

中波红外导弹用高强纳米红外陶瓷整流罩特性研究

李福巍^{1*}, 赵虹霞³, 潘国庆^{1,2}, 张运强^{1,2}, 齐申³, 姜雄伟³¹中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471099;²航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471099;³中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 红外整流罩位于导弹的最前端, 是红外导弹的主要部件之一。根据其工作环境的要求, 红外整流罩应具有良好的光、机、热等性能。目前, 中波红外导弹的红外整流罩主要采用氟化镁、蓝宝石、尖晶石、ALON 和纳米复相陶瓷等材料制造。本文提出了一种高强稀土氧化物稳定的 ZrO_2 纳米红外透明陶瓷整流罩, 通过对陶瓷材料的特性进行研究, 证明了该种材料可以用于中波红外导弹。同时, 采用该种材料完成了红外整流罩样件的研制, 并对样件进行了导弹服役环境下的适应性试验和模拟动态抛罩试验, 验证了该材料的性能。

关键词 材料; 纳米红外陶瓷; 红外导弹; 红外整流罩; 稀土氧化物

中图分类号 TN214; TJ762

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0716002

Study on Characteristics of High-Strength Nano Infrared Ceramic Dome for Mid-Infrared Missile

Li Fuwei^{1*}, Zhao Hongxia³, Pan Guoqing^{1,2}, Zhang Yunqiang^{1,2}, Qi Shen³, Jiang Xiongwei³¹China Airborne Missile Academy, Luoyang, Henan 471099, China;²Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang, Henan 471099, China;³Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Infrared dome, located at the forefront of an infrared missile, is one of the main components in the missile. According to the requirements of its working environment, the infrared dome should have good optical, mechanical, and thermal properties. At present, the main materials for fabricating infrared domes on the mid-infrared missiles are MgF_2 , sapphire, spinel, ALON, and nanocomposite ceramic. In this paper, we proposed a ZrO_2 nano infrared transparent ceramic dome stabilized by high strength rare earth oxides. The research on the characteristics of the ceramic proved that the material could be used in the mid-infrared missiles. Furthermore, the material was applied to the development of the infrared dome sample. The compatibility test and the simulated dynamic casting test of the sample at the service environment of a missile verified the performance of the material.

Key words materials; nano infrared ceramic; infrared missile; infrared dome; rare earth oxide

OCIS codes 160.4236; 160.4760; 130.3060

1 引言

红外导弹是精确制导武器的重要分支, 根据工作波段的不同, 它主要可以分为短波导弹(主要为激光导弹或炸弹)、中波($3 \sim 5 \mu m$)导弹和长波($8 \sim$

$12 \mu m$)导弹, 而其中的中波导弹是目前应用最为广泛和发展最为深入的制导形式。红外整流罩位于导弹的最前端, 是红外导弹的主要部件之一。在导弹高速飞行过程中, 红外整流罩不但要承受高的气动加热温度和大的气动压力, 还要防止雨点、沙粒等对

收稿日期: 2020-08-07; 修回日期: 2020-09-20; 录用日期: 2020-11-11

基金项目: 装备发展部预研领域基金(61404150201)

* E-mail: 15538866262@163.com

导弹前端的侵蚀破坏;同时,它作为光学系统的一个组成部分,还要参与光学系统成像。因此,要求红外整流罩具备以下性能:1)高透过率;2)高强度;3)高抗热冲击性能;4)低发射率;5)在高温环境中,物理化学性能稳定^[1-2]。

目前常用的红外整流罩材料主要有氟化镁、蓝宝石、尖晶石、ALON 和纳米复相陶瓷等。氟化镁是较早用作红外整流罩的材料之一,也是当前应用得最为成熟的红外整流罩材料。蓝宝石凭借其优异的力学性能和光学性能,成为目前高马赫导弹整流罩材料的一种比较理想的选择^[3-4]。尖晶石和 ALON 这两种材料是在红外整流罩低成本需求和异形整流罩的需求下应运而生的,与氟化镁相比,它们具有更好的强度、硬度和抗热冲击性能,但其略低于蓝宝石,可以认为是性能介于蓝宝石和氟化镁之间的红外整流罩材料^[5]。

