

机载光电设备红外 8~12 μm 光学窗口技术研究*

赵丽娟, 吉书鹏

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 基于机载光电设备红外窗口的性能要求, 对几种 8~12 μm 波段红外材料的性能进行了比较, 分析 ZnS 材料作为长波红外窗口的优越性, 并对两种不同工艺制备的 ZnS 的光学、力学和热性能进行了分析和比较, 对以 ZnS 为基底的窗口材料的镀膜选择进行了分析, 介绍了一种红外窗口厚度的确定方法, 并对不同厚度及镀膜前后的 ZnS 样品进行了透过率的测试。

关键词: 机载光电设备; 红外窗口; ZnS; 类金刚石膜

中图分类号: TN21

文献标识码: A

0 引言

近年来, 随着传感器技术的发展, 红外成像技术在现代国防科技中已占有十分重要的地位. FLIR 系统是利用目标本身的红外辐射来工作, 抗干扰能力强, 不受地杂波、海杂波的干扰, 具有良好的低空探测性能, 因此红外成像技术的应用能够大大提高武器平台的全天时综合作战效能. 然而机载光电设备的工作环境一般都很恶劣, 为了保障红外传感器不被外界环境损伤影响其性能, 外部窗口的特性至关重要. 本文对几种 8~12 μm 波段红外材料进行了分析比较, 测量了不同厚度及镀膜前后的 ZnS 样品透过率.

1 红外窗口材料选取

窗口材料的选择不仅要有良好的机械特性、热特性, 还要有好的光学特性. 对于一个红外成像系统, 光学系统和光学窗口的透过率对成像质量有着较大的影响, 因此在选取材料的时候, 尽量选取红外透过率高的材料; 其次折射率要高, 且不因温度和波长的变化而发生很大的变化; 另外作为窗口材料还要考虑它的硬度, 特别是断裂韧性, 抗热冲击特性, 以及抗磨损和抗腐蚀能力等. 一般飞行器在高速飞行时由于空气动力加热, 窗口的表面温度会随飞行速度的增长而升高, 其增长关系见图 1^[1].

从图 1 可以看出: 以 2Mach 的速度飞行的载机, 在飞行高度为 12 km 时窗口的表面温度可达到 117°C, 飞行高度越低, 窗口的表面温度越高; 若载机的飞行高度一定, 同样在 12 km 的高空以 5Mach 的速度飞行, 窗口的表面温度达到 1027°C. 可见窗口的表面温度与载机的飞行速度成正比, 与载机的飞

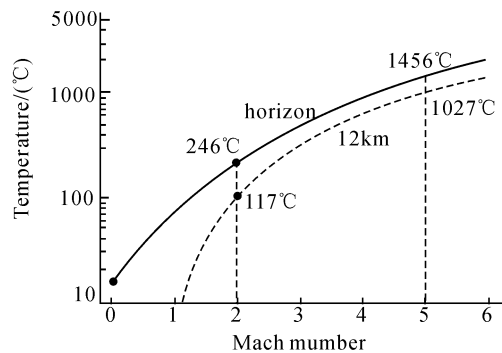


图 1 飞行器在不同高度表面温度和飞行速度的关系
Fig. 1 The connection of surface temperature and flying speed of aircraft

行高度成反比. 因此在做材料选择时要考虑到实际使用时载机的飞行高度和飞行速度, 确定窗口的表面温度, 从而避免所选材料在温度升高的情况下透过性能受到影响.

金刚石作为红外窗口材料具有宽阔的透射区, 在紫外、可见光和其它波段红外区域都有良好的透过性, 热导性优良, 具有坚硬的自然特性, 抗腐蚀耐磨损, 是一种理想的红外窗口材料. 目前以甲烷和氢气的混合气体为原料, 可生成适合场发射的金刚石薄膜^[2], 但是制备大块可用于窗口的金刚石, 由于其工艺难、价格昂贵, 因此现阶段在红外窗口中的应用还很有限.

