文章编号: 1001-1455(2014)05-0567-07 **DOI**: 10.11883/1001-1455(2014)05-0567-07

人/椅弹射救生系统穿盖过程的数值模拟*

李志强[1],王志华[1],刘晓明[2],赵隆茂[1]
(1.太原理工大学材料强度与结构冲击山西省重点实验室,山西 太原 030024;
2.成都飞机工业集团有限责任公司,四川 成都 610092)

摘要: 拟针对战斗机微爆索预破碎座舱盖弹射救生系统中人/椅系统穿盖过程中弹射通道的畅通性,座舱盖的破坏模式以及人体重要部位的冲击损伤程度。考虑微爆索在舱盖内表面沿中央和四周 2 种不同的切割布局,建立人/椅系统撞击舱盖的解耦模型,采用非线性动态显式算法对穿盖过程进行了数值模拟。模拟结果表明:第 2 种布局较第 1 种布局更有利于形成畅通的弹射通道,也有助于减轻人体的损伤,同时给出 2 种布局切割槽深度的临界值。研究结果可为弹射救生系统的优化设计和安全生产提供可靠依据。

关键词: 爆炸力学;破坏模式;解耦模型;弹射救生系统;微爆索;舱盖;冲击损伤
中图分类号: O383 **国标学科代码**: 1303599 **文献标志码**: A

战斗机遇到故障、人为失误和环境因素等导致飞机不能正常飞行,特别是空中格斗失败致伤时,有时只需几分钟甚至几秒钟的时间就会酿成机毁人亡的惨剧,此时要求飞行员必须当机立断地使用弹射救生系统来保证其生命安全。弹射救生系统主要有抛放座舱盖、直接进行穿盖弹射和预先破碎座舱盖透明件 3 种方式[1-3]。预先破碎座舱盖较其他 2 种方式具有延时短和低损伤等优点,工作过程是首先启动微爆索切割系统,削弱有机玻璃的强度,紧接着开启火箭发射筒,推动人/椅系统向上运动,利用座椅上的穿盖刀直接撞击舱盖,这时要求保证飞行员头部和脊柱受到最小的损伤使其安全离机。

关于人体头部碰撞的研究数据中,未见适用于穿盖弹射的生理参数报道。生产弹射座椅的英国马丁-贝克公司用 6.7 kN 作为人体头部承受穿盖力的耐限值[4]。另外根据人体头部撞击实验数据,穿盖弹射时头部撞击载荷超过 3.0 kN 时,作用时间不超过 30 ms[5]。这项指标与美国韦恩大学提出的人脑对坚硬平面耐撞的耐受曲线相近,即头部对较高量级的力或加速度只能耐受很短的时间,而对较低量级的力或加速度则可耐受较长的时间[6]。动态响应指数 δ 是广泛应用于损伤预测的评价标准。从物理意义上来说,δ 是将人体看作质量-弹簧-阻尼的机械系统,表征了人体脊柱的最大动力压缩[7-8]。为了保证飞行员的人身安全,各国标准都对人体向上弹射加速度的耐限进行了明确规定。GJB 1282-91《人体向上弹射加速度耐限》采用动力响应指数 δ 来评定人体向上弹射时对加速度的耐受力,表示人体向上弹射时造成的脊柱最大动力压缩加速度与重力加速度之比。标准中规定:“弹射弹(含火箭)温度为 21 ℃时(设定的飞机座舱温度),δ 应不大于 $18g$”。

李志强等[9-10]对微爆索爆炸切割有机玻璃平板和座舱盖进行实验和数值模拟研究,得到了微爆索在舱盖上采用 2 种不同的布局,爆炸切割深度与装药量之间的关系。本文中采用解耦的方法,即根据微爆索切割舱盖的结果,在其外表面预置相应的切割槽模拟弹射时舱盖的初始破损和破坏,建立人椅系统撞击舱盖的有限元模型,评价飞行员冲击损伤程度和微爆索布局的合理性,可为弹射救生系统的优化设计和生产提供可靠的依据。