近年来,有越来越多的研究人员开始关注红外纳米陶瓷材料的研制。美国早在 2005 年就将纳米陶瓷的制备理念引入到红外窗口材料体系的研究中,并先后开发了多种纳米陶瓷材料,大幅提高了材料的力学性能和抗热冲击性能^[6-7]。在美国国防部高级研究计划局(DARPA)和海军实验室的资助下,Raytheon 公司联合六家研究机构于 2007 年制备出了平均晶粒尺寸约为 200 nm、两相均匀弥散的高光学质量红外陶瓷,其中波范围内的吸收系数低于 0.05 cm^{-1} ,红外辐射率远低于蓝宝石,在 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的抗弯强度达到了 650 MPa,硬度超过 20 GPa。2013 年,美国 Raytheon 公司报道了口径为 70 mm 的纳米陶瓷红外窗口材料的性能,该材料的综合性能全面超越了蓝宝石单晶。同时,我国多家科研单位也相继展开了红外纳米陶瓷的研制工作,如航天科工集团三院 8358 所研制的热压 MgF_2 陶瓷材料以及中国科学院上海硅酸盐研究所研制的 MgAl_2O_4 材料等。但在高速飞行的气动热环境下,这些材料或高温辐射严重,或机械强度不足。鉴于此,本文研制了 ZrO_2 基红外纳米陶瓷材料,该种材料不仅机械强度高,还具有较低的高温辐射系数,是一种新的适用于中波红外导弹的高强纳米红外陶瓷材料。

2 高强纳米红外透明陶瓷的制备

高强纳米红外透明陶瓷是以高纯 Y_2O_3 纳米粉为掺杂材料,以商业氧化锆粉体为基体,经球磨混合、造粒、成形、烧结制备而成的。该红外透明陶瓷材料既具有良好的力学性能,又具有极低的发射率

和优异的中波红外透过性能,是一种可以用于红外整流罩的新型材料。

2.1 力学性能的提升

材料的断裂源于外力作用下产生的微裂纹的扩展。陶瓷材料中的初始微裂纹尺寸与晶粒尺寸相当,晶粒越细,初始裂纹尺寸就越小,材料断裂的临界应力就越大,断裂强度也就越高。此外,由于晶界强度比晶粒内部弱,因此陶瓷的断裂多沿晶界发生。晶粒越细,沿晶界破坏时裂纹扩展所走的路程就越长,断裂强度就越高。另一方面,晶粒细化能使陶瓷的微观结构更均匀,从而可以提高陶瓷的断裂强度。

气孔也是影响陶瓷断裂强度的另一个因素。陶瓷中的气孔不仅会减小负荷面积,而且会使气孔附近区域产生应力集中,大幅降低材料的断裂强度。

因此,本文通过细化晶粒和排除微气孔这两个方面提升材料的力学性能。

2.2 高温热辐射的控制

由基尔霍夫定律可知,材料的发射率与其吸收率相关,吸收越强,辐射也越强。原料配比中的 ZrO_2 和 Y_2O_3 两种材料具有极低的声子能量,因此,在 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 波段均具有非常小的吸收率,是获得低辐射率中波红外材料的内在因素。

此外,还有影响红外整流罩材料高温辐射的外在因素,如在 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 波段内具有较强吸收的杂质、残余的羟基以及各种引起吸收的缺陷。因此,本文在控制材料的高温辐射系数方面采用了以下措施:1)采用高纯原料,消除引入红外辐射的杂质;2)烧结后段采用热等静压烧结,以最大限度地消除材料中的显微缺陷(第二相和气孔);3)消除晶格缺陷。

通过以上方法制备的高强纳米红外陶瓷材料不仅具有较高的机械强度,还具有较低的热辐射系数。

3 高强纳米红外陶瓷的显微结构

ZrO_2 基高强纳米红外陶瓷断面的显微结构如图 1(a)所示,从图中观察不到未排出的气孔,说明陶瓷的致密度非常高,其实测密度达到了 5.8 g/cm^3 ,接近 ZrO_2 的理论值(5.85 g/cm^3)。同时,陶瓷晶粒大小集中在 $200\sim 300 \text{ nm}$ [如图 1(b)所示],且分布均匀。从陶瓷断面照片可以看出陶瓷晶界干净,没有明显的 Y_2O_3 杂相,这是因为 Y_2O_3 固溶到了 ZrO_2 中。实验中所用的 Y_2O_3 的质量分数约为 3%。 Y_2O_3 可以作为稳定剂,使 ZrO_2 以高强度的四方相的形式稳定存在;同时, Y_2O_3 具有极低的红外辐射系数,可以抑制材料的红外发射率。

