

应急脱离剪切销的双剪切破坏过程仿真研究

谈志晶* 林 森

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘 要: 民用飞机吊挂应急脱离剪切销需要在紧急情况下断开并使得吊挂或者发动机脱离机翼, 避免飞机在紧急着陆时, 吊挂结构因受到地面反弹而损坏机翼油箱, 导致油箱漏油起火引发火灾。因此应急脱离剪切销对于飞机紧急着陆状态下, 飞机安全着陆起到了非常重要的作用。本文以不锈钢材料的应急脱离剪切销为研究对象, 通过试验方法对不锈钢材料的试件进行力学性能测试, 根据测试结果建立了应急脱离剪切销的弹塑性本构模型, 依据本构模型开展了 2 种不同径厚比下的应急脱离剪切销双剪仿真分析。分析结果表明, 在双剪工况下, 随着施加在剪切销上的载荷增加, 应急脱离剪切销上剪切应力在两侧不断增加; 剪切销的内径越大, 其破坏瞬间的剪切强度越大, 且破坏位移越大。

关键词: 剪切销; 不锈钢; 本构模型; 仿真

中图分类号: V215

文献标识码: A

OSID:



0 引言

吊挂结构是民机的主要承力部件, 整个飞行过程中传递来自发动机产生的推力, 而在紧急情况下需要在吊挂与发动机的连接接口或者吊挂与机翼的连接接口脱离, 切断推力继续传递至机翼, 保证飞机的安全着陆, 因此研究如何保证吊挂应急脱离剪切销在紧急情况下的有效脱离相当重要。本文选用不锈钢作为应急脱离剪切销的材料并论述应急脱离剪切销的结构设计要求。目前, 国外应急脱离的相关研究相对于国内起步较早, 因此国内的理论研究相对薄弱^[1-2]。美国学者较早的研究分析了飞机失事的影响因素, 并提出针对飞机抗坠性的若干优化意见^[3], 之后又根据民用飞机适航条款的相关要求, 设计了一种能够在紧急情况下自动断开的保护装置, 该保护装置会在飞行载荷达到一定阈值后自动断开^[4]。国内学者范耀宇等^[5]通过分析历史上民用飞机应急着陆时发生的空难, 并结合空客、波音等飞机设计公司在吊挂应急脱离方向的设计理念, 对中国民机吊挂的紧急情况下的脱离设计提出了一

些建设性意见, 并进一步结合 PAM-CRASH 仿真软件模拟分析了民用飞机吊挂应急脱离的方案^[6]。2015 年, 我国张鹏飞学者^[7]发表论文叙述了民用飞机紧急状况下的应急脱离设计, 论述了发动机或吊挂的应急脱离设计的试验验证以及模拟仿真的方法。2015 年我国朱成钢^[8]研究并总结中国国内已有的应急脱离剪切销的强度设计方法, 并在总结的基础上提出了应急脱离剪切销新的强度设计思路, 即通过塑性修正方法得到应急脱离剪切销断离横截面上的极限许用力矩, 只需保证经过塑性修正后得到的弯曲强度达标即可。2017 年金子博等人^[9]以某大型民用飞机吊挂应急脱离剪切销的设计为背景, 研究了超静定结构双剪切应急脱离剪切销横向抗冲击性能对应急脱离剪切销强度设计的影响程度。首先其通过 ABAQUS 有限元仿真软件建立了一套热耦合力学模型, 通过相关边界条件的设定, 模拟真实的飞机紧急迫降工况, 并使用多组不同尺寸应急脱离保险销, 在不同着陆角度以及着陆速度下, 模拟分析了应急脱离剪切销的剪断载荷和能量吸收效率, 并最终得出不同内外径尺寸以及径厚比对应

* 通信作者。E-mail: tanzhijing@comac.cc

引用格式: 谈志晶, 林森. 应急脱离剪切销的双剪切破坏过程仿真研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2021(1): 64-68. TAN Z J, LIN S. Simulation study on double shear failure process of emergency breaking shear pin[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2021(1): 64-68 (in Chinese).

