

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0115-05

# 用尖晶石代替蓝宝石制作红外成像 整流罩的设计

赵洪卫 侯天晋 朱 斌

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

**摘要** 研究了在气动效应或爆破冲击环境条件下,尖晶石和蓝宝石制作的中波红外成像制导导引头整流罩的设计方法。对在大气中高速飞行的成像导引头整流罩,进行了气动效应仿真分析和电弧风洞模拟实验。采用在尖晶石外表面,镀制金刚石保护膜的方法实现了尖晶石整流罩的消热设计。对在高压爆破冲击环境条件下成像导引头整流罩的耐冲击要求,采用在导引头金属壳体与整流罩的连接处增加过渡缓冲层的方法,较大降低了子母弹在切壳和抛撒分离过程中作用于尖晶石整流罩的传导压应力。研究表明,在中波红外光学成像整流罩的设计中,采用尖晶石代替蓝宝石可以满足不同环境条件的技术要求。

**关键词** 红外成像;金刚石镀膜;缓冲过渡层;电弧风洞;切壳与抛撒;气动效应

**中图分类号** TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0115

## Infrared Imaging Domes Design with Spinel Instead of Sapphire

Zhao Hongwei Hou Tianjin Zhu Bin

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract** The aerodynamic effect or the explosive and shock effect on spinel and sapphire domes of the mid-infrared (mid-IR) imaging missiles are studied. Based on the aerodynamic simulation analysis and the arc wind tunnel experimental results, a protective diamond coating applied to a spinel dome to realize the athermalization design is carried out. To suffer great impact, exciding and spreading experiments testify that a transited structure layer buffer added between the spinel dome and the metal shell could weaken the conducting stress along the shell greatly. The results show that applying spinel instead of sapphire to make domes is feasible under different technique requirements.

**Key words** infrared imaging; diamond coating; transited layer buffer; arc wind tunnel; exciding and spreading; aerodynamic effect

### 1 引 言

光学整流罩在成像导引头中起着保护内部光电系统的作用,并作为成像光学系统的组成部分,其重要性不言而喻。随着红外成像制导技术的快速发展,对整流罩设计的技术要求越来越高。早在 1989 年 4 月,美国在奥兰多召开了第一届“窗口与整流罩技术及材料会议”<sup>[1]</sup>,此后每两年召开专题讨论会议,并出版论文集。目前,整流罩技术研究的内容主

要集中在材料研发、系统模拟、结构设计和气动效应等多个方面,这些研究成果,已经不断被应用到新一代的整流罩设计中。我国在这方面的研究起步较晚,但最近几年在光学整流罩材料的加工和镀膜工艺等技术方面发展迅速<sup>[2,3]</sup>。传统工艺制作整流罩如蓝宝石整流罩等,具有加工周期长和费用高等缺点,随着现代工艺技术的不断提高,使用新材料和新工艺制作整流罩的时机已逐渐成熟<sup>[4~8]</sup>。

**收稿日期**: 2010-04-16; **收到修改稿日期**: 2010-06-05

**作者简介**: 赵洪卫(1968—),男,博士研究生,主要从事光学技术在机载及弹载器系统中的应用等方面的研究。

E-mail: hwzhaol23@sina.com

**导师简介**: 侯天晋(1956—),男,研究员,主要从事激光技术及其应用等方面的研究。E-mail: tianjinhou@gmail.com

本文主要讨论中波红外成像整流罩的设计技术,针对尖晶石与蓝宝石导引头整流罩,开展了一系列分析实验研究。通过外场实验,成功实现了以尖晶石代替蓝宝石制作红外整流罩的设计。

## 2 红外成像整流罩的设计要求

### 2.1 技术要求

红外成像整流罩作为光学成像系统的一部分,其设计首先必须满足光学成像性能的要求,同时还要满足作战环境的特殊使用条件。在光学上,要求材料满足光电成像系统中光学设计的指标,如透光波段的范围和光的透射率大小等。在外形上,要求满足飞行环境状态的技术指标,如飞行高度和飞行速度等。除此之外,还要满足作战环境下的要求,如整流罩的抗雨蚀和沙蚀等<sup>[9~13]</sup>。