目前在 8~12 μm 长波波段下常用的红外窗口材料主要有 Ge、GaAs、GaP、ZnS、ZnSe, 其性能分析见表 1^[1,3].

锗是 8~12 μm 波段红外系统最常用的材料, 它的机械强度高, 导热性好, 热吸收系数低, 折射率和透射率都很高, 但抗化学腐蚀性能较差, 没有保护膜易被腐蚀产生针孔状蚀点^[4]. 另外锗的断裂韧性较低, 在窗口压力较大的情况下容易断裂, 且窗口温度超过 88.9°C 时, 开始吸收红外辐射, 透过率逐渐降低. ZnSe 虽然光学性能优良, 但硬度和断裂韧性较低, 在窗口阻力较大的时候容易断裂, 无法抵

* 中国空空导弹研究院基金资助

Tel: 0379-63387307 Email: zhaolj014@yahoo.com.cn

收稿日期: 2007-01-12

表1 几种红外材料性能

性能	材料	ZnS	ZnSe	GaAs	GaP	Ge
晶体结构		立方		立方	立方	立方
透过范围/ μm		0.3~14	0.5~22	0.9~12	0.6~11	1.8~12
透过峰值/(%)		74	74	55	60	46
200℃时透过性能		透	—	透	透	失透
>200℃时透过性能		透	—	不透	—	失透
吸收系数/ cm^{-1}	8 μm	0.1	—	< 0.01	0.09	—
	10.6 μm	0.3	0.5	< 0.01	0.44	—
	12 μm	0.4	—	< 0.01	1.44	—
硬度/($\text{Kg} \cdot \text{mm}^{-2}$)		250	120	750	845	850
断裂强度/($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)		1	0.5	0.43	0.8	0.66
弯曲强度/MPa		97	—	55	103	93
弹性模量/Gpa		74.5	70.3	85.5	102.6	103.3
泊松比/(23℃)		0.29	0.28	0.31	0.31	0.31
膨胀系数/(10^{-6}K^{-1}) (23℃)		6.8	7.1	5.73	5.3	6.0
比热/($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) (23℃)		0.468	0.339	0.345	0.435	0.310
热导率/($\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)		0.17	0.18	0.53	0.97	0.60
熔点/℃		1830	1520	1238	1467	973
抗热冲击比较		GaP > Ge > GaAs > ZnS				
抗雨水冲蚀比较		GaP > GaAs \approx ZnS \approx Ge				

抗高速雨水、冰雪和风沙的侵蚀,同样 GaAs 和 GaP 虽然硬度高,但断裂韧性也比较低,在 200℃ 以上均出现失透现象,且制备工艺复杂,成本高。

ZnS 在 0.6~14 μm 的波长范围内都具有透光性能,尤其在 8~10 μm 波段透光性更好.虽然它的红外吸收率比 ZnSe 高,但由于折射率温度系数低、硬度高、机械强度高,抗腐蚀性,抗热冲击性能良好等性能优势和较低的价格,人们更愿意使用.目前 ZnS 已成为 8~12 μm 波段红外系统中最常用的窗口材料之一,可用于制备大功率红外激光器窗口、高速飞行器红外窗口和整流罩以及红外吊舱等机载光电设备红外窗口。

ZnS 有两种主要的制备方法,热压法(HP)与化学气相沉积法(CVD),由于制备工艺的不同,这两种方法制备的 ZnS 在各种特性上体现出了一定的差别,见表 2^[5-6]。

从表 2 中可以看出:CVD ZnS 的光学性能和抗

表2 两种制备方法的 ZnS 材料性能比较

性能	热压 ZnS	CVD ZnS
熔点	1830	1830
透过率波段/ μm	1~13	0.6~13
硬度/($\text{Kg} \cdot \text{mm}^{-2}$)	350	250
断裂模量/MPa	97.2	103.4
热导率/($\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.155	0.17
膨胀系数/(10^{-6}K^{-1})	7.5(25~500℃)	7.85(25~500℃)
断裂韧性/($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	0.59	0.8
弯曲强度/MPa	44.8	65.1
杨氏模量/Gpa	73.8	74.5
热冲击品质因子, $R/(\text{W}/\text{m}^{1/2}) \times 10^3$	0.015	0.0245

