摩擦发光材料在航空航天设备破损 监测领域的研究进展及展望



肖雨欣¹,冯钰博²,王嘉禄¹,梁秋菊¹,于涛¹ 1.西北工业大学,陕西西安710129 2.西安航天动力试验技术研究所,陕西西安710100

摘 要:航空航天设备往往在极端环境(超高温、超低温、高辐射等)中应用,开展破损检测技术研究对于提高其安全性、稳定性尤为重要。摩擦发光作为一种实时破损检测技术,成为航天设备实时破损检测的重要手段。本文总结了摩擦发光材料近年来的材料设计策略,从有机材料(如N-苯基酰亚胺、三苯胺类、四苯基乙烯类、吩噻嗪类、咔唑类)及无机材料分别入手,总结其研究进展及发展趋势,并对其在破损监测领域的现有应用进行梳理归纳、分类探讨,最后对其在航空航天设备破损监测领域的前沿应用加以展望,为我国开展同类应用提供有益参考。

关键词:实时破损监测;应力监测;摩擦发光;航天材料;航天器材料

中图分类号:V259

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.10.001

由于航空航天飞行器长期在极端恶劣环境中运行,航 空航天设备的稳定性、可靠性和安全性面临严峻的考验。 除需进一步优化结构满足气动需求、工艺性要求外,其使 用过程的维护要求也至关重要。历史上曾经发生的一些 航空航天事故正是由设备的破损和故障所致的。如2003 年"哥伦比亚号"航天飞机事故便是因脱落的材料撞击到 飞机左翼前缘造成了裂缝。当航天飞机高速返回时大量 气体冲入破损处,摧毁了机翼内含的传感器,酿成了整个 航天飞机在空中解体的惨案。惨痛的历史教训表明,开展 航空航天领域的前沿技术研究,特别是破损检测技术的不 断完善,对于提高航空航天设备的安全性和稳定性至关 重要。

目前,应用于航天器材料的破损无损监测技术主要有 X射线探伤技术、超声探伤技术、荧光渗透探伤技术^[1],以及 涡流检测和脉冲雷达热波等^[2]。然而,以上的破损检测技 术仅能应用于航天设备的"发射前"或"回收后",能应用于 航天设备运行过程中的实时破损检测技术却鲜有报道。 材料裂纹的实时监测对飞行器损伤容限/疲劳试验、保证服 役过程中的安全性和可靠性等具有重要意义^[3]。理想的航 空航天设备所需的实时破损监测技术主要存在三个需求: (1)即时响应性。一旦设备发生破损,便可以立即响应。 (2)高灵敏性。对于非常微小的损伤也可以有明显响应。 (3)信号易于监测。监测设备能够实现对信号的捕捉,且 具有简易、轻便的特性。

近年来,随着材料领域日新月异的发展,摩擦发光材料 逐渐走进科学家们的视野。摩擦发光,也称力致发光,是指 一类材料在如摩擦、拉伸、挤压、碰撞等外力作用下,将外力 所赋予的机械能转化为光能并对外释放的发光现象^向。与 传统的发光材料相比,摩擦发光材料不仅具有独特的应力 激发方式,无须外加电源或光源,而且对外界应力刺激具有 明显的响应性。基于上述的两点特征,摩擦发光材料如今 在新型光源、生物成像、商标防伪、信息加密、应力传感、材 料破损监测等领域具有重要的潜在应用价值,有望成为航 天设备实时破损检测的重要手段。因此,近年来,摩擦发光 材料的研究备受关注,逐渐成为光电材料领域的研究热点 之一。本文综述了基于摩擦发光材料的应力传感技术及其 研究进展,并对其在航空航天破损监测领域的应用进行了 展望。

收稿日期: 2023-05-11;退修日期: 2023-07-27;录用日期: 2023-09-08 基金项目:航空科学基金 (2020Z073053007)

引用格式: Xiao Yuxin, Feng Yubo, Wang Jialu, et al. Research progress and prospects of triboluminescence materials in the field of aerospace equipment breakage monitoring[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(10):1-8. 肖雨欣, 冯钰博, 王嘉禄, 等. 摩擦发光材料在航空航天设备破损监测领域的研究进展及展望[J]. 航空科学技术, 2023, 34(10):1-8.