急脱离剪切销剪断特性的影响。

民用飞机应急脱离剪切销的设计,通常情况下使用不锈钢作为制造应急脱离剪切销的材料,而不锈钢的力学性能直接影响应急脱离剪切销的使用寿命。含铜相析出作为不锈钢加强的一种手段之一^[10-11],通过析出粒子错位发生积塞增加材料强度。另外,采用热处理手段来提高不锈钢的抗磨损性能^[12-13]。计算机领域的迅猛发展,带动了相关仿真软件的飞速进步,众多有限元仿真软件已经具有强大的仿真分析能力,包括材料的力学性能分析、失效准则的建立以及模型网格的划分。2013 年宗俊达等人^[14]使用 MSC Nastran 软件对应急脱离剪切销的试验夹具进行了强度以及刚度的模拟计算,给出了试验夹具的校核设计方法,为试验夹具提供了设计思路。张孟攻学者^[15]提出了一种应急脱离剪切销抗剪强度计算的理论方法,其采用三维模型和有限元分析方法动态模拟了应急脱离剪切销的脱离全过程。2015 年,王宝宾等人^[16],采用 ABAQUS 仿真软件,模拟了应急脱离剪切销在不同直径尺寸下的脱离应力,并通过试验进行了验证,成功地将应急脱离技术应用于航空业以外的领域,解决了汽车制造业中变速器台架应急脱离问题,从而以较低的研发成本保护了昂贵的试验设备的安全。本文以应急脱离剪切销为研究对象,开展力学性能测试和断裂过程仿真分析,研究不同径厚比对应急脱离剪切销破坏过程的影响,为后续应急脱离剪切销试验件的设计与制造提供理论支持。

1 试验

1.1 试验方法

圆柱体单向拉伸实验是材料力学性能测试中常见的试验方法,方便为材料的有限元模拟提供精确有效的理论数据。依照 ASTM E8/E8M 金属材料试验方法,开展某种不锈钢制作的哑铃型试棒单轴拉伸试验,为减少试验装夹等带来的影响,开展 3 组单轴拉伸试验,试样尺寸如图 1 所示。试验装置采用万能试验机。

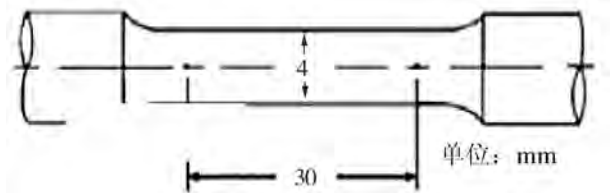


图 1 试样尺寸

1.2 试验结果

基于单轴拉伸试验数据,进行本构模型和有限元模型的建立。由位移载荷曲线转换得到真实应力-应变曲线,如图 2 所示。

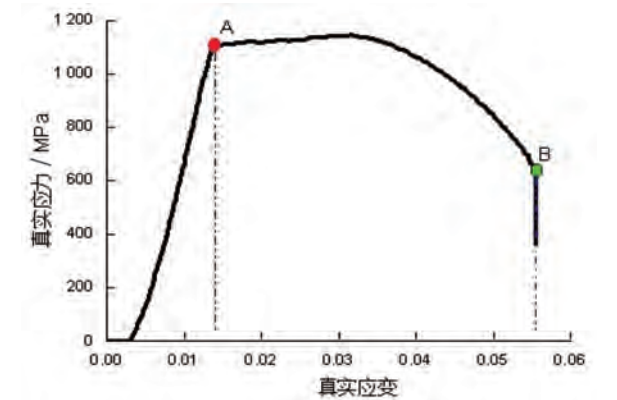


图 2 应变-应力曲线

2 有限元模型的建立

分析不锈钢应急脱离剪切销真实应力应变曲线,可看出主要包括弹性形变和塑性形变。建立剪切销的仿真模型,选用弹-塑性本构模型,本构模型如式(1)所示^[17]。式中, E 为弹性模型,屈服强度通过弹性变形阶段获得,分析塑性变形阶段,计算获得应变硬化系数 B 和应变硬化指数 n 。进而获得本构模型的具体参数,如表 1 所示。

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & (\varepsilon < \frac{\sigma_y}{E}) \\ \sigma_y + B\varepsilon^n & (\varepsilon > \frac{\sigma_y}{E}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ —应力,MPa;

E —弹性模量,MPa;

ε —应变;

σ_y —屈服强度,MPa;

B —应变硬化系数,MPa;

n —应变硬化指数。

表 1 弹塑性本构模型参数

参数	σ_y /MPa	B /MPa	n	E /MPa
数值	1 089	499	0.568	119 168

依据弹-塑性本构模型,建立了有限元模型,使用 C3D8R 单元进行网格划分,夹具上部通过参考点 RP-1 进行绑定,在参考点施加 $4E+6$ 载荷,限制夹具底部 Z 方向的自由度,释放应急脱离剪切销试件的全

