

纤维增强环氧树脂复合材料抗固体颗粒流 冲蚀磨损研究进展

于晶晶^{1,2}, 吴杨敏¹, 赵文杰¹, 王德亮², 薛群基¹

(1.中国科学院宁波材料技术与工程研究所 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室 浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 浙江 宁波 315201; 2.中国科学技术大学纳米学院, 江苏 苏州 215123)

摘要:在生产生活中, 固体颗粒流冲蚀磨损会造成经济损失, 并且存在安全隐患。环氧树脂复合材料具有较好的强度和耐冲蚀性能, 被广泛地应用于颗粒流冲蚀磨损工况下。为进一步提升环氧树脂的耐冲蚀性能, 通常通过填料来改性环氧树脂, 其中纤维增强环氧树脂表现出优异的耐固体颗粒流冲蚀性能, 使得环氧树脂复合材料的应用更加广阔。根据纤维的种类可以将其分为无机纤维(玻璃纤维或碳纤维)、自然纤维及混和纤维增强环氧树脂复合材料。综述了纤维增强环氧树脂复合材料抗固体颗粒流冲蚀性能的研究现状, 讨论了不同的纤维增强复合材料表现出的冲蚀行为(塑性、脆性、半塑性、半脆性), 重点分析和对比了不同纤维填料特性(纤维类型、纤维含量、纤维取向)增强环氧树脂复合材料在不同工况条件(冲蚀角度、冲蚀速度、磨粒特性)下的耐冲蚀磨损性能, 阐明了不同纤维增强环氧复合材料的冲蚀模式和抗冲蚀机理, 指出其现存的问题并展望其发展方向和前景。

关键词: 环氧树脂; 纤维增强; 冲蚀磨损; 无机纤维; 天然纤维

中图分类号: TQ343 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)11-0029-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.11.005

Erosive Wear Resistance of Fiber-reinforced Epoxy Resin to Solid Particle Flow

YU Jing-jing^{1,2}, WU Yang-min¹, ZHAO Wen-jie¹, WANG De-liang², XUE Qun-ji¹

(1.Key Laboratory of Marine Materials and Related Technology, Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;

2.School of Nano Science and Technology, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, China)

ABSTRACT: In daily production and life, erosive wear of solid particle flow will not only cause economic losses, but also have

收稿日期: 2017-08-29; 修订日期: 2017-09-10

Received: 2017-08-29; **Revised:** 2017-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(51775540); 浙江省重点研发计划(2015C01SA790002); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA13040601); 宁波市自然科学基金(2017A610049)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51775540), Zhejiang Province Key Technology Project (2015C01SA790002), The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA13040601) and Ningbo Municipal Nature Science Foundation (2017A610049)

作者简介: 于晶晶(1990—), 女, 硕士生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: YU Jing-jing (1990—), Female, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 赵文杰(1981—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为海洋功能防护材料。

Corresponding author: ZHAO Wen-jie (1981—), Male, Ph.D., Professor, Research focus: marine functional protective materials.

a security risk. Epoxy resin composite is widely used in erosive wear working conditions of particle flow due to excellent strength and erosion resistance. In order to further improve the erosion resistance of epoxy resin, fillers are usually used to modify epoxy resin. Fiber-reinforced epoxy resin exhibits excellent erosion resistance to solid particles, which facilitates broader application of epoxy resin composites. Fibers can be classified into inorganic fiber (fiber glass or carbon fiber), natural fiber and mixed fiber-reinforced epoxy resin composite. Research progress of erosion resistance of fiber-reinforced epoxy composites to solid particle flow was reviewed. Erosion behavior (plastic, brittle, semi-plastic and semi-brittle) of different fiber-reinforced composites was discussed. Characteristics of different fiber fillers (fiber category, fiber content, fiber orientation) and erosive wear resistance of reinforced epoxy resin composites under different working conditions (erosion angle, erosion rate, abrasive properties) were analyzed and compared emphatically. Erosion mode and anti-erosion mechanism of different fiber-reinforced epoxy composites were expounded, and existing problems of fiber-reinforced epoxy composites were pointed out. Finally, development directions and prospects of fiber-reinforced epoxy composites are also proposed.

