

热发射过程中发射箱蒙皮力学性能损伤与试验研究

党海燕 杨娇萍 李克婧

(北京特种机械研究所,北京,100143)

摘要:文中选择大、中、小 3 种典型结构尺寸的发射箱,利用计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)仿真软件 Fluent 对发射箱蒙皮表面在导弹发射过程中的力、热环境进行了仿真分析。以铝合金材料为例,对发射箱蒙皮材料在燃气流环境中力学性能损伤情况进行了烧蚀试验研究。研究结果表明,随着烧蚀时间延长,铝合金材料力学性能损伤存在一个突变点,在 1.5 s 内下降不明显,但是当烧蚀时间延长至 2.0 s 时,力学性能急剧下降至 0。该研究结果为铝合金发射箱轻量化设计、热防护设计和使用次数设计等提供了数据支撑。

关键词:发射箱蒙皮;热发射;力学性能损伤;烧蚀试验

中图分类号:TB333

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2018)S1-0051-05

Mechanical Properties Impairment and Test Research of Launch Container Skin During Thermal Launching

DANG Haiyan, YANG Jiaoping, LI Kejing

(Beijing Institute of Specialized Machinery, Beijing, 100143, China)

Abstract: The thermal and pressure conditions on the launch container skin surface are studied by Fluent software, in which three typical sizes of launch containers are chosen. Aluminum samples are employed as a launch container skin example, and their mechanical property impairment are researched in ablating test during thermal launching. The results show that mechanical properties of aluminum samples decrease little as the erosion time increases to 1.5 s. But when the erosion time increases to 2.0 s, the aluminum samples lost their mechanical properties completely. The results support important data for lightly designing, protection designing and number times of use designing of container launches which made of aluminum alloy materials.

Key words: launch container skin; thermal launching; mechanical property impairment; erosion test

导弹热发射过程中助推器燃烧会产生高温高速的燃气流,承担发射功能的地面设备,尤其是发射箱将受到高温高速燃气流的冲击、冲刷和烧蚀作用,在这种大载荷、高速、高温燃气流瞬态冲击下,发射箱蒙皮材料的力学性能损伤失效问题十分突出^[1-2]。目前,因为缺乏发射过程中蒙皮材料力学性能损伤方面的基础性研究,为考虑装备安全性,发射箱结构设计、重复使用次数设计等方面均偏保

守,导致发射箱重量普遍偏高、重复使用次数偏低。

按照发射箱尺寸,本文选择了大型、中型和小型 3 种典型的发射箱,采用 CFD 仿真软件 Fluent 对发射箱蒙皮内壁表面的燃气流环境进行了仿真计算分析,对发射箱蒙皮表面承受的温度、压力、烧蚀时间等环境参数进行了统计,为发射箱蒙皮材料烧蚀试验提供理论试验环境参数。

目前,发射箱蒙皮材料主要有金属材料和非金

收稿日期:2018-03-23;修订日期:2018-05-30

通信作者:党海燕,女,研究员, E-mail:jpyang@mail.ipc.ac.cn。

引用格式:党海燕,杨娇萍,李克婧. 热发射过程中发射箱蒙皮力学性能损伤与试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2018,50(S1):51-55. DANG Haiyan, YANG Jiaoping, LI Kejing. Mechanical properties impairment and test research of launch container skin during thermal launching[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018,50(S1):51-55.

属复合材料两种,金属材料主要有铝合金、不锈钢等,非金属材料主要为玻璃纤维、碳纤维增强树脂基复合材料^[3-4]。与钢铁、工程塑料等材料相比,铝合金有着质量轻、比强度高、耐腐蚀等优异的性能,还具有优良的流动性、尺寸稳定性、机械加工性能和电磁干扰屏蔽性能。铝合金这些优异性能使其在国防、航空工业、机械设备和电子产品等众多领域有着非常广泛的应用,也是目前发射箱的主要选用材料之一,并且在今后很长时间内依然无法被取代^[5-10]。因此,本文以铝合金材料为例,选取最恶劣的环境参数进行了烧蚀试验,研究了铝合金材料在燃气流环境中的力学性能损伤情况,为铝合金发射箱蒙皮轻量化设计、热防护设计及重复使用次数设计提供数据支撑。

