

http://pmse.scu.edu.cn

## 纤维及其表面改性方法在柔性绝热材料中的应用研究进展

范儵崙<sup>1,2,3</sup>, 徐雨<sup>1,2,3</sup>, 余惠琴<sup>1,2,3</sup>, 李滨<sup>1,2,3</sup>

(1. 西安航天复合材料研究所, 陕西 西安 710025; 2. 陕西省航天复合材料重点实验室, 陕西 西安 710025;

3. 西安市先进聚合物基复合材料重点实验室, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 柔性绝热材料作为固体火箭发动机热防护系统的重要组成部分, 需兼具轻质、抗烧蚀、高力学性能。近年来, 纤维及其表面改性技术在柔性绝热材料中的应用研究取得了显著进展。纤维的引入增强了柔性绝热材料的高温炭化结构完整性和抗烧蚀能力, 结合纤维表面改性技术, 有效增强了纤维与材料基体的界面作用, 显著提升了材料综合性能。文中综述了近年来纤维及其表面改性方法在柔性绝热材料中的研究应用进展, 包括无机、有机纤维填充不同柔性绝热材料, 以及纤维改性前后对柔性绝热材料烧蚀性能和力学性能的影响, 归纳分析了纤维及其表面改性在柔性绝热材料领域的研究侧重点。

**关键词:** 纤维; 界面; 表面改性; 柔性绝热材料

**中图分类号:** V25

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7555(2026)03-0169-11

柔性绝热材料是固体火箭发动机燃烧室的重要组成部分, 其功能主要有: 一方面起到密封作用, 确保高压燃气不泄露; 另一方面通过阻止或减缓热量传递, 避免壳体温度升高至危及自身结构完整性的程度, 确保发动机正常工作<sup>[1]</sup>。早期的发动机燃烧室绝热材料为碳/环氧树脂或碳/酚醛树脂硬质复合材料, 虽然此类材料的耐烧蚀性能优异, 但伸长率很低, 无法适应高机动发动机工作时燃烧室产生的大应变, 逐步被以丁腈橡胶(NBR)、三元乙丙橡胶(EPDM)、硅橡胶(SR)、芳氧基聚磷腈橡胶(PDPP)等为基体的柔性绝热材料所替代<sup>[2]</sup>。这些柔性绝热材料基体本身不具备抗烧蚀能力, 尤其是NBR和EPDM这样成炭率较低的柔性材料。而稳定炭层的形成是设计和制备高性能耐烧蚀热防护材料的关键。

大量研究发现, 纤维对柔性绝热材料的炭层有稳定作用。纤维的添加有利于形成嵌入式骨架结构, 在基体炭化后, 这种结构能增强炭层的尺寸稳定

性和热稳定性, 促进焦炭在原始基体上的黏附, 起到固结炭层、减缓烧蚀的作用, 从而提高柔性绝热材料的抗烧蚀能力<sup>[3-6]</sup>。因此, 在柔性绝热材料领域, 纤维发挥着无可替代的作用。金属纤维的力学强度高, 且具有优良的抗氧化和耐高温性能, 但其高导热率不利于材料绝热。在早期柔性绝热材料的研究中, 常使用石棉纤维(Asbestos fiber)、玄武岩纤维(Basalt fibers)、碳纤维(Carbon fiber)等填料。随着柔性绝热材料研究的不断深入, 以芳纶纤维(Aramid fiber)、聚酰亚胺纤维(Polyimide fiber)、酚醛纤维(Phenolic fiber)、聚对苯撑苯并二噁唑纤维(PBO fiber)等高性能有机纤维为填料的柔性绝热材料成为研究热点。

在固体火箭发动机领域, 传统柔性绝热材料即使引入纤维增强体仍难以解决燃烧室富氧环境中的氧化烧蚀难题, 难以形成牢固且致密的炭层。而且绝热材料中常用的纤维表面活性都较低, 纤维与基体之间难以形成很好的界面黏合, 在燃烧过程中受

气流冲刷易发生剥落与集体分离,耐火持久性差,纤维的加入还不可避免地会提高绝热材料的密度,因此,纤维和基体之间的界面性能对纤维增强绝热材料的整体性能起着至关重要的作用。纤维经过表面改性后,一是能够提高其与基体之间的界面黏合,二是纤维表面的活性基团能带入 Si, P 和 N 等可陶瓷化元素,提高复合材料的抗热氧化性与隔热作用。因此,需针对不同纤维,选择适宜的表面改性方法,提高纤维表面活性,增强复合材料的界面性能,从而提升复合材料的力学性能和耐烧蚀性能。本文对纤维及其表面改性在固体火箭发动机柔性绝热材料中的应用现状进行了综述,为柔性绝热材料的研制提供了指导。

## 1 无机非金属纤维及其表面改性在柔性绝热材料中的研究

### 1.1 石棉纤维

石棉纤维是一种天然硅酸盐矿物纤维。它具有诸多特性,(1)耐高温和抗烧蚀,可耐受 500~800 °C 的高温;(2)导热系数低至 0.15~0.35 W/(m·K);(3)具有较高的强度和柔韧性,纤维可编织成织物;(4)耐化学腐蚀性优异。基于这些优异性能,石棉纤维曾被广泛用作固体火箭发动机燃烧室的内绝热材料。

20 世纪 60~70 年代,短切石棉纤维被用作 NBR 和 EPDM 柔性绝热材料的填料。苏联在 20 世纪 70 年代开发了石棉纤维与硅酸铝陶瓷前驱体的复合绝热材料。20 世纪 80 年代,航天四院 43 所开发了高石棉填充的 NBR 柔性绝热材料 9621,并广泛应用于固体火箭发动机内绝热层<sup>[7]</sup>。90 年代又开发了密度更低、烧蚀性能和绝热性能更好的石棉填充的 EPDM 柔性绝热材料 J-90-1,成功应用于全尺寸玻璃钢复合材料固体火箭发动机,综合性能优于意大利研制的 ITA 绝热材料(石棉/EPDM 材料)<sup>[8]</sup>。之后有研究在 9621 配方基础上用碳纤维替代 50% 温石棉并引入 1% 偶联剂,解决了绝热材料力学性能波动大、延伸率偏低、与壳体 and 推进剂粘接性能差等实际问题<sup>[9]</sup>。还有学者发现,石棉与 SiO<sub>2</sub> 和酚醛混合使用能够降低 NBR 烧蚀材料的烧蚀率,按一定比例混合使用,可以使烧蚀材料形成稳定致密的炭化层,具

有良好的耐烧蚀和抗冲刷能力。

但由于石棉具有严重的生物毒性,限制了其在固体火箭发动机柔性绝热材料领域的应用。自 20 世纪 80 年代后,许多国家已逐步限制或禁止石棉的使用。尽管如此,石棉柔性绝热材料的设计理念(如纤维增强、多尺度结构)仍影响着当前柔性绝热材料的发展,主要表现在以下 3 个方面:(1)催生环保型纤维研制;(2)扩展高性能混杂纤维体系应用,实现轻量化和抗烧蚀协同提升;(3)促进表面改性技术发展。