1 基本假设

人体在弹射过程中处于一个非常复杂且急剧变化的力学环境中。对穿盖和人椅弹射离机过程进行

* **收稿日期**: 2013-02-27; **修回日期**: 2013-05-16
作者简介: 李志强(1973—),男,博士,副教授。

数值分析时,作了以下假设:(1)仅考虑常温下,飞机飞行高度为零,速度也为零的最不利弹射状态。(2)不考虑空气气流吹袭对人椅弹射姿态造成的影响。(3)忽略弹射座椅的变形,简化为刚体。(4)由于人椅向上弹射并非向前运动,安全带对其影响很小,因此不考虑安全带对飞行员的被动约束作用。

2 有限元模型

2.1 有限元网格划分

某型战斗机舱盖(厚度为 7 mm)和座椅系统的三维几何模型,如图 1 所示。微爆索采用 2 种布局,预置 3 种不同切割深度(6.0、6.5 和 6.8 mm)和宽度的舱盖划分网格,如图 2 所示。弹射座椅的结构复杂,一般由骨架、椅盆、头靠和椅盆升降机构等部分组成。座椅上还装有紧急离机使用的弹射操纵系统、弹射动力系统、安全带系统、稳定系统、人椅分离系统、降落伞系统、应急供氧系统和救生包装置。按照图 1 所示座椅的外形建立简化的刚性座椅,顶部两侧的穿盖刀与真实的穿盖器形状相同,质心位置与真实座椅质心的位置一样,质量也相同,约为 94 kg。飞行员按照 GJB36-85《飞行员人体侧面样板尺寸和各部位尺寸》[11-12]。再考虑到模拟的人椅系统,共重 170 kg,去除座椅的重量以后,飞行员的重量约为 76 kg。与美国的 50%分位的人体模型基本接近,因此选择 HYBRIDⅢ50%分位的假人代替飞行员。