KEY WORDS: epoxy resin; fiber-reinforced; erosive wear; inorganic fiber; natural fiber

在我们的日常生产生活中, 固体颗粒流冲蚀比较常见, 例如风力能源。风力发电是最具吸引力的环境友好型能源之一, 它是近 10 多年来世界上增长最快的可再生能源。但是在风能行业有一个重要的问题, 即涡轮的叶片边缘易受到砂砾流体的侵蚀磨损, 严重地降低了涡轮的性能^[1]。另外, 高速运动的车辆外壳、在沙漠环境中使用的飞机的气轮机压缩机和涡轮叶片、直升机旋翼桨叶和机翼前缘、火箭发动机尾喷管等^[2,3]经常暴露于颗粒流冲击的环境下, 它们的表面及零部件极易受到颗粒流的冲蚀, 造成局部损伤, 导致部件机械性能降低和寿命缩短, 严重的可能会发生事故, 危害财产与生命安全^[4]。

固体颗粒流冲蚀是由携带小颗粒的气流体反复冲击材料表面而引起的材料损伤和损耗行为, 除了机械冲击, 在被侵蚀的表面还会发生热力学和化学反应, 因此造成冲蚀破坏的原因非常复杂^[5]。影响冲蚀行为的参数包括粒子属性、冲击参数、粒子浓度、强化类型和温度等^[6,7]。根据材料在不同冲击角下的冲蚀行为, 耐冲蚀磨损性能材料可以分为塑性材料和脆性材料。根据材料的性质和冲蚀条件, 冲蚀分为塑性和脆性模式。对于塑性模式, 在低冲击角下质量损失最大。对于脆性模式, 高冲击角下质量损失最大, 并且比塑性模式下的冲蚀率更高。根据冲击角度的不同, 固体颗粒流冲蚀可以分为低冲击角下的研磨磨损和高冲击角下的冲击磨损^[8], 高冲击角下的法向冲击会造成塑性变形和内部摩擦, 摩擦力引起的拉伸应力导致表面的微细裂纹增加, 导致冲蚀率增加^[9]。而倾斜冲击则发生在较低的冲击角上, 冲击作用于工件表面上, 力的平行分量更高, 因此易发生微切削和微犁耕^[10]。冲蚀磨损机理与冲击速度也密切相关^[11], 低

冲击速度情况下, 冲击应力不足以造成塑性变形, 此时磨损机理主要是表面疲劳; 中等冲击速度下, 受冲击材料可能会发生塑性变形, 此时磨损是由于重复的塑性变形造成的; 较高冲击速度下, 撞击可能会导致被冲蚀材料表面熔化^[12]。另外, 冲蚀颗粒的形状也对冲蚀机制有影响, 球形或钝的冲蚀粒子可能会造成表面的极端塑性变形, 使材料变薄; 尖锐的冲蚀颗粒则会导致材料表面切削或脆裂^[13]。参数条件和物质特性决定了主导机制的类型, 已有学者通过对微区过程的简要描述将固体颗粒冲蚀机制分为 5 种基本类型, 如图 1 所示^[14]。

聚合物及其复合材料具有很多优点, 例如强度高、质轻、无毒性、耐蚀性强、设计适应性多变、易生产、减摩耐磨与自润滑性能较好, 因此被广泛应用于结构材料、汽车部件、工程部件及航空航天、海洋、能源等领域^[13,15]。以环氧树脂为例, 环氧树脂具有较好的粘结性且化学稳定性好、固化收缩率低、涂膜坚硬稳定, 在粘合剂、涂层涂料、绝缘材料和复合材料等方面应用广泛, 并且其成本低, 制备工艺简单, 是一种极具潜力的材料。但环氧树脂也有缺点, 例如脆性大, 易产生裂纹, 耐湿热性差, 耐冲击磨损性能较差, 耐冲击强度低等^[16]。此时, 纤维增强环氧树脂便显现出其优势。纤维/环氧复合材料具有优良的性能, 如高模量和高强度, 能满足在恶劣环境下的工况需求。在过去几年, 纤维增强环氧树脂复合材料已经广泛地应用于建筑、海洋、水工结构、电器、航天等不同领域^[17], 是一种很有应用潜力的新型高效材料。同时, 纤维增强环氧树脂的抗冲蚀性能也引起了人们的广泛关注。目前此类研究主要集中于无机纤维、自然纤维和混合纤维增强环氧树脂复合材料的抗冲蚀磨损性能。