1 摩擦发光材料研究现状

摩擦发光材料按材料组成细分,主要可以分为有机摩 擦发光材料和无机摩擦发光材料两种。通常认为,有机摩 擦发光材料一般具有非中心对称结构和压电性质,然而其 发光机理尚不明确。而无机摩擦发光材料则有着发光亮 度强、响应灵敏度高等特性,但由于其主要由贵金属元素 构成,不仅价格昂贵,同时也相比有机材料的毒性较大,这 一弊端限制了它的发展。我们将这两类材料的特性总结 于表1中,以便于读者对照。有机摩擦发光材料发展至 今,因其易于通过改变官能团而改变材料自身的偶极矩, 目前主要可以分为酰亚胺类、三苯胺类、四苯乙烯类、吩噻 嗪类、咔唑类等材料。这类材料具有合成简单、成本低廉、 毒性较小、发光范围宽等优点,近年来引起了人们的高度 关注。

表1 摩擦发光材料特性总结

Table 1 Summary of triboluminescent material properties

	有机摩擦发光材料	无机摩擦发光材料
主要 分类	酰亚胺类、三苯胺类、 四苯乙烯类、吩噻嗪类、 咔唑类等	碱金属卤代盐类,稀土元素掺杂 的陶瓷材料类,过渡金属有机配合 物类等
特点	一般具有非中心对称 结构;具有压电性质;易 于通过改变官能团而改 变偶极矩;合成简单、成 本低廉、毒性较小、发光 范围宽	摩擦发光亮度强;对力刺激响应 灵敏度高;机理研究较深入,包含 压电效应诱导为主的弹性力致发 光、静电相互作用引起的塑性摩擦 发光等
不足	发光机理尚不明确	由贵金属元素构成,价格昂贵、 毒性较大

1.1 N-苯基酰亚胺类

N-苯基酰亚胺类材料因其易于合成与修饰官能团,自 2012年H. Nakayama等^[5]首次报道了具有不对称结构的酰 亚胺衍生物的摩擦发光性质后,目前已开发出一系列具有 摩擦发光性质的材料,如图1(a)所示。对这类材料进行X 射线晶体结构分析发现,由于具有非中心对称的分子排列, 它们大多具有较大的偶极矩,因此表现出强烈的压电效应, 故而有利于产生明亮的摩擦发光。另外,除通过在N-苯基 酰亚胺的主体结构中引入强吸电子基团三氟甲基(-CF₃)增 大偶极矩外,科研人员还通过在苯基上引入富含π电子的 噻吩、萘等基团,将这系列材料的摩擦发光从蓝光范畴调节 到了可见光的范畴^[4]。此外,萘基自身所富含的大量电子 及其结构所具有的刚性,使材料具有较大的偶极矩和共轭, 分子呈片层状排列,多种的分子间弱相互作用如氢键、C-H…π相互作用等共同作用增加了分子间的束缚,抑制非辐 射跃迁过程,提高其摩擦发光时的荧光量子效率。研究认 为,其之所以能够展现出摩擦发光,是因为其具有压电效 应,而这类压电晶体的裂纹表面带电,材料和周围的氮气气 体被电子放电激发后,产生了摩擦发光的现象。值得一提 的是,酰亚胺衍生物具有良好的化学和电化学稳定性,并且 即使在充分研磨后也能很好地保持摩擦发光性质。



(a) N-苯基酰亚胺衍生物结构



(b) N-苯基酰亚胺不同衍生物摩擦发光图像



Fig.1 Partial structures of N-phenylimides and their triboluminescence photos^[5-6]