### 1.2 玄武岩纤维

玄武岩纤维(Basalt fibers, BF)是一种新型绿色高性能纤维材料。其拉伸强度和弹性模量与玻璃纤维基本相当,断裂伸长率与芳纶相差无几,在 600 °C 时强度保留率可达 80%,在 900 °C 时质量损失仅 3%,高温热稳定性明显优于石棉纤维,成本仅为碳纤维的 22.6%或芳纶纤维的 46.7%,是柔性绝热材料中石棉纤维的合适替代品<sup>[10]</sup>。邹华维等<sup>[11]</sup>研究了玄武岩纤维填充环氧改性乙烯基硅橡胶柔性材料,发现添加 6 phr 玄武岩纤维时复合材料热导率低至 0.2 W/(m·K),热解速率最低为 0.05 mm/s,炭层密度最大,大尺寸裂纹缺陷少,添加 12 phr 时硅橡胶的拉伸强度能提高 647%。还有研究发现,采用玄武岩纤维和芳纶纤维 1:1 混合填充 EPDM 柔性绝热材料,抗烧蚀性能非常优异<sup>[12]</sup>。采用玄武岩纤维/硅树脂复合补强 EPDM/氯丁或 EPDM/丁腈橡胶制备的铝合金发动机燃烧室内绝热层,在 6500 kW/m<sup>2</sup> 热流密度下仍展现出较好的隔热性能<sup>[13]</sup>。

玄武岩纤维表面光滑且富含硅氧键,需通过改性增强与聚合物基体的界面结合。采用 1 mol/L 的氢氧化钠溶液和 5%~10% 的钛酸酯溶液处理玄武岩纤维,能改善其在三元乙丙橡胶中的分散性和粘接力,提升绝热材料的综合性能<sup>[14]</sup>。采用体积分数 6% 的油酸钾溶液处理玄武岩纤维增强天然橡胶,其拉伸强度提高了 16%<sup>[15]</sup>。硅烷偶联剂改性也是玄武岩纤维表面处理的一种常用方法。张国宁等<sup>[16]</sup>对比研究了 KH550 处理短切玄武岩纤维增强 8 种橡胶的性能,发现得益于 KH550 与氯原子的反应,纤维能均匀分散至氯丁橡胶中,且力学性能最优。李辉等<sup>[17]</sup>发现,添加 15 phr KH570 改性玄武岩纤维的三元乙

丙橡胶复合材料拥有更好的综合性能。

玄武岩纤维环保、价廉、易加工、耐高温、抗氧化,但由于玄武岩纤维是一种高刚度硅酸盐型无机填料,烧蚀后的炭层易碎,且易吸附环境水分导致基体材料老化,会降低绝热材料在湿热环境中的长期可靠性。另外,玄武岩纤维的密度高达  $2.64 \text{ g/cm}^3$ ,不利于绝热材料的轻量化发展。

### 1.3 碳纤维

碳纤维(Carbon fiber, CF)是一种主要由碳元素组成的无机纤维材料。碳原子含量超过 90%且沿着纤维轴向有序排列造就了其高强度、高模量特性。密度只有钢的 1/4,还兼具耐腐蚀、耐高温的特点,在柔性绝热材料中常作为补强、耐烧蚀填料使用。有研究使用碳纳米管作为二次纤维填料,与碳纤维协同作用来改善 SiR 绝热材料的力学和耐烧蚀性能<sup>[18]</sup>。还有报道通过碱性碳酸镁和碳纤维原位构建纤维支撑的微孔炭结构提高抗烧蚀性能<sup>[19]</sup>。在高温硫化 SiR 中掺入碳纤维和黏土或碳化硅粉也可以起到增强炭层、抵抗烧蚀的作用。研究发现,碳纤维在不同的橡胶基体中性能发挥存在显著差异,如 Tab.1 所示。用短切碳纤维增强环氧改性乙烯基硅橡胶(EMVSR)形成的炭层致密平整,当纤维添加 6 phr 时,耐烧蚀性能最佳<sup>[11]</sup>。在 PDPP 弹性体中加入 9 phr 碳纤维,碳纤维的高炭化产率可明显降低复合材料的线性烧蚀率<sup>[20]</sup>。当基体为 EPDM 时,随着短切

碳纤维用量增加,复合材料耐烧蚀性能变好,但是力学性能下降<sup>[21]</sup>。对比发现,短切碳纤维的添加量一般控制在 5~10 phr,过多碳纤维在柔性基体中易团聚,产生力学各向异性。柔性绝热材料的碳纤维用量与拉伸强度呈负相关,与抗烧蚀性能成正相关关系。虽然碳纤维在烧蚀过程中为炭化层的形成提供了丰富的碳源,有利于提高复合材料的耐烧蚀性能,但碳纤维表面具有化学惰性,与橡胶基体结合并不紧密,且在氧化性燃气环境中( $>800 \text{ }^\circ\text{C}$ )易发生氧化剥蚀,导致界面结合强度骤降,基体高温炭化后形成的炭化物与纤维的作用更弱,限制了复合材料力学性能的提高<sup>[22]</sup>。因此,对碳纤维表面有效改性十分重要。

传统的化学刻蚀、等离子体物理表面改性方法一般处理过程复杂,并且会在一定程度上破坏碳纤维并降低其力学性能,研究发现,在微纳米尺度内优化复合材料界面结构可有效调控复合材料界面性能<sup>[23]</sup>。Song 等<sup>[24]</sup>以氧化锌纳米线为介质,联合电化学沉积和微波辐射的方法,使碳纤维表面负载的纳米线均匀一致且生长密度可控,复合材料的界面剪切强度提高了 26.4%,且并未损伤碳纤维本身的力学性能。还有报道提出了多巴胺改性碳纤维再与硅橡胶复合制备柔性绝热材料的方法,既不会破坏碳纤维自身结构,又解决了传统碳纤维增强复合材料柔韧性差、热稳定性差等缺陷<sup>[25]</sup>,且绿色环保。

Tab.1 Comparison of the properties of different matrix insulation materials reinforced with carbon fiber

Matrix	Enhancers	Content /phr	Tensile strength /MPa	Linear ablation rate /( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Elongation at break /%
SR	CF	7	9.42	0.173	363.9
EPDM	CF	5	10.0	0.127	633
PDPP	CF	9	3.7	0.0563	120
EMVSR	CF	6	2.5	0.08	220

碳纤维虽然具有优异的力学性能和耐高温性能,但固体火箭发动机在工作状态下基本处于有氧状态,在长时间高温燃气冲刷下,碳纤维易发生氧化,抗热流冲刷性差,无法形成完整炭层起到保护作用。此外,碳纤维本身具有较高的轴向热导率,会降

低材料整体的绝热效果。

### 1.4 小结

石棉纤维、玄武岩纤维和碳纤维是柔性绝热材料中常用的无机纤维填料。无机纤维虽具有较高耐高温性,但普遍表面光滑,缺乏活性基团,与柔性聚合

物基体的粘接性差,热应力下易脱黏,导致材料分层。其高刚性易导致绝热材料柔韧性下降,难以适应发动机壳体变形,且高温时基体软化会削弱力学强度。无机纤维的密度也较高,增加了发动机壳体质量,不适用于航天器轻量化。