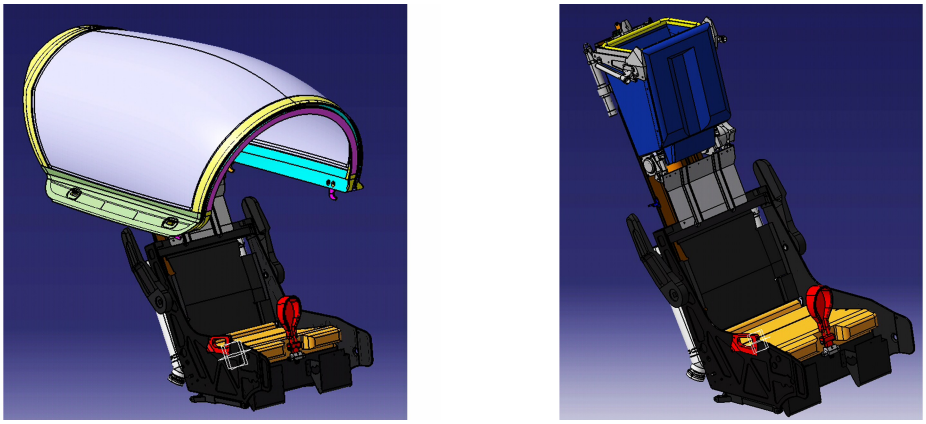

图 1 舱盖和座椅的三维几何模型

Fig. 1 3D geometry model of canopy and seat

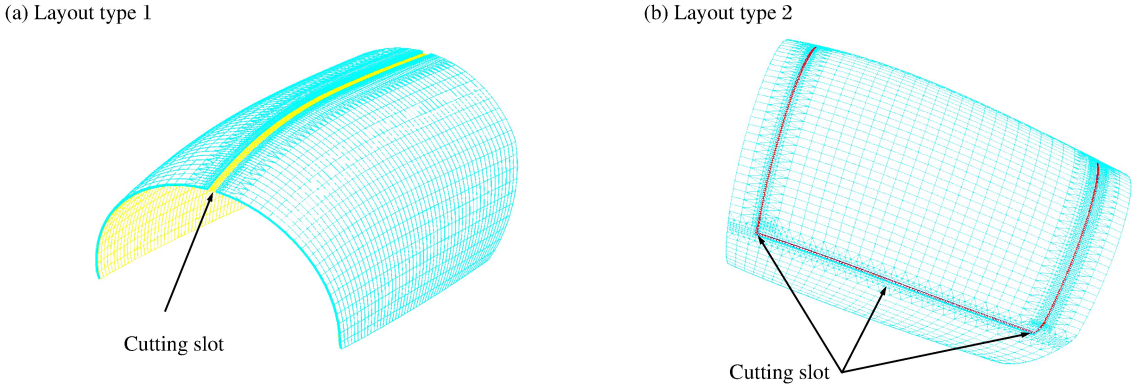

图 2 预破坏舱盖的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of pre-damaged canopy

将上述假人、座椅和舱盖的模型组合在一起,形成了 2 种不同的穿盖弹射模拟系统的有限元模型,如图 3 所示[12]。整个模型共有 103 个单元,包含了实体单元、壳单元、铰单元、梁单元、弹簧阻尼单元。为了更好地模拟舱盖破碎现象,沿舱盖厚度方向共划分了 15 层网格,其单元厚度为 0.46 mm。弹射时,人椅系统弹射轴线与垂直方向成 22°。

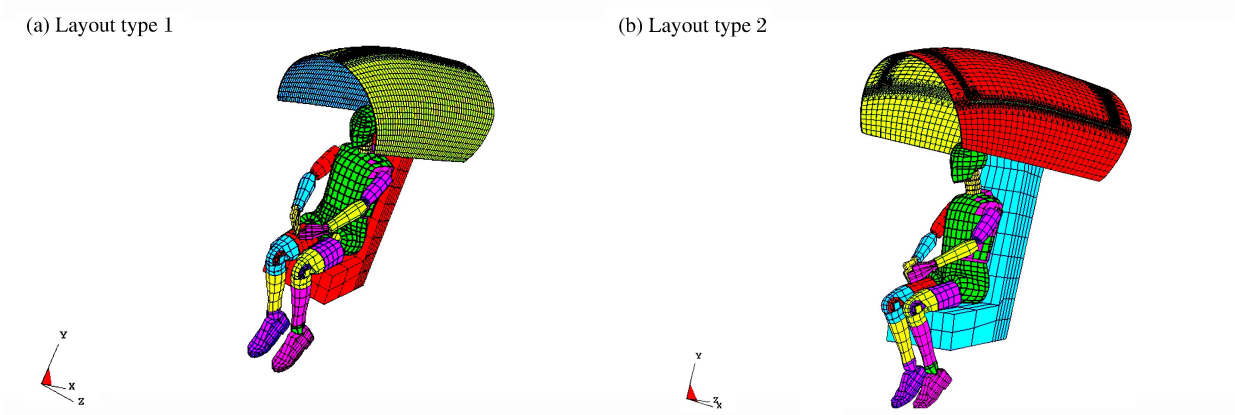

图 3　弹射系统的有限元模型

Fig. 3　Finite element model of ejection system

2.2　材料模型

2.2.1　舱盖

舱盖为航空 3＃有机玻璃，采用 LS-DYNA 中的 105＃材料（＊MAT_ DAMAGE_2），这是考虑粘性效应的弹塑性和连续损伤力学相结合的本构模型[13]。利用等效应力-等效塑性应变曲线来反映弹粘塑性模型。对于连续损伤力学模型，定义损伤应力 $\tilde{\sigma}$ 为[12]：

$$\tilde{\sigma}=\frac{\sigma}{1-D} \tag{1}$$

式中：D 是损伤变量，σ 是名义应力。损伤演化过程通过损伤变量的变化率来定义：

$$\dot{D}=\begin{cases}0 & \varepsilon \leqslant r_D \\ \dfrac{Y}{S(1-D)}\dot{\varepsilon} & \varepsilon > \varepsilon_D, \sigma_1 > 0\end{cases} \tag{2}$$