1 燃气流环境计算分析

本文采用 CFD 仿真软件 Fluent 对 3 种典型发射箱的导弹发射过程中燃气流场进行分析,在这里仅对仿真过程中采用的理论计算公式进行描述,主要对大、中、小 3 种典型发射箱蒙皮表面的温度、压力、烧蚀时间等环境参数进行统计。

1.1 仿真计算过程中采用的控制方程^[11-12]

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j E) = -\frac{\partial q_j}{\partial x_j} - \frac{\partial p u_j}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

湍流模型采用 RNG $k-\epsilon$ 双方程湍流模型,其控制方程如下:

湍流动能方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{d}{dx_j} \left(\Gamma_k \frac{dk}{dx_j} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (4)$$

湍流动能的耗散率方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{d}{dx_j} \left(\Gamma_\epsilon \frac{d\epsilon}{dx_j} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中:

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

ρ 为密度, kg/m^3 ; u 为 x 坐标轴方向上的流体速度, m/s ; p 为静压, Pa ; E 为单位质量的内能, J ; q 为热通量, $q = -\lambda \partial T / \partial x$; T 为温度; λ 为热传导系数; k 为湍流动能, J ; ϵ 为湍流动能的耗散率; Γ 为输运特性的湍流耗散系数, $\Gamma_k = \mu_t / \sigma_k + \mu$, $\Gamma_\epsilon = \mu_t / \sigma_\epsilon + \mu$, σ_k 和 σ_ϵ 为 k 和 ϵ 的湍流普朗特/斯密特数,分别取 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.30$, μ 为动力黏性系数; μ_t 为湍流黏性系数,用式 $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$ 来计算,其中 C_μ 为模型常数,取 $C_\mu = 0.0845$, m^2/s ; δ_{ij} 为克罗内克算子; i, j 为坐标方向; $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$ 为模型常数,分别取 $C_{\epsilon 1} = 1.42$, $C_{\epsilon 2} = 1.68$ 。

对于燃气流控制方程,采用有限体积法求解。在具体求解时,采用耦合显式算法,同时求解连续方程、动量方程和能量方程,然后再求解湍流模型方程。连续方程、动量方程、能量方程和湍流模型方程的计算收敛精度均小于 10^{-3} 。

1.2 仿真计算结果统计

根据助推器性能、结构参数以及发射箱结构参数,通过仿真分析计算,获得大、中、小 3 种典型发射箱蒙皮内壁表面不同部位的燃气流环境参数如表 1 所示。

表 1 3 种典型发射箱蒙皮内表面燃气流环境参数表

Tab. 1 Thermal gas condition parameters on three typical sizes of launch containers skin surface

部位	温度/K			压力/MPa			时间/s		
	大型	中型	小型	大型	中型	小型	大型	中型	小型
箱体前端	2 190	2 000	1 100	0.10	0.084	0.048	1.0	0.5	0.1
箱体中部	2 500	2 068	1 800	0.15	0.045	0.060	2.0	1.0	0.2
箱体后端	2 500	2 370	2 200	0.15	0.100	0.080	3.0	2.0	0.4

从表 1 中数据可以看出,大型导弹发射箱蒙皮内壁表面燃气流最高温度可达 2 500 K,压力为 0.15 MPa,受燃气流烧蚀、冲刷作用的时间最长,为 3 s,相应地,发射箱蒙皮材料力学性能损伤也最为严重。

2 铝合金材料在燃气流环境试验研究

2.1 试验材料

考虑到试验结果主要服务于铝合金发射箱产品轻量化设计,结合现有发射箱产品蒙皮材料及其厚度尺寸,试验样品选用厚度 2.5 mm 的 5A06 (LF6) 铝合金,其化学成分(质量分数%)为 6.0

Mg, 0.7 Mn, 0.2 Zn, 0.4 Fe, 0.4 Si, 0.1 Cu, 0.03 Ti, 0.000 2 Be, 其余为 0.1, 合金的供货处理状态为 M。按照 GB/T228—2002 要求制备成哑铃型试样, 试样尺寸及结构示意图如图 1 所示。