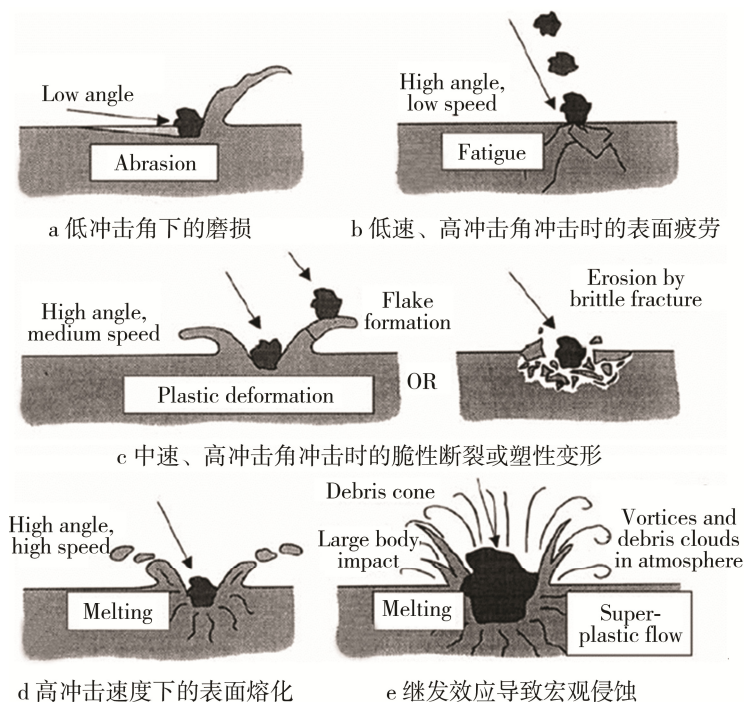
图 1 固体颗粒的冲蚀机制^[14]

Fig.1 Erosion mechanisms of solid particle: (a) wear at low impact angle, (b) surface fatigue during low speed, high impact angle impact, (c) brittle fracture or plastic deformation during medium speed, high impact angle impact, (d) surface melting at high impact speed, (e) macroscopic erosion under secondary effects^[14]

1 无机纤维

无机纤维是具有优异性能的无机非金属材料,种类繁多。目前应用于冲蚀性能研究的主要是玻璃纤维和碳纤维,它们具有耐热性能较好、不燃、抗腐蚀性好、抗拉强度高优点^[18,19]。作为补强材料时,无机纤维与环氧树脂胶粘稳定,结合力较好,易于加工,能增强环氧树脂的刚性和硬度,从而提高环氧树脂的抗冲蚀性能。

1.1 玻璃纤维

玻璃纤维具有机械强度高、耐热性好、抗腐蚀性等优点,但缺点是性脆、耐磨性较差^[20]。它们通常用作复合材料中的增强材料、电绝缘材料和绝热保温材料,目前已在生产生活中的各个领域使用。玻璃纤维应用于聚合物作为补强材料时,具有极高的抗拉强度^[21,22],其中增强环氧树脂复合材料的抗固体颗粒流冲蚀研究得到众多学者的关注。

姜秉元^[23]将粒子流喷射到玻璃纤维-环氧树脂复合材料上,结果表明:复合材料的冲蚀磨损率随粒子冲击角度的增大呈指数增加,在 90°冲击角下达到最大值,且在 0°~180°的范围内冲蚀磨损率呈对称分布。当纤维的排列方向与磨面平行时,材料的磨损率最高,但耐磨性低;当纤维的排列方向与磨面垂直时,材料的磨损率最低,耐磨性较好。