式中：ε_D 是损伤应变阈值，ε 为积累塑性应变，$\dot{\varepsilon}$ 为积累塑性应变率，S 是应变能释放率，为正的材料常数。σ_1 为最大主应力，Y 是应变能密度。对于舱盖，密度 $\rho=1.19\ \mathrm{g/cm^3}$，弹性模量 $E=3.6\ \mathrm{GPa}$，泊松比 $\nu=0.4$，屈服强度 $\sigma_s=76\ \mathrm{MPa}$。

2.2.2　假人

假人的结构主要由头部、颈部、上肢（上臂、下臂和手掌）、胸部、腰腹部和下肢（大腿、小腿及脚）组成。人体组织主要包括硬组织（骨骼）、软组织（肌肉、皮肤、韧带、肌腱、血管和所有的器官等）和关节。根据人体各部位组织的动态力学特性[14-15]，假人的骨骼采用刚性材料，假人四肢的肌肉和气管采用弹性材料，假人的肋骨、胸椎和脚部采用弹塑性材料，假人的颈部、肋骨肌肉层、头部皮肤和腰椎采用粘弹性材料，假人颈部和胸部的皮肤采用空材料，假人的胸部和臀部采用低密度泡沫材料。文中重点介绍粘弹性材料，该模型使用 Jaumann 率公式描述线性的粘弹性行为：

$$\dot{S}_{ij}=2\int_0^t G(t-\tau)\dot{D}_{ij}\,\mathrm{d}\tau \tag{3}$$

式中：$\dot{S}_{ij}$ 为应力偏量的变化率，$\dot{D}_{ij}$ 为应变偏量的变化率，$G(t)$ 为剪切松弛模量，τ 为弛豫时间。

$$G(t)=G_\infty+(G_0-G_\infty)\mathrm{e}^{-\beta t} \tag{4}$$

式中：G_0 为短期限的弹性剪切模量，G_∞ 为无限期的弹性剪切模量，β 为衰减常数。其他材料模型可参考 LS-DYNA971 关键字手册[16]。

由于人体各部位组织的生理特性不尽相同，其力学参数也不相同，这里仅列出 50％分位假人颈部各组成部分的材料模型和相应的力学参数，如表 1 所示，其他部位的力学参数参考假人的关键字文件。Hybird Ⅲ假人的颈部主要包括颈椎、颈椎肌肉、颈部皮肤、气管等。

表 1 Hybrid Ⅲ假人颈部材料模型及参数

Table 1 Material models and parameters of neck for Hybrid Ⅲ dummy

部位	材料模型	ρ/(kg·m^{-3})	K/GPa	E/GPa	ν	G_0/GPa	G_∞/GPa	β
颈椎肌肉	黏弹性	1 250	0.002 3	—	—	0.007 5	0.002	1.0
颈椎	刚性	2 700	—	70.00	0.31	—	—	—
颈部皮肤		2 700	7.000 0	0.31	—	—	—	—
气管	线弹性	1 250	—	4.30	0.31	—	—	—

2.3 初边值条件

舱盖沿长度方向两边采用固定边界条件。人椅穿透舱盖的动力来自火药燃爆产生的弹射动力,由于火箭弹射动力曲线无法从实验获得,因此只能根据一级弹射筒的动量为 26 kN·s,近似计算弹射初速度为 153 m/s。