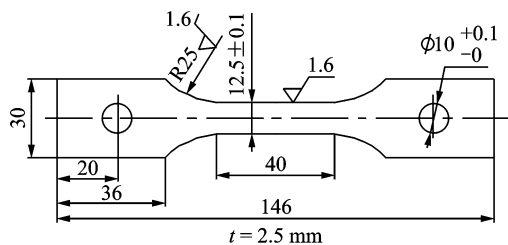


图 1 拉伸试样结构及尺寸示意图

Fig. 1 Structure illustration of tensile samples

2.2 烧蚀试验方法

超音速火焰喷涂工艺是将助燃气体与燃料在燃烧室中连续燃烧, 使产生的高温焰流通过膨胀喷嘴流出燃烧室, 把喷涂材料在焰流中加热、加速后喷射到经预处理的基体材料表面上形成涂层的一种工艺方法。目前这种工艺方法主要应用于将金属、陶瓷等喷涂在一定的基体材料表面, 形成防护层。在这种工艺方法实施过程中, 通过调整燃气的质量流量及其与空气的比例等工艺参数, 可产生温度高达 3 000 K 的高温高速燃气流。本文利用超音速火焰喷涂设备产生的高温高速燃气模拟导弹发射时产生的燃气流环境, 对铝合金材料进行烧蚀试验, 试验时通过调整丙烷燃气的质量流量及其与空气的比例, 使喷枪距离试样表面距离为 100 mm 时, 燃气火焰在试样表面的温度为 2 500 K (正式试验前, 首先利用高温传感器进行测试, 确定丙烷燃气及空气的质量流量等工艺参数)。图 2 给出的是火焰喷枪在烧蚀试验前对铝合金试样烧蚀部位对焦状态照片。

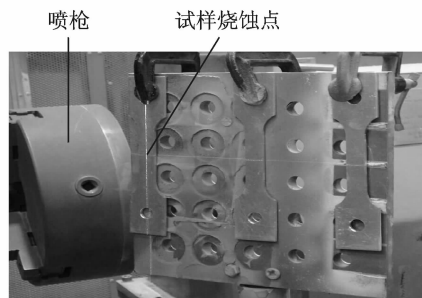


图 2 火焰喷枪在烧蚀前对烧蚀点的对焦状态照片

Fig. 2 Focus photos of flame gun on tensile samples before erosion test

根据 3 种典型导弹发射箱的发射过程燃气流仿真计算分析结果, 发射箱蒙皮内表面受燃气流烧

蚀的最高温度为 2 500 K, 因此本文选取最严酷的温度参数 2 500 K 进行烧蚀试验, 压力环境由高温高速燃气自然产生。从表 1 可以看出, 燃气流作用时间有 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 s, 结合试验设备所能达到的最小作用时间, 本文选取 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 s 这几种工况进行烧蚀试验, 每个试验工况烧蚀 3 个试样, 对烧蚀后的试样力学性能进行测试。

2.3 性能测试

表面形貌观测: 烧蚀试验结束后, 对试样表面烧蚀情况进行了照相, 并利用光学显微镜对试样表面烧蚀情况进行了观测。

拉伸力学性能测试: 利用 INSTRON 5852 电子万能试验机对试样的拉伸断裂强度 (σ)、屈服强度 ($\sigma_{0.2}$)、拉伸模量 (E) 进行了测试, 测试速率均为 2 mm/min。

3 试验结果与讨论

3.1 表面形貌观测

不同烧蚀时间下, 烧蚀后铝合金试样照片如图 3 所示, 因为当烧蚀时间为 2.0 s 时样品已经被烧断, 所以就只烧蚀了 1 个试样, 也没有进行 3.0 s 的烧蚀试验。