Biswas 等^[24]将 3 种不同含量 (20%、30%、40%, 质量分数, 后同) 的玻璃纤维以 4 种取向 (15°、30°、45°、60°) 加入到环氧树脂中研究其机械性能和抗冲蚀磨损性能。结果表明,若只考虑纤维取向,30°纤维取向的复合材料显示更好的显微硬度、抗张强度、抗弯强度、冲击强度等机械性能。30°纤维取向且纤维含量为 20% 的复合材料的冲蚀损失率最大。30% 和 40% 纤维含量的复合材料在 15°纤维取向时,冲蚀损失率最大,射流的速度对于冲蚀损失率的影响较大。

Ballout 等^[25]将玻璃纤维和环氧树脂质量比不同的复合材料进行固体颗粒流冲蚀磨损试验。结果表明,环氧基树脂是一种半塑性的冲蚀行为,在 45°冲击角下,其冲蚀率最大;玻璃纤维则表现为典型的脆性冲蚀行为。改变玻璃纤维/环氧的质量比,将直接导致复合材料的冲蚀率和侵蚀行为类型 (脆性或半塑性) 的不同,当玻璃纤维/环氧的比例小于 50/50 时,复合材料就会出现半塑性冲蚀行为。此外,复合材料中环氧基体的含量越高,冲蚀率越低,冲蚀过程主要由塑性环氧基体的冲蚀机理和特性所主导。

另外,在玻璃纤维增强环氧树脂的基础上,增加其他辅助填料是否能进一步提高复合材料的性能,也有学者进行了研究。Bagci 等^[26,27]研究了硼酸增强的两种纤维取向 (0°和 45°) 的玻璃纤维/环氧树脂复合材料,研究不同冲击速度与冲击角度下复合材料的抗冲蚀性能。结果表明,所有样品表现出与塑性材料相似的性质,在 30°冲击角下存在最大冲蚀率,硼酸增

强玻璃纤维/环氧树脂复合材料的硬度、拉伸强度、弹性模量和密度均降低,导致冲蚀损失率达到较高值,而无硼酸增强的玻璃纤维/环氧树脂复合材料由于较好的胶粘力,展现出较低的冲蚀率。如图2所示,在纤维取向上,45°纤维取向的复合材料比0°纤维取向的复合材料具有更好的抗磨损性能。这是由于当磨粒颗粒冲击磨损掉表层的基体后将会直接冲击在玻璃纤维上,0°纤维取向的材料会在纤维上形成较大的弯曲力矩,而45°取向的分成了法线分量和切线分量两部分,降低了直接作用于纤维的正向力,弯曲力矩较低,从而提高抗冲蚀性能。

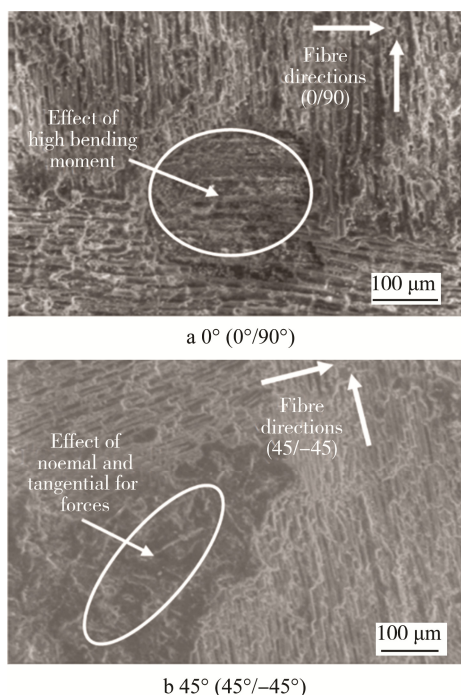


图2 不同纤维取向复合材料冲蚀后的形貌图^[26]
Fig.2 SEM images of composites with different fiber orientations: (a) 0°(0°/90°); (b) 45°(45°/-45°)^[26]