热冲击能力都优于热压 ZnS,但硬度稍差,热压 ZnS 的硬度较高,光学性能、机械性能良好,价格比 CVD ZnS 低.可见两种方法制备的 ZnS 各有优缺点,具体可根据载机的速度、高度及受力情况来选取。

2 红外窗口镀膜

目前的窗口材料,没有一种是自身就能满足红外窗口性能要求的,且暴露在外的窗口表面会受到外界自然环境的损伤,使原有的透光性能下降.为了提高窗口的透过率,保持红外窗口性能,必须对窗口进行镀膜处理。

目前在各种材料上镀红外增透膜的技术国内已经发展成熟,ZnS 材料在 8~12 μm 波段的平均红外透过率能达到 0.70,镀增透膜后其平均透过率能达到 0.85 以上,峰值透过率能达到 0.95 以上.而在 ZnS 等材料上镀红外保护膜可选择范围就小很多。

磷化硼是一种新型的保护膜材料,它的折射率较高,约为 3.0,光吸收较低,在 0.8~12 μm 波段内具有好的透光性,与各种基底材料的附着性好,硬度高.在 ZnS 基底上镀 BP 膜后,仅在 12.5 μm 附近有弱的吸收峰,在 8~12 μm 波段内作为保护膜可以起到很好的保护效果,而且对窗口的透光性影响很小.然而由于 BP 膜的研究很多都涉及军事用途,所以具体的膜系结构尚未公开,其工艺及性能研究在我国也才刚刚起步,因此目前还不具备使用条件,是一种有待研究的潜在高效耐磨涂层^[7]。

类金刚石碳膜(Diamond-Like Carbon, DLC)在红外区域从 2 μm 直到 50 μm 以上有极好的透明

性、硬度高、化学性能稳定、不怕酸碱及有机液侵蚀、防潮、且与衬底有良好的粘附性能^[8],因此成为红外窗口的硬质抗冲击涂层材料的最佳选择.但是由于 DLC 膜与 ZnS 的性质相差甚远,以 ZnS 为基底镀 DCL 膜的附着性较差,1978 年由 Honpkins 等人提出的光学焊接^[9]法,成功解决了以上难题,但是,对高精度红外光学窗口来说,在焊接温度下类金刚石和衬底材料的热失配对窗口完整性有很大的影响.热应变可导致窗口的明显弯曲,从而改变光学性质甚至引起界面处破裂.另外还有一种方法,预先在基底材料上沉积一层与基底和 DCL 膜均具有良好的热膨胀系数匹配关系和附着性的中间过渡层,通过过渡层来增强类金刚石膜的附着性.目前国内对这种过渡层的研究已经略见成效.除此之外通过溅射法在 ZnS 上镀类金刚石膜也正在研究中.

3 红外窗口厚度

窗口材料的厚度对红外透过率是有影响的,通常透过率随厚度增加而减小.所以,为了提高透过率,可以尽量减小窗口的厚度,可是如果窗口太薄,其机械强度又达不到使用要求,可能会在使用过程中变形甚至断裂,因此窗口材料的厚度的选取应适中.

