

CVD 金刚石膜与常用红外光学材料抗砂蚀性能对比研究

段萌^{1,2}, 张运强^{1,2}, 潘国庆^{1,2}, 朱瑞华³, 魏俊俊³, 陈良贤³, 李成明³

(1.中国空空导弹研究院,河南 洛阳 471009;2.航空制导武器航空科技重点实验室,河南 洛阳 471009;
3.北京科技大学 新材料技术研究院,北京 100083)

摘要: **目的** 通过分析 CVD 金刚石膜与几种常用红外光学窗口材料在砂蚀过程中形貌特征以及红外透过率的变化规律,获得 CVD 金刚石膜在砂蚀过程中的材料去除机制及抗砂蚀性能的关键因素。**方法** 采用喷射式冲蚀磨损系统,对 CVD 金刚石膜及其他几种常见红外光学材料进行砂蚀性能测试。通过扫描电子显微镜对材料冲蚀后表面形貌进行观察,电子天平测量红外材料砂蚀率。采用红外光谱仪对砂蚀前后红外光学材料进行测量,评价其冲蚀前后的红外性能变化。**结果** CVD 金刚石膜抗砂蚀能力远高于 Ge、ZnS、MgF₂ 以及石英玻璃。在设定测试条件下,仅经过 6 s 冲蚀,除 CVD 金刚石膜外,其余光学材料的红外透过性能下降 40%~60%。而 CVD 金刚石经受 240 min 的相同条件冲蚀,其红外透过率仅下降 9.5%,显示出极佳的抗砂蚀能力。**结论** CVD 金刚石膜的冲蚀过程主要是微裂纹形成及扩张连接导致材料流失。其他材料的冲蚀过程既有裂纹扩展,也有反复的切削、犁削,而后者是这些材料被冲蚀的主要原因。

关键词: CVD 金刚石膜; 红外窗口; 砂蚀; 冲蚀机制

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0270-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.043

Comparison of Sand Erosion Resistance of CVD Diamond Film and Common Infrared Optical Materials

DUAN Meng^{1,2}, ZHANG Yun-qiang^{1,2}, PAN Guo-qing^{1,2}, ZHU Rui-hua³, WEI Jun-jun³,
CHEN Liang-xian³, LI Cheng-ming³

(1.China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China; 2.Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang 471009, China;

3.Institute of Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to key factors affecting material removal mechanism and erosion resistance of CVD diamond film during sand erosion by analyzing morphology features and sand erosion resistance of CVD diamond film and several common infrared window materials during sand erosion. Jet-type erosion wear system was used to test erosion resistance of CVD di-

收稿日期: 2017-02-22; 修订日期: 2017-04-12

Received: 2017-02-22; Revised: 2017-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51272024)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51272024)

作者简介: 段萌 (1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为光电与红外材料。

Biography: DUAN Meng (1979—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: direction of optical and infrared material.

通讯作者: 李成明 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为薄膜科学与技术。

Corresponding author: LI Cheng-ming (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: direction of films science and technology.

among film and other common infrared optical materials. Morphology of materials after erosion was observed with SEM, sand erosion rate of infrared materials was measured with electronic balance. The infrared optical materials before and after sand erosion were measured with infrared spectrometer, and infrared performance variation before and after erosion was evaluated. The sand erosion resistance of CVD diamond film was much higher than that of Ge, ZnS, MgF_2 and quartz glass. Only after 6 seconds of sand erosion test under set measurement conditions, infrared transmittance of Ge, ZnS, MgF_2 and quartz glass decreased by 40%~46% except for CVD diamond film. While the transmittance of CVD diamond decreased by merely 9.5% even though CVD diamond has been eroded for 240 min under the same condition, and thereby exhibiting superior sand erosion resistance. Main cause of CVD diamond film erosion is microcrack formation and material loss led by expanded connection. The main cause of material erosion is repeated cutting and ploughing, for other materials, crack formation as well as cutting and ploughing.