Srivastava 等^[28]研究了粒子、撞击角和粒子速度对玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的固体颗粒流冲蚀行为的影响。研究表明,在复合材料中加入小麦粉填料,降低了纤维增强环氧复合材料的硬度、抗拉强度和密度,当加入2 g小麦粉时,冲蚀磨损率最低,纤维基质的脱模量降低,具有较低的冲蚀率。无小麦粉填料的复合材料由于粘接强度较低而导致较高的冲蚀率。在60°的冲击角下,冲蚀率最大,表现为半塑性冲蚀磨损行为,并且冲蚀由微切削和微犁耕所引起。

由以上可得,以玻璃纤维为填料的环氧复合材料,具有较好的抗固体颗粒流冲蚀磨损性能,对于辅助类填料,有利于提高结合力,对抗冲蚀性能提升有利,反之,则无明显改善。因此,在玻璃纤维/环氧复合材料的应用中可以选择性添加辅助填料来提高性能。

1.2 碳纤维

碳纤维是发展迅速的一类特种纤维,具有比强度高、耐化学试剂、比模量高、体积小、耐高温、耐候性好等特性^[29]。其既具有碳材料的固有特性,又兼备纤维的柔软可加工性,具有优异的力学性能,近年来被广泛应用于航空航天、能源、化学化工、汽车交通、建筑器材等领域,是性能优越的战略性新型材料^[30,31]。

Cai 等^[32]对比了碳纤维/环氧复合材料和钛合金的抗固体颗粒流冲蚀行为。实验结果表明,碳纤维/环氧树脂复合材料表现出脆性冲蚀行为,在高冲击角下,纤维更易持续暴露于冲蚀环境中而导致变薄和剥离,由于纤维损失会导致缺陷产生,造成高质量损失,而钛合金则表现出塑性冲蚀模式。在15°冲击角下,碳纤维/环氧复合材料的冲蚀率是钛合金的1.5倍,在90°冲击角时,碳纤维/环氧复合材料的冲蚀率相对于钛合金增加到5倍。

Amkee Kim 等^[33]研究了以环氧树脂为基础,单向和多向的碳纤维层压复合材料的抗冲蚀行为,得出冲击角度对于复合材料冲蚀磨损的影响与塑性材料冲蚀行为相似,冲蚀率在冲蚀角度为15°~30°之间时达到最大值。对于单向复合材料,冲击角度为90°时,单向纤维90°复合材料的磨损率高于单向纤维45°和单向纤维0°复合材料,这是由于当冲击粒子以90°的冲击角撞击材料时,磨料粒子的全部冲击能垂直施加于90°取向的纤维上,动能耗散造成微观裂纹扩展,纤维断裂和破碎纤维的去除过程是赋予材料抗冲蚀性能的重要因素,对于多向纤维复合材料,冲蚀角度对于冲蚀磨损率的影响差别不大。

Zhang 等^[34,35]通过真空辅助树脂变换成型工艺,使用碳纳米纤维纸包覆碳纤维/环氧树脂复合涂层,该复合涂层的纳米结构使其具有高强机械性能,比传统碳纤维/环氧树脂复合涂层展现出更优异的抗冲蚀性能。他们还以碳纳米纤维纸作为增强相来提高玻璃纤维/环氧树脂复合涂层的抗冲蚀性能,结果表明该复合涂层展现出较高的抗冲蚀性能。

虽然无机纤维填料改性会在一定程度上增强环氧树脂抗冲蚀性能,但是玻璃纤维和碳纤维的加入都会导致环氧树脂性脆、易碎、耐磨性相对较差,材料的韧性下降,因此,无机纤维在环氧树脂中应用有待采用新的改性方法,以进一步提高性能。并且此类材料通常是很难回收的,由于高成本,回收利用也是不现实的,无机纤维增强聚合物材料不会自然分解,要么被自然堆弃,要么焚烧,存在许多不可忽视的问题。