特别是当导弹高速飞行时,要求整流罩在气动加热环境下,仍然能够具有良好的光学性能,以便能够实现对目标的识别、跟踪等功能。另外,对整流罩的设计,有时还要求其能够承受成像制导前,诸如整流罩外面保护罩的抛弃,或者多弹头的分离等对罩体产生的巨大冲击力等。

### 2.2 材料的选择

红外成像整流罩的常用材料主要有硫化锌、锡化锌、蓝宝石、尖晶石、氮氧化铝、碳化硅、砷化镓陶瓷晶体和磷酸盐玻璃等。使用蓝宝石制作光学窗口和整流罩的研究应用历史悠久,传统的制作方法是采用经典的光学加工。由于蓝宝石的硬度较大,加工周期较长,成本较高;即使采用先进的晶体生长法,由于生长缺陷的存在,也还远未达到实用化的要求<sup>[14,15]</sup>。

目前,采用化学气相沉积(CVD)合成技术,可以生产出大尺寸的氮氧化铝与尖晶石窗口以及整流罩等,其性能与蓝宝石相近,而成本大为降低。氮氧化铝对于合成粉末颗粒的要求较高,目前主要用于透明防护装甲等;而尖晶石在制作较大尺寸整流罩方面更具优势<sup>[16]</sup>。从满足光学等应用条件的角度来看,尖晶石在紫外到中波红外波段具有良好的透射率,高温下阻热性能亦优于氮氧化铝,所以在较高马赫数的整流罩设计中,具有非常大的吸引力。美国的弹道实验证实,尖晶石整流罩具有与蓝宝石相近的性能,在风洞实验中,其表现优异<sup>[17]</sup>。

所以使用尖晶石代替蓝宝石,可以节省巨大的研究经费,研究意义重大。

另外金刚石晶体也是一种常讨论到的光学窗口

材料,它被认为是自然界中光学和力学等物理性能最为稳定的材料。但是金刚石对中波红外存在一个透射率较低的吸收带,因此一般认为不太适合制作中波红外整流罩。利用它高温下物理性能稳定的特点,可用来制作保护膜<sup>[18~22]</sup>。

## 3 尖晶石与蓝宝石整流罩的设计研究

### 3.1 整流罩的气动效应实验

#### 3.1.1 气动加热仿真分析

当导弹在大气层内高速飞行时,空气流场在整流罩的周围会形成湍流,产生气动效应,对罩体产生气动加热。气动效应对成像性能的影响从光学上来看,气动效应形成的激波层和附面层等会引起光波的折射、散射和吸收等效应,使图像画面出现抖动和模糊等现象,严重时甚至无法成像;从力学上来看,高速飞行的整流罩,会受到因空气动力学产生的机械应力和因气动加热产生的热应力的影响。如果这些应力超过了罩体的压力承受极限,罩体就会发生破裂现象,可能引起灾难性的后果。

首先根据流体力学的湍流理论,采用球壳温度场模型,对设计的一个尖晶石整流罩的弹道工作状态,进行了气动仿真分析计算<sup>[23~25]</sup>。导弹的理论弹道制导条件是:假设导弹按照理论弹道水平飞行,制导高度 6 km,飞行速度 816 m/s,制导时间 8.5 s。图 1 给出了整流罩上计算的主要点位,以及其对应的球心角大小。

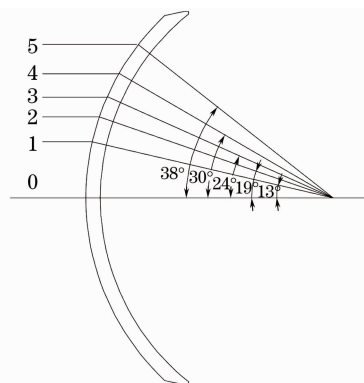


图 1 尖晶石整流罩的主要计算点位

Fig. 1 Major calculational points of a spinel dome

表 1 给出了整流罩的内外壁上,理论计算的气动加热温度的最大值。

计算表明,在抛罩后理论弹道条件下,尖晶石整流罩外表面最高温度为 102.9 °C,内表面最高温度为 90.5 °C;罩体的外表面流场,在球心角大于 24°以上位置为完全湍流状态。