KEY WORDS: CVD diamond film; infrared window; sand erosion; erosion mechanism

红外制导技术因其制导精度高、抗干扰能力强、隐蔽性好、效费比高、结构紧凑、机动灵活等优点,已成为现代高性能导弹的首选制导模式^[1-3]。整流罩作为红外制导引头的关键部件,是决定红外制导能力及服役周期的关键部件^[4]。根据战场环境要求,红外整流罩材料需具备以下几点特征:(1)良好的红外透过性能,使追踪目标信号能够保真穿过窗口材料进入探测器;(2)机械强度高,在高速环境下能抵抗气动加压;(3)热辐射率低,窗口被气动加热后自身热辐射信号对红外探测器的干扰小;(4)具有优良的抗砂蚀及雨蚀能力,在极端环境(如沙漠、风暴、雨雪)下能承受持续的冲击,综合性能不发生明显衰减。

对于常见的红外光学材料,考核其红外透过性能、机械强度以及热辐射性能相对比较容易,采用成熟的测试仪器基本上可直接给出对应性能的绝对值。但是,对于抗砂蚀能力(雨蚀基本类似,但也具有自身特征,本研究中不涉及)的考核,则相对比较复杂,影响因素繁多,如冲击粒子的类型、速度、形状、密度、角度等,很难形成一个标准的评价体系。因此,对于红外光学材料的抗砂蚀能力的评价,多以材料的硬度来表示^[5]。这对于评价光学材料的抗砂蚀能力,显然比较片面,实际测试过程中也已发现,两者虽然有关联,但是却不能简单等同。

CVD 金刚石具有宽的透射波段,且具有最高的硬度、极高的强度、最高的热导率和最高的抗热冲击能力,是最理想的长波红外材料^[6-8]。此外,CVD 金刚石膜还具有极其优异的抗砂蚀雨蚀能力,这对于战术导弹高速甚至超高速飞行至关重要。因为红外整流罩材料直接暴露于空气中,易受沙粒、碎石子等固体材料的冲击,使光学表面出现损伤,严重的损伤会使红外透过率急速下降,影响红外系统的正常工作,因此对于整流罩材料的抗砂蚀性能的研究非常重要^[9]。本研究中,将采用横向对比的方式,将 CVD 金刚石膜与其他常用红外光学材料(Ge、CVD ZnS、热压

MgF_2 、石英)的抗砂蚀性能进行对比,一方面获得了多种光学材料抗砂蚀性能的数据,同时也将揭示 CVD 金刚石膜优异的抗砂蚀能力的机制。

1 试验

对比试验选用的 CVD 金刚石膜采用直流喷射等离子体 CVD(DC Arc Plasma Jet CVD)系统制备。选用石墨镀钛过渡层作为衬底材料,沉积前,衬底经金刚石粉研磨,然后用酒精+丙酮清洗。沉积气氛为 $\text{Ar}+\text{H}_2+\text{CH}_4$,其中 Ar 流量为 6 L/min, H_2 流量为 3 L/min, CH_4 流量为 120 mL/min。沉积温度为 900 °C,工作气压为 3.5 kPa,沉积时间为 200 h。沉积结束后去除石墨衬底,获得自支撑金刚石膜,随后进行切割抛光,获得尺寸为 20 mm×20 mm×1 mm、表面粗糙度 $R_a=5$ nm 的光学级 CVD 金刚石膜。

其余红外光学材料 Ge、CVD ZnS、热压 MgF_2 、石英玻璃均从市场购得,厚度均为 1 mm,双面光学级抛光,以满足红外波段透过性能的检测。抛光后的 CVD 金刚石膜及其他红外材料的初始红外透过率如图 1 所示。用于测试的金刚石膜的品质一般,但仍具有宽谱透过特性,波长为 3~5 μm 时有本征吸收,波长为 8~12 μm 时的透过率达到 50%(理论光学级 CVD 金刚石膜在波长 8~12 μm 时的透过率为 71%^[6]),其余光学材料的红外透过性能与理论值比较接近,具备较高的光学质量。

