

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.033

基于有限元法与 SVM 的摄像机外壳防暴性能分析及壁厚优化

朱超¹, 孙杭其^{1,2}, 刘明^{1,2}, 邓志吉^{1,2}, 纪国伟^{1,2}, 帅树新^{1,2}, 叶建辉¹

(1. 浙江大华技术股份有限公司, 浙江 杭州 310053; 2. 浙江省视觉物联融合应用重点实验室, 浙江 杭州 310053)

摘要: IK 作为电器设备外壳机械碰撞的防护等级, 是结构设计过程中重要的测试标准。利用有限元软件构建 IK10 (20 J 能量) 仿真模型。通过与试验比对, 模型的应变预测误差小于 6% 且能准确捕捉到裂纹损伤的起始位置, 具有良好的一致性。基于上述模型, 对 ADC12 材质外壳进行壁厚优化, 开展不同壁厚外壳的 IK 仿真, 为支持向量机提供训练样本, 构建壁厚与等效塑性应变之间的回归关系, 找寻满足结构强度的最小壁厚, 实现局部轻量化的设计, 对同类产品产品研发具有指导意义。

关键词: IK; ADC12; 有限元; 结构优化; 支持向量机

中图分类号: TG115.5 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)03-0172-04

Antiriot Analysis and Wall Thickness Optimization of Camera-housing Based on FEM and SVM

ZHU Chao¹, SUN Hangqi^{1,2}, LIU Ming^{1,2}, DENG Zhiji^{1,2}, JI Guowei^{1,2}, SHUAI Shuxin^{1,2}, YE Jianhui¹

(1. Zhejiang Dahua Technology Co., Ltd., Hangzhou 310053, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Harmonized Application of Vision and Transmission, Hangzhou 310053, China)

Abstract: IK, as the protection level of the electrical equipment shell mechanical impact, is an important test standard in the structural design process. In this study, the IK10 (20 J energy) simulation model is built by finite element software. Compared with the experiments, the strain prediction error of the model is less than 6%, and the initial position of the crack can be accurately captured, with good consistency. Based on the above model, the wall thickness of the ADC12 material shell is optimized, IK simulation of shells with different wall thicknesses is conducted, training samples for Support Vector Machines (SVM) is provided, and a regression relationship between wall thickness and equivalent plastic strain is constructed to seek the minimum wall thickness meeting with the structural strength. The implementation of local lightweight design has guiding significance for the research and development of similar products.

Keywords: IK; ADC12; finite element method; structure optimization; SVM

0 引言

铝合金由于其机械加工性能良好、强度高、塑性好等特点, 被广泛应用于航天、航空、汽车、机械、安防等领域^[1]。其中 ADC12 作为铝合金中高性能再生铝, 拥有良好的铸造性能^[2], 铸件强度高、热膨胀系数小、耐腐蚀性能高及切削性能好, 因此主要应用于曲轴箱、齿轮箱、气化器本体、电动工具机体及安防领域中摄像机机体等零部件^[3]。

随着科技的发展, 视频资源在守护城市安全、助力城市治理方面发挥着重要的作用^[4]。在使用过程中, 设备工作的环境存在一些容易遭受破坏或者自然环境恶劣的场所, 因此摄像机外壳作为保护内部零件的重要部件需有耐冲击的能力。IK 冲击测试对于摄像机在研发过程中的安全评估至

关重要。

目前国内摄像机中 ADC12 的外壳设计不完善, 为了满足 IK 等级的冲击试验, 外壳的壁厚尺寸设计常常过盈, 生产成本增加, 摄像机整机的质量增大的同时, 更易导致使用风险增加。因此, 需要找寻在满足结构强度前提下的最优壁厚, 但使用传统的试错方法, 对于人力、物力和时间成本需求巨大, 不利于结构的开发。