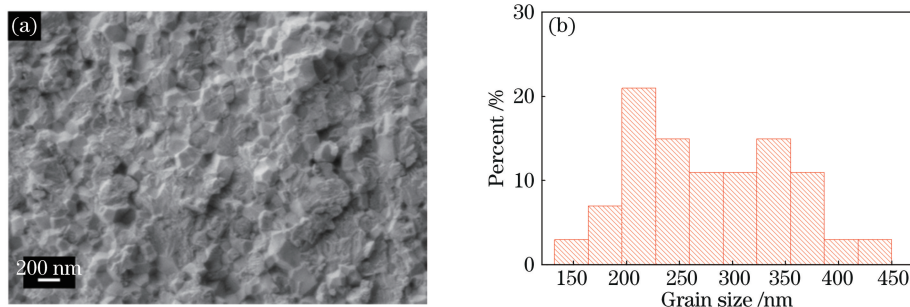


图 1 高强纳米红外陶瓷的断面形貌和晶粒尺寸分布。(a)红外陶瓷的断面形貌;(b)晶粒尺寸分布

Fig. 1 Fractured surface image and grain size distribution of high strength nano infrared ceramic.

(a) Fractured surface image of infrared ceramic; (b) grain size distribution

4 高强纳米红外陶瓷的特性分析

4.1 光谱透过特性

高强纳米红外陶瓷的折射率大于 2,在中波(3~5 μm)范围内的理论透过率为 75%。本文对未

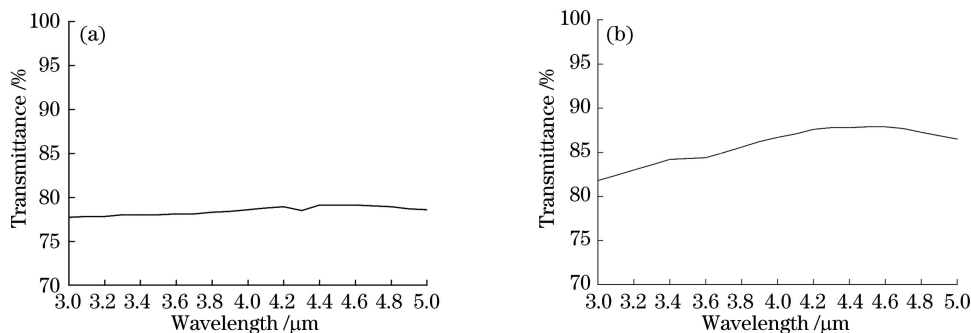


图 2 高强纳米红外陶瓷的透过率曲线。(a)未镀膜;(b)镀膜后

Fig. 2 Transmittance curve of high strength nano infrared ceramic. (a) Before coating; (b) after coating

4.2 光谱折射特性

红外整流罩也是光学系统的一部分,它的光谱折射特性也尤为重要,因此,本文对它的折射率也进行了测试。测试采用的是美国 J. A. Woollam 公司的椭偏仪,图 3 为材料在中波(3~5 μm)范围内的折射率分布情况。可见:该种材料的透过率略大于 2,高于蓝宝石的折射率(1.7 左右);同时,其折射率

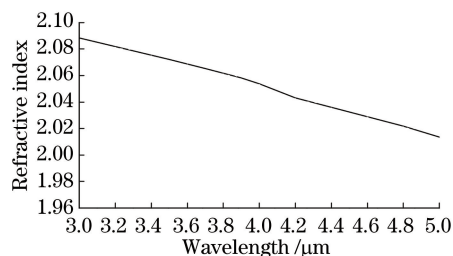


图 3 高强纳米红外陶瓷的折射率曲线

Fig. 3 Refractive index curve of high strength nano infrared ceramic

镀膜材料进行了测试,其透过率在 78%左右,如图 2(a)所示。为了进一步提高红外陶瓷的透过率,本文采用单面镀膜的方式对其进行处理,然后测试其透过率。图 2(b)为单面镀膜后红外陶瓷的透过率测试结果,可知平均透过率在 85%左右。