## 2 有机纤维及其表面改性在柔性绝热材料中的应用

### 2.1 芳纶纤维

芳纶纤维是一类含苯环的线形聚酰胺纺丝制成的特种合成纤维,它是一种轻质高强增强材料,具有耐高温、抗化学腐蚀和自熄等特性,能在高温形成纤维状炭结构,可以稳定炭层,是柔性绝热材料理想的骨架材料<sup>[26]</sup>。

对于 NBR 来说,其受热分解时可在芳纶纤维骨架的帮助下形成沿纤维取向的气体通道,这既能稳定炭层,又促进了热解气流的排出与复合材料内部高压的释放,极大地提高了复合材料的抗烧蚀性<sup>[27]</sup>。其中选用单丝纤度为 1.33 dtex 高模量纤维的绝热材料具有最佳的力学性能和抗烧蚀性,拉伸强度为 10.24 MPa,断裂伸长率为 690.7%,线性烧蚀率为 0.095 mm/s<sup>[28]</sup>。陈蓉等<sup>[29]</sup>通过添加含卤-锑的阻燃剂、芳纶纤维和增塑剂,研制了一种耐低温无石棉的丁腈绝热材料,添加 6 phr 芳纶纤维时线烧蚀率低至 0.045 mm/s。航天四院 42 所通过正交试验确定了性能最佳的芳纶纤维增强室温硫化硅橡胶绝热材料组成,其线烧蚀率为 0.199 mm/s,拉伸强度为 2.84 MPa,断裂伸长率为 119.9%<sup>[30]</sup>,还系统研究了芳纶纤维长度、用量和取向对 EPDM 柔性绝热材料力学行为和烧蚀性能的影响,发现随着芳纶短纤维含量和长度增加,绝热材料的拉伸强度和断裂伸长率降低,初始模量增大,纤维在平行压延方向的变化程度明显大于垂直压延方向<sup>[31]</sup>。这充分说明柔性绝热材料的力学性能受到纤维性能、相对用量、结构、与基体结合强度等因素的影响。

然而,芳纶纤维分子链段中苯环的位阻效应使得酰胺基团较难与其它原子或基团发生反应,导致芳纶纤维表面呈现化学惰性,与其他基体的黏合性很差。因此,必须对芳纶纤维进行表面处理,降低纤维表面的取向度或增加纤维表面的活性基团。

目前,有大量研究报道利用化学反应改善纤维表面组成及结构。和芳纶纤维相比,表面原纤化处理之后得到的芳纶浆粕在 NBR 中的分散性和与基体的界面粘结性更好,绝热材料拥有更高的拉伸强度和更致密坚硬且耐冲刷的炭层。航天 42 所采用 2 种不同异氰酸酯化合物对芳纶纤维进行活化处理,并用间苯二酚-甲醛-胶乳(RFL)浸渍液处理,添加改性纤维的 EPDM 绝热材料断裂伸长率提高了 53%,拉伸强度降低了 9.7%,弹性模量升高了 24.3%<sup>[32]</sup>。基于 Friedel-Crafts 反应,活化处理芳纶纤维的惰性表面,再加入 EPDM 绝热材料后,断裂伸长率提高了 68.0%,拉伸强度下降了 18.6%,弹性模量和黏性模量均增加<sup>[33]</sup>。Sa 等<sup>[34]</sup>利用多巴胺对间位芳纶纤维进行了仿生修饰,结合多巴胺的预沉积和硅烷偶联剂 KH560 的接枝改性,活化了芳纶纤维的表面,使芳纶纤维与橡胶基体的界面黏合强度提高了 67.5%。有研究发现,在芳纶纤维表面涂覆液态超支化聚碳硅烷(VHPCS),能在保持 EPDM 绝热材料原有拉伸强度的同时将断裂伸长率提高 60.60%,同时线性和质量烧蚀率分别下降了 22.67% 和 11.67%<sup>[35]</sup>。用降冰片烯双层倍半硅氧烷(DN-DDSQ)改性芳纶纤维,可以促进较低温度时的 SiC 原位转化,通过形成更致密的交联网络和更好的耐高温笼状结构提高 EPDM 绝热材料的抗烧蚀性,添加 5 phr 改性纤维绝热材料的交联密度提高 9.52%,拉伸强度提高 60.60%,线性烧蚀速率降低了 62.40%<sup>[36]</sup>。

有报道采用物理手段提高芳纶纤维与柔性基体之间的浸润性。Biswas 等<sup>[37]</sup>在空气气氛中使用等离子体处理芳纶纤维,发现改性纤维表面接触角减小,氧含量提高,粗糙度增大,这些综合作用促使芳纶纤维与橡胶基体的界面性能提高。采用超声处理技术处理 10 min 时纤维增强 EPDM 绝热材料的力学性能最好。以上研究表明,通过表面改性可以提高芳纶纤维与橡胶基体的界面结合力,提高柔性绝热材料的力学性能或者烧蚀性能。

与 NBR, EPDM 和 SR 等柔性绝热材料基体相比,PDPP 具有优异的抗烧蚀性能,与金属粘接性能良好,烧蚀后能形成独特的焦炭层,是一种在固体火箭发动机柔性绝热材料领域极具应用潜力的材料基

体。研究发现,芳纶纤维填充的 PDPP 具有很高的拉伸强度,这主要归因于 Fig.1 所示 PDPP 分子链中

氧、氮原子分别和芳纶纤维分子链上酰胺基团之间的强的氢键作用。

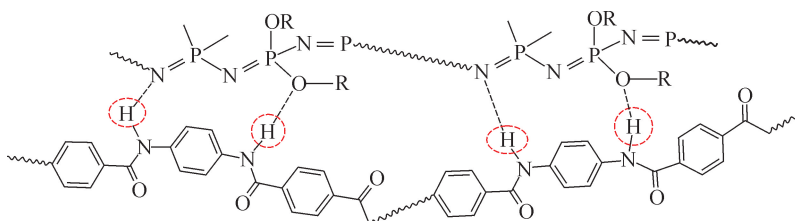


Fig. 1 Schematic diagram of the possible interaction between aramid fibers and PDPP

## 2.2 聚酰亚胺纤维

聚酰亚胺(PI)纤维是一种分子主链上含有芳酰亚胺环的特种高性能纤维。其密度仅为  $1.35 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$ ,热分解温度通常在  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  以上。相较于芳纶纤维,PI 纤维在热稳定性、阻燃性能及碳含量方面表现更优。与碳纤维、玻璃纤维相比,PI 纤维的断裂伸长率更高且韧性更突出,是柔性绝热材料的理想增强体。