有限元技术的发展以及优化算法的出现, 为解决这一问题提供了有效手段^[5]。一方面, 采用有限元技术对摄像机外壳进行 IK 仿真, 缩短了设计的周期, 降低了产品的开发和自身成本; 另一方面, 仿真结果可以为优化算法提供训练样本, 以求解最佳设计参数, 使产品的性能达到期望的目标, 实现轻量化并达到环保设计要求^[6-9]。

第一作者简介: 朱超 (1986—), 男, 安徽宣城人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为塑性力学, 442757975@qq.com。

本文以铝合金 ADC12 为原材料,根据国标 GB/T 228.1—2010 设计狗骨形棒材单轴拉伸试验,采用有限元软件中延性金属损伤本构模型标定参数。以此模型为基础,对摄像机整机进行 IK10 仿真,通过与物理试验结果比照,证明有限元模型能够准确地模拟出物理试验的状态。以不同壁厚外壳仿真结果作为数据样本,采用泛化能力强、具有较高的鲁棒性和全局最优性且对小样本建模有高精度^[10-13]的支持向量机(support vector machine, SVM),构建外壳壁厚与等效塑性应变之间的回归关系,以此找到满足结构强度前提下最优的壁厚,为同类产品的研发提供参考。

1 有限元法在摄像机外壳防暴性能分析中的应用

1.1 材料属性

ADC12 属于 Al-Si-Cu 系可热处理强化铝合金,本文采用的试验原材料以某厂生产性能良好的 ADC12 材料为基样,根据国标 GB/T 228.1—2010 设计单轴拉伸试样,得到材料参数如表 1 所示。

表 1 ADC12 铝合金棒材单轴拉伸试验材料属性

材料	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
ADC12	68	0.3	152.3	322.2	4.66

1.2 IK 冲击仿真模型

IK 即电器设备外壳机械碰撞的防护等级,是外壳设计过程中重要的测试标准,对于摄像机整机的安全评估至关重要。根据 GB/T 2423.55—2006 要求,标准监控摄像机的防护等级要求需满足 IK10 测试,即 5 kg 的摆锤在 400 mm 高度的位置进行初速度为 0 的摆锤冲击试验(20 J 能量),冲击过后零件如无裂纹说明部件满足冲击测试。

由于摄像机各组件结构较为复杂,选用四面体网格离散,综合考虑试样的尺寸、仿真精度和运算时间等因素,平均单元尺寸选定为 0.6 mm,模型包含 6 538 296 个单元,1 454 900 个节点,采用 beam 单元模拟摄像机部件之间的螺栓连接,摆球与摄像机之间创建面面接触,其他部件之间创建全局自动接触,全局接触的滑动摩擦因数设为 0.2,选取仿真时间为 0.02 s,图 1 为冲击仿真模型和摄像机模型示意。为了减少仿真计算的时间,将摆锤刚体放置在水平距离模型砸击点 0.5 mm 的位置,根据 $mgh = mv^2/2$,给刚体球施加水平初

速度 2.8 m/s,模拟其从 400 mm 的高度自由摆动的过程。

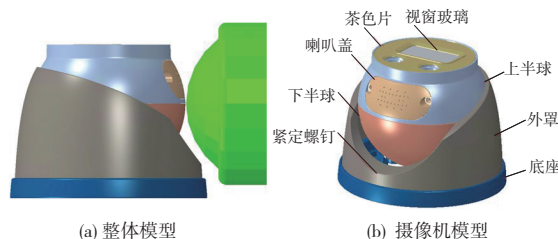


图 1 冲击仿真模型示意

1.3 本构模型

本文利用有限元实现断裂过程的精细化数值仿真,采用延性金属损伤塑性模型,依据 RABOINOV、JEAN 等^[14-15]提出的损伤塑性理论确定的,采用设定连续性参变量的方法,分析构件中损伤演化的复杂进程,参变量即为损伤变量,由此建立损伤模型的本构方程。图 2 所示为延性金属损伤塑性模型,描述一个失效机制的应力-应变曲线,包括 4 个方面:定义有效的材料响应($a-b-c-d'$)、定义损伤起始准则(c 点)、定义损伤演化规律($c-d$)以及损伤发生后网格是否删除(d 点)。因此,基于曲线,在材料参数中输入单轴拉伸试验所得的弹性模量、泊松比和弹塑性阶段的应力-应变曲线以及断裂应变。