3 模拟结果及分析

3.1 座舱盖的破坏模式

图 4 给出了 2 种微爆索布局,人/椅系统穿透切割槽深度为 6.0 mm 座舱盖过程。

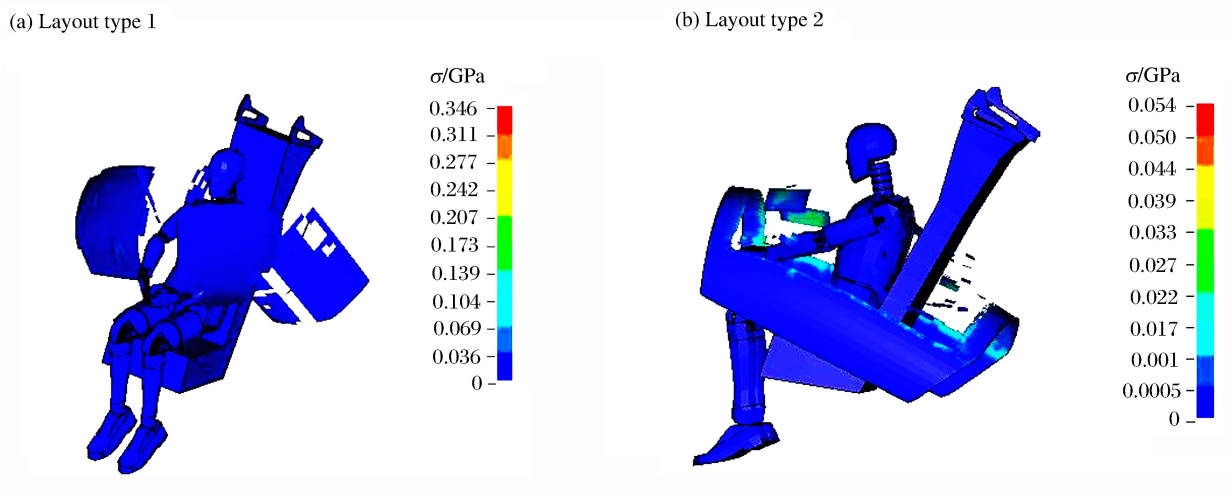

图 4 人/椅穿盖弹射过程应力分布

Fig. 4 Pressure distribution of aircrew/seat through-the-canopy-ejection process

从图 4(a)中看出,对于第 1 种布局,穿盖刀撞击座舱盖后,座舱盖首先在与穿盖刀接触区域被撞破,形成比较大的碎片,紧接着沿中间预置槽破坏,并向四周扩展。从图 4(b)中看出,对第 2 中布局[12]穿盖刀撞击舱盖后,首先在与穿盖刀接触区域被撞破,形成大的碎片,紧接着沿周边封闭的预置槽破坏,形成较大的破坏区域,为弹射提供有利的通道。

3.2 人体头部惯性力

图 5 给出了 2 种微爆索布局,人/椅系统穿透具有 3 类切割深度的舱盖时,人体头部承受惯性力随时间变化曲线。

从图 5 中可以看出,对于第 1 种布局,切割槽深度分别为 6.0、6.5 和 6.8 mm 时,人体头部的惯性力分别为 4.5、3.6 和 2.3 kN,耐受时间分别为 2、1.5 和 1 ms。对于第 2 种布局,切割槽深度分别为 6.0、6.5 和 6.8 mm 时,人体头部惯性力分别为 3.9、3.1 和 1.95 kN[12],耐受时间分别为 1.9、1.3 和 0.9 ms。对比图 5(a)和(b),发现对于 2 种布局,舱盖的切割深度越大,人体头部承受的惯性力越小,飞行员受损伤的可能性越小,无论惯性力还是耐受时间均未达到人体头部受伤的极限值。对于相同切割深度的舱盖,第 2 种布局较第 1 种布局使人体头部受伤风险小。以 6.7 kN 作为人体头部承受穿盖力的耐限值,通过数据拟合得到 2 种布局切割槽深度的临界值分别为 5.2 和 4.83 mm。