研究表明,相对芳纶纤维而言,PI 纤维在 EPDM 柔性绝热材料中的应用具有显著优势。添加 7 phr PI 纤维时,EPDM 绝热材料拉伸强度为 7.09 MPa,断裂伸长率为 762%,密度为  $1.09 \text{ g/cm}^3$ ,线烧蚀率为  $0.08 \text{ mm/s}$ ,硫化性能优异,混炼工艺性能优良<sup>[38]</sup>。PI 纤维还可以提高可瓷化 EPDM 绝热材料的热稳定性,PI 纤维热解、炭化后贯穿在 EPDM 裂解后的炭层中形成纤维增强炭层结构,有助于材料获得尺寸稳定、形状完整的陶瓷产物<sup>[39]</sup>。刘永兴等<sup>[40]</sup>研究发现,用 PI 纤维织物增强 EPDM 绝热材料,相较于添加同等含量的芳纶纤维和碳纤维织物具有更低的线烧蚀率,炭层保留最为完整,综合性能优异。添加 10 phr PI 纤维可显著改善丁异戊橡胶绝热材料烧蚀性能,线烧蚀率从  $0.395 \text{ mm/s}$  降至  $0.149 \text{ mm/s}$ <sup>[41]</sup>。

当聚酰亚胺纤维长度不超过 2 mm 时,剪切分散性较好,可使柔性绝热材料的断裂伸长率保持稳定<sup>[42]</sup>。然而,更长的 PI 纤维存在分散均匀性难题,长度超过 2 mm 的聚酰亚胺纤维在柔性绝热材料拉伸时易发生界面脱黏,导致绝热层压延方向的力学性能波动<sup>[43]</sup>。有研究开发了一种湿法混合工艺,克服了传统干法混合中 PI 纤维在 EPDM 中分布不均匀的问题,绝热材料的线性烧蚀速率降低了 14.29%

( $0.042 \text{ mm/s}$ )<sup>[44]</sup>。

在 NBR 基柔性绝热材料体系中,切碎的 PI 纤维体系的绝热性能优于芳纶纤维体系。经等离子体处理后,聚酰亚胺纤维表面粗糙度增大并产生大量极性基团,显著增强了其与 NBR 基体的界面相互作用,使得 NBR 柔性绝热材料的线性烧蚀速率降至  $0.05 \text{ mm/s}$ <sup>[6]</sup>。PI 浆粕能明显改善 EPDM 绝热材料的力学性能,这是因为 PI 浆粕是由短切 PI 纤维经过帚化制备的,在帚化的过程中,PI 的比表面积增大,更有利于纤维与基体的结合,所以绝热材料的拉伸强度和断裂伸长率均变大<sup>[45]</sup>。有报道通过氢氧化钾蚀刻改性 PI 纤维,在同等添加量下,改性 PI 纤维较未改性纤维增强 EPDM 柔性绝热材料的拉伸强度和断裂伸长率分别提高了 15% 和 10%,线性烧蚀率降低了 33%<sup>[5]</sup>。

## 2.3 酚醛纤维

酚醛纤维是一种阻燃、抗烧蚀、高热稳定的有机纤维,它是由热塑性酚醛树脂熔融纺丝后再在盐酸和甲醛的混合液中缩醛化或络合化制备而成。

酚醛纤维具有高成炭特性,在柔性绝热材料领域展现出较大的应用前景。当 NBR 中填充 25 phr 酚醛纤维时,绝热材料的线烧蚀率为  $0.04 \text{ mm/s}$ ,拉伸强度为 8.12 MPa,断裂伸长率为 794%,密度为  $1.114 \text{ g/cm}^3$ ,综合性能良好<sup>[46]</sup>。李颖妮等<sup>[47]</sup>研究发现,填充酚醛纤维的 NBR 柔性绝热材料的线烧蚀率为  $0.125 \text{ mm/s}$ ,随着酚醛纤维填充量增加,材料的拉伸强度及断裂伸长率呈现下降趋势。再引入硼酚醛树脂,当酚醛纤维用量为 10% 时绝热材料线烧蚀率优异( $0.042 \text{ mm/s}$ ),密度最小( $1.146 \text{ g/cm}^3$ ),具有良好的力学性能。马小丰等<sup>[48]</sup>系统研究了酚醛纤维

在不同橡胶基体中的适用性,结果表明,当填充量为 10 phr 时,PDPP 基柔性绝热材料表现出最佳的耐热性和耐烧蚀性能;而 NBR 基柔性绝热材料的拉伸强度最高,与铝片粘接性能优异;SR 基绝热材料的力学强度较低且粘接性能较弱,烧蚀过程中炭层脱落严重;EPDM 基绝热材料的加工性能良好,但耐烧蚀性能相对不足。研究指出,酚醛纤维具有瞬时耐高温特性,其在 NBR,EPDM 和 PDPP 等柔性绝热材料上有替代传统耐烧蚀纤维填料的潜力。基于上述研究,马小丰等<sup>[49]</sup>进一步探究了短切酚醛纤维的尺寸和含量对 EPDM 柔性绝热材料性能的影响,发现纤维长度为 3 mm、填充量为 10 phr 时,EPDM 绝热材料的性能最佳,线烧蚀率为 0.0981 mm/s,拉伸强度为 14.6 MPa,断裂伸长率为 541%。

常规的酚醛纤维存在脆性大、机械混合易破损

的问题,且酚醛纤维分子结构中有大量酚羟基,使其在紫外光或热作用下不稳定,影响绝热材料的性能。有不少学者对此开展了界面改性研究。有研究采用自制的酰胺聚合物对酚醛纤维进行化学改性,通过羰基与酰胺基亲核反应生成了羟甲基聚酰胺中间体,实现了酚醛纤维的增韧,反应机理如 Fig.2 所示<sup>[50]</sup>。通过对比不同酰胺含量的改性酚醛纤维发现,当酰胺结构占比为 15%时,纤维与橡胶基体的界面作用力显著增强。当改性纤维添加量为 15 phr 时,EPDM 柔性绝热材料的拉伸强度可达 16.1 MPa,添加量为 20 phr 时,线烧蚀率低至 0.0156 mm/s。马小丰等<sup>[51]</sup>采用聚磷腈改性酚醛纤维,有效提高了酚醛纤维与橡胶基体的界面结合性能,改善了绝热材料的阻燃性、耐烧蚀性能和力学性能,且制备方法容易实现规模化生产。

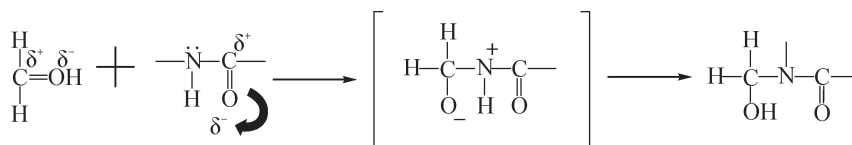


Fig. 2 Reaction mechanism of amide polymer modified phenolic fibers

#### 2.4 聚对苯撑苯并二噁唑纤维

聚对苯撑苯并二噁唑(PBO)纤维是由芳香族杂环聚合物通过液晶纺丝法成型得到的一类具有超高力学强度、耐高温、高阻燃特性的特种有机纤维。PBO 纤维的密度为  $1.56 \text{ g/cm}^3$ ,拉伸强度可达 5.8 GPa,弹性模量高达 280 GPa,极限氧指数约为 68,热分解温度高至  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[52]</sup>。作为高性能有机纤维的典型代表,其凭借突出的力学性能、热稳定性及低密度特性,在先进复合材料增强领域展现出显著优势,并在柔性绝热材料应用中具有重要潜力。

