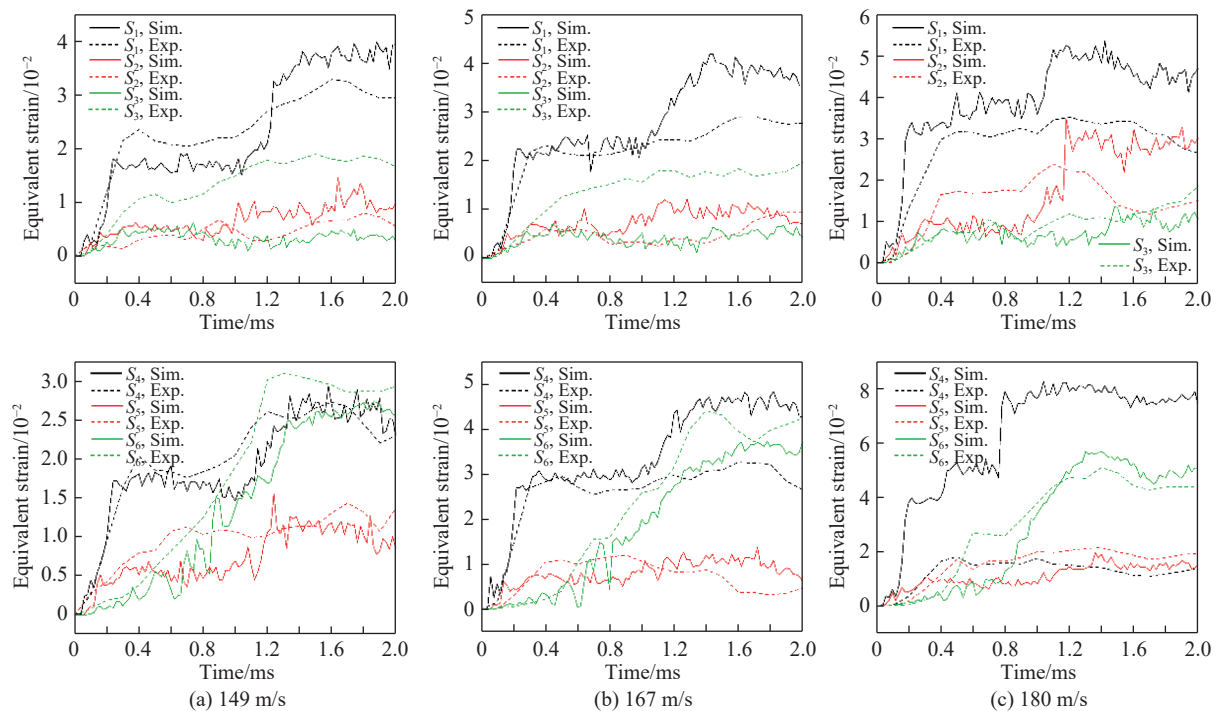


图 13 应变-时间曲线的计算与实验结果对比

Fig. 13 Comparison of calculated strain-time curves with experimental results

3 结 论

通过 3D-DIC 实验和数值计算方法,研究了 1.8 kg 鸟体高速撞击 1.6 mm 厚 TC4 钛合金平板的动态响应和损伤破坏,得到了较精确、有效的有限元模型,并得到如下结论。

(1) 1.6 mm 厚的 TC4 钛合金在 1.8 kg 鸟体高速撞击下的临界破坏速度为 167 m/s。撞击过程中平板内部未破坏, 而螺栓和夹具处发生剪切破坏。

(2) 3D-DIC 测试技术能够比较准确地测定鸟撞冲击过程中 TC4 钛合金平板的变形场。高速冲击过程中平板的变形较大, 易出现光线遮挡和反光, 需要设置补充高速摄影机。

(3) 实验表明, 鸟撞冲击后 TC4 钛合金平板破坏主要为螺栓等边界处的剪切破坏。将修正的 von Mises 屈服准则引入 Johnson-Cook 动态本构和损伤模型中, 在本构中同时考虑拉伸和剪切两种应力状态。该本构能够准确地模拟鸟撞平板问题。