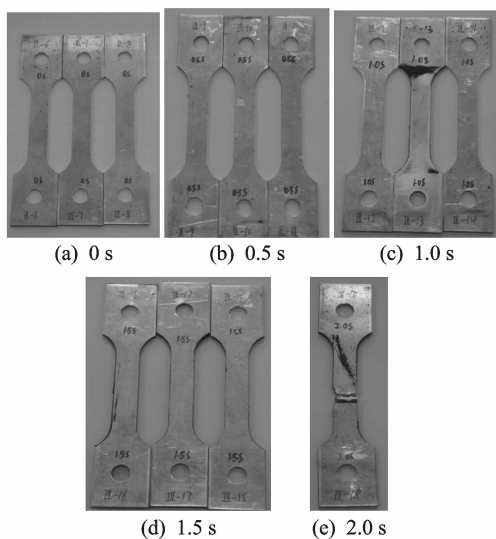


图 3 不同烧蚀时间下烧蚀后铝合金拉伸试样

Fig. 3 Photos of tensile samples after erosion test with different erosion time

从图 3 可以看出, 当烧蚀时间从 0.5, 1.0, 1.5 s 时, 目测试样表面没有任何变化, 当烧蚀时间从 1.5 s 增加到 2.0 s 时, 试样被烧坏, 说明从 1.5 s 到 2.0 s 的这个时间段试样力学性能的衰减有一个突变, 这与后续力学性能测试结果一致。

图4给出的是在放大倍数为100的情况下,试样在不同烧蚀时间时的表面显微形貌。从图中可以看出,试样表面有一定的凹坑缺陷,也有部分试样表面有划伤缺陷,这些缺陷应该是在试样加工成型过程中出现的。当试样被2500 K高温高速燃气烧蚀0.5 s时,试样表面的凹坑缺陷数量有凹坑缺陷继续扩大,甚至连成在了一起,继续延一定的增加,凹坑缺陷的尺寸相应也有一定的增加。当试样烧蚀时间延长至1.0 s和1.5 s时,部分长烧蚀时间,试样表面的缺陷尺寸和数量进一步增加,划伤缺陷的深度和尺寸也增加,但是还没有出现裂纹,而当烧蚀时间延长至2.0 s时,试样表面在凹坑缺陷旁边已经出现了微裂纹,材料被高温高速燃气烧坏,力学性能下降至0。

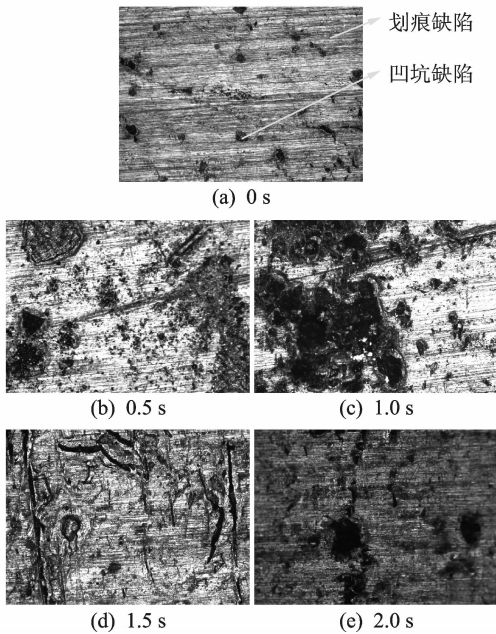


图4 不同烧蚀时间下烧蚀后铝合金拉伸试样表面显微照片(放大倍数为100倍)

Fig. 4 Micro photos of tensile samples after erosion test with different erosion time (magnification of 100)

3.2 力学性能测试

针对烧蚀后试样进行拉伸力学性能测试,并从应力-应变曲线上计算其模量、屈服强度($\sigma_{0.2}$)和断裂强度,测试结果如表2所示。从表2中数据可以看出,当烧蚀时间从0.5 s延长到1.5 s时,铝合金材料试样拉伸力学性能随烧蚀时间延长有所下降,而当烧蚀时间从1.5 s增至2.0 s的过程中,试样直接被烧断,拉伸强度下降为0。但是烧蚀时间从0.5 s延长到1.5 s的过程中,试样弹性模量、屈服强度和断裂强度的下降趋势有所不同:弹性模量平

均值的变化趋势则是先下降(烧蚀时间为0.5 s时下降了10 GPa),之后随烧蚀时间延长变化不大;屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 平均值随烧蚀时间延长下降比较多,下降了34.69 MPa(烧蚀时间为1.0 s);拉伸断裂强度随着烧蚀时间延长虽然有所降低,但是降低幅度不大,最大降低值为11.6 MPa(当烧蚀时间为1.0 s时)。