砂蚀性能测试采用北京科技大学自行设计的喷射式冲蚀磨损实验装置。该装置主要由两部分组成:气体产生系统以及气体冲蚀系统。试验过程中,通过高效空气压缩系统将空气压缩后储存于储气罐中,然后通过压缩空气携带砂粒形成气-固两相流体,高速喷射于样品表面,从而实现红外光学材料抗砂蚀性能的仿真测试。通过选择不同的喷嘴尺寸、粉料类型和尺寸以及控制压缩气体供给,可实现不同喷速及砂

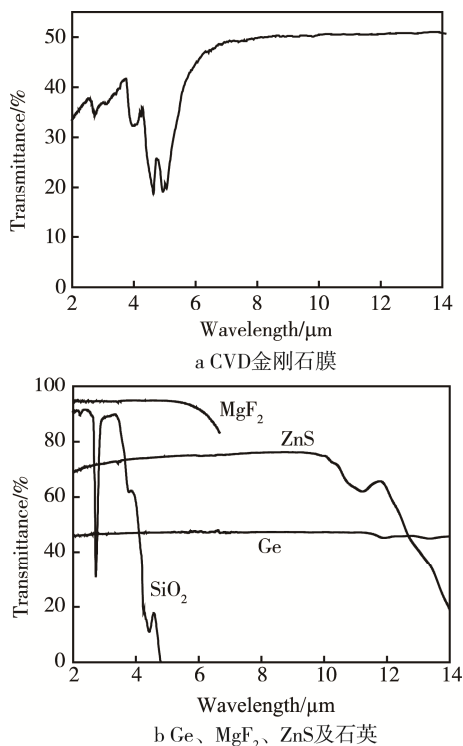


图1 不同光学材料红外透过率对比

Fig.1 Infrared transmittance of various materials: (a) CVD diamond film; (b) Ge, MgF_2 , ZnS and Quartz

型的选择。本研究中,主要对比几种红外光学材料的抗砂蚀能力,因此选择固定的喷速及砂粒,对于喷速及砂型对冲蚀效果的影响在此不做分析。砂料选用 Al_2O_3 粉,粒度为 180 目,出口喷速为 134 m/s (砂料喷速测定采用双速双盘测速法,测量精度 $\pm 5\%$ ^[10]),冲蚀角度为 90° ,喷射砂粒入射角度垂直于样品表面。

形貌观察采用扫描电子显微镜 (CAMBRIDGE, S-360) 进行。采用电子天平测量红外材料的砂蚀率 (mg/g)。采用红外光谱仪 (BRORAD-60V) 对砂蚀前后红外光学材料进行测量,评价冲蚀前后红外性能的变化。

2 结果与讨论

2.1 红外材料砂蚀率

冲蚀磨损过程中,在被冲蚀材料硬度一定的情况下,磨料硬度对脆性材料的冲蚀效果起决定性作用^[11]。通常磨料的硬度越接近靶材的硬度或超过靶材的硬度,即磨料的硬度越大,则该磨料对靶材的冲蚀磨损率越大。 Al_2O_3 材料的努氏硬度约为 2000 kg/mm^2 ^[12],低于 CVD 金刚石膜的硬度,而高于其他 4 种光学材料。CVD 自支撑金刚石膜和红外光学材料冲蚀磨损率的对比结果见图 2 所示。鉴于 CVD 金刚石膜极高的耐砂蚀能力,短时间的冲蚀根本无法对金刚石造成失重,因此图 2 中 CVD 金刚石膜的冲蚀时间为 4 h,

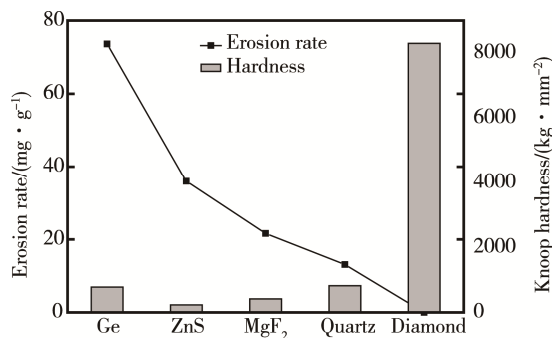


图2 CVD 金刚石膜与常用红外光学材料冲蚀磨损率及努氏硬度比较

Fig.2 Comparison of erosion rate and Knoop hardness between various infrared materials

