

某结构件的非线性弹塑性分析计算

Non-linear Elastic-Plastic Analysis of a Certain Component

洛阳光电技术发展中心 王宏伟

[摘要] 使用有限元软件 MSC/Nastran,对某结构件进行了非线性弹塑性计算,分析对比了结构应力以及残余应力与材料屈服极限之间的关系,计算结果与试验值基本吻合,说明使用该软件进行工程结构非线性弹塑性计算是准确的。

关键词: MSC/Nastran 弹塑性 残余应力 塑性变形

[ABSTRACT] The structure in this paper is analyzed by the finite element software MSC/Nastran in non-linear elastic-plastic solution, and the relationship of the structural stress and residual stress compared with yielding limit of the material has been examined. The results of the analysis fit the experimental results well, which confirms the accuracy of the nonlinear elastic-plastic solution about the engineering structures by using the software.

Keywords: MSC/Nastran Elastic-plasticity Residual stress Plastic deformation

工程实际中,结构件在外载荷的作用下,常常只需要在材料的线弹性范围内进行强度与刚度的分析计算。但是,对于某些领域产品的设计,结构件在载荷作用下,工作应力可能超过材料的屈服应力极限,从而产生结构材料的屈服变形。当屈服变形过大时,会导致结构件的性能失效,影响结构件的正常使用。因此,在某些领域产品设计中,需要对结构件的材料进行弹塑性范围内的非线性弹塑性分析计算。

1 塑性计算原理

1.1 初始屈服准则

金属塑性材料在载荷作用下,当材料的应力 σ 小于材料的屈服极限 σ_s 时,材料处于弹性变形阶段;当 $\sigma = \sigma_s$ 时,材料开始塑性变形,此时称为初始屈服。在单轴应力状态下的初始屈服准则为 $\sigma = \sigma_s$; 在任一可能应力组合下的应力初始屈服准则可表示为 $f(\sigma_{ij}) = k$, 其中, σ_{ij} 为应力分量, f 为屈服函数, k 为材料常数。

根据材料初始屈服条件与坐标轴的方向选取无关的各向同性假定,可将上式改写为应力偏量不变量的函数,其一般形式为 $f(J_1, J_2, J_3) = k$, 其中, $J_1 = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3$, $J_2 = -(\sigma'_1 \sigma'_2 + \sigma'_2 \sigma'_3 + \sigma'_3 \sigma'_1)$, $J_3 = \sigma'_1 \sigma'_2 \sigma'_3$, 式中, J_1, J_2, J_3 为

应力偏量的不变量, $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ 为 3 个主应力的应力偏量^[1-2]。

在工程中常用的初始屈服准则为 Tresca 准则(第三强度理论准则)和 Mises 准则(第四强度理论准则),两种准则均适用金属材料的弹塑性应力分析,但 Tresca 准则在计算时只考虑第 1、3 主应力的作用,而 Mises 准则计算时考虑了 3 个主应力的作用。对于多数情况, Mises 准则更接近于试验结果,因此本文使用 Mises 准则进行计算^[1-2]。

1.2 后继屈服准则

当材料应力 σ 大于材料的屈服极限 σ_s 时,应力变化服从后继屈服准则,包括各向同性后继屈服准则和各向异性后继屈服准则。对于金属材料一般使用各向同性后继屈服准则,各向同性后继屈服准则又包括加工硬化法则和应变硬化法则。

加工硬化法则认为 k 值取决于塑性功的积累 ($\int dW_p$), 从而后继屈服准则具有如下形式: $\sigma = f(J_1, J_2, J_3) = k = F(\int dW_p)$, 该式可以写成增量形式 $d\sigma = F' dW_p$, 则加工硬化法则函数 $h = \frac{1}{F' f}$ 。其中, F 为后继屈服函数,反映了材料硬化后新的屈服应力对于等效塑性功的依赖关系; F' 为材料强化阶段等效应力与等效塑性功曲线 $\sigma - \varepsilon_p$ 的斜率^[2]。