表 1 理论弹道上尖晶石整流罩的计算温度

Table 1 Temperature of a spinel dome theoretical trajectory

Calculational points	Spherical angles / (°)	Theoretical trajectory	
		External wall temperature / °C	Internal wall temperature / °C
1	0	67.9	61.9
2	13	100.7	85.8
3	19	102.9	90.5
4	24	102.5	90.2
5	30	102.4	89.7
6	38	99.2	87.2

### 3.1.2 电弧风洞模拟实验

根据理论计算,先采用电弧风洞进行了气动模拟实验研究。其方法是利用电弧风洞产生的高温超音速气流,模拟导引头工作的流场热环境。主要检测导引头整流罩受到强的热气流冲击时,能否承受该冲击;同时测试红外整流罩,在仿真环境条件下温度场的分布,考核气动效应对成像的影响等。

实验时,通过调节设备加热器的气体输入流量和电弧功率等,可以控制气流的温度、压力和密度等流场参数,使之达到或接近导引头的工作环境状态。由于装置条件所限,无法测量罩体的外壁温度分布,采用贴片式温度传感器,测量了整流罩内壁主要点位的温度。

根据对导引头在弹道气动环境条件下的计算结果,分别对电弧风洞实验的空气流场参数进行了设置。实验的风洞口的热气流的气压约为 0.5 MPa,热流量为 200~550 kW/m<sup>2</sup>,冲击持续时间为 2~4 s。

实验结果是整流罩样品在受到热空气流冲击后,罩体出现了开裂,如图 2 所示。



图 2 电弧风洞实验后破裂的整流罩

Fig. 2 Cracked dome after arc wind tunnel experiment

实验记录了整流罩的内壁采样点温度大小,内壁温度最高达到了 96 °C,罩体在受到热流冲击后的第 7 s 出现了开裂。

由于受到模拟实验条件的限制,气流温度和气压大小,不能完全与弹道状态吻合,实验流场的气压远大于理论弹道的仿真结果。

### 3.1.3 减小气动热应力的方法

通过深入的研究分析,决定采用在尖晶石外表面上,镀金刚石保护膜的方法来增强尖晶石罩的力学强度,以减小热流对尖晶石的热冲击<sup>[26~27]</sup>。

这是因为金刚石是自然界中,高温条件下力学、热学和光学等物理性能表现最好的红外材料。金刚石的热导率远大于尖晶石,传热快,可以减小罩体的热梯度,使其表面上不同位置产生的热应力变化减小,从而避免了尖晶石罩体的开裂。虽然金刚石在红外中波吸收系数较大,但是因为膜层的厚度为微米量级,对光的吸收可以忽略;从光学设计上来看,因厚度改变而产生的像差,可以在光学装调阶段予以消除,不会引起成像性能的改变。同时,镀膜后罩体的表面更加光滑,减小了空气流与罩体的摩擦力,从另一个方面减小了产生的气动热量。最后,金刚石保护膜又可以增强尖晶石罩体的力学强度。

对采用镀金刚石膜的尖晶石与蓝宝石整流罩,再次进行的风洞实验的结果显示,在电弧风洞模拟热冲击下,两种整流罩均没有出现开裂现象;并且能够满足对固定目标实现中波红外光学成像的技术要求。

## 3.2 整流罩的切壳抛撒实验

### 3.2.1 实验简介

导弹设计为中波红外成像制导模式的子母弹,将 4 个子弹均匀对称排在战斗部壳体内,当导弹飞行到目标的上空后,抛撒机构首先切开导弹的外壳体,然后抛出子弹,打击一定半径范围内的多个目标。

本实验主要考核,弹头分离时光电成像制导系统的稳定性可靠性,特别是成像整流罩在切壳和抛撒过程中,承受瞬时高压应力冲击的能力。采用地面静态模拟的方法,将 4 颗模拟子弹采用金属条带捆绑后,装载于导弹壳体内,倒置在地面固定支架上,进行模拟实验。