表2 金属试样力学性能测试结果

Tab. 2 Mechanical properties of samples

烧蚀时间/s	断裂强度/MPa	屈服强度($\sigma_{0.2}$)/MPa	弹性模量/MPa
0.0	359.14	168.00	73.94
0.5	355.85	159.51	63.45
1.0	347.54	133.31	57.72
1.5	349.52	139.18	61.83
2.0	0.00	0.00	0.00

从这个结果可以看出,选用厚度为2.5 mm的5A06铝合金作为发射箱蒙皮结构材料时,如果燃气流烧蚀时间超过1.5 s,则必须考虑对其进行抗烧蚀防护设计,否则发射箱蒙皮结构材料就有可能被烧坏而失效。该研究结果为多型号铝合金材料发射箱轻量化设计、热防护设计及发射箱重复使用次数设计提供了重要的数据支撑。

4 结束语

本文选择了大、中、小3种典型结构尺寸的发射箱,利用CFD仿真软件Fluent对发射箱蒙皮表面在导弹发射过程中的力、热环境进行了仿真分析,并以铝合金材料为例,对发射箱蒙皮材料进行了烧蚀试验研究,测试了燃气流环境中力学性能损伤情况,研究表明,随着烧蚀时间延长,铝合金材料力学性能损伤存在一个突变点,在1.5 s内下降不明显,但是当作用时间延长至2.0 s时,力学性能急剧下降至0。该研究结果为多型号铝合金材料发射箱轻量化设计及其防热防护设计,预测发射箱重复使用次数提供了数据支撑。

参考文献:

- [1] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论和数值模拟[M]. 北京:科学技术出版社,1994.
- [2] 吴大方,宋昊,李永亭,等. 铝-镁合金5A06在瞬态热冲击条件下的力学性能研究[J]. 实验力学,2006,21(5):591-595.
WU Dafang, SONG Hao, LI Yongting, et al. A study on mechanical properties of 5A06 Al-Mg alloy at transient heating[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006,21(5):591-595.

- [3] 刘燕. 贮箱用 2219 铝合金热处理工艺的研究[D]. 天津:天津大学,2013.
LIU Yan. Study on the heat treatment process of the 2219 aluminium alloy for the tank[D]. Tianjin:Tianjin University, 2013.
- [4] 陈愚,孙风云. 贮运发射箱的结构与设计[J]. 包装工程,2012, 33(15):132-135.
CHEN Yu, SUN Fengyun. Structure and design of storage and transport launcher[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15):132-135.
- [5] 张玲翔. 飞航导弹箱式发射技术[J]. 飞航导弹,1996(1):20-28.
ZHANG Lingxiang. Box-type winged missile launch technology[J]. Winged Missiles Journal, 1996(1): 20-28.
- [6] 罗兵辉,柏振海. 高性能铝合金研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 3(5):60-62.
LUO Binghui, BAI Zhenhai. Development of high-performance aluminum alloys[J]. Ordnance Materials Science and Engineering, 2002, 3(5):60-62.
- [7] 张剑. 导弹发射箱结构优化设计[J]. 四川兵工学报, 2012,33(8):60-63.
ZHANG Jian. Optimizing the design of missile launch container[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2012,33(8):60-63.
- [8] 胡黎明,高凯. 飞航导弹轻型发射箱结构优化技术研究[J]. 战术导弹技术,2008(4):12-14.
HU Liming, GAO Kai. Research on structure optimization of light launch container for aerodynamic missile[J]. Tactical Missile Technology, 2008(4): 12-14.
- [9] 蔡建,詹永富,罗俊杰. 发射箱复合材料箱体的设计与选材[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(8):36-38.
CAI Jian, ZHAN Yongfu, LUO Junjing. Design and material selection of composite launch container [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2010, 31(8):36-38.
- [10] 王建华,易丹青,陈康华,等. 耐热铝合金研究进展[J]. 宇航材料工艺,2000(6):10-13.
WANG Jianhua, YI Danqing, CHEN Kanghua, et al. High-temperature aluminum alloys and their research development [J]. Aerospace Materials & Technology, 2000(6):10-13.
- [11] 张福祥. 火箭燃气射流动力学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2004.
- [12] 赵承庆,姜毅. 气体射流动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1998.

(编辑:孙静)