任显诚等<sup>[53]</sup>的研究表明,相较于芳纶纤维和碳纤维,PBO 纤维填充液态硅橡胶柔性绝热材料具有更低的线烧蚀率和背面温度,在壳体结构热防护方面表现出显著优势。高国新等<sup>[54]</sup>将 PBO 纤维用于增强 EPDM 绝热材料,添加 3.42%~5.56% 长度为 3~4 mm 的 PBO 纤维可将绝热材料的质量烧蚀率和线性烧蚀率分别降低至 0.05 g/s 和 0.10 mm/s,明显低于添加等量芳纶纤维的绝热材料。Yang 等<sup>[55]</sup>使用 PBO 纤维增强氯化聚磷腈,得到了拉伸强度为

9.1 MPa,热导率为  $0.2365 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,线烧蚀率为  $0.017 \text{ mm/s}$  的柔性绝热材料。

PBO 纤维的优异性能源于其独特的分子结构,作为刚性芳香环高分子,苯环与噁唑环的共平面结构通过空间位阻效应和共轭效应形成紧密堆积的分子链排列,赋予 PBO 纤维伸直链构象和高度取向有序性,这种分子结构不仅使其具备超高强度和模量,同时也导致纤维表面呈现化学惰性,与基体材料的界面结合力不足,限制了 PBO 纤维在高端复合材料领域的应用<sup>[56]</sup>。

针对此类问题,研究人员开展了多种改性探索。Zhang 等<sup>[57]</sup>报道了氧等离子体改性 PBO 纤维,当处理功率为 200 W,处理压力为 30 Pa,处理时间为 15 min 时,PBO 纤维复合材料的层间剪切强度从 32.7 MPa 增加到 47.7 MPa。孟进方等<sup>[58]</sup>在 PBO 纤维表面构建了二氧化钛涂层,使得纤维与基体的界面剪切强度提高了 43.5%,同时二氧化钛优异的紫外屏蔽性能赋予 PBO 纤维良好的耐紫外辐射性能,经 200 h 紫外光加速老化实验后其拉伸强度保持率提

高了 25%。Lv 等<sup>[59]</sup>将三聚氰胺(MEL)和碳纳米管(CNTs)接枝到 PBO 纤维表面,通过分子间范德华力和机械连锁效应,使得 PBO-MEL-CNTs 纤维与基体界面剪切强度提升了 180.4%。还有研究者对 PBO 纤维表面进行直接氟化,引入了羧基和碳氟键等极性基团,且极性基团的比例随着氟化程度的增加而提高,改性后的 PBO 纤维与基体的层间剪切强度从 27.3 MPa 提升至 37.5 MPa<sup>[60]</sup>。

综上所述,目前 PBO 纤维表面改性已有大量的研究,其中物理改性方法主要有等离子体处理、表面涂层、辐照,化学改性方法主要有接枝与氟化。但研究关注点主要集中在纤维表面改性后复合材料的力学性能变化,对纤维的耐高温性能及抗烧蚀性能关注较少,并且关于改性后的 PBO 纤维在柔性绝热材料中的应用目前未检索到相关报道。

## 2.5 小结

有机纤维具有高弹性模量和断裂伸长率,能有效适应发动机壳体的动态变形(如热膨胀或振动载荷),减少因应力集中导致材料开裂或分层。有机纤维密度也远低于无机纤维,能显著减轻绝热料质量,符合航天器轻量化需求。并且有机纤维与柔性绝热材料基体的化学相容性高,通过表面改性(如偶联剂处理)可形成强界面结合,减少热应力下的脱黏风险。因此,有机纤维在柔性绝热材料中的应用逐渐成为研究热点。

由于有机纤维在以 NBR 和 EPDM 为基体的柔性绝热材料中应用最为广泛,本文从 2 方面对有机纤维在柔性绝热材料中的应用情况进行分析,一是不同纤维及表面改性在 NBR 和 EPDM 橡胶基体中所发挥的性能差异,二是不同柔性绝热材料的性能差异。

研究数据表明,如 Fig.3 和 Fig.4 所示,酚醛纤维和 PI 纤维在 2 种基体中展现出更优异的综合性能,经过表面改性的纤维对柔性绝热材料的性能提升效果尤为显著。酚醛纤维和 PI 纤维增强的绝热材料在拥有高力学性能(拉伸强度>10 MPa)的同时还具有优异的抗烧蚀性能(线烧蚀率 $\leq 0.05$  mm/s),并且纤维经过表面改性后绝热材料的力学和烧蚀性能增强了 20% 左右。从 Fig.5 中可以发现,纤维增强 NBR 绝热材料的力学性能好(拉伸强度>6 MPa),但

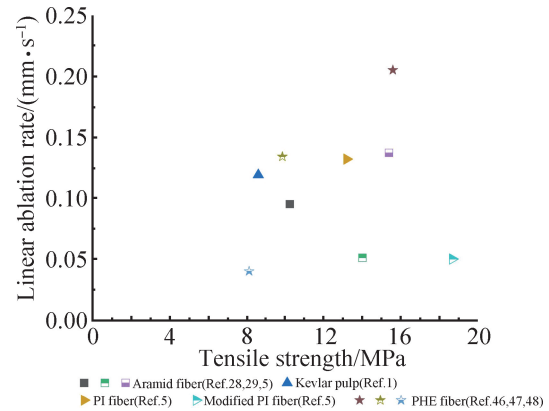


Fig. 3 Comparison of the properties of different fiber-reinforced nitrile rubber-based insulation materials

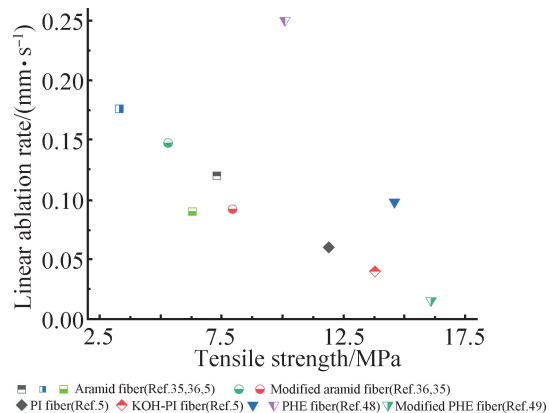


Fig. 4 Comparison of the properties of different fiber-reinforced EPDM rubber-based thermal insulation materials