1.2 三苯胺类

三苯胺体系作为同样含有氮杂原子的强给电子基团, 通常通过与另一强吸电子的基团相连接便可得到偶极矩较 大的材料,这类强吸电子基团通常包括醛基、羧基、氟原子 等。文献[7]设计并合成的苯甲醛取代的三苯胺衍生物晶 体属于非中心对称空间群,在分子本身具有较大的偶极矩 和丰富的分子间弱相互作用力来抑制非辐射跃迁过程的共 同作用下,该化合物在外力的刺激下能产生明显的绿光的 摩擦发光。该课题组后续通过在三苯胺衍生物不同的位点 上,引入不同的卤素原子,得到的扭曲结构的材料在众多分 子间弱相互作用力的作用下,展现出了明亮的摩擦发光现 象,如图2所示^[8]。其相关工作也表明,分子间堆积的紧密 程度与摩擦发光性质的有无结果并不具有直接的关联^[9]。 通过对其设计的10种含有不同卤原子且取代位置不同的 三苯胺衍生物展开研究发现,松散堆积的晶体在外界力的 刺激下相较而言晶格更容易坍塌,虽然具有强分子间相互 作用的紧密堆积的晶体可以减少非辐射弛豫导致的能量损 失,从而实现明亮的摩擦发光。但是,如果分子堆积过于紧 密,晶体由于具有强的刚性而不易破碎,反而会导致较弱的 摩擦发光。



图2 三苯胺衍生物的结构及摩擦发光性质^[8]

Fig.2 The structure of triphenylamine derivatives and their triboluminescent properties^[8]

1.3 四苯乙烯类

四苯乙烯体系为人所著称的是其所具有的聚集诱导发 光性质,具有非中心对称结构的四苯乙烯衍生物在摩擦发 光材料领域也发展众多。值得一提的是,李振课题组报道 了四甲氧基取代的四苯乙烯衍生物,该材料可以培养出有 两种空间群的晶体,故而表现出完全不同的摩擦发光性质。 非中心对称的P₂₁(c)晶群的晶体展示出明显的蓝光摩擦发 光性质,而C₂晶群的晶体则没有观察到摩擦发光。此外, P₂₁(c)晶群中众多的弱相互作用位点进一步抑制了材料的 非辐射跃迁过程,大大提升了其发光量子效率^[10]。

本文通过赋予有机摩擦发光分子可逆光致变色特性, 构建有机光开关摩擦发光材料(o-TPF),其在结晶态时被 摩擦后发出明亮的蓝色光,并表现出明显的光致变色特性 (颜色从白色到紫红色)。这项工作还实现了一种简单的限 定应力监测范围的应力传感装置,如图3所示^[11]。基于材 料可通过光照实现摩擦发光性质的"开一关"调节的特性, 在应力监测前,可通过掩模版和紫外光限定应力监测范围, 从而为光控限域应力传感提供了基础,效果图如图3(b)所 示。研究表明,o-TPF独特的光开关摩擦发光特性归因于 在光致变色过程中o-TPF和c₁-TPF之间的偶极矩的可逆 性变化,因而实现了具有高稳定性和可重复性的光开关摩 擦发光。这项工作为下一代光开关有机摩擦发光材料的设 计和构建提供了新的策略,并促进了其在高分辨率靶向应 力传感、材料损伤监测、多层信息加密等方面的应用。





1.4 吩噻嗪类

吩噻嗪作为含有富电子的氮和硫杂原子的杂环化合物,其丰富的孤对电子令n→π*跃迁更容易发生,对其发光效率特别是系间窜越速率的增强大有帮助。此外,吩噻嗪自身的蝴蝶状分子结构能在一定程度上阻碍分子间π-π堆积的形成,从而抑制非辐射跃迁。科研人员基于吩噻嗪类衍生物设计出了不少非中心对称结构的摩擦发光材料^[12-14]。

2015年,文献[12]将吩噻嗪与二苯砜连接,在外力刺激 下晶体碎裂,晶体的碎裂面积累正负电荷,电子放电激发分 子发光,受益于材料自身存在的扭曲构型电荷转移发光所 导致的固态高的荧光量子效率,该摩擦发光材料在外力刺 激下,即便是在日光的条件下也能够看到明亮的绿光。 2022年,该课题组还通过简单地改变吩噻嗪衍生物Br-BPZ 中溴原子所在二苯甲酮基团上的取代位置,实现了对摩擦 发光性质的特征从无、稳定到动态特性的调控。其中,p-Br-BPZ随研磨时间的延长而表现出明显的动态摩擦发光, 其摩擦发光颜色从蓝色逐步变为白色最终变为黄色^[14],如 图4所示。这项工作为动态摩擦发光材料的设计与调控提 供了新的见解与思路。