实验前,将测试设备内置于子弹体内,用以测量子弹体的不同部位的冲击加速度大小等参数。实验时,首先在导弹壳体内部建立较高的气压,然后引爆导爆索切除外壳;经瞬间延迟后,位于各子弹捆绑轴心的气囊,在高压下向外冲击子弹,各个子弹离开轴心飞出,从而实现子弹的抛撒。

### 3.2.2 实验结果

考虑到高压爆破冲击对于光电系统的较大冲击影响,成像整流罩的耐冲击设计成为技术的关键,对采用蓝宝石、尖晶石整流罩的导引头子弹进行了实验研究。

再考虑到抛撒后子弹落地对导引头整流罩的损

伤影响等情况,实验时采取切壳和抛撒分步进行。首先进行了切壳耐冲击实验,主要测量切壳时壳体内部建压大小、导弹体内部温度数值变化、弹头(红外成像探测光电系统)与弹尾(计算机控制系统)的冲击过载、子弹抛撒飞行速度和子弹体内光电系统的抗冲击能力等。

在图3所示的外壳切除分离实验中,爆炸产生的巨大冲击应力,经过子弹体传递到整流罩,对罩体形成的压应力使尖晶石整流罩开裂损伤(如图4所示);而蓝宝石整流罩保持完好(如图5所示)。



图3 切壳后的实验装置现场

Fig. 3 Excided missile experimental apparatus



图4 切壳后损伤的尖晶石整流罩

Fig. 4 Cracked spinel dome after exciding experiment



图5 切壳后完好的蓝宝石整流罩

Fig. 5 Intact sapphire dome after exciding experiment

对蓝宝石和尖晶石整流罩,进行了多次切壳对比实验,均证明蓝宝石整流罩的抗冲击能力远大于尖晶石,而尖晶石多次被损伤。

图6~8分别给出了其中一次实验中,对子弹体头部在三维不同的方向上,瞬间冲击加速度 $a$ 的测量值与冲击时间 $t$ 的关系,图中不同的测试通道对应相应编号的子弹体。