参考文献:

- [1] 黄旭, 朱知寿, 王红红. 先进航空钛合金材料与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
HUANG X, ZHU Z S, WANG H H. Advanced aeronautical titanium alloys and applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [2] GUIDA M, MARULO F, MEO M, et al. SPH-Lagrangian study of bird impact on leading edge wing [J]. *Composite Structures*, 2011, 93(3): 1060–1071.
- [3] DE VUYST T, VIGNJEVIC R, CAMPBELL J C. Coupling between meshless and finite element methods [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(8): 1054–1064.
- [4] 张鼎逆, 上官倩苒, 刘富. 基于 SPH 方法的 LY12-CZ 铝合金平板鸟撞模型 [J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2016, 37(4): 418–422.
ZHANG D N, SHANGGUAN Q Q, LIU F. Model of bird impact on LY12-CZ aluminum alloy plate based on SPH [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2016, 37(4): 418–422.
- [5] 刘军, 李玉龙, 刘元镭. 基于 SPH 方法的叶片鸟撞数值模拟研究 [J]. *振动与冲击*, 2008, 27(9): 90–93.
LIU J, LI Y L, LIU Y Y. Numerical simulation study of bird-impact on a blade using SPH method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(9): 90–93.
- [6] 刘富, 张嘉振, 童明波, 等. 2024-T3 铝合金动力学实验及其平板鸟撞动态响应分析 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(4): 113–118.
LIU F, ZHANG J Z, TONG M B, et al. Dynamic tests and bird impact dynamic response analysis for a 2024-T3 aluminum alloy plate [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(4): 113–118.
- [7] LIU J, LI Y L, GAO X S. Bird strike on a flat plate: experiments and numerical simulations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 70: 21–37.
- [8] 姚小虎, 韩强, 赵隆茂, 等. 飞机圆弧风挡的抗鸟撞击问题研究 [J]. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2007, 35(2): 6–12.
YAO X H, HAN Q, ZHAO L M, et al. Investigation into arc windshield of aircraft subjected to bird impact [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 35(2): 6–12.
- [9] 邹学韬, 张晓晴, 姚小虎. 压剪载荷作用下 TB6 钛合金的动态力学性能 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(2): 024206.
ZOU X T, ZHANG X Q, YAO X H. Dynamic behavior of TB6 titanium alloy under shear-compression loading [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(2): 024206.
- [10] 惠旭龙, 牟让科, 白春玉, 等. TC4 钛合金动态力学性能及本构模型研究 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(22): 161–168.
HUI X L, MU R K, BAI C Y, et al. Dynamic mechanical property and constitutive model for TC4 titanium alloy [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(22): 161–168.
- [11] KAY G. Failure modeling of titanium 6Al-4V and aluminum 2024-T3 with the Johnson-Cook material model: DOT/FAA/AR-03/57 [R]. Washington: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2003: 1–11.

Deformation and Destruction of TC4 Titanium Alloy Plate under the Bird Impact

JIA Lin¹, LI Congfu¹, ZOU Xuetao², YAO Xiaohu²

(1. AECC Commercial Aircraft Engine Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201108, China;

2. Civil Engineering and Transportation College, South University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China)

Abstract: In order to analyze the dynamic behavior of aerospace TC4 titanium alloy plane under the bird impact, the deformation field of TC4 titanium alloy plate subjected to the bird impact was studied by 3D-DIC dynamic deformation field test technology. Meanwhile, a numerical simulation model was established based on explicit finite element analysis software ABAQUS. In this model the Johnson-Cook dynamic constitutive relations was used to describe the property of TC4 titanium alloy, and the bird model was established with smooth particle method (SPH). Comparing the numerical and experimental results, it is concluded that the calculated strain can match the experimental results well. The rationality and reliability of numerical analysis of the bird impact on the TC4 titanium alloy model are verified.

Keywords: TC4 titanium alloy; bird impact; smoothed particle hydrodynamics method; shear failure