而其他 4 种光学材料的冲蚀时间仅为 6 s。

选用的冲蚀时间差异如此大主要是因为测试过程中, CVD 金刚石膜表面几乎不发生变化,即使经过 4 h 持续不断的冲蚀,其表面仅有极其细微的变化(冲蚀率为 0.0012 mg/g)。Ge 的冲蚀率最高,为 73.6 mg/g ; CVD ZnS 次之,冲蚀率为 35.9 mg/g ; 热压 MgF_2 的冲蚀率为 21.6 mg/g ; 石英玻璃的冲蚀率为 13.1 mg/g 。显而易见, CVD 金刚石膜具有远远高于其他红外光学材料的抗冲蚀磨损能力。考虑冲蚀时间时,两者的冲蚀磨损率相差 6~7 个数量级。

此外,通过对光学材料硬度值的对比发现,不同光学材料的冲蚀率与自身硬度值并不是简单的对应关系。如 Ge 的硬度 (780 kg/mm^2)^[13] 约为 ZnS 的 (230 kg/mm^2)^[14] 3 倍,但是其冲蚀率却是 ZnS 的 2 倍多。可见,硬度值并不是决定光学材料抗砂蚀性能的唯一参数。后续研究发现,砂蚀性能可能还与材料的断裂强度及韧性等参数有关,即抗砂蚀能力与材料本身在砂粒冲击过程中抵抗裂纹扩展的能力有关。

2.2 砂蚀对表面形貌的影响

光学材料在进行冲蚀实验前,均进行过精密抛光加工,表面均具有光学级质量,粗糙度仅为几纳米。因此即使在扫描电子显微镜下也很难观察到明显的表面特征。但是,冲蚀试验后,由于冲蚀区域出现明显的材料流失,使表面出现明显的冲蚀特征。冲蚀 6 s 后, Ge、ZnS、 MgF_2 及石英玻璃的冲蚀区域的显微形貌如图 3 所示。

由图 3 可知, Ge 晶体冲蚀磨损表面的一定区域内存在尺寸细小的磨损损伤,但是,在大部分区域内是裂纹扩展后形成的解理表面,而且它们都与试样表面基本保持平行,锗为单晶材料,说明裂纹扩展倾向于沿相同的晶面进行。ZnS 材料的磨损表面具有明显的塑性材料的冲蚀磨损形貌特征,主要由细小、不规则的磨损表面形貌构成,几乎看不到裂纹扩展后的特征。ZnS 的硬度值很低是这一现象形成的原因之一,

因为与磨料硬度相差很大,磨料颗粒在 ZnS 表面的冲蚀作用区域内易于造成塑性形变^[15]。MgF₂ 材料的冲蚀磨损表面虽然仍然显露部分裂纹扩展后的形貌,但是大部分表面是点蚀、切削和犁削的痕迹。石英玻璃的冲蚀磨损表面显露的各个断裂面均十分平滑规则,而且具有较大的尺度,这可能是由于石英玻璃具有低断裂韧性,而且为非晶态材料,造成裂纹的扩展容易进行,同时不受晶面取向和晶面能量的限制。

通过观察冲蚀磨损表面显微形貌,可以确定上述

几种红外光学材料的冲蚀磨损机理包括两方面,即裂纹扩展和反复的切削、犁削。但是,对于不同的材料,以及在不同的实验条件下,不同的冲蚀磨损机理发挥主要作用。

CVD 金刚石膜由于其极佳的抗砂蚀能力,因此在极短的时间内(6 s),表面几乎不发生变化。为了观察 CVD 金刚石膜冲蚀过程中形貌的变化规律,将不同阶段 CVD 金刚石膜冲蚀后的形貌进行对比,如图 4 所示。对于 CVD 自支撑金刚石薄膜,其表面十