1.5 咔唑类

咔唑类衍生物不仅具有芳香族的大共轭电子云,还具



有氮杂原子以及其带有的孤对电子,因而常被用于设计合成有机力致发光材料。咔唑类摩擦发光材料主要有N-异丙基咔唑、N-己基咔唑、N-苯基咔唑等。

2021年,李振课题组通过调整一系列从甲基到正辛基 不同长度的烷基链,合成了一系列含羰基的咔唑衍生物。 偶数烷基链化合物表现出高效的摩擦发光,这可能与其晶 格系统中丰富的氢键相关。此外,通过将辛基酰胺咔唑 (CAC-8)作为主体材料,在其中掺进各类有机染料,成功 实现了从蓝色到红色的多色摩擦发光的调节^[15]。作者团 队发现通过将近红外发光材料 Pt(II)F₂₀TPPL 以质量分数 2.0% 掺进N-己基咔唑中,成功实现了其摩擦发光从本身 的蓝光变为肉眼不可见的近红外摩擦发光(746nm)^[16],这 种发生在主体材料和客体材料之间的能量转移而产生的 新型摩擦发光材料也是现今有机摩擦发光材料的一种发 展趋势。

1.6 无机类

无机摩擦发光现象目前仍没有公认的普适理论能够解 释整个物理过程。碱金属卤代盐^[17-18]、稀土元素掺杂的陶 瓷材料^[19-22]、过渡金属有机配合物^[23-25]等都可以产生摩擦 发光现象,其机理主要分为压电效应诱导为主的弹性力致 发光、静电相互作用引起的塑性摩擦发光等^[23]。除此之外, 据研究报道,绝大多数材料的摩擦发光强度与外加应力在 一定范围内呈线性关系,但在特殊情况下,摩擦发光这一现 象对外界应力的响应也存在非线性的情况,有待科学家们 持续探索。

2 摩擦发光材料应用现状

对于金属或复合材料航天器结构,在役条件和失效模 式通常很复杂,因而无法准确预测。正因如此,航空航天行 业通常使用保守的基于时间或基于使用的定期维护做法, 这些做法过于耗时、劳动密集且成本很高。此外,随着结构 老化,维护服务频率和成本增加,性能和可用性降低。确保 结构安全的一种可能方法是经常检查结构并了解其结构状况。使用基于条件的维护与连续的结构完整性监测相结合 方法,可以显著降低检测成本。摩擦发光因上述的灵敏性 而在破损检测方面可以得到广泛应用。目前,广泛将摩擦 发光材料,即高分子复合层或者摩擦发光材料涂层与目标 结构紧密结合,再采用适当的方式探测发光信号及分布,从 而推算出结构承受的应力。

摩擦发光材料现已可以应用于实时结构力学分析,目前的研究已可以检测股骨活动时的力学强度,未来有望应用于航空航天设备的实时结构力学分析。K. Hyodo等^[26]将 摩擦发光材料涂在合成股骨表面,制成力致发光合成股骨, 如图5所示。试验结果显示,在1.8kN垂直载荷振幅的情况 下,股骨颈部分在270ms内成像达到最大变化。该技术作 为智能筛查工具,有助于各种生物力学分析。如比较不同 设计的人工关节连接后的应力分布,阐明每个设计对骨骼 动态环境的影响。



图 5 力致发光合成股骨^[26] Fig.5 Frictional luminescent materials for real-time structural mechanics^[26]