随波长的增加而减小,符合光学材料的基本特性。

4.3 硬度

硬度是红外整流罩的一个重要的力学性能参数。在恶劣的环境(如高速飞行中遇到的雨水、沙粒等的冲击腐蚀环境)中,材料的硬度具有很重要的作用^[8]。本文采用 INSTRON-2100B 维氏硬度计对高强纳米红外陶瓷的硬度进行测试,测试数据如表 1 所示。

表 1 高强纳米红外陶瓷的维氏硬度数据

Table 1 Vickers hardness of high strength nano infrared ceramic

No.	Vickers hardness /MPa
1	13590
2	13740
3	13740
4	13590
Average	13670

根据维氏硬度和努氏硬度的转换关系^[9]可知蓝宝石的维氏硬度约为 15000 MPa, 氟化镁的维氏硬度约为 5450 MPa。可见, 该种材料的硬度已经远高于氟化镁的硬度, 并与蓝宝石的硬度接近。

4.4 弯曲强度

采用三点弯曲法对高强纳米红外陶瓷的弯曲强度进行测试, 测试数据如表 2 所示。

表 2 高强纳米红外陶瓷的弯曲强度数据
Table 2 Bending strength of high strength nano infrared ceramic

No.	Bending strength /MPa
1	1889
2	1799
3	1796
4	1819
Average	1826

可见, 高强纳米红外陶瓷材料的弯曲强度已高于蓝宝石等材料的弯曲强度。

4.5 高温红外辐射特性

红外整流罩的高温红外辐射会使红外成像系统的图像背景亮度增加, 甚至造成红外探测器饱和, 淹没目标信号。因此, 红外整流罩的高温红外辐射特性尤为重要。通过对高强纳米红外陶瓷进行测试, 得到了其在 600 °C 时的发射率曲线, 如图 4 所示。

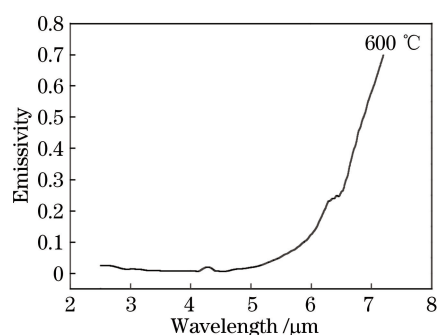


图 4 高强纳米红外陶瓷在 600 °C 时的发射率曲线
Fig. 4 Emissivity curve of high strength nano infrared ceramic at 600 °C

由图 4 可见: 600 °C 时, 高强纳米红外陶瓷材料在 3~5 μm 波段范围内有很低的发射率, 在 5.5 μm 之后发射率急剧升高(但这部分不在中波红外导弹的工作范围之内, 对系统无影响)。

5 高强纳米红外陶瓷整流罩的应用特性

5.1 膜层牢固度

红外导弹在高速飞行过程中会出现气动加热现象, 导致红外整流罩温度升高。根据弹道和速度的

不同, 红外整流罩温度可能达到 300 °C 以上, 甚至是 600 °C 以上。

为了增加高强纳米红外陶瓷整流罩的透过率, 本文在整流罩内表面镀制了增透膜。在镀膜时选用了稳定性较好的蓝宝石膜; 同时, 优化膜系结构, 控制蒸镀条件, 以提升膜层和基底的亲合性, 从而提高膜层的牢固度。为了验证膜层在高温环境下的牢固度, 本文还展开了高温冲击试验研究: 将整流罩放入预设温度为 600 °C 的马弗炉中, 静置 2 min 后将其从炉中取出, 在常温环境下静置 15 min; 然后再将整流罩重新放入预设温度为 600 °C 的马弗炉中, 如此循环 10 次, 分析膜层的变化情况。

试验前后的图片如图 5 所示。可见, 试验后整流罩完好, 膜层牢固, 未见起皮或膜层脱落现象。同时, 本文对高温冲击试验后的整流罩进行了透过率测试, 结果发现, 透过率与试验前相比没有下降, 验证了整流罩膜层的牢固性和耐热性。