2 天然纤维

当前,环境保护与能源资源节约的意识不断提

高, 激励全球范围内的研究人员从节能、低耗、可持续的研究思路出发, 使用天然纤维来替代合成纤维是一种新选择。天然纤维的主要优势是低成本、可再生、生物降解性、低比重、储量丰富、高比强度和刚度等^[36]。并且, 天然纤维增强聚合物复合材料具有独特的性能, 如低密度、低成本、高强度、环境友好等^[37]。天然纤维增强聚合物具有良好的发展潜力, 甚至可以在现有的无机纤维应用领域中占据一席之地。目前已有不少研究人员的重点从合成纤维转向天然纤维增强聚合物复合材料, 并且这些复合材料在航空航天应用领域被广泛接纳, 正朝着摩擦磨损应用的方向发展^[38]。

天然纤维中较有潜力的包括纤维素、甘蔗纤维、黄麻纤维、竹纤维、菠萝纤维、椰壳纤维等^[39,40], 它们凭借其优异的特性作为聚合物中的强化纤维, 得到了广泛关注, 已有研究者对天然纤维-环氧树脂复合材料进行了冲蚀性能研究^[41,42]。

竹子是亚洲和南美洲丰富的自然资源, 它的高强度来源于在其体内纵向排列的纤维, 竹纤维通常被称为“天然的玻璃纤维”, 具有优越的力学性能。Gupta 等^[43]用竹纤维改性环氧树脂, 研究了不同含量 (0%、10%、20%、30%、40%) 竹纤维填充环氧树脂的机械性能和不同实验条件 (冲蚀角度、冲蚀速度、磨粒尺寸) 下的冲蚀磨损性能。结果表明, 竹纤维的加入显著提高了环氧树脂的抗冲蚀性能, 且随着竹纤维含量的提高, 环氧树脂的硬度从 24.5HV 增加到 37HV, 抗拉强度在竹纤维含量 40% 时达到最大值, 抗弯强度和层间剪切强度在竹纤维含量 20% 时最高, 冲击强度在竹纤维含量 0~20% 内呈线性增加, 在竹纤维含量高于 20% 后趋于平缓增加。

Vivek 等^[44]在环氧树脂中加入短黄麻纤维制备复合涂层, 研究其抗冲蚀性能。结果表明, 短黄麻纤维的加入可以提高环氧树脂的抗冲蚀性能, 随着黄麻纤维含量的增加, 材料的机械性能提高, 材料硬度逐渐增大, 抗拉强度在纤维含量为 40% 时达到最大, 抗弯强度在纤维含量为 20% 时最高。主要原因是纤维与树脂结合较好, 使材料具有较低的孔隙率, 从而提高环氧树脂的整体性能。

Mishra 等^[45]研究了撞击角和粒子速度对蔗渣纤维增强环氧复合材料的固体颗粒流冲蚀行为, 在 30° 到 90° 的不同撞击角度分别以 48、70、82 和 109 m/s 的速度冲蚀复合材料, 并对冲蚀磨损程度进行了评估。结果表明, 该复合材料在 90° 冲击角下冲蚀率最大, 表现为典型的脆性冲蚀特征, 纤维体积分数对复合材料的侵蚀率有重要影响, 复合材料整体冲蚀破坏包括表层环氧树脂基体的去除和发生于纤维-树脂胶黏界面处的纤维的断裂破坏。

天然纤维的加入可以提高环氧树脂的抗冲蚀性

能, 然而, 天然纤维对环境敏感且耐湿性相对较差, 降低了纤维复合材料的强度, 这些不利条件限制了纤维的应用^[46]。故对天然纤维材料的进一步处理, 改性纤维表面, 增加纤维与环氧基质的结合力, 从而进一步提高其性能, 对于纤维强化聚合物的研究具有重大意义。

3 混合纤维

无机纤维与自然纤维具有各自的优缺点: 无机纤维力学性能好, 化学稳定性好, 但是成本高、能耗高; 自然纤维节能、低耗, 但对热和吸湿负荷非常敏感, 造成有限的机械性能^[47]。如今, 人们对于多种不同类型的纤维组成混合复合材料的兴趣越来越浓厚, 将两种纤维材料共同改性环氧树脂, 组成一个多相系统的冲蚀特性。混和纤维赋予材料的特性是单一类型的纤维强化所达不到的, 从而表现出新的特性或性能, 进一步提高单一纤维改性树脂所达不到的层间韧性和高比强机械性能, 充分利用纤维的优势兼并经济性, 目前也有学者对此进行了研究。