在碰撞传感方面,R.Fontenot等^[27]开发了一种将 EuD₄TEA与聚合物相结合的碰撞传感器。这项研究表明, 通过增加基底材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的浓度,可 以显著地改变摩擦发光的强度。在高浓度下,PMMA可产 生对低速冲击完全不敏感的化合物,因此可以设计仅在给 定阈值以上被触发的传感器。EuD₄TEA与PMMA的薄层 可以发出被阳光激活的明亮红光,在正午阳光等明亮的光 线条件下可见。当前用于航天器和飞机损伤检测和监测的 技术不能提供原位和分布式传感,定期无损检测所需的停 机时间产生的相关成本可能较高,摩擦发光聚合物传感器 可能能够弥补有关技术的不足。

在裂纹传感方面,徐超男等^[28]也研究了裂纹张开和疲 劳裂纹扩展的记录系统,使用力致发光传感器成功地通过 响应位置和强度重新记录了裂纹尖端的扩展轨迹和尖端周 围的应力强度因子,图6(a)中虚线表示应用摩擦发光片式 传感器的区域。在10min的积分时间内成功地检测到了桥 梁在一般交通情况下的裂纹张开位移,如图6(b)所示。该



图6 摩擦发光系统监测桥梁梁面[28]



成果体现了力致发光传感器在可焊性、无铅性、低成本等方 面的显著优势,满足社会对基础设施上应力/损伤累计历史 检测记录的需求。此外,Y.Fujio等^[29]利用由无机摩擦发光 材料SrAl₂O₄:Eu和环氧树脂组成的力致发光传感器,开发 了一种检测高压储氢钢瓶内表面裂纹(内裂纹)的新的无损 评估技术。该团队为了观察容器内部裂纹,将片状力致发 光传感器连接到经受最大压力为45MPa的液压循环的存储 缸的外表面上。力致发光模式随着循环次数的增加而改 变,并且力致发光传感器可以可视化内部裂纹,如图7所 示。有限元法的应力分析表明,力致发光传感器提供了与 裂纹尖端应力集中相关的独特等效应变分布,具有高等效 应变的两点之间的距离与裂纹深度成反比,使用附着在外 表面上的力致发光传感器对内部裂纹的生长行为进行了无 损量化。该技术作为一种无损评估技术,可能有助于解决 航天器负载的易燃气体存储过程中的安全问题。





除此之外,在实时损伤传感方面,O. Okoli等^[30]通过对 嵌入式ITOF传感器用于黏合复合材料接头实时原位损伤 检测的有效性的研究,讨论了摩擦发光强度与胶黏剂断裂

韧性的关系。ITOF 传感器可在不产生任何错与信号的情 况下检测由于纯剪切引起的黏合接头的损坏;摩擦发光强 度随着胶结接头断裂韧性的增大而增大,传感器信号是损 伤严重程度的函数,损伤越严重,摩擦发光强度越高。该团 队现有研究成果证明,ITOF传感器用于风力涡轮机叶片黏 合接头中实时损伤传感具有可行性,有望在未来进一步应 用于航空航天设备的叶片接头实时损伤检测。徐超男等[31] 还提出了一种可扩展的弹性发光应变传感器,用于解决从 微米到米尺度的结构诊断问题。该团队的工作证明了新开 发的可扩展弹性发光应变传感器能够实现多尺度和精确的 动态应变成像,该成果在高灵敏度弹性发光传感器和动态 应力/应变成像的定量评估方面都取得了重大进展,展示了 大型基础设施上应力/应变的精确动态成像、现场断裂检查 和危险级别(应力集中)诊断,如图8所示的在城市高速公 路外的精确动态成像。图8(c)、图8(d)显示了由过往车辆 引起应变裂纹进行修复前的摩擦发光和应变图像。用研磨 机对焊接段进行研磨修复后,图8(e)、图8(f)不仅证实了修 复过程的有效性,而且验证了这种可扩展的摩擦发光传感



- 图8 高速公路节理断面现场定量应变成像及危险等级诊断的 弹性摩擦发光传感器^[31]
- Fig.8 Scalable elasticoluminescent sensor for onsite quantitative strain imaging and effective danger-level diagnosis of a highway joint section^[31]

器在应力集中定量成像和修复工作前所未有的可见定量评 估方面的有效性。这类创新的可扩展应变传感器有望开启 多尺度应变成像研究的新时代,并有助于与多领域研究相 关的精确动态应力/应变成像,有望应用在实际的航天设备 破损监测中。