应变硬化法则认为 k 值取决于塑性应变积累 ($\int d\varepsilon_p$), 从而后继屈服准则具有如下形式: $\sigma = f(J_1, J_2, J_3) = k = H(\int d\varepsilon_p)$, 该式的增量形式为 $d\sigma = H' d\varepsilon_p$, 则应变硬化法则函数 $h = \frac{\sqrt{3}}{2H'}$ 。其中, H 为后继屈服函数,反映了材料硬化后新的屈服应力对于等效塑性应变总量的依赖关系; H' 为材料强化阶段等效应力与等效塑性应变曲线 $\sigma - \varepsilon_p$ 的斜率^[2-3]。

2 结构件的弹塑性计算

某圆筒形结构件由部件 1 和部件 2 两部分组成,部件 2 外缘直径左端处与部件 1 内缘直径左端处通过楔块将两个部分连接在一起成为整体,在部件 2 外缘直径右端处与部件 1 内缘直径之间安装密封圈,从而在部件 2 与部件 1 右内侧形成一个密封腔体,可以承受内压的

作用。

腔体内表面的工作压力为 11MPa,工作压力作用下的结构应力超过材料的屈服极限导致结构塑性变形,卸载后形成塑性残余变形。因塑性变形较大影响了结构件的正常使用,需要对其进行弹塑性分析计算。

在建模计算时,由于两部分连接处的壁厚较大,且连接处没有受到工作压力(11MPa)的作用,使其计算应力较小,为简化结构有限元模型并提高计算效率,对该结构接触部分作简化处理,将两部分结构件在该接触部分结构固连,处理结果虽然使该处附近的应力计算结果与真实应力情况不一致,但对整个结构的计算结果没有影响。

2 个结构件的组成材料分别为 Mat1 和 Mat2,均为金属塑性材料。根据对两种材料进行应力应变试验测试,得到两种材料的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线,分别如图 1、图 2 所示。材料 1 的弹性模量 $E_1=165000\text{MPa}$,泊松比 $\mu_1=0.3$,屈服强度极限为 1510MPa ;材料 2 的弹性模量 $E_2=184000\text{MPa}$,泊松比 $\mu_2=0.2983$,屈服强度极限为 1050MPa 。

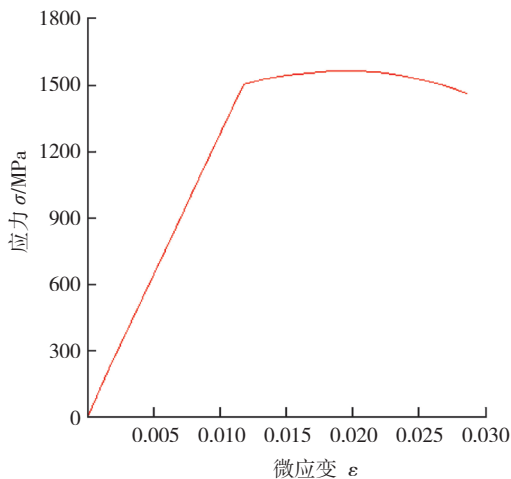


图1 材料Mat1的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线
Fig.1 $\sigma-\varepsilon$ curve of the material Mat1

3 分析计算流程

3.1 有限元模型

根据结构件的实际结构尺寸,使用 MSC/Patran 软件建立结构件的有限元模型,如图 3 所示。在所建的有限元模型中,共有 3824 个六面体有限单元,6426 个有限元节点。

3.2 边界约束

根据结构件对称性的特点,结构件受到均匀内压变形后,对于 Y 轴上的节点在 Z 向上的位移为 0, Z 轴上的节点 Y 向上的位移为 0,从而分别约束有限元模型部件 1 左端上相应节点的 Y 向和 Z 向位移分别为 0;另外,

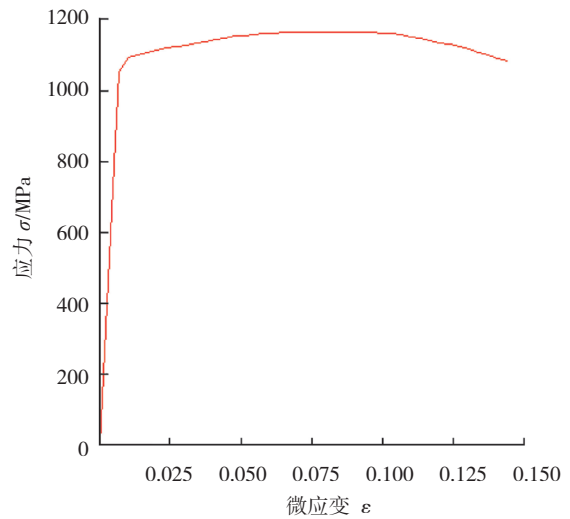


图2 材料Mat2的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线
Fig.2 $\sigma-\varepsilon$ curve of the material Mat2