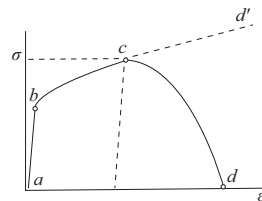


图 2 延性金属损伤塑性模型本构示意图

1.4 IK 冲击试验与有限元分析结果对比

在有限元分析的基础上,对摄像机整机进行 IK10 冲击试验,冲击试验装置如图 3 所示。将摄像机放置在水平的钢板基座上,采用螺钉固定。为防止应变片被砸坏,在冲击点的临近位置设置应变片传感器,连接数据采集设备,用于捕捉在冲击过程中所测位置的应变随时间的变化过程,为了提高精度,调整应变片的读取频率为 10 000 Hz。

在 IK10 等级的冲击下,试验结果如图 4(a)所示,壁厚为 1.6 mm 外壳试验后初始裂纹的位置出现在紧定螺钉孔上方,且边缘处发生了明显的月牙形损伤;如图 4(b)所示,仿真云图结果表明

紧定螺钉处上方的单元被消除呈现出月牙形,最大的等效塑性应变(equivalent plastic strain, PEEQ)达到了8.52%,超出材料的断裂应变值4.66%,摄像机外壳的局部区域已经被破坏,仿真模型很好地捕捉到裂纹的起始损伤区域。此外,锤击过程中应变传感器随时间变化的曲线如图5

虚线所示,在应力波传播的过程中,应变发生了震荡,随着时间的推移,应变逐渐趋于稳定,试验稳定的应变为 $986\mu\epsilon$,通过读取相同位置仿真的应变结果绘制曲线,发现仿真稳定的应变为 $931\mu\epsilon$,与试验的误差为5.9%,因此有限元模型能够较准确地模拟出物理试验的状态。