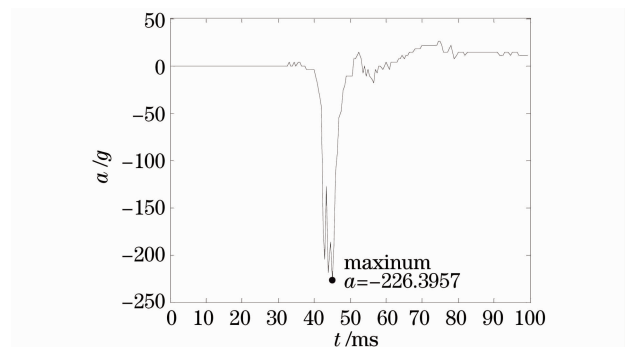


图6 第一通道中子弹头部抛撒方向冲击加速度

Fig. 6 Horizontal acceleration of guided missile head in channel 1

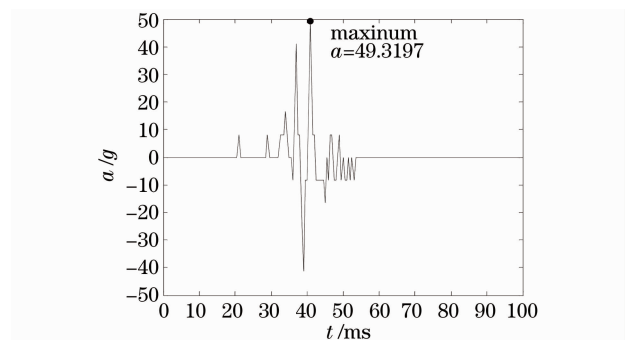


图7 第二通道中子弹体轴向冲击加速度

Fig. 7 Axis acceleration of guided missile head in channel 2

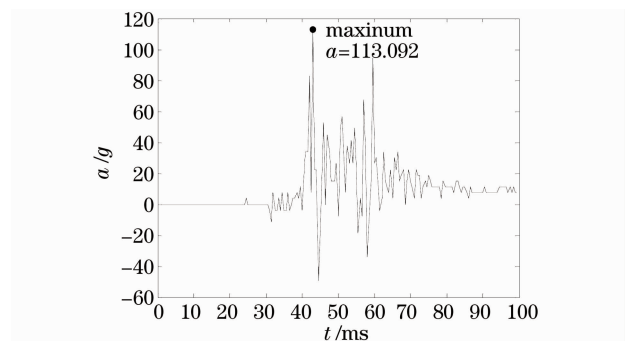


图8 第三通道中子弹头部切向冲击加速度

Fig. 8 Tangential acceleration of guided missile head in channel 3

### 3.2.3 结构设计的改进

从图6~8的测试结果可以看出,子弹体在切壳实验中,受到的瞬间冲击加速度最高达到226g( $g$ 为重力加速度)。在多次实验中发现该值最大可达到1034g,巨大的冲击应力沿子弹体迅速传递到整流罩体,对壳体形成瞬间压应力。蓝宝石整流罩的抗压应力远大于尖晶石,当该压应力超过了尖晶石的承受极限时,将会导致尖晶石整流罩的破裂。

上述情形说明,尖晶石整流罩的设计,必须考虑对瞬间压应力的缓冲释放等。在结构设计上,需要



考虑到整流罩晶体与金属壳体间的连接方式。经过认真研究分析,对尖晶石整流罩的结构连接进行了改进,在壳体与罩体之间采用特殊工艺技术,增加了可吸收压应力的缓冲过渡结构层。

对于改进后的尖晶石整流罩子弹,又进行了切壳和抛撒实验研究,结果显示整流罩未有任何损伤。抛撒实验结束后对子弹体进行通电检查,中波红外成像系统一切正常。该次实验切壳时,对弹头最大冲击加速度达到了 400 g;抛撒时冲击时间大约为 2 ms,冲击加速度最大值约为 160 g。

## 4 结 论

采用 CVD 技术加工的尖晶石整流罩代替传统的蓝宝石整流罩,具有可以缩短加工周期和降低费用等优点,特别是在满足批量生产上更具有不可估量的经济效益。针对实际工程中红外成像整流罩设计的使用环境条件,完成了两种情况的整流罩设计,通过实验证明了采用尖晶石代替蓝宝石整流罩的可行性。

在对飞行速度达到 680 m/s 以上的中波红外成像导引头的整流罩设计时,必须考虑到气动效应对整流罩体的光学、热学和力学等物理性能的成像影响。采用在尖晶石外表面,镀制金刚石膜层增加了整流罩表面的光滑度,减小了与空气的摩擦力;同时利用金刚石膜层传热快的特性,减小了气动热应力对尖晶石整流罩的影响,从而保证了气动环境条件下,尖晶石整流罩仍具有稳定的物理性能。

在中波红外成像子弹切壳和抛撒分离环境条件下,采用在尖晶石罩体与子弹金属外壳体的连接处,增加过渡缓冲结构层的方法,改进了导引头整流罩的抗应力能力,减小了因爆炸冲击对整流罩形成的传导压应力。