综上,摩擦发光材料对应力作用及材料破损非常敏感, 即使材料裂痕微小,也会产生强烈的荧光发射。因此,该类 材料在材料探伤、设备监测、应力传感等领域具有重要的应 用前景。目前科研人员正在努力突破有机摩擦发光材料的 非晶态化设计,试图将此类材料直接涂覆于机翼、航天器及 其他精密设备表面,设备产生微小裂痕即会伴随荧光闪光 现象,从而达到实时监测的目的。我们有理由相信,在未 来,航空航天设备能够基于摩擦发光如今在结构力学等方 面的应用实现实时破损传感。

3 总结与展望

对于金属或复合材料飞机结构,在役条件和失效模式 通常很复杂,可能无法准确预测。正因如此,航空航天行业 通常使用保守的基于时间或基于使用的定期维护做法,这 些做法过于耗时、劳动密集且成本很高。此外,随着结构老 化,维护服务频率和成本增加,性能和可用性降低。确保结 构安全的一种可能方法是经常检查结构并了解其结构状 况。使用基于条件的维护与连续的结构完整性监测相结合 的方法,可以显著降低检测成本。

围绕航天器结构的形式多样性、特征复杂性、损伤多样 性和隐蔽性,从监测过程、创新的传感器设计、新的监测方 法或技术等方面探索飞机结构健康监测的发展趋势,是提 高其技术成熟度的重要途径。而传感器设计也向着小型 化、智能化、系统集成等方面发展^[32]。其中一些传感器价 格昂贵,难以部署在大型结构上,或者无法承受恶劣的环境 和长时间持续运行,而在监测大范围而非局部区域的情况 下,与准分布式传感器相比,分布式传感器可能在相对较低 的频率下具有更高的空间分辨率^[33],基于摩擦发光材料制 成的传感器具有低成本的优势,同时在分布式传感方面也 具有可行性,R.Fontenot等^[27]在美国国家航空航天局 (NASA)亚拉巴马州太空拨款联合会等机构的支持下得到 的研究成果能够为此提供佐证。本文所综述的基于摩擦发 光材料在无损探伤方面的应用也可为其未来在航天器方面 的实际应用提供思路与可能性。

总而言之,目前摩擦发光材料在航空航天设备破损监 测领域仍处于研究的起步阶段,但其有益的性能及在破损 监测方面潜在的应用前景已吸引了大量国内外科学家的广 泛关注。当前,有望在材料科学不断进步的同时,通过后续 系统研究深入分析其内在机制,实现其在多样、复杂的大范 围航空航天设备环境中用于应力传感、结构损伤检测等方 面具有高度可靠的检测能力和灵敏性的应用和拓展。

[^]AST

参考文献

- 高铁成,郭恒飞,张威,等. 航天复合材料无损检测技术的发展现状[J]. 天津工业大学学报,2017,36(1): 71-76.
 Gao Tiecheng, Guo Hengfei, Zhang Wei, et al. Development status of non-destructive testing technology for aerospace composite materials[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2017, 36(1): 71-76.(in Chinese)
- [2] 王飞,史倩竹,高明宇,等.C/GFRP层板冲击损伤红外脉冲雷达热波成像检测技术研究[J]. 航空科学技术,2023,34(2): 78-85.

Wang Fei, Shi Qianzhu, Gao Mingyu, et al. The impact damage detection of C/GFRP laminate using infrared chirppulsed radar thermography[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(2): 78-85. (in Chinese)