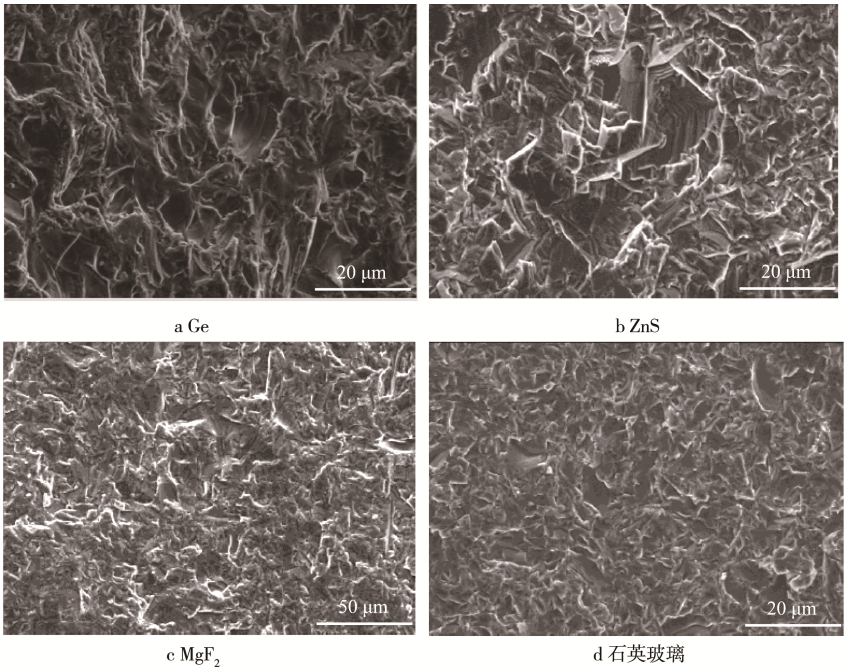


图 3 不同红外材料冲蚀测试后冲蚀中心区域显微形貌照片

Fig.3 SEM micrograph of the center area of various infrared materials after 6s erosion test: (a) Ge; (b) ZnS;(c) MgF₂;(d) Quartz

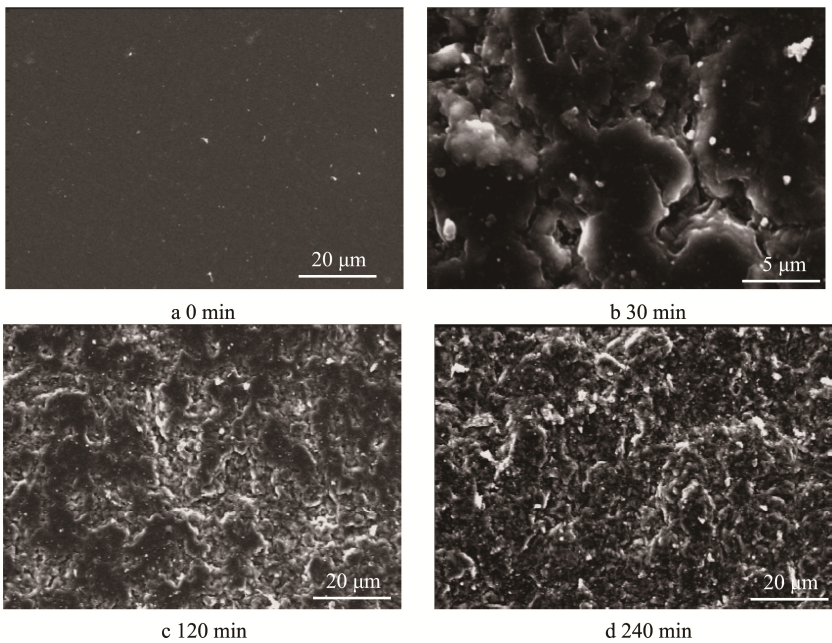


图 4 CVD 金刚石膜表面随冲蚀时间变化的局部形貌

Fig.4 SEM micrograph of the center area of diamond film with different erosion time