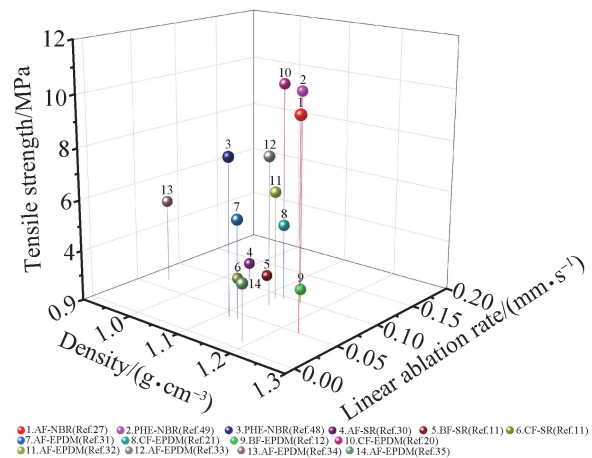


Fig. 5 Comparison of comprehensive properties of fiber-reinforced flexible thermal insulation materials

密度较高(1.1 g/cm<sup>3</sup> 以上),抗烧蚀性较差(线烧蚀率>0.1 mm/s),增强 SiR 绝热材料的力学性能较差,

增强 EPDM 绝热材料的各项性能较为均衡,且密度为三者中最低,在轻量化发展中具有较好的应用前景。

### 3 结语

柔性绝热材料是固体火箭发动机燃烧室的热防护材料,其性能直接关系到火箭发射过程中的稳定性和安全性。随着航天固体动力事业的不断发展,固体发动机对柔性绝热材料的力学性能、耐烧蚀性能和轻量化的协同要求日益严苛。为降低燃烧室的结构质量并提高质量比,在保持力学与耐烧蚀性能的前提下,绝热材料轻量化将是固体火箭发动机复合材料研究的重要内容。从纤维角度而言,未来研究需瞄准以下几个方面。

(1) 选择低密度、高抗热分解、阻燃的特种纤维为填料,在不损失柔性绝热材料力学性能和烧蚀性能的前提下,降低材料的密度。

(2) 筛选合适的纤维表面改性方法,提升纤维与基体界面结合力,促进纤维在基体中的分散,在较低的纤维用量下获得柔性绝热材料在轻量化、力学性能、耐烧蚀等性能上的最优解。

(3) 通过纤维表面引入 Si, C, N, B 等杂元素活性基团,烧蚀时可实现纤维表面原位陶瓷化,增强纤维的热氧化稳定性能,提升纤维的抗热气流冲刷能力,减缓绝热材料烧蚀。

#### 参考文献:

- [1] 李志颖, 杨新飞, 杨学军, 等. 芳纶纤维对丁腈橡胶绝热材料性能的影响[J]. 特种橡胶制品, 2023, 44(1): 30-34.  
Li Z Y, Yang X F, Yang X J, *et al.* Effect of aramid fiber on performance of NBR insulation materials[J]. *Special Rubber Products*, 2023, 44(1): 30-34.
- [2] George K, Panda P B, Mohanty S, *et al.* Recent developments in elastomeric heat shielding materials for solid rocket motor casing application for future perspective[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2018, 29: 8-21.
- [3] Qu H J, Hui K, Bian C, *et al.* Lightweight and mechanically robust EPDM foams for high thermal insulation and moderate ablative resistance via constructing cellular char layer[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2021, 307: 2100665.
- [4] Shen S, Guo H B, Ma X Y, *et al.* Enhanced ablation resistance of divinyl-POSS modified additional liquid silicone rubber and its fiber reinforced composite[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43: 2896-2908.
- [5] Han Z, Qi S, Liu W. Correction for 'surface-modified polyimide fiber-filled ethylenepropylenediene monomer insulations for a solid rocket motor: processing, morphology, and properties[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52: 3042.
- [6] Zhao Y, Hu S, Liu W, *et al.* Nitrile butadiene rubber-based heat-shielding insulations for solid rocket motors: effect of polyimide fibrous reinforcement on the morphology and properties[J]. *High Performance Polymers*, 2015, 27: 153-160.
- [7] 陈永泉. 石棉填充丁腈橡胶绝热材料的各向异性研究[J]. 宇航材料工艺, 1988(2): 30-35.  
Chen Y Q. Study on the anisotropy of asbestos filled nitrile rubber insulation material[J]. *Aerospace Materials Technology*, 1988 (2): 30-35.
- [8] 陈永泉. EPDM/石棉固体发动机内绝热材料的性能[J]. 固体火箭技术, 1990(1): 94-103.  
Chen Y Q. Performance of EPDM/asbestos solid engine internal insulation materials[J]. *Solid Rocket Technology*, 1990 (1): 94-103.
- [9] 靳月恒. 丁腈橡胶绝热材料改性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.  
Jin Y H. Research on modification of nitrile rubber thermal insulation materials[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [10] 宋平, 高欢, 汪灵, 等. 玄武岩纤维基本特征及应用前景分析[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(4): 173-178.  
Song P, Gao H, Wang L, *et al.* Basic characteristics and application prospect analysis of basalt fiber[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(4): 173-178.
- [11] Zhang H, Huang M, Xing Y, *et al.* Improving the ablative performance of epoxy-modified vinyl silicone rubber composites by incorporating different types of reinforcing fibers[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45: 4725-4742.
- [12] 青岛科技大学. 一种短纤维增强三元乙丙橡胶绝热功能材料: 中国, 202111656693.6[P]. 2023-07-28.
- [13] 中国兵器装备集团西南技术工程研究所. 一种铝合金发动机燃烧室复合内绝热层及其制备方法: 中国, 202210824891.7 [P]. 2024-02-13.
- [14] 国家知识产权局. 一种高填充玄武岩纤维/三元乙丙橡胶复合材料制备方法[J]. 橡胶科技 (中英文), 2024, 22(6): 357-358.  
China National Intellectual Property Administration. A preparation method of high filling basalt fiber/EPDM rubber composite material[J]. *Rubber Technology (Chinese and English)*, 2024, 22(6): 357-358.
- [15] 王景, 任建彬, 汪传生, 等. 玄武岩纤维改性对橡胶复合材料