- [3] 安雨晴,杨宇,王莉.一种基于广义回归神经网络的裂纹扩展 定量监测模型[J].航空科学技术,2023,34(3):40-48.
 An Yuqing, Yang Yu, Wang Li. A quantitative monitoring model of structural crack propagation based on generalized regression neural network[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34 (3): 40-48. (in Chinese)
- [4] 贾彦荣,高贯雷,夏敏. 调控有机小分子晶体力致发光行为的 方法[J]. 化学学报,2022,80(9):1309-1321.
 Jia Yanrong, Gao Guanlei, Xia Min. Methods for adjusting mechanoluminescence behaviors on crystals of purely organic small molecules [J]. Acta Chimica Sinica, 2022, 80(9): 1309-1321.(in Chinese)
- [5] Nakayama H, Nishida J I, Takada N, et al. Crystal structures and triboluminescence based on trifluoromethyl and pentafluorosulfanyl substituted asymmetric N-phenyl imide compounds [J]. Chemistry of Materials, 2012, 24(4):671-676.
- [6] Nishida J I, Ohura H, Kita Y, et al. Phthalimide compounds containing a trifluoromethylphenyl group and electrondonating aryl groups: Color-tuning and enhancement of

triboluminescence [J]. The Journal of Organic Chemistry, 2016, 81(2):433-441.

- [7] Fang Manman, Yang Jie, Liao Qiuyan, et al. Triphenylamine derivatives: Different molecular packing, and the corresponding mechanoluminescent or mechanochromism property [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017, 5:9879.
- [8] Tu Jin, Fan Yunhao, Wang Jiaqiang, et al. Halogen-substituted triphenylamine derivatives with intense mechanoluminescence properties [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(39): 12256-12262.
- [9] Wang Jinfeng, Chai Zhaofei, Wang Jiaqiang, et al. Mechanoluminescence or room-temperature phosphorescence: molecular packing-dependent emission response [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2019,58(48):17297-17302.
- [10] Wang Can, Xu Bingjia, Li Mengshu, et al. A stable tetraphenylethene derivative: Aggregation-induced emission, different crystalline polymorphs, and totally different mechanoluminescence properties [J]. Materials Horizons, 2016, 3:220-225.
- [11] Xie Zongliang, Zhang Xiayu, Xiao Yuxin, et al. Realizing photoswitchable mechanoluminescence in organic crystals based on photochromism [J]. Advanced Materials, 2023, 15: 2212273.
- [12] Xu Shidang, Liu Tingting, Mu Yingxiao, et al. An organic molecule with asymmetric structure exhibiting aggregation-induced emission, delayed fluorescence, and mechanoluminescence [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2015, 54: 874-878.
- [13] Arivazhagan C, Maity A, Bakthavachalam K, et al. Phenothiazinyl boranes: A new class of AIE luminogens with mega stokes shift, mechanochromism, and mechanoluminescence [J]. Chemistry-A European Journal, 2017, 23:7046-7051.
- [14] Deng Huangjun, Yang Zhan, Li Gaoyu, et al. Dynamic organic mechanoluminescence (ML): The roles of Mechano-induced conformational isomer and energy transfer from ML to photoluminescence (PL) [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 438: 135519-135526.
- [15] Tu Liangjing, Che Weidong, Li Shuhui, et al. Alkyl chain regulation: Distinctive odd-even effects of mechano-

luminescence and room-temperature phosphorescence in alkyl substituted carbazole amide derivatives [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021,9:12124-12132.