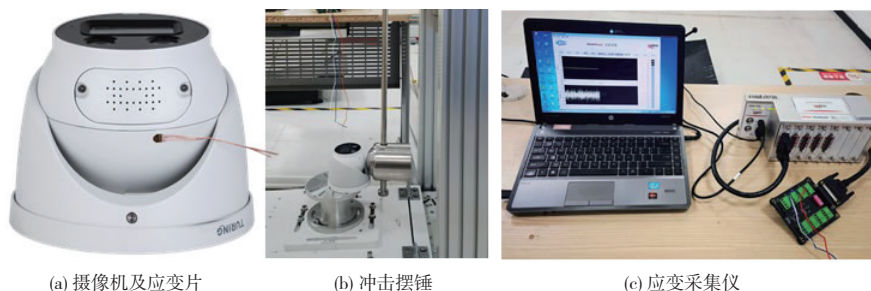


图3 IK10冲击试验设备

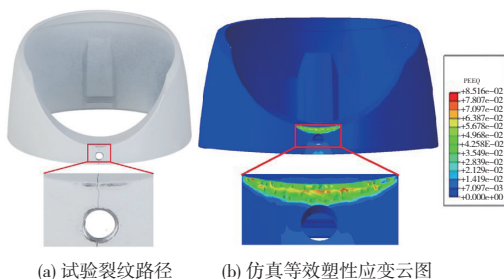


图4 IK10冲击试验仿真对比图

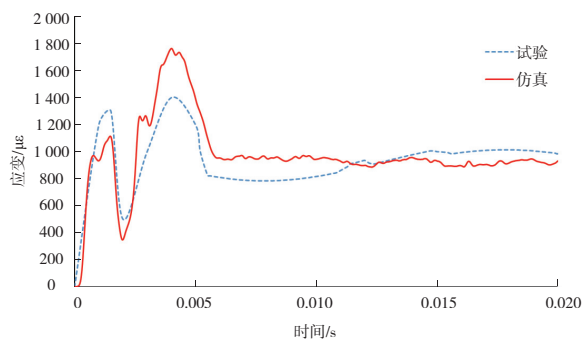


图5 IK10锤击过程中试验与仿真的微应变-时间曲线

2 SVM在原模型的壁厚优化中的应用

物理试验结果发现,壁厚为1.6 mm外壳整机在IK10冲击试验中,外壳出现了明显破坏区域,既定结构无法满足IK10等级的冲击。本文通过增加厚度的方式对外壳结构强度进行加强^[16],从而使试样表面不出现明显的裂纹且仿真结果的PEEQ小于材料断裂应变。但壁厚的增加,使生产成本增加的同时,也增大摄像机整机的质量,加

大了使用的风险。

为找寻在满足结构强度前提下的最优壁厚,单纯采用试验和有限元进行不同壁厚的穷举尝试,人力、物力、时间成本耗费巨大,不利于结构的开发。因此,针对结构复杂且网格数量较大、每种壁厚外壳仿真的计算量大的摄像机,本文选用适合小样本分析的SVM^[17-18]构建壁厚与安全性映射关系模型,最大化提升寻找最优壁厚效率,实现结构轻量化。

为积累SVM训练样本,开展壁厚为1.2 mm、1.4 mm、1.8 mm、2.0 mm的ADC12外壳IK10仿真,结果如图6和表2所示。从1.2 mm到2.0 mm不同壁厚,冲击后最大等效塑性应变有着明显的下降,同时仿真云图中的裂纹扩展尺寸逐步减小(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

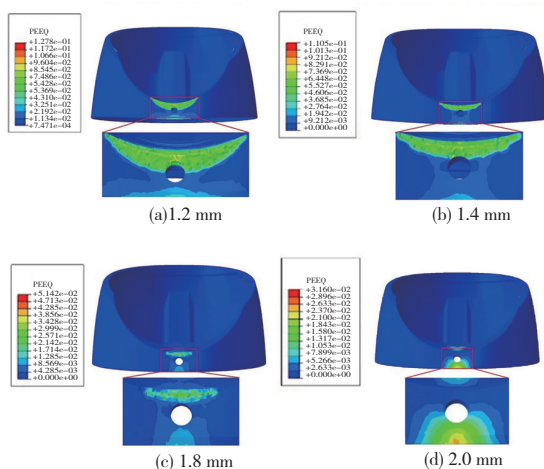


图6 不同壁厚对应的等效塑性应变云图

表2 外壳壁厚及其对应的最大等效塑性应变和质量

壁厚/mm	最大等效塑性应变	质量/kg
1.2	0.127 8	0.121
1.4	0.110 5	0.130
1.8	0.051 4	0.148
2.0	0.031 6	0.156

根据表2中样本,使用SVM构建外壳壁厚与等效塑性应变之间的回归关系,SVM优化目标为:

$$\max \left[-\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m (\alpha_i^* - \alpha_i)(\alpha_j^* - \alpha_j) k(x_i, x_j) + \sum_{i=1}^m \alpha_i^* (y_i - \varepsilon) - \sum_{i=1}^m \alpha_i (y_i - \varepsilon) \right] \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^m \alpha_i^* = \sum_{i=1}^m \alpha_i \\ 0 \leq \alpha_i^*, \alpha_i \leq C (i=1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (2)$$

式中: α_i 为拉格朗日乘子; α_i^* 为最优解; C 为平衡系数; ε 为误差上限; x 为壁厚参数; y 为等效塑性应变; (x_i, y_i) 为所使用第*i*训练样本。核函数 $k(x_i, x)$ 定义了从原始数据映射到高维空间的非线性变换,高斯径向核函数在大样本和小样本都有比较好的回归表现,且比多项式核函数参数少。因此本文使用高斯核函数^[19]。