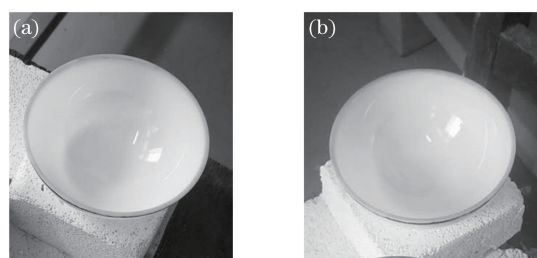


图 5 整流罩在高温冲击试验前后对比照片。
(a) 试验前; (b) 试验后

Fig. 5 Comparison photos of dome before and after high temperature impact test. (a) Before test; (b) after test

5.2 整流罩的环境适应性

红外导弹组成复杂, 服役环境恶劣, 寿命期内将承受温度、湿热、低气压、淋雨、盐雾、霉菌、振动、加速度及冲击等环境应力, 为保证设计定型后交付部队的导弹质量, 生产中需要对元器件、部件、分组件及组件等不同层级的产品 100% 进行环境应力筛选, 筛选合格的产品才允许进行高层级装配^[10-11]。

因此, 作为红外导弹的主要组成部分, 红外整流罩也应该具备对以上环境的适应性。本文将红外整流罩组装为组合件, 如图 6 所示, 并在组件状态下完成红外导弹的各项环境适应性考核, 以进一步检验高强纳米红外陶瓷材料的性能。

5.3 整流罩抛罩的环境适应性

红外导弹整流罩多为球形整流罩, 这种较钝的球形整流罩会增加导弹的气动阻力, 影响导弹的射程。为了提高红外导弹的射程, 除了可以采用共形



图 6 整流罩组件实物

Fig. 6 Photo of dome assembly

整流罩以外,还可以采用双层整流罩的形式,即在红外整流罩外面再增加一个圆锥形整流罩,以提高导弹的气动性能。当需要进行红外探测时,采用抛罩的方式将外层罩分离,进入红外制导模式。

整流罩的分离有被动式分瓣抛罩、主动式分瓣抛罩、主动式破碎抛罩和主动式整体抛罩等。而导爆索式抛罩是主动式破碎抛罩的一种,它的特点是操作简单、传爆可靠、不怕雷电、抗杂流、可使成组装药同时起爆,且能实现毫秒微差爆破等^[12-14]。这种抛罩方式是体积较小的红外导弹的一种优选方案。但是,这种方式也存在缺点,即由于空间较小,导爆索产生的破坏力会快速传递到红外整流罩上,对其具有一定的破坏性。虽然设计时可以采用一定的防护措施阻隔一部分破坏冲击,但是这种破坏性不可能完全避免。因此,要求红外整流罩也要具有良好的机械强度,可以抵抗残留的冲击。

从本文的上述分析可以知道,高强纳米红外陶瓷材料具有良好的力学性能,其弯曲强度甚至高于蓝宝石等材料,非常适合用于该类抛罩型红外导弹上。

因此,在模拟动态抛罩试验中,本文将高强纳米红外陶瓷整流罩作为内部的红外整流罩。模拟时主要关注导弹的摆放姿态和前端整流罩的受力情况。首先根据导弹的飞行姿态和攻角计算导弹飞行时与气流之间的夹角,从而通过专用夹具控制导弹和试验设备喷流口轴线之间的夹角;另外,根据导弹的飞行弹道和飞行速度计算红外整流罩的受力情况,调整试验设备的内部压力,使喷流到达整流罩时保持要求的压力。图 7 为模拟动态抛罩试验,图 7(a)为抛罩前的状态,图 7(b)为抛罩后的状态。抛罩试验完成之后,高强纳米红外陶瓷整流罩完好无损,充分验证了该种陶瓷材料的力学性能和抗冲击性能。