Mehmet 等^[48]研究了单向碳纤维和多向玻璃纤维/环氧树脂层压复合材料中纤维取向对抗冲蚀性能的影响。实验结果显示, 在 30° 的冲击角下, 所有不同取向的纤维/环氧树脂层压材料都表现出最高的冲蚀率, 如图 3 和图 4 所示。多向玻璃纤维/环氧树脂材料表面变形情况要好于单向碳纤维/环氧树脂材料, 且 0° 取向的单向碳纤维和 0°/-90°/0° 取向的多向玻璃纤维具有最好的抗冲蚀磨损性能。

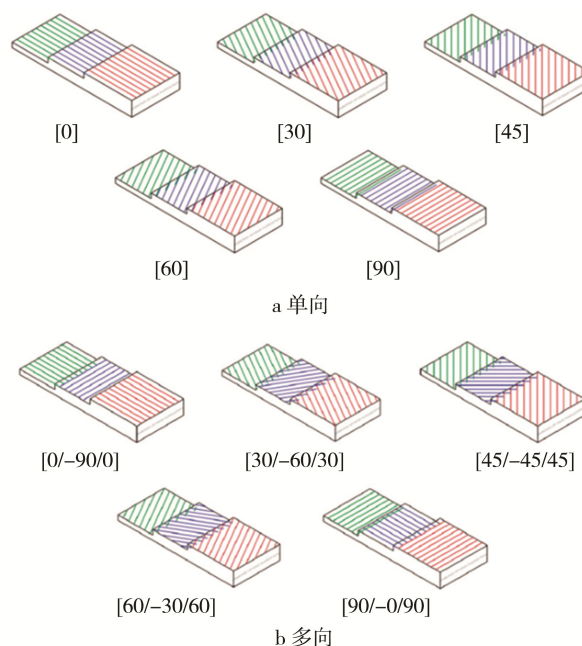


图 3 试样的纤维取向

Fig.3 Fiber orientations of specimen: (a) unidirectional, (b) multidirectional

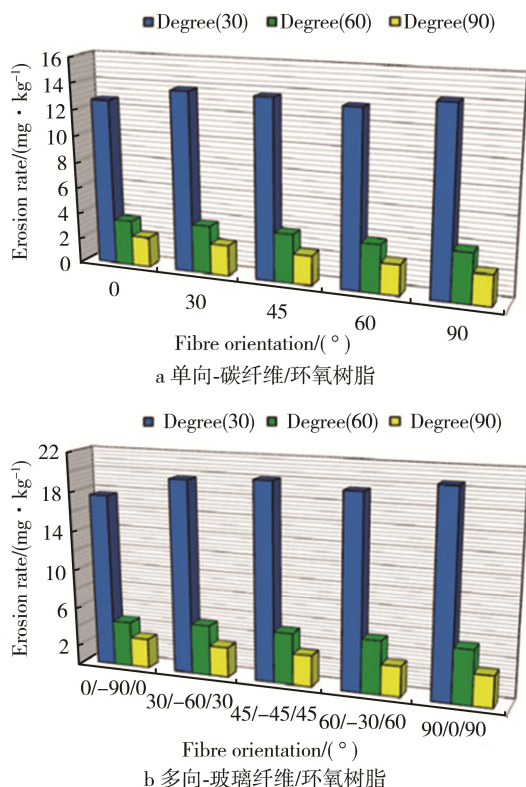


图4 试样在 30°, 60°和 90°的冲击角度下纤维取向和冲蚀速度的变化^[48]

Fig.4 Variations of fiber orientation and erosion rate at 30°, 60°, and 90° impact angle of specimen: (a) unidirectional carbon fiber-epoxy resin; (b) multidirectional-carbon fiber-epoxy resin^[48]