窗口的厚度主要取决于:基底材料的性质,例如弹性模量、挠度、断裂韧性等;周围环境的影响,例如空气动力载荷、加速度、振动、温度等;光谱/光学性能需求^[10].根据强度公式,矩形窗口的极限厚度为

$$d = 0.75 \left[\frac{(S_F)L^2 \cdot l^2}{L^2 + l^2} \right]^{1/2} \left[\frac{\Delta P}{\delta_f} \right]^{1/2} \quad (1)$$

圆形窗口的极限厚度为

$$d = \frac{D}{2} \times \sqrt{\frac{KS_F \Delta P}{\delta_f}} \quad (2)$$

其中: L 为矩形窗口的长; l 为矩形窗口的宽; D 为圆形窗口的直径; δ_f 为材料允许强度; K 为与板固定方式的系数; S_F 为安全系数, ΔP 为窗口所受压强.在式(1)和(2)中: L 、 l 、 D 、 δ_f 、 K 和 S_F 这几项参量主要由基底材料的尺寸和特性以及与结构件的固定方式所决定,因此当光学系统、基底材料和固定方式确定后,这几项参量的值也就确定. ΔP 是由窗口所受的压力和受力面积所决定的,而窗口所受压力又与飞行器的飞行速度和空气密度有关.假设空气分子与窗口为完全弹性碰撞情况,窗口所受压力按单位时间内空气分子撞击到窗口的力计算,根据动量守恒有

$$Ft = 2mv \quad (3)$$

m 为单位时间内撞击窗口的空气质量; v 为载机飞行速度

$$m = \rho V$$

ρ 为空气密度; V 为单位时间内撞击到窗口的空气体积

$$V = Stv$$

S 为撞击到窗口上的空气的截面积

将以上关系式代入(3)有

$$F = \frac{2Stv^2}{t} \rho = 2Sv^2 \rho \quad (4)$$

窗口所受压力确定,则根据窗口的尺寸和实际使用状态可确定 ΔP .

将以上各个确定的参量代入式(1)和(2)进行窗口极限厚度的估算,根据实际情况综合考虑窗口使用的可靠性,进一步确定窗口的厚度.

4 测试分析

对不同厚度的 ZnS 样品进行了透过率的测试,其透过率曲线见图 2.

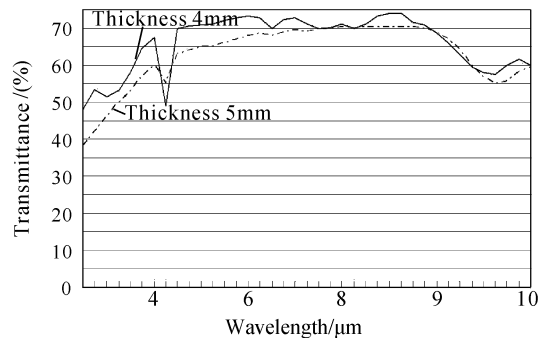


图2 不同厚度的 ZnS 窗口透过率曲线比较
Fig.2 Compared the transmittance of ZnS window between different thickness

从图 2 中可以看出,样品的透过率随厚度的增加而减小,为了提高透过率,可以减小样品的厚度,但如果样品太薄,其机械强度又差,所以厚度应适中.

另外还对厚度为 5 mm 的 ZnS 样片在镀膜前后进行了透过率测试比较,如图 3.其中 1 为镀膜前样片的透过率曲线,2 为镀膜后样片的透过率曲线.从图 3 可以看到镀膜前 ZnS 的透过率最高为 0.71,镀

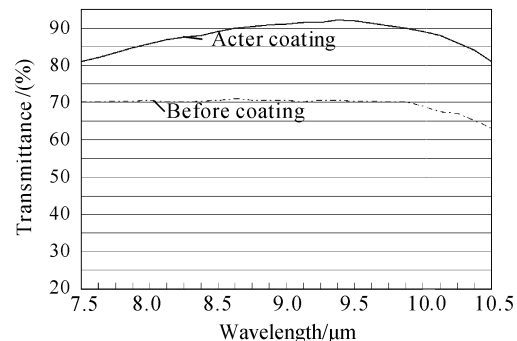


图3 镀膜前后 ZnS 窗口透过率曲线比较
Fig.3 Compared the transmittance of ZnS window between coating and without coat

增透膜后透过率最高达到 0.91,可见镀增透膜后样片的透过率有了显著的提高.