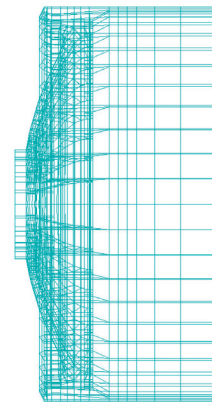


图3 结构件的有限元模型
Fig.3 Finite element model of the structure

模型左端节点的 X 向位移约束为 0。模型约束如图 4 所示。

3.3 材料弹塑性属性的定义

利用 MSC/Patran 软件 Fields 菜单中的 Create/Material Property/Tabular Input 工具分别定义两种材料的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线,然后与材料的属性定义相关联,确定材料的弹塑性特性及其他材料属性。

3.4 分析工况定义

使用 MSC/Patran 软件 Load Cases 菜单中的 Create 工具分别建立 2 种工况: Case1 和 Case2。这 2 种工况的边界约束相同,唯一不同是 Case1 为内压作用工况,Case2 为无内压工况,即卸载工况。

3.5 弹塑性分析算子定义

使用 MSC/Patran 软件 Analysis 菜单中的 Analyze/Entire Model/Full Run 工具,点击对话框选择 NONLINEAR STATIC,即非线性解算器 SOL106,点击 Subcase Selete 对话框同时选择 Case1 和 Case2 作为计

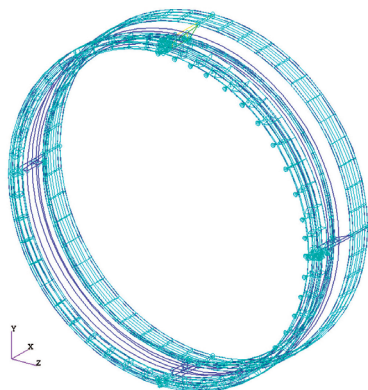


图4 模型约束图

Fig.4 Constraint chart of the model

算工况,另外其他计算选项可以使用默认也可以重新定义。

3.6 分析计算及结果输出

以上各计算选项定义完毕后,即可使用 MSC/Nastran 软件进行弹塑性计算,得到计算结果文件。文件中包含载荷作用下的选择应力变形值以及卸载后的应力变形值等信息。

然后使用 MSC/Patran 软件 Analysis 菜单中的 Read Output2/Result Entities 工具将结果文件读入到 MSC/Patran 软件中。

3.7 结果显示与分析比较

使用 MSC/Patran 软件 Result 菜单中的 Result 后置处理工具,显示计算结果,分析判断计算结果的合理性与准确性。结果中的 Case1 工况为载荷作用下的应力变形情况,Case2 工况为卸载后的应力变形情况。

4 计算结果

使用 MSC/Nastran 的 SOL106 解算器进行结构件的弹性分析计算。计算后使用 MSC/Patran 后置处理工具调出计算结果进行分析比较。

部件 1 在工作压力下的 Von Mises 应力最大值为 1256.4MPa;最大变形为 0.70356mm,其中,部件 1 上的最大轴向变形为 -0.1616mm,最大径向变形为 -0.69227mm。工作状态下的应力云图如图 5 所示,变形云图如图 6 所示。

工作压力卸掉后,部件 1 的残余 Von Mises 应力最大值为 16.506MPa;最大变形为 0.01244mm,其中,最大轴向变形为 -0.00143mm,最大径向变形为 -0.01243mm。部件 1 卸载后的残余应力云图如图 7 所示,残余变形云图如图 8 所示。