- 性能的影响[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2025, 46(1): 89-94.
- Wang J, Ren J B, Wang C S, *et al.* Effect of basalt fiber modification on properties of rubber composites[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 46(1): 89-94.
- [16] 张国宁, 梁庆, 姬燕飞. 玄武岩短纤维增强橡胶复合材料的研制[J]. 橡塑资源利用, 2023(6): 21-29.
- Zhang G N, Liang Q, Ji Y F. Development of basalt short fiber reinforced rubber composite materials[J]. Rubber and Plastic Resource Utilization, 2023(6): 21-29.
- [17] 李辉, 张卜方, 赵春霞, 等. 硅烷偶联剂改性的短切玄武岩纤维增强三元乙丙橡胶复合材料的研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(S1): 199-204.
- Li H, Zhang B F, Zhao C X, *et al.* Study on the silane coupling agent-modified short cut basalt fiber reinforced EPDM rubber composite material[J]. Chemical New Materials, 2024, 52(S1): 199-204.
- [18] Li P, Duan Y H, Liu F Y, *et al.* Multi-walled carbon nanotubes as secondary fibre fillers for property improvement of short carbon fibre-reinforced silicone rubber[J]. Bulletin of Materials Science, 2019, 42: 1-8.
- [19] Huang Y S, Kong Y R, Yan L W, *et al.* In situ construction of fiber-supported micro-porous char structure to enhance anti-ablative performance of silicone rubber composites[J]. 2021, 32: 2899-2907.
- [20] Wu J, Zhang S K, Basharat M, *et al.* Performances of novel poly (diaryloxyphosphazene) based heat shielding materials with various fibrous reinforcements[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138: 51222.
- [21] Wu Q, Yang X, Ye Z Y, *et al.* Dopamine-dependent graphene oxide modification and its effects on interfacial adhesion of carbon fiber composites[J]. Surfaces and Interfaces, 2022, 31: 102086.
- [22] Zheng H, Song G J, Zhang W J, *et al.* Enhancing the interfacial strength of carbon fiber/epoxy composites by introducing "rigid-flexible" structure onto carbon fiber surface via  $\pi$ - $\pi$  interaction[J]. Surfaces and Interfaces, 2022, 30: 101899.
- [23] Ren T, Zhu G, Hou X, *et al.* Improvement of interfacial interactions in CF/PEEK composites by an s-PSF/graphene oxide compound sizing agent[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138: 51327.
- [24] Song S A, Lee C K, Bang Y H, *et al.* A novel coating method using zinc oxide nanorods to improve the interfacial shear strength between carbon fiber and a thermoplastic matrix[J]. Composites Science and Technology, 2016, 134: 106-114.
- [25] 谷博. PDA & AMTS 改性碳纤维/硅橡胶复合材料的制备及界面增强研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
- Gu B. Preparation and interface reinforcement research of PDA & AMTS modified carbon fiber/silicone rubber composites[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023.
- [26] Yang G, Park M, Park S J. Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites: a review[J]. Composites Communications, 2019, 14: 34-42.
- [27] Zhou R T, Zheng H B, Zheng Y S. Study of the aligned pyrolysis gas channels in fiber-reinforced ablative materials[J]. Polymer Degradation & Stability, 2015, 119: 9-13.
- [28] 李兰英, 林志娇, 何鑫业, 等. 国产芳纶在丁腈绝热层的应用研究[J]. 高科技纤维与应用, 2016, 41(5): 48-52.
- Li L Y, Lin Z J, He X Y, *et al.* Study on the application of domestic aramid fibre in nitrile insulation blanket[J]. High-Tech Fibers and Applications, 2016, 41(5): 48-52.
- [29] 陈蓉, 宋博, 伏玲, 等. 耐低温无石棉绝热层研制[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(3): 34-37.
- Chen R, Song B, Fu L, *et al.* Preparation of low temperature-resistant and non-asbestos insulation[J]. Aerospace Materials Technology, 2014, 44(3): 34-37.
- [30] 李洋, 孙笑然, 伍政, 等. 室温硫化硅橡胶外防护材料及成型工艺[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(4): 509-513.
- Li Y, Sun X R, Wu Z, *et al.* Material and molding process of room temperature vulcanized silicone rubber for external ablation and heat insulation coating[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2018, 41(4): 509-513.
- [31] 王明超, 赵敏, 张琰, 等. 有机纤维长度对 EPDM 绝热层耐烧蚀性能的影响[J]. 固体火箭技术, 2022, 45(2): 289-293.
- Wang M C, Zhao M, Zhang Y, *et al.* Effects of organic fiber length on ablation resistance of EPDM insulation[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2022, 45(2): 289-293.
- [32] 周俊, 何永祝. 芳纶纤维的活化浸渍处理对 EPDM 绝热层力学性能的影响[J]. 化学与黏合, 2016, 38(3): 157-160.
- Zhou J, He Y Z. Effect of immersion treatment on aramid fiber on the mechanical properties of EPDM thermal insulation layer[J]. Chemistry and Bonding, 2016, 38(3): 157-160.
- [33] 周俊, 何永祝, 邓康清. 傅-克烷基化反应改性芳纶纤维对 EPDM 绝热层力学性能的影响[J]. 化学与黏合, 2016, 38(4): 235-239.
- Zhou J, He Y Z, Deng K Q. Effect of Friedel-Crafts reaction modified aramid fiber on the mechanical properties of EPDM insulation layer[J]. Chemistry and Adhesive, 2016, 38(4): 235-239.
- [34] Sa R, Yan Y, Wei Z H, *et al.* Surface modification of aramid fibers by bio-inspired poly(dopamine) and epoxy functionalized silane grafting[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6: 21730-21738.