获得的回归模型为

$$y = \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \alpha_i^*) k(x_i, x) + b \quad (3)$$

式中*b*为偏置值。

据此回归模型,识别满足强度需求对应的最小壁厚,即1.86 mm。为了进一步验证SVM回归的壁厚安全性,更新外壳壁厚重新进行IK10的冲击仿真,得到等效塑性应变云图7,其最大的PEEQ值为0.043 6,与回归函数 $f(x)$ 值0.046 6的误差为6.4%,且云图中单元未被删除,外壳符合安全性。综上所述,1.86 mm为满足结构强度前提下的最优壁厚。

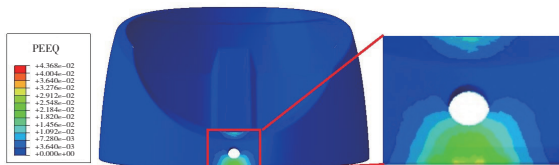


图7 壁厚为1.86 mm外壳IK10冲击仿真等效塑性应变云图

3 结语

本文利用有限元法对摄像机进行了IK10的

防暴冲击仿真,并与物理试验结果比照,证明仿真模型能够准确地模拟出物理试验的状态。针对不同壁厚进行仿真分析,将得到的样本结果用于支持向量机构建回归关系,找到满足结构强度前提下最优的壁厚,对外壳等零部件的设计和改进具有重要的指导意义和参考价值。

1)构建摄像机整机IK10的冲击仿真,与物理试验结果比照,仿真很好地捕捉到裂纹的起始损伤区域。随着应力波的传播,应变发生震荡,对比仿真与试验稳定应变,误差控制在6%以内,有限元模型能够较准确地模拟出物理试验的状态。

2)基于以上模型,开展不同壁厚外壳仿真为支持向量机提供训练样本,构建了外壳壁厚与等效塑性应变之间的回归关系,以此找到满足结构强度前提下最小壁厚,最大化提升寻找最优壁厚效率,实现了局部的轻量化,对同类型产品研发具有指导意义。

参考文献:

- [1] 王蒙蒙,张德恩,卢锦德,等. Al-Cu-Mn系新型铝合金热处理工艺研究[J]. 热加工工艺,2013,42(6): 159-160,163.
- [2] HUANG X, YAN H. Effect of trace La addition on the microstructure and mechanical property of as-cast ADC12 Al-Alloy[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2013, 28(1): 202-205.
- [3] 刘伟,景莉丽,刘云,等. 汽车发动机缸体用ADC12铝合金铸造成分优化[J]. 热加工工艺,2016,45(5): 67-68,72.
- [4] 何丹娜,黄磊,王伟. 关于提高摄像机利用率的方法研究[J]. 警察技术,2022(3): 73-75.
- [5] 刘明卓. 基于ABAQUS的汽车座椅塑料件有限元分析与结构优化[J]. 塑性工程学报,2011,18(4): 116-119.
- [6] 蔡锋,张亮亮,刘旌扬. 优化设计在汽车零部件轻量化中的应用[J]. 汽车技术,2010(4): 25-29.
- [7] 孟子皓,王登峰,张小朋,等. 车架与电池舱一体化结构轻量化与疲劳寿命集成优化设计[J]. 汽车工程,2024,46(12): 2143-2153,2219.
- [8] 李作轩,贾良跃,郝佳,等. 基于多工况关联的无人车辆车身结构轻量化优化设计[J]. 兵工学报,2023,44(11): 3529-3542.
- [9] 刘尚明,张丽,魏成亮,等. 基于多输出LSSVM的压气机特性的拟合和预测研究[J]. 热力透平,2013,42(2): 77-83.

(下转第221页)

• 221 •