部件 2 工作压力下的 Von Mises 应力最大值为 1102.1MPa;最大变形为 1.8748mm,其中,部件 2

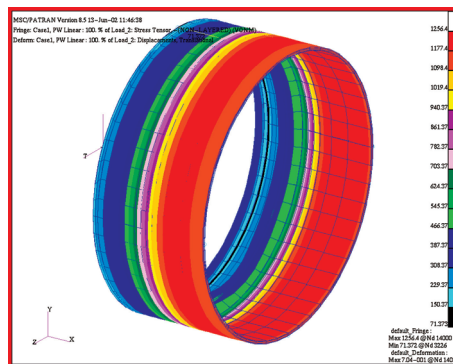


图5 部件1工作压力下的应力云图

Fig.5 Stress distribution cloud drawing under the working pressure of Part 1

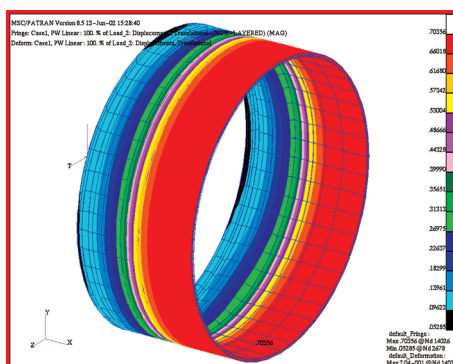


图6 部件1工作压力下的变形云图

Fig.6 Deformation distribution cloud drawing under the working pressure of Part 1

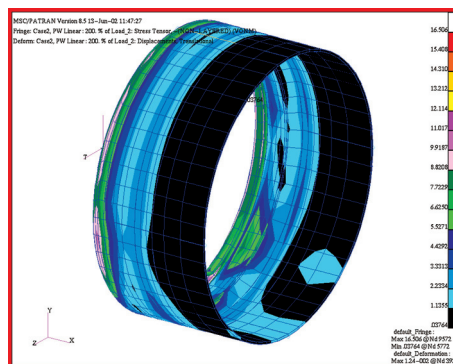


图7 部件1卸载后的残余应力云图

Fig.7 Residual stress distribution cloud drawing of Part 1 after unloading

上的最大轴向变形为 -1.8747mm,最大径向变形为 -0.83953mm。工作状态下的应力云图如图 9 所示,变形云图如图 10 所示。

压力卸掉后,部件 2 的残余 Von Mises 应力最大值为 790.93MPa;最大残余变形为 0.22924mm,其中,最大轴向残余变形为 -0.22911mm,最大径向变形为

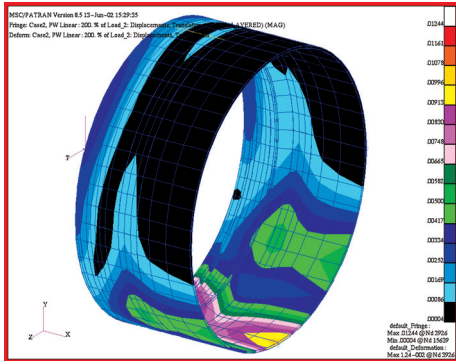


图8 部件1卸载后的残余应力云图
Fig.8 Residual stress distribution cloud drawing of Part 1 after unloading

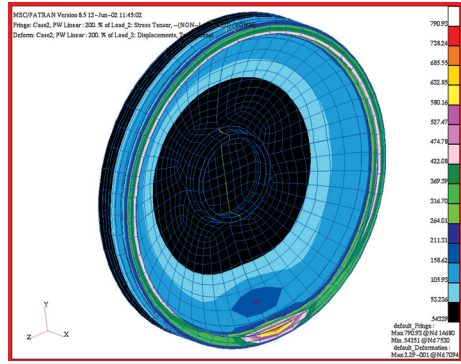


图11 部件2卸载后的残余应力云图
Fig.11 Residual stress distribution cloud drawing of Part 2 after unloading

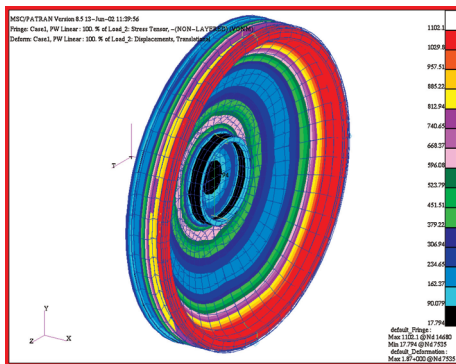


图9 部件2工作压力下的应力云图
Fig.9 Stress distribution cloud drawing under the working pressure of Part 2