6 结 论

高强纳米红外陶瓷是一种新型纳米陶瓷材料,

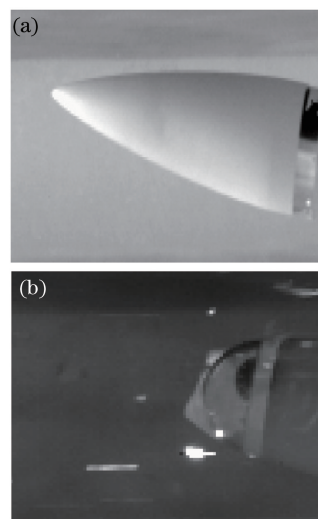


图 7 模拟动态抛罩试验。(a)抛罩前;(b)抛罩后

Fig. 7 Simulated dynamic separation test. (a) Before separation; (b) after separation

该材料不仅具有较高的机械强度,还具有较低的热辐射系数。本文对该陶瓷材料的特性进行研究,证明了该材料非常适合用于制造红外导弹的整流罩。同时,本文使用该陶瓷材料完成了红外整流罩样件的研制,并采用该样件完成了导弹服役环境下的适应性试验及模拟动态抛罩试验,充分验证了该种材料的性能。该种材料的应用拓展了红外导弹整流罩材料的选择范围。

参 考 文 献

- [1] Zhang R S. Recent advances in infrared window and dome technologies [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S2): 114-119.
张荣实. 红外窗口/整流罩技术新进展[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S2): 114-119.
- [2] Meng Q C, Duan M, Zhang Y Q, et al. New development on dome of infrared air-to-air missile [J]. *Aero Weaponry*, 2008(2): 24-27.
孟庆超, 段萌, 张运强, 等. 红外空空导弹整流罩技术的新进展[J]. *航空兵器*, 2008(2): 24-27.
- [3] Zhang L, Chen L, Fan Y Y, et al. Development of mid-infrared transmitting glasses window and applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900134.
张龙, 陈雷, 范有余, 等. 中红外玻璃材料发展及前沿应用[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900134.
- [4] Xie Q M, Li Y W, Pan S C. The development and application of the materials for infrared windows and domes[J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(10): 559-567.
谢启明, 李奕威, 潘顺臣. 红外窗口和整流罩材料的

- 发展和应用[J]. 红外技术, 2012, 34(10): 559-567.
- [5] Goldman L M, Smith M, Ramisetty M, et al. Conformal ALON and spinel windows [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10985: 109850G.
- [6] Li J, Jiang N, Xu S Q, et al. Recent development on infrared transparent MgO-Y₂O₃ nanocomposite ceramics[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(9): 1302-1314.
李江, 姜楠, 徐圣泉, 等. 红外透明 MgO-Y₂O₃ 纳米复相陶瓷研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(9): 1302-1314.
- [7] Fan J T, Xu Y Y, Qin X P, et al. Comparative study on transmittance and radiance of sapphire, YAG, spinel, MgF₂ and Y₂O₃ at high temperatures [J]. Infrared Technology, 2017, 39(10): 951-957.
范金太, 许杨阳, 覃显鹏, 等. 常用中波红外窗口材料高温透过与热辐射性能比较[J]. 红外技术, 2017, 39(10): 951-957.
- [8] Yu H Z. Infrared optical material [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 154-163.
余怀之. 红外光学材料[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2015: 154-163.
- [9] Wang Q S. Knoop hardness and its conversion to Vickers hardness [J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2001(2): 43-44.
王庆山. 努氏硬度及其与维氏硬度的换算[J]. 机车车辆工艺, 2001(2): 43-44.
- [10] Li G C, Wu R X, Guo Q L. Research on environmental routine test items for air-to-air missile [J]. Aerospace Control, 2019, 37(1): 91-95.
李根成, 吴瑞轩, 郭强岭. 空空导弹环境例行试验项目研究[J]. 航天控制, 2019, 37(1): 91-95.
- [11] Fan H T. Air-to-air missile conceptual design [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013: 7.
樊会涛. 空空导弹方案设计原理[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 7.
- [12] Ge Q M, Liu X C, Qu H Y, et al. Research of high-speed aircraft shroud separation technologies [J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(3): 28-31.
戈庆明, 刘秀春, 渠弘毅, 等. 高速飞行器头罩分离设计方案研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(3): 28-31.
- [13] Jeyakumar D, Rao B N. Dynamics of satellite separation system [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 297(1/2): 444-455.
- [14] Choi S, Kim C, Rho O H, et al. Numerical analysis on separation dynamics of strap-on boosters in the atmosphere[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2002, 39(3): 439-446.