5 结论

综上所述,作为红外成像系统中内外环境的分界面,窗口是保障传感器正常工作的关键部件之一,它的性能好坏直接影响到机载光电设备的使用性能.因此,应当根据系统的战术指标要求和传感器的性能要求,合理选择窗口材料和涂覆膜层,以期得到可靠、适用的高性能红外窗口.

参考文献

- [1] YU Huai-zhi, ZHENG Yue-hua, LIU Jian-ping, *et al.* Infrared transmitting material ZnS [J]. *Laser & Infrared*, 1997, **27**(6):366-370
余怀之,郑岳华,刘建平,等.红外透射材料 ZnS[J].激光与红外,1997, **27**(6):366-370
- [2] ZHANG Zhi-yong, WANG Xue-wen, ZHAO Wu, *et al.* Growth of diamond films for field emission cold cathode in hot filament CVD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(4):450-453
张志勇,王雪文,赵武,等.用热丝 CVD 技术制备场发射冷阴极金刚石薄膜 [J].光子学报,2002, **31**(4):450-453
- [3] CERQUA-RICHARDSON K A, SCHMIDT S. Development of a comprehensive infrared material database for the opticon fabrication system [C]. *SPIE*, 1993, **2018**:13-20
- [4] JI Shi-hua. Technique and development relating to military opto-electronic equipment IR window [J]. *Journal of Applied Optics*, 1996, **17**(2):8-14
纪士华.军用光电设备红外窗口技术及发展[J].应用光学,1996, **17**(2):8-14
- [5] SAVAGE J A. Infrared optical materials and their antireflection coatings[M]. *Adam Hilger Ltd*, 1985:73-79
- [6] GERALD W D. Development and operating experience on a zinc-sulfide window for the infrared instrumentation system (IRIS)[C]. *SPIE*, 1989, **1112**:359-367
- [7] MONACHAN B C. Ultra-hard coatings for I. R materials[C]. *SPIE*, 1989, **1112**:129-143
- [8] YAO He-bao, HE Qing-li, XU Rong, *et al.* Infrared transmission characterization of diamond like carbon films on KCl lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(9):1132-1134
姚合宝,贺庆丽,徐蓉,等. KCl 透镜上的类金刚石碳膜红外透射特性研究[J].光子学报,2002, **31**(9):1132-1134
- [9] ZHANG Ji-hua, SUN Yi-ning, LI Jing-qi, *et al.* Prediction of thermal strain in diamond-zinc sulfide composite infrared windows[J]. *Journal of Functional Materials And Devices*, 2002, **18**(4):378-382
张继华,孙亦宁,李敬起,等.金刚石-硫化锌复合窗口的弹性应变研究[J].功能材料及器件学报,2002, **18**(4):378-382
- [10] HARTMANN Rudolf. Airborne FLIR optical window examples [C]. *SPIE*, 1992, **1760**:86-96

Study of 8~12 μm Infrared Region Optical Window for Airborne Photoelectric Equipment

ZHAO Li-juan, JI Shu-peng

(China Airborne Missile Academy, Luoyang, Henan 471009, China)

Received date:2007-01-12

Abstract: The property requirements of infrared window for the airborne photoelectric equipment has been explained and the properties of the material for 8~12 μm infrared region have been compared. The superiorities of ZnS as a material long wave infrared window were described, and ZnS optics, mechanics and hot function of two kinds of different crafts are analyzed and compared. The choice of window material coating on the ZnS has been analysed, and the method of ascertaining the thickness of infrared window has been introduced. The transmittance of ZnS has been compared between different thickness and coating or not.

Key words: Airborne photoelectric equipment; Infrared window; ZnS; DLC film.



ZHAO Li-juan was born in Hubei Province in 1980. She graduated from Wuhan University with her B. S. degree in 2002. Now she is working in China Airborne Missile Academy. Her major research fields include infrared optics and optical design.