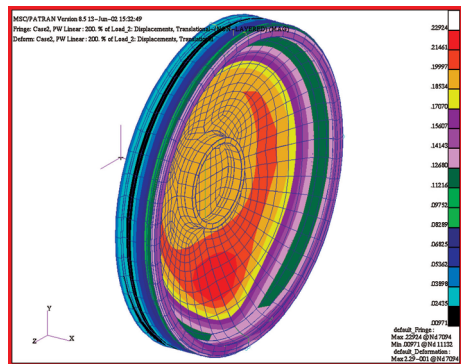


图12 部件2卸载后的残余变形云图
Fig.12 Residual deformation distribution cloud drawing of Part 2 after unloading

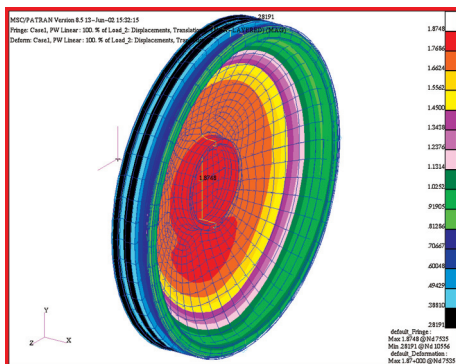


图10 部件2工作压力下的变形云图
Fig.10 Deformation distribution cloud drawing under the working pressure of Part 2

-0.14941mm。部件 2 卸载后的残余应力云图如图 11 所示,残余变形云图如图 12 所示。

从计算变形结果的数值可以看出,由于部件 1 的最大等效应力 1256.4MPa,小于其材料的屈服强度极限 1510MPa,结构的变形为线弹性范围内的变形,没有材料的塑性变形的发生。因此,卸载后部件 1 的结构变形

基本恢复,剩余的结构变形和残余应力是因与部件 2 的连接及部件 2 的塑性变形而引起的,所以部件 1 的残余变形和残余应力较小。

部件 2 的最大等效应力为 1102.1MPa,大于材料的屈服强度极限 1050MPa,结构材料已经屈服变形。从其残余应力和残余变形较大的结果也可以证明材料塑性变形的发生。

另外,部件 2 的残余最大轴向变形 -0.22911mm 与残余最大径向变形 -0.14941mm 的计算结果和工程中的试验测试结果 -0.26mm 与 -0.17mm 基本相符,而且计算和试验测试的结构位置也一致。

5 结束语

从以上的分析和比较可以看出,当结构的应力小于材料的屈服极限时,按照理论分析,结构应不存在残余变形与残余应力作用;当结构的应力大于材料的屈服极限时,存在残余变形和残余应力;在由几个结构组合的复杂结构中,对于实际应力小于材料屈服极限的分结

(下转第 89 页)

联合质控、技术等部门对航材储备进行共同的分析,则会最大限度地避免不合理库存,使航材储备更加经济合理化。如技术部门根据最低设备清单(MEL)和维护经验对一些组合部件的分析将有助于有寿命的部件拉开梯次,由此降低库存量。对一些故障部件采取预防性维修措施,可以减少维修费用。各部门联合实施航材管理,特别是对机队较小、技术力量较弱的维修单位,可以使人力资源得到有效的利用^[4]。

3.2 强化航材成本控制

根据航材的流转件、慢流转件、不流转件的分类情况及该件是国内修还是国外修的送修渠道分类情况,制定出不同的保证率和控制方法。

(1)对于国内能修的流转件,应给予较低的保证率。通过加快修理,缩短修理周期,使航材库存量减少,库存资金占用小;对于不流转件中的低价不流转件建议其保证率确定为90%;对于高价流转件的保证率就定为92%。并在周转分析中划分几个周转标准,通过计算机对周转额的排序,掌握航材的消耗规律以及常耗器材的动态。