## 参 考 文 献

- 1 W. J. Tropf, M. E. Thomas, R. K. Frazer. Windows and domes: past, present, and future[C]. *SPIE*, 2003, **5078**: 80~89
- 2 Li Yaolong, Li Jianming, Su Xiaoping *et al.*. Resarch trends and current status in infrared window and dome materials[J]. *J. Synthetic Crystals*, 2007, **36**(4): 877~884  
李跃龙, 黎建明, 苏小平等. 红外窗口整流罩材料研究现状与发展趋势[J]. *人工晶体学报*, 2007, **36**(4): 877~884
- 3 Zhang Rongshi. Recent advances in infrared window and dome technologies[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(s): 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**(s): 114~119
- 4 Troy A. Street. Delphi technological forecast results of hypersonic window materials[C]. *SPIE*, 1994, **2286**: 480~484
- 5 D. C. Harris. Frontiers in infrared window and dome materials [C]. *SPIE*, 1995, **2552**: 325~335
- 6 T. J. Mroz, T. M. Hartnett, J. M. Wahl *et al.*. Recent advances in spinel optical ceramic[C]. *SPIE*, 2005, **5786**: 64~70
- 7 J. L. Sepulveda, R. O. Loutfy, S. Chang *et al.*. Advances in spinel ceramic technology for large windows and domes [C]. *SPIE*, 2009, **7302**: 73020E
- 8 J. Yu, B. McWilliams, S. Kilczewski *et al.*. Processing method and process modeling of large aperture transparent magnesium aluminate spinel domes[C]. *SPIE*, 2009, **7302**: 730209
- 9 A. A. Déom, A. Luc, C. Flamand *et al.*. Are classical rain erosion experiments of infrared materials used in high-velocity seekers representative[C]. *SPIE*, 1997, **3060**: 130~141
- 10 L. M. Goldman, R. W. Tustison. High durability infrared transparent coatings[C]. *SPIE*, 1994, **2286**: 316~324
- 11 R. M. Sullivan, A. Phelps, J. A. Kirsch *et al.*. Erosion studies of infrared dome materials[C]. *SPIE*, 2007, **6545**: 65450G
- 12 A. A. Déom, D. L. Balageas, F. G. Laturelle *et al.*. Sensitivity of rain erosion resistance of infrared materials to environmental conditions such as temperature and sires [C]. *SPIE*, 1990, **1326**: 301~309
- 13 C. R. Seward, C. S. J. Pickles, R. Marrah *et al.*. Rain erosion data on window and dome materials[C]. *SPIE*, 1990, **1760**: 280~290
- 14 F. Schmid, M. B. Smith, C. P. Khattak. Current status of sapphire dome production[C]. *SPIE*, 1994, **2286**: 2~15
- 15 J. A. Savage, C. J. H. Wort, C. S. J. Pickles *et al.*. Properties of free-standing CYD diamond optical components[C]. *SPIE*, 1997, **3060**: 144~159
- 16 J. M. Wahl, T. M. Hartnett, L. M. Goldman *et al.*. Recent advances in ALON™ optical ceramic[C]. *SPIE*, 2005, **5786**: 71~82
- 17 A. A. DiGiovanni, L. Fehrenbacher, Don W. Roy. Hard transparent domes and windows from magnesium aluminate spinel [C]. *SPIE*, 2005, **5786**: 56~63
- 18 D. C. Harris. Properties of diamond for window and dome applications[C]. *SPIE*, 1994, **2286**: 218~228
- 19 T. P. Mollart, C. J. H. Wort, C. S. J. Pickles *et al.*. CVD diamond optical components, multi-spectral properties and performance at elevated temperatures [C]. *SPIE*, 2001, **4375**: 180~198
- 20 C. Liu, W. Qiu, H. Meissner. High growth rate deposition of highly oriented polycrystalline diamond film[C]. *SPIE*, 2009, **7302**: 73020H
- 21 S. Joseph, D. Yadlovker, O. Marcovitch *et al.*. Evaluating environmental survivability of optical coatings[C]. *SPIE*, 2009, **7302**: 73020I
- 22 D. S. Hobbs. Study of the environmental and optical durability of AR microstructures in sapphire, ALON, and diamond [C]. *SPIE*, 2009, **7302**: 73020J
- 23 G. Russell, S. Cayson, M. Jones *et al.*. Army hypersonic compact kinetic energy missile laser window design[C]. *SPIE*, 2003, **5078**: 28~39
- 24 E. F. Cross. Analytical method to calculate window heating effects on IR seeker performance[C]. *SPIE*, 1994, **2286**: 493~499
- 25 R. Cayzac, C. Grignon, E. Carette. Navier-Stokes computation of heat transfer and aero-heating modeling for supersonic projectiles[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2006, **10**(5): 374~384
- 26 L. M. Goldman, S. K. Jha, N. Gunda *et al.*. Durable coatings for IR windows[C]. *SPIE*, 2005, **5786**: 381~392
- 27 P. Kiocek, T. McKenna, J. Trombetta. Thermo-optic, thermo-mechanical, and electromagnetic effects in IR windows and domes, and the rationale for GaAs, GaP, and diamond [C]. *SPIE*, 1994, **2286**: 70~90