分光滑平整(见图4a), 冲蚀30 min后, 金刚石膜表面的冲蚀区域出现轻微“磨砂”特征, 表面出现了材料流失(图4b)。出现冲蚀磨损带来的材料流失首先发生在金刚石膜的晶界处, 随着冲蚀时间的增加(120 min), 晶界附近的冲蚀磨损区域增加, 各个冲蚀区域逐渐连接贯通(图4c), 当其边缘区域有裂纹产生并与边界贯通时, 发生材料流失的机会大大增加。继续延长冲蚀时间(240 min), 冲蚀磨损造成的材料流失在整个冲蚀区域内发生, 如图4d所示。此时显示出稳定的冲蚀磨损率, 冲蚀磨损进入稳定冲蚀阶段。

2.3 砂蚀对红外透过的影响

红外光学窗口材料最关键的性能指标是红外透过性能。经过砂蚀冲击后, 原有表面光学加工状态发生改变, 材料的光学性能将出现衰减。因此, 光学材料的抗砂蚀性能显著影响材料的红外光学性能。图5为CVD金刚石膜及其他红外光学材料经历不同冲蚀试验后, 其红外透过性能的变化规律。由于各种光学材料所适用的波段有差异, 因此在对其红外透过性能变化进行对比研究时, 选取该材料透过率较高的波长进行统计。

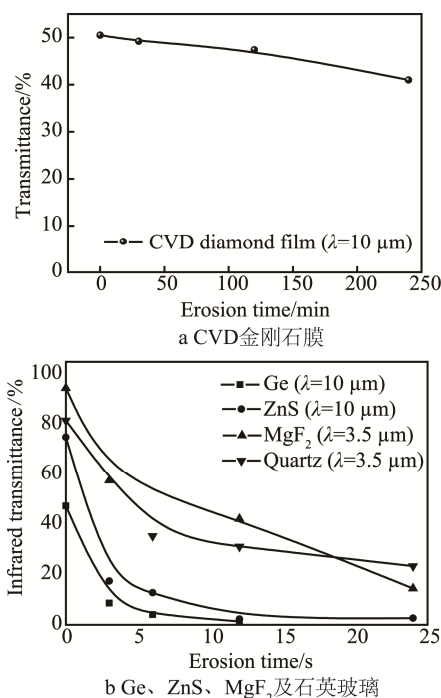


图5 光学材料红外透过率随冲蚀时间的变化
Fig.5 Infrared transmittance of various materials with different erosion test time:

由图5a可以看出, CVD金刚石膜在冲蚀磨损作用下, 红外透过率的损失十分缓慢, 30 min后, 红外透过率只降低1.3%, 240 min后, 红外透过率只下降9.5%。而对于其他红外光学材料, 在短短的6 s冲蚀磨损作用后, 红外透过率已发生了十分明显的降低(如图5b), Ge、ZnS、MgF₂和石英玻璃的红外透

率分别降低43%、62%、40%、46%, 而且在随后的冲蚀磨损过程中, 红外光学材料的红外透过率仍然会进一步发生不同程度的降低。

对于弹载红外光学系统的窗口(或)头罩, 即使是20%的红外透过损失率也是无法接受的^[16]。对于本研究涉及的几种重要红外光学材料, 冲蚀6 s后的红外透过率损失远远超过20%, 冲蚀12 s后几乎全部失透。而CVD金刚石膜在经过30 min的冲蚀后, 红外透过损失率不到3%, 即使在长达240 min的冲蚀后, 红外透过损失率仅为9.5%。由此可见, 短时间的粒子冲蚀根本不可能给CVD金刚石膜窗口(头罩)造成任何可觉察的损伤, 但是对于其他光学窗口材料, 砂蚀造成的损伤可能是致命的。因此, 依据抗砂蚀能力可以判断, CVD金刚石膜具有最优的抵抗固体颗粒冲蚀的能力, 是制作在高速固体颗粒冲蚀磨损环境中使用的红外光学窗口的最理想材料。