- [35] Zhang Y, Ma X T, Yang M M, *et al.* Ablation resistance of ethylene propylene diene monomer insulation materials reinforced with liquid hyperbranched polycarbosilane coated aramid fibers[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, 217: 110510.
- [36] Ma X T, Ji T Z, Zhang J N, *et al.* A double-decker silsesquioxane of norbornene and performance of crosslinking reactive modified EPDM ablation resistance composites[J]. *Composites Part A*, 2023, 165: 107370.
- [37] Biswas K M, Shayed M, Hund R, *et al.* Surface modification of Twaron aramid fiber by the atmospheric air plasma technique[J]. *Textile Research Journal*, 2013, 83: 406-417.
- [38] 内蒙古航天红峡化工有限公司. 一种聚酰亚胺纤维填充的抗烧蚀三元乙丙绝热材料: 中国, 201710939246.9 [P]. 2018-01-12.
- [39] 刘良点, 秦岩, 宋九强, 等. 短切聚酰亚胺纤维增强可瓷化三元乙丙橡胶复合材料的制备与性能[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(12): 2800-2809.
- Liu L D, Qin Y, Song J Q, *et al.* Preparation and properties of ceramifiable ethylene propylene diene monomer rubber composites reinforced with chopped polyimide fibers[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(12): 2800-2809.
- [40] 刘永兴, 赵元, 张维海, 等. 纤维织物增强三元乙丙橡胶绝热材料的制备及性能[J]. *宇航材料工艺*, 2019, 49(5): 48-52.
- Liu Y X, Zhao Y, Zhang W H, *et al.* Fabrication and performances of fabrics reinforced ethylene-propylene-diene monomer insulations[J]. *Aerospace Materials Technology*, 2019, 49(5): 48-52.
- [41] 刘辉, 曾金芳, 余惠琴, 等. 聚酰亚胺短切纤维及其表面处理对丁异戊橡胶性能的影响[J]. *弹性体*, 2018, 28(6): 10-14.
- Liu H, Zeng J F, Yu H Q, *et al.* Influence of polyimide chopped fiber and its surface treatment on properties of butadiene-isoprene rubber[J]. *Elasticity*, 2018, 28(6): 10-14.
- [42] 张琰, 何永祝, 胡建江, 等. PI短纤维对EPDM绝热层平行压延方向断裂伸长率的影响[J]. *固体火箭技术*, 2019, 42(6): 779-785.
- Zhang Y, He Y Z, Hu J J, *et al.* Optical effects of PI short fibers on elongation of EPDM insulation in parallel rolling direction[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2019, 42(6): 779-785.
- [43] 刘琮佩, 王明超, 张箭, 等. PI纤维增强EPDM绝热层力学性能波动性拉伸损伤机制研究[J]. *固体火箭技术*, 2022, 45(5): 772-778.
- Liu C P L, Wang M C, Zhang J, *et al.* Investigation on mechanical properties unstable tensile damage mechanism of EPDM insulation reinforced by PI fiber[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2022, 45(5): 772-778.
- [44] Xue J, Wu L, Xu H, *et al.* Preparation of ablation-resistant ethylene propylene trioxide/polyimide staple fiber composite insulation layer by solution wet mixing process[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2024, 227: 110879.
- [45] 王连庆. 三元乙丙热防护材料的制备及工程化应用性能适应研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2022.
- Wang L Q. Research on the preparation and engineering application performance adaptation of EPDM thermal protection materials[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022.
- [46] 宋崇健, 张炜, 莫纪安. 填充短纤维对NBR基绝热材料性能的影响[J]. *固体火箭技术*, 2004, 27(1): 73-76.
- Song C J, Zhang W, Mo J A. Effect of short fiber filler on the properties of NBR-matrix insulator[J]. *Solid Rocket Technology*, 2004, 27(1): 73-76.
- [47] 李颖妮, 杨学军, 刘锋. 酚醛纤维和芳腈纤维对丁腈橡胶耐烧蚀性能的影响[J]. *应用化工*, 2013, 42(7): 1287-1290.
- Li Y N, Yang X J, Liu F. Effect of phenolic fiber and polysulfonamide fiber on ablative performance of NBR[J]. *Applied Chemistry*, 2013, 42(7): 1287-1290.
- [48] 吴剑, 马小丰, 李建华, 等. 国产化酚醛纤维在不同橡胶基绝热材料上的应用[J]. *化工新型材料*, 2023, 51(7): 155-159.
- Wu J, Ma X F, Li J H, *et al.* Application of domestic phenolic fiber in different rubber based insulation materials[J]. *Chemical New Materials*, 2023, 51(7): 155-159.
- [49] 马小丰, 李建华, 吴剑, 等. 酚醛短切纤维对EPDM绝热材料性能的影响[J]. *塑料工业*, 2019, 47(7): 31-34.
- Ma X F, Li J H, Wu J, *et al.* Effects of phenolic short fibers on properties of EPDM insulations[J]. *Plastics Industry*, 2019, 47(7): 31-34.
- [50] 王宗保, 马小丰, 林呼斯图, 等. 酚醛纤维对芳氧基聚磷腈绝热层的性能影响研究[J]. *化工新型材料*, 2024, 52(7): 120-125.
- Wang Z M, Ma X F, Lin H, *et al.* Study on the effect of phenolic fiber on the properties of poly (aryloxy) phosphazene insulations[J]. *Chemical New Materials*, 2024, 52(7): 120-125.
- [51] 开滦(集团)有限责任公司, 北京化工大学. 一种用于酚醛纤维改性的组合物、柔性绝热材料及制备方法: 中国, 202211610652.8 [P]. 2024-11-08.
- [52] 杨超杰, 吴喜娜, 魏浩, 等. PBO纤维表面改性处理的研究进展[J]. *表面技术*, 2024, 53(1): 48-55.
- Yang C J, Wu X N, Wei H, *et al.* Research progress on surface modification of PBO fiber[J]. *Surface Technology*, 2024, 53(1): 48-55.
- [53] Zhang H, Yan L W, Zhou S T, *et al.* A comparison of ablative resistance properties of liquid silicone rubber composites filled with different fibers[J]. *Polymer Engineering and Science*,

- 2021, 61: 442-452.
- [54] Gao G, Zhang Z, Li X, *et al.* An excellent ablative composite based on PBO reinforced EPDM[J]. *Polymer Bulletin*, 2010, 64: 607-622.
- [55] Zheng Y, Yue T, Cui G, *et al.* Synthesis of chlorinated polyphosphazenes with improved interfacial strength for novel flexible heat shielding materials[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2025, 64: 5448-5458.
- [56] 王静, 杨爽, 陈平, 等. PBO 纤维复合材料界面性能研究进展[J]. *航空制造技术*, 2024, 67(22): 28-39.
- Wang J, Yang S, Chen P, *et al.* Research progress of interfacial properties of PBO fiber composites[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2024, 67 (22): 28-39.
- [57] Zhang C S, Li C Y, Wang B Y, *et al.* Effects of atmospheric air plasma treatment on interfacial properties of PBO fiber reinforced composites[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 276: 190-197.
- [58] 孟进方, 王斌, 李思雨, 等. PBO 纤维表面二氧化钛涂层的构建及其抗紫外光性能研究[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 55(2): 231-237.
- Meng J F, Wang B, Li S Y, *et al.* Construction of titanium dioxide coating on the surface of PBO fiber and study on its anti-ultraviolet property[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 55(2): 231-237.
- [59] Lv J W, Wang B, Ma Q, *et al.* Interfacially enhancement of PBO/epoxy composites by grafting MWCNTs onto PBO surface through melamine as molecular bridge[J]. *Materials Research Express*, 2018, 5: 065006.
- [60] 洪达伟, 程政, 刘向阳. 直接氟化 PBO 纤维及其结构与性能研究[C]//中国化学会 2017 全国高分子学术论文报告会论文集. 成都: 中国化学会 2017 全国高分子学术论文报告会, 2017: 625-625.

## Progress on Research of the Application of Fiber and Surface Modification Methods in Flexible Thermal Insulation Materials

Xiaoyu Fan<sup>1</sup>, Yu Xu<sup>1,2,3</sup>, Huiqin Yu<sup>1,2,3</sup>, Bin Li<sup>1,2,3</sup>

(1. Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Aerospace Composites, Xi'an 710025, China;

3. Xi'an Key Laboratory of Advanced Polymer Composite Materials, Xi'an 710025, China)

**ABSTRACT:** As an important part of the thermal protection system of solid rocket motors, flexible thermal insulation materials need to have the characteristics of light weight, ablation resistance, and high mechanical properties. In recent years, significant progress has been made in the application research of fibers and their surface modification technologies in flexible thermal insulation materials. The introduction of fibers enhances the structural integrity of the high-temperature carbonized structure and the ablation resistance of flexible thermal insulation materials. Combined with fiber surface modification technology, it effectively strengthens the interfacial interaction between the fibers and the material matrix, significantly improving the comprehensive properties of the materials. This article reviewed the research and application of fibers and their surface modification methods in flexible thermal insulation materials in recent years, including the filling of different flexible thermal insulation materials with inorganic and organic fibers, as well as the effects of fibers on the ablation performance and mechanical properties of flexible thermal insulation materials before and after modification. At the same time, it summarized and analyzed the research focuses of fibers and their surface modification in flexible thermal insulation materials.

**Keywords:** fiber; interface; surface modification; flexible insulating materials