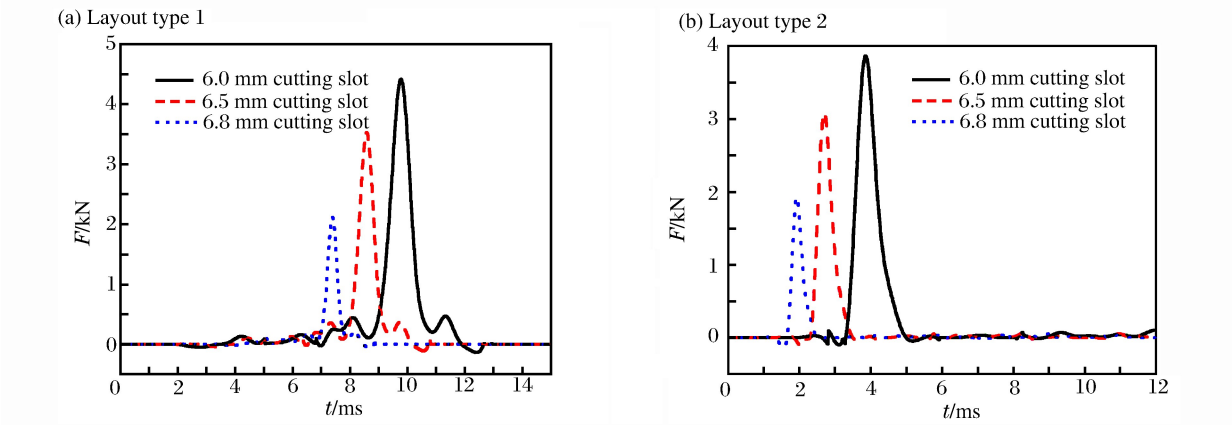

图 5　人体头部的惯性力时程曲线

Fig. 5　Histories of aircrew head impact force

3.3　人体动力响应指数

定义人体向上弹射时造成的脊柱最大动力压缩加速度与重力加速度之比为动力响应指数 δ，来评定人体向上弹射时对加速度的耐受力。图 6 所示为 2 种微爆索布局，人/椅系统穿透 3 类不同切割深度的舱盖时，人体脊柱垂向弹射过载随时间变化曲线。

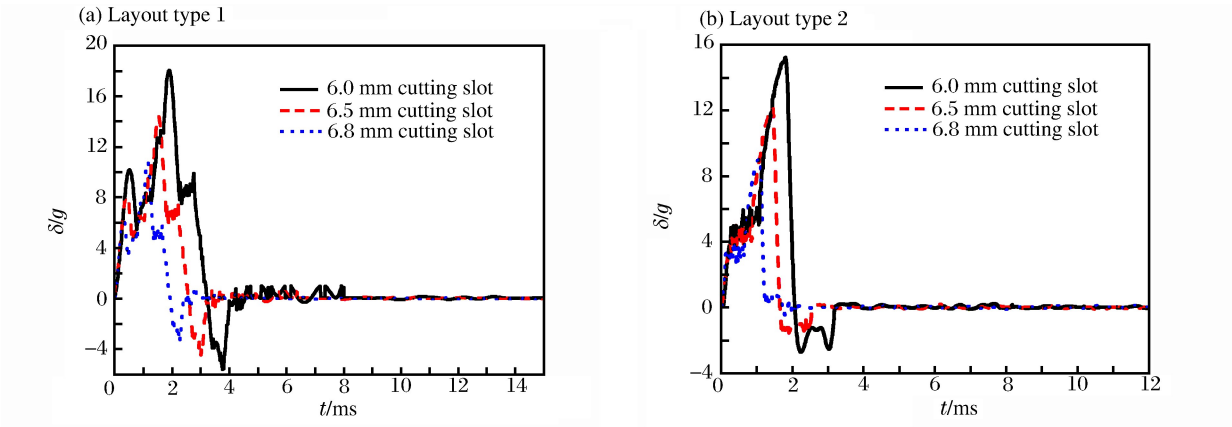

图 6　人体动力响应指数时程曲线

Fig. 6　Dynamic response index history curves

从图 6 中可以看出，对于第 1 种布局，切割槽深度分别为 6.0、6.5 和 6.8 mm 时，δ 分别为 18.1g、14.5g 和 10.3g，持续时间分别为 4.0、3.2 和 2.4 ms。对于第 2 种布局，切割槽深度分别为 6.0、6.5 和 6.8 mm时，δ 分别为 15.2g、12g 和 9.1g，持续时间分别为 3.0、2.4 和 1.9 ms[12]。比较图 6(a)和(b)，发现对于 2 种布局，舱盖的切割深度越大，人体脊柱承受的弹射过载越小，飞行员受伤的风险也越小，δ 均在军标规定的范围之内。对于相同切割深度的舱盖，第 2 种布局对人体脊柱产生的弹射过载均较小。以 18g 作为极限值，通过数据拟合得到 2 种布局切割槽深度的临界值分别为 6.0 和 5.64 mm。