局自由度,完成设置后,应急断离剪切销双剪有限元模型如图 3 所示。开展不同径厚比下双剪仿真分析,方案如表 2 所示。

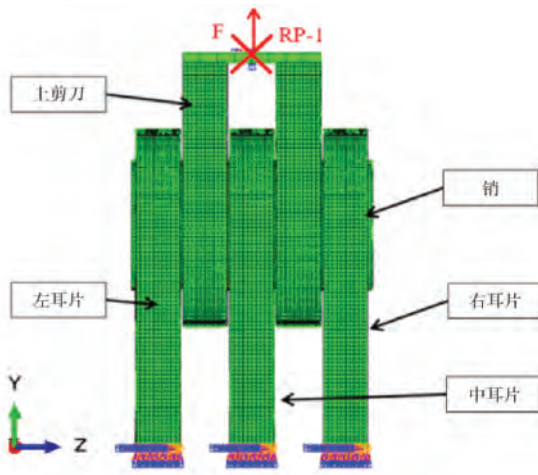


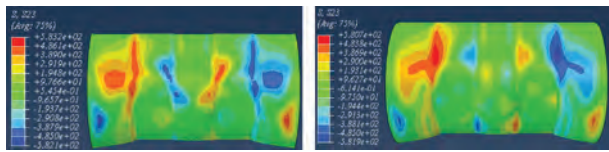
图 3 双剪有限元模型

表 2 双剪分析不同径厚比方案

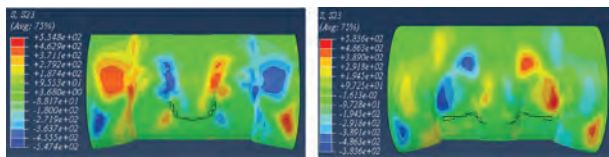
编号	外径/mm	内径/mm
双剪 1-1	32	23.320 45
双剪 1-2	32	25.295 74

3 结果分析

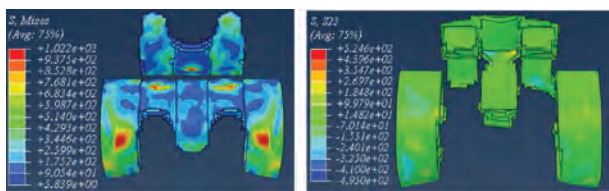
试件 1-1、1-2 随时间变化所承受的剪应力 S23 云图如图 4 所示。



(a) 试件 1-1、试件 1-2 断裂前 S23 云图



(b) 试件 1-1、试件 1-2 断裂瞬间 S23 云图



(c) 试件 1-1、试件 1-2 完全破坏 S23 云图

图 4 剪切销双剪剪应力 S23 变化过程

图 4(a)可以看出,在不断施加载荷的过程中,两侧的剪切应力也随之增加,随着时间推移直至断裂前,试件 1-1 所承受的最大剪力范围为 486.1 MPa ~ 583.2 MPa,平均剪切强度值 534.65 MPa;试件 1-2 所承受的最大剪力范围为 483.8 MPa ~ 580.7 MPa,平均剪切强度值 532.25 MPa。施加的载荷不断增加,应急断离剪切销剪切处开始出现裂纹并慢慢扩展,如图 4(b)所示,相同外径 32 mm 下,试件 1-1 断裂瞬间平均剪应力 508.85 MPa 小于试件 2-2 断裂瞬间平均剪应力 534.95 MPa,裂纹出现在不同位置,完全断裂后,断离销断口均出现不规则形状,得出的结论为:相同外径下,应急断离剪切销内径越大,其破坏瞬间的剪切强度则越大。

图 5 和图 6 分别展示出了双剪工况下,试件 1-1 与试件 1-2 破坏过程中应力云图和位移变化云图。可以看出,在不同时刻下,试件 1-1 的平均 MISES 应力比试件 1-2 大,即应急断离剪切销内径越小,平均 MISES 应力越大。从图 6 可看出,不同时刻,应急断离剪切销内径越大,破坏位移越大。

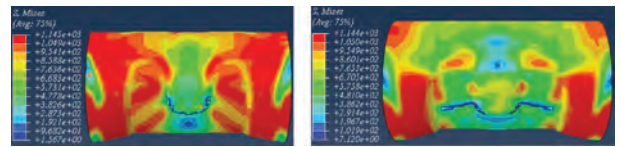
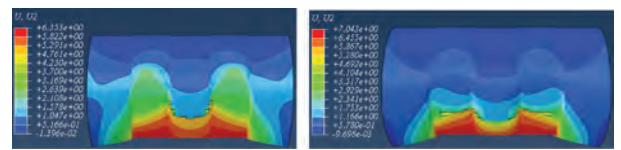
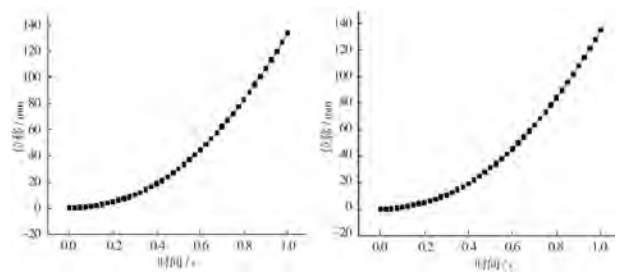