2.4 红外材料砂蚀机制探讨

CVD金刚石膜之所以具有极佳的抗砂蚀能力, 除基于其自然界最高的硬度外, 也与其内在的砂蚀机制区别于其他红外材料有关^[17]。CVD金刚石膜表面晶粒相互结合十分致密, 因固体颗粒冲击作用产生的裂纹, 即使发生扩展与晶界连通, 由于各个晶粒之间的结合作用, 材料流失也不会立刻发生^[18]。只有当晶界附近冲蚀磨损区域的增加, 以及各个区域逐渐连接贯通后, 材料才开始流失^[19], 主要特征是裂纹的萌生及缓慢扩展、连接。由于CVD金刚石膜具有极高的硬度、断裂强度及韧性, 该裂纹扩展的趋势非常缓慢, 从而使CVD金刚石膜的冲蚀磨损率极低^[20-21]。

而其他几种光学材料, 由于本身硬度及断裂韧性普遍较低, 在冲蚀过程中, 除由于冲蚀造成局部裂纹萌生、扩展以及贯通导致材料流失外, 更多的冲蚀来自砂粒对材料表面形成的反复切削、犁削作用。此外, 由于被测材料较低的硬度, 高速冲击过程中也容易在红外材料表面形成局部塑性变形区, 在塑性变形区与弹性变形区的交界处形成应力集中, 从而加速试样的材料流失^[22]。

当然, 窗口的实际服役环境可能与本研究所使用的测试条件具有很大区别, 其冲蚀磨损机制也会有所不同。但总体上, 低硬度、低韧性是导致红外材料易于被冲蚀的主要原因。而CVD金刚石膜在这两方面均远优于其他红外光学材料, 加之其良好的宽光谱透过特性, 最高的热导率以及化学稳定性, 使其成为最佳的光学窗口材料。

3 结论

通过采用自主研发的喷射式冲蚀磨损系统, 对自

制 CVD 金刚石膜及其他常见红外材料的抗砂蚀性能进行了对比研究。结果表明,在相同的喷射环境下,短时间内,Ge、ZnS、MgF₂ 以及石英玻璃等材料的砂蚀率远高于 CVD 金刚石膜,12 s 后,这些材料的红外透过率几乎完全丧失,而 CVD 金刚石膜几乎不发生任何变化,即使经历 240 min 的持续冲蚀,其红外透过率仅下降 9.5%,可见 CVD 金刚石膜表现出极佳的抗砂蚀性能。这种优异的抗砂蚀性能主要得益于 CVD 金刚石膜的高硬度及韧性,使冲蚀主要发生在表面的裂纹萌生及扩张,而这种趋势非常缓慢。其他红外材料的砂蚀主要来自砂粒对材料表面快速的反复切削、犁削,从而导致材料急速流失。

参考文献:

- [1] 钱昂,何友金,刘亮. 反舰导弹中波与长波红外成像制导优势对比研究[J]. 红外技术, 2014, 8(8): 671—675.
QIAN Ang, HE You-jin, LIU Liang. A Comparative Study of the Advantage of Infrared Imaging Guidance Anti-ship Missiles Based on Medium Wave and Long-wave[J]. Infrared Technology, 2014, 8(8): 671—675.
- [2] 杨俊彦,吴建东,宋敏敏. 红外成像制导技术发展展望[J]. 红外, 2016, 37(8): 1—5.
YANG Jun-yan, WU Jian-dong, SONG Min-min. Development and Prospect of Infrared Imaging Guidance Technology[J]. Infrared, 2016, 37(8): 1—5.
- [3] 李玉民,李瑾. 红外光学材料及整流罩技术的新发展[J]. 红外与激光技术, 1995, 24(5): 1—6.
LI Yu-min, LI Jin. Development of IR Optical Materials and Dome Technology[J]. Infrared and Laser Technology, 1995, 24(5): 1—6.
- [4] 段萌,张运强,潘国庆. 超声速长波红外整流罩材料研究进展[J]. 人工晶体学报, 2016, 45(12): 2882—2889.
DUAN Meng, ZHANG Yun-qiang, PAN Guo-qing. Research Progress of Supersonic LWIR Dome Materials[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2016, 45(12): 2882—2889.
- [5] 余怀之. 红外光学材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
YU Hui-zhi. Infrared Optical Materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [6] 吕反修. 金刚石膜制备及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
LV Fan-xiu. Preparation and Application of Diamond Films[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [7] 王猛,李成明,朱瑞华,等. 立方 Y₂O₃ 薄膜结构、力学及光学性能的研究[J]. 人工晶体学报, 2014(1): 25—30.
WANG Meng, LI Cheng-ming, ZHU Rui-hua, et al. Study on Structure, Mechanical and Optical Properties of Cubic Y₂O₃ Thin Films[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014(1): 25—30.
- [8] HUA Chen-yi, GUO Jian-chao, YAN Xiong-bo, et al. Characterization and Thermal Shock Behavior of Y₂O₃ Films Deposited on Freestanding CVD Diamond Substrates[J]. Applied Surface Science, 2016, 376: 145—150.
- [9] ZHU Rui-hua, LI Cheng-ming, CHEN Liang-xian, et al. Erosion Difference of Growth and Nucleation Sides of Free-standing Diamond Films Prepared by DC Arc Plasma Jet CVD[J]. Applied Surface Science, 2015, 355: 203—208.
- [10] 林福严,曲敬信,陈华辉. 磨损理论与抗磨技术[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
LIN Fu-yan, QU Jing-xin, CHEN Hua-hui. Wear Theory and Antiwear Technology[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [11] 杜仕国,孟胜皓,闫军,等. D60 钢在模拟海岛环境中腐蚀产物的红外光谱研究[J]. 装备环境工程, 2015(1): 10—14.
DU Shi-guo, MENG Sheng-hao, YAN Jun, et al. IR Analysis of Corrosion Products on D60 Steel in Simulated Island Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015(1): 10—14.
- [12] SUTORIK A C, COOPER C, GILDE G. Visible Light Transparency for Polycrystalline Ceramics of MgO · 2Al₂O₃ and MgO · 2.5Al₂O₃ Spinel Solid Solutions[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2013, 96(12): 3704—3707.
- [13] MCCOLM I. Ceramic Hardness[M]. New York: Springer Science and Business Media, 2013.
- [14] MERDRIGNAC C O, HAKMEH N, DURAND G, et al. Manufacturing of Transparent ZnS Ceramics by Powders Sintering[J]. International Society for Optics and Photonics, 2016, 56: 982203.
- [15] 刘巾军. 铝合金在模拟海岛环境中腐蚀产物的红外光谱研究[J]. 装备环境工程, 2015(4): 124—128.
LIU Jin-jun. IR Analysis of Corrosion Products on Aluminum Alloy in Simulate Island Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015(4): 124—128.
- [16] 韩杰才,刘星,汪新智,等. 高速导弹红外窗口失效研究概述[J]. 功能材料, 2014, 45(B12): 1—8.
HAN Jie-cai, LIU Xing, WANG Xin-zhi, et al. Review of Failure Research of Infrared Windows for Hypersonic Missiles[J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45 (B12): 1—8.
- [17] DAVIES A R, FIELD J E. The Solid Particle Erosion of Free-standing CVD Diamond[J]. Wear, 2002(252): 96—102.
- [18] GAHLIN R, ALAHELISTEN A, JACOBSON S. The Particle Size Effect in Abrasion Studied by Controlled Abrasive Surfaces[J]. Wear, 1996(196): 226—233.
- [19] KIM J H, LIM D S. Erosion of Free-standing CVD Diamond Film[J]. Diamond and Related Materials, 1999(8): 865—870.
- [20] WHEELER D W, WOOD R J K. Solid Particle Erosion of CVD Diamond Coating[J]. Wear, 1999(233—235): 306—318.
- [21] TELLING R H, FIELD J E. Fracture and Erosion of CVD Diamond[J]. Diamond and Related Materials, 1999(8): 850—854.
- [22] SHELDON G L, FINNIE I. On the Ductile Behavior of Nominally Brittle Materials during Erosive Cutting[J]. Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME, 1966(88B): 387—392.