3.4　人体颈部损伤

穿盖过程中，人体颈部较其他部位受力较为复杂，颈部弯曲或伸展产生轴向力和剪切力，使其受到损伤。颈部损伤主要通过作用在颈部的最大力和力矩来评价。NIC 准则规定颈部轴向力的最安全损伤极限为 1.1 kN。飞行员向上弹射时颈部主要承受轴向力，对于第 1 种布局，切割槽深度分别为 6.0、6.5 和 6.8 mm 时，人体颈部承受的最大轴向力分别为 0.900、0.745 和 0.634 kN。对于第 2 种布局，切割槽深度分别为 6.0、6.5 和 6.8 mm 时，人体颈部承受的最大轴向力分别为 0.820、0.685 和 0.590 kN。对于 2 种微爆索布局，人体颈部承受的轴向力均在损伤极限范围之内。对于相同切割深度的舱盖，第 2 种布局对人体颈部产生的轴向力均比第 1 种布局的小。以 1.1 kN 作为人体头部承受轴向力的极限值，通过数据拟合得到 2 种布局切割槽深度的临界值分别为 5.4 和 5.02 mm。

4 结 论

采用三维非线性显式动态算法对 2 种不同布局的微爆索预破碎座舱盖穿盖弹射过程进行了数值模拟,得到了以下结论:

(1)微爆索的敷设方式直接影响弹射通道的清理,周边布置的微爆索比中间布置的微爆索穿盖时形成的弹射通道更为宽敞,从而减轻了弹射时舱盖对飞行员的损伤。

(2)同时满足飞行员头部、脊柱和颈部安全极限值,2 种布局的切割槽深度临界值分别为 6.00 和 5.64 mm,为微爆索的优化设计提供依据。

(3)对于相同切割深度的座舱盖,第 2 种布局较第 1 种布局对人体头部、脊柱和颈部造成的损伤要轻。因此,微爆索的第 2 种布局比第 1 种布局更为合理。

人椅弹射的动力主要来自于火箭的推力。模拟弹射过程时,人椅的初始动力应该使用火箭的推力曲线,但是这条曲线很难通过实验测定,一般只给出初始动量,因此本文中近似地使用火箭的初始动量作为人椅弹射的初始条件。另外由于客观条件的限制,本文中的计算结果并未得到真实穿盖弹射实验的验证,但计算结果反映出的趋势和规律可为真实的实验提供参考。

参考文献:

[1] Sandstedt P. Experience of rocket seat ejection in the swedish air force: 1967-1987[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1989,60(6):367-373.

[2] Milanov L. Aircrew ejection on the republic of bulgaria, 1953-1993[J]. Aviation, space, and environmental medicine, 1996,67(4):364-368.

[3] Moreno Vazquez J M, Duran Tededa M R, Garcia Alcon J L. Report of ejections in the spanish air force, 1979-1995: An epidemiological and comparative study[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1999,70(3):686-691.

[4] Miller B A. Unassisted through canopy ejection experience[C]// Proceedings of the 20th SAFE annual symposium. 1982:146-149.

[5] 丛红,徐建仁,刘力,等.穿盖弹射对人体头、肩、膝部的损伤程度[J].航空军医,1997,25(5):259-261.
Cong Hong, Xu Jian-ren, Liu Li, et al. Human head and knee tolerance to impact produced by through-the-canopy ejection[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 1997, 25(5):259-261.

[6] Patrick L M, Lissner H R , Gurdjian E S. Survival by design head protection[C]// Proceedings of the 7th Stapp Car Crash Conference. 1963.