图 5 试件 1-1、1-2 断裂瞬间应力云图



(a) 试件 1-1、1-2 断裂瞬间位移云图



(b) 试件 1-1、1-2 位移随时间的变化曲线

图 6 剪切销双剪位移变化过程

4 结论

民用飞机吊挂应急断离剪切销在紧急情况下的成功断离对保障飞机安全着陆至关重要。本文以不锈钢材质应急断离剪切销为研究对象,开展了材料的力学性能测试,建立了应急断离剪切销的弹-塑性本构模型;基于力学性能测试结果,建立了应急断离剪切销的双剪有限元模型,开展了不同径厚比下的应急断离剪切销仿真分析并为应急断离剪切销试验件设计提供数字化参考。主要结论如下:

(1) 双剪工况下,相同外径下,内径越大,其破坏瞬间的剪切强度越大;

(2) 双剪工况下,相同外径下,内径越大,其破坏位移越大。

参考文献:

- [1] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册 第14册: 起飞着陆系统设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [2] 侯成义, 葛东云. 民用飞机结构抗坠性设计的研究进展[J]. 航空工程进展, 2011, 2(1): 70-77.
- [3] DE HAVEN H. Causes of injuries in light plane accident[R]. Aero Digest Aviation Engineering, 1944.
- [4] MASCLET J. Aircraft undercarriage including a safety device having a predetermined breaking load: US 4087062 A[P]. 1978-02-05.
- [5] 范耀宇, 郭海沙, 马世伟. 民用飞机吊挂应急断离设计研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2010(4): 28-29; 41.
- [6] 马世伟, 范耀宇. 吊挂应急断离仿真分析[J]. 装备制造技术, 2014(8): 85-86.
- [7] 张鹏飞. 民用飞机发动机吊挂保险销设计研究[J]. 科技视界, 2015(27): 138; 252.
- [8] 朱成钢, 朱照泽, 郭海沙. 应急断离保险销设计研究[C]//2015年工业设计与协同创新学术会议暨第20届全国工业设计学术年会论文集. 天津: 机械设计, 2015.
- [9] 金子博, 薛彩军, 郭瀚泽. 民用飞机应急断离连接件结构优化设计研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(10): 59-63; 356.
- [10] 刘瑞良, 闫牧夫, 乔英杰, 等. 马氏体不锈钢热处理及其拉伸性能[J]. 金属热处理, 2013, 38(2): 87-91.
- [11] 华小珍, 魏振伟, 刘智勇, 等. 固溶处理对15-5PH不锈钢马氏体相变的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(8): 67-70.
- [12] ABAD A, HAHN M, ES-SAID O S. Corrosion of 15-5PH H1025 stainless steel due to environmental conditions[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(1): 208-212.
- [13] 李伟, 杜楠, 樊兆宝. 15-5PH 马氏体时效钢的工艺性能[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(1): 78-81.
- [14] 宗俊达, 姚卫星, 郭仕贤. 某飞机安全销试验夹具的仿真设计[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(3): 24-28.
- [15] 张孟玫, 许文耀, 王双胜. 剪切销断裂过程的仿真研究[J]. 科技通报, 2012, 28(4): 212-213; 219.
- [16] 王宝宾, 翟晓杰. 基于 ABAQUS 的变速器试验台架剪切销有限元分析及改进[J]. 汽车零部件, 2015(11): 44-46.
- [17] 戴志成. 飞机断离销剪切强度有限元与实验研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2016.

作者简介

谈志晶 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 民用飞机短舱吊挂结构设计。E-mail: tanzhijing@comac.cc

林森 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 民用飞机短舱吊挂结构设计。E-mail: linsen@comac.cc

Simulation study on double shear failure process of emergency breaking shear pin

TAN Zhijing * LIN Sen

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: The emergency breakaway shear pin needs to be disconnected in case of emergency and make the hanging or engine separate from the wing, in order to prevent the hanging structure from damaging the wing oil tank due

to the rebound of the ground during the emergency landing. In this paper, stainless steel material shear pin is taken as the research object, and the mechanical properties of the material are tested by the test method. According to the test results, the elastic-plastic constitutive model of the shear pin is established, and the double shear simulation analysis of the breakaway pin under two different diameter thickness ratios is carried out according to the constitutive model. The results show that under the double shear condition, with the increase of applied load, the shear stress on both sides of the pin increases continuously; the larger the inner diameter is, the greater the shear strength at the moment of failure is, the greater the failure displacement is.

Keywords: shear pin; stainless steel; constitutive model; simulation

* Corresponding author. E-mail: tanzhijing@comac.cc