- [16] Hao Fei, Wang Hailan, Yu Donghai, et al. Realizing near-infrared mechanophosphorescence from an organic host/guest system [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2023,11:5725-5730.
- [17] Feng A, Smet P. A review of mechanoluminescence in inorganic solids: Compounds, mechanisms, models and applications [J]. Materials, 2018, 11(4):484-539.
- [18] Chandra B P, Bagri A K, Chandra V K. Mechanoluminescence response to the plastic flow of coloured alkali halide crystals
 [J]. Journal of Luminescence, 2010, 130(2):309-314.
- [19] Fontenot R S, Hollerman W A, Bhat K N, et al. Effects of added uranium on the triboluminescent properties of europium dibenzoylmethide triethylammonium [J]. Journal of Luminescence, 2013, 134:477.
- [20] Rausch J, Lorenz V, Hrib C G, et al. Heterometallic Europium disiloxanediolates: Synthesis, structural diversity, and photoluminescence properties [J]. Inorganic Chemistry, 2014, 53:11662.
- [21] Biju S, Gopakumar N, Bunzli J C G, et al. Brilliant photoluminescence and triboluminescence from ternary complexes of DyIII and TbIII with 3-phenyl-4-propanoyl-5isoxazolonate and a bidentate phosphine oxide coligand[J]. Inorganic Chemistry, 2013, 52:8750.
- [22] Mikhalyova E A, Yakovenko A V, Zeller M, et al. Manifestation of π - π stacking interactions in luminescence properties and energy transfer in aromatically-derived Tb, Eu and Gd Tris(pyrazolyl)borate complexes [J]. Inorganic Chemistry, 2015, 54: 3125.
- [23] Balsamy S, Natarajan P, Vedalakshmi R, et al. Triboluminescence and vapor-induced phase transitions in the solids of methyltriphenylphosphonium tetrahalomanganate(II) complexes [J]. Inorganic Chemistry, 2014, 53:6054.
- [24] Chen Jun, Zhang Qing, Zheng Fakun, et al. Intense photo- and tribo-luminescence of three tetrahedral manganese(II) dihalides with chelating bidentate phosphine oxide ligand [J]. Dalton Trans, 2015, 44: 3289.
- [25] İncel A, Varlikli C, McMillen C D, et al. Triboluminescent electrospun mats with blue-green emission under mechanical

force [J]. Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121:11709.

- [26] Hyodo K, Terasawa Y, Xu C, et al. Mechanoluminescent stress imaging for hard tissue biomechanics [J]. Journal of Biomechanics, 2012, 45: 263.
- [27] Fontenot R, Bhat K, Aggarwal M, et al. Incorporating strongly triboluminescent europium dibenzoylmethide triethylammonium into simple polymers[J]. Polymer Journal, 2014, 46: 111-116.
- [28] Terasaki N, Xu Chaonan. Historical-log recording system for crack opening and growth based on mechanoluminescent flexible sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(10): 3999-4004.
- [29] Fujio Y, Xu Chaonan, Terasawa Y, et al. Sheet sensor using SrAl₂O₄:Eu mechanoluminescent material for visualizing inner crack of high-pressure hydrogen vessel[J]. International

Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41:1333-1340.

- [30] Okoli O, Shonag M, Ndebele T. Real-time damage monitoring in trailing edge bondlines of wind turbine blades with triboluminescent sensors[J]. Structural Health Monitoring, 2019, 18(4):1129-1140.
- [31] Liu Linsheng, Xu Chaonan, Yoshida A, et al. Scalable elasticoluminescent strain sensor for precise dynamic stress imaging and onsite infrastructure diagnosis [J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(1):1800336.
- [32] Qing Xinlin, Hu Sun, Li Wenzhuo, et al. Piezoelectric transducer-based structural health monitoring for aircraft applications [J]. Sensors, 2019, 19:545.
- [33] Sante R. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and applications
 [J].Sensors,2015, 15:18666-18713.

Research Progress and Prospects of Triboluminescence Materials in the Field of Aerospace Equipment Breakage Monitoring

Xiao Yuxin¹, Feng Yubo², Wang Jialu¹, Liang Qiuju¹, Yu Tao¹

1. Northwestern Polytechnical University, Xi' an 710129, China

2. Xi' an Aerospace Propulsion Institute of the Sixth Research Institute, Xi' an 710100, China

Abstract: Aerospace equipment is often used in extreme environments (ultra-high temperature, ultra-low temperature, high radiation, etc.), and it is particularly important to carry out research on breakage detection technology to improve its safety and stability. Triboluminescence as a real-time damage detection technology, has become an important means of real-time damage detection for aerospace equipment. In this review the material design strategies of triboluminescence materials in recent years are summarized. Starting from organic materials such as N-phthalimide, trianilines, tetraphenylvinyl, phenothiazines, carbazole derivatives and inorganic materials, the research progress and development tendency are summarized, and their existing applications in the field of damage monitoring are summarized, classified and discussed. At last, the author prospects the frontier applications of its breakage monitoring in the field of aerospace equipment, so as to provide useful reference for China to carry out the similar applications.

Key Words: real-time breakage monitoring; stress monitoring; triboluminescence; aerospace materials; spacecraft material