[7] 赵一明,杨春信,韩海鹰,等.弹射救生过程数值计算及损伤风险评估[J].空气动力学学报,2006,24(3):314-318.
Zhao Yi-ming, Yang Chun-xin, Han Hai-ying, et al. Numerical calculation of ejection process and injury crisis evaluation[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2006,24(3):314-318.

[8] Brinkley J W, Mosher S E. Development of acceleration exposure limits to advanced escape systems, implications of advanced technologies for air and spacecraft escape[R]. GARD-CP-472, 1989:24-28.

[9] 李志强,刘晓明,赵勇刚,等.微爆索线性切割航空有机玻璃的实验研究和有限元分析[J].爆炸与冲击,2007,27(5):385-389.
Li Zhi-qiang, Liu Xiao-ming, Zhao Yong-gang, et al. Experimental study and finite element analysis of linear cutting aerial PMMA using micro detonation cord[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(5):385-389.

[10] 李志强,赵隆茂,刘晓明,等.微爆索线型切割某战斗机舱盖的研究[J].航空学报,2008,29,(4):1049-1054.
Li Zhi-qiang, Zhao Long-mao, Liu Xiao-ming, et al. Study on the linear shape cutting canopy of a warcraft with miniature detonating cord[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2008,29,(4):1049-1054.

[11] 李志强,赵隆茂,刘晓明,等.微爆索布局对战斗机舱盖破裂影响的数值模拟[J].北京理工大学学报,2009,29(增刊):170-173.
Li Zhi-qiang, Zhao Long-mao, Liu Xiao-ming, et al. Numerical simulation of the influence of miniature detonating cord layout on fracturing warcraft[J]. Journal of Beijing Institute of Technology Natural Science Edition, 2009,29

(suppl):170-173.

[12] Li Zhi-qiang, Yao Xiao-hu, Zhao Long-mao. A computer simulation on human injury during the aircrew/seat through-the-canopy-ejection[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011(55/56/57):179-182.

[13] Berstad T, Hopperstad O S, Lademo O G, et al. Computational model of ductile damage and fracture in shell analysis[C]// The Second European LS-DYNA Conference. Gothenburg, Sweden, 1999.

[14] Shalak R, Chinen S. Handbook of bioengineering[M]. New York: MeGraw-Hill, 1987.

[15] MeElhaney J H. Dynamics response of bone and muscle tissue[J]. Journal of Applied Physiology, 1966,21:1231-1236.

[16] LS-DYNA971 keyword user's manual[M]. Livermore Software Technology, 2007.

Penetration process of screw/seat ejection life-saving system through canopy: Numerical simulation*

Li Zhi-qiang[1], Wang Zhi-hua[1], Liu Xiao-ming[2], Zhao Long-mao[1]

(1. *Shanxi Key Laboratory of Material Strength and Structure Impact, Taiyuan University of Technology, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*;

2. *Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd, Chengdu* 610092, *Sichuan, China*)

Abstract: Aimed to an ejection life-saving system in combat aircraft with a canopy pre-damaged by miniature detonation cord, the followings were investigated as the accessibility of the ejection passageway, the damage modes of the canopy, and the impact injury degrees of the key human-body parts. The decoupled models were proposed for describing the impact of the aircrew/seat system into the canopy. In the proposed models, the two different layouts of the miniature detonation cord in the canopy were considered, i. e. Along the center of the canopy (the first layout) and around it (the second layout). Based on the above models, the process of the aircrew/seat system penetrating through the canopy was numerically simulated by using the nonlinear dynamics explicit algorithm. And the critical depths of the cutting slots were obtained for the two layouts. The simulated results indicate that the second layout is more helpful for generating an unobstructed passageway and relieving human impact injury than the first layout.

Key words: mechanics of explosion; damage mode; decoupled model; ejection life-saving system; miniature detonation cord; canopy; impact injury

---

* Received 27 February 2013; Revised 16 May 2013

Corresponding author: Li Zhi-qiang, lizhiqiang@tyut.edu.cn

(责任编辑　王易难)