(2)周转件在航材储备项数上虽只占20%,但在库存资金上却占到了80%左右。因此,计划人员对周转件的订货和送修要有更多的关注,严格订货决策和审批权限,对于周转件的工作重点应该放在加强送修、缩短修理周期的工作上。其保证原则是允许库存为零,但不能影响正常飞行。消耗件在航材储备项数上占到了80%,而资金上却只占20%左右。对此,常耗件的保证原则是不允许库存为零,但要严格控制最高储备定额。并且要杜绝积压航材或计划不当和影响正常供应^[5]。

(3)订货渠道也是航材成本控制的一个因素。简单的货比三家只能得到相对价格低廉的航材,要选择原生产厂或实力较大的库存分销商。特别是独家库存分销商,有时价格低于原厂,因此航材科需要广泛建立这种订货渠道^[6]。

3.3 打造航材共享平台

在超过600亿的民航航材储备中,周转件占库存的80%,不少于480亿。3年不流转的中转件按抽样统计占库存的34%,约200亿。消耗件约占100亿,也就是说富余航材超过200亿元。各个航空公司都建立了相对独立的航材储备,随着机队规模和航线不断扩大,需要不断扩大航材储备以保证航班运行,虽然各个公司情况不尽相同,但都会有一批航材沉淀下来,对整个行业而言存在着整合的空间^[7]。

航材共享有以下突出作用:第一,有利于周转件互援。从技术角度分析,飞机的使用时间长短不同、气候条件不同、维护技术人员不同、航材的短时间内消耗不

同,这样会出现某一项航材在一段时间内在一个地方消耗大、而别的地方基本不消耗的情况。所以航材互援能充分利用资源,减少单方库存,增加整体库存利用率,从而提高经济效益。第二,有利于消耗件调配。航材消耗件周转速度慢,容易造成积压。如果航材共享开展得顺利,可以在共享的各单位间调配,这样积压航材就被激活,而且又可以节约资金,双方有利。第三,有利于信息交流。通过航材储备管理行业间的交流,可以逐渐总结出储备经验数据,总结出先进的管理方法,在对比中发现自己的不足^[8]。

4 结束语

航材管理是航空公司成本控制最为重要的方面之一,它不但影响航空公司飞行服务的正常性,也影响着航空公司的经济效益。CCAR-121R2及其咨询通告以行业法规的形式为我国的航材管理提供了一个系统的管理模式,本文希望通过对这些法规的解读,能够引起航空公司对航材适航性的重视;同时也希望对航材管理方面的建议能够使航空公司提高经济效益。

参考文献

- [1] 赵淑舫,宁宣熙,吴桐水.航材需求预测模型研究.中国民航学院学报,2002,20(3):20-23.
- [2] 刘刚.南方航空公司航材采购管理研究[D].大连:大连理工大学,2005.
- [3] 田云.浅谈航材管理中的成本控制[EB/OL]. [2010-12-07]. <http://www.china-cam.cn/news/experience/2010/12/1271589.html>.
- [4] 李卫灵,张素琴,李丽.航材全寿命管理研究.价值工程,2010(34):102-103.
- [5] 韩来庆,王威,赵福军.装备全寿命管理看航材综合保障.科技信息,2008(6):56-58.
- [6] 郑勇.从CCAR-121R2看民航总局的航材管理发展导向[EB/OL]. [2007-05-16]. <http://news.carnoc.com/list/84/84961.html>.
- [7] 陈姗姗.中航材拟打造航材共享平台[EB/OL]. [2011-05-13]. <http://finance.ifeng.com/news/corporate/20110513/4015983.shtml>.
- [8] 曾焯.建立经济效益型的航材管理方式.现代商贸工业,2008(4):190-192.

(责编 深蓝)

(上接第86页)

构,如果存在残余应力与残余变形的情况,往往是因为组合结构中其他分结构具有较大残余变形而导致的。

参考文献

- [1] 汪凌云.金属塑性变形力学.重庆:重庆出版社,1986.
- [2] 王仁,熊祝华,黄文彬.塑性力学基础.北京:科学出版社,1998.
- [3] 谢贻权,何福保.弹性和塑性力学中的有限单元法.北京:机械工业出版社,1981.

(责编 深蓝)