Dalbehera 等^[49]将 0°/90°编织角的玻璃纤维织物、45°/-45°编织角的黄麻纤维织物与环氧树脂制备层叠复合材料, 并进行试验。结果表明, 黄麻纤维、玻璃纤维与环氧树脂之间有良好的界面粘附力, 玻璃纤维和黄麻纤维的混织能显著提高抗冲蚀性能, 堆叠顺序为外层两层玻璃纤维、中间两层黄麻纤维的复合材料有最低的冲蚀磨损率。冲蚀引起材料的去除主要是微切削和微犁耕, 关于冲蚀角度对于复合材料抗冲蚀性能的影响, 所有实验材料均表现为半塑性行为, 在 45°~60°具有最大的冲蚀磨损率。

Biswas 等^[50]制备了混合竹纤维、玻璃纤维增强的环氧复合材料, 经过冲蚀磨损实验得出, 纯环氧树脂表现为最大冲蚀率, 15%竹纤维、玻璃纤维/环氧复合材料的冲蚀率最低。若不考虑纤维的加载, 只考虑冲击角度对于冲蚀性能的影响, 则纤维混合复合材料在 60°的冲击角下均表现为最大的冲蚀率, 既不是塑性冲蚀磨损, 也不是脆性冲蚀磨损, 呈现为半脆性的冲蚀磨损特征。

混合纤维/环氧复合材料展现出较高的耐冲蚀性能, 并且充分利用不同纤维的优势, 协同互补, 表现出比单一纤维填料更优异的性能, 值得更进一步的研究应用。

由上可得, 就耐冲蚀性能来说, 目前可用的纤维增强聚合物的表现与金属材料和弹性体相比仍不具有太多优势。由于非均匀性和各向异性, 复合材料的固体颗粒流冲蚀行为比金属更复杂, 在复合材料中加入适量的玻璃纤维可以提高弹性模量和极限抗拉强度, 与纯环氧树脂相比, 脆性纤维的加入会改变其冲蚀磨损机制, 从而提高其抗冲蚀性能。另外, 对比无机纤维与有机纤维增强环氧复合材料, 其性能也表现出较大差异。Sandhyarani 等^[51]用不同百分含量的红泥分别填充竹纤维/环氧树脂和玻璃纤维/环氧树脂复合材料, 在相同的条件下进行冲蚀磨损测试。实验结果表明, 竹纤维/环氧树脂复合材料的机械性能(抗张强度、拉伸模量、抗弯强度冲击强度和层间剪切力)要低于玻璃纤维/环氧树脂复合材料, 但显微硬度、耐冲蚀磨损性能均高于玻璃纤维/环氧树脂复合材料, 抗冲蚀性能也显著提高。故要提高纤维增强聚合物的性能, 仍需要改进。增强环氧树脂韧性、降低孔隙、减少缺陷、使纤维在环氧树脂中均匀分散且与基体界面结合牢固等, 这均是使纤维增强环氧性能提升的关键。

4 结语

纤维改性环氧树脂复合材料表现出较好的抗固体颗粒流冲蚀磨损性能, 这对于环氧树脂性能的提升具有重大意义。通过对纤维增强环氧树脂复合材料的改性方法与机理的总结分析, 下一步研究应重点关注:

1) 目前研究重点集中于纤维改性环氧复合材料冲蚀反应及其主要作用机理, 讨论影响参数(冲蚀角度、冲蚀速度、纤维含量、纤维取向等)下的冲蚀性能趋势, 由于变量较多, 造成许多特定参数有待完善, 有待进一步系统研究。

2) 对于纤维增强聚合物, 对于冲蚀性能影响较大的是纤维与环氧的结合强度, 通过改性提高纤维与环氧的结合力也是一个重要切入点。

3) 新型低耗、环保、绿色健康纤维材料的开发与应用, 对于纤维增强环氧树脂的发展十分重要, 应积极研发并勇于尝试。

参考文献:

- [1] AGLAN H, CHENOCK T. Erosion Damage Features of Polyimide Thermoset Composites[J]. Sampe Quarterly, 1993, 24(2): 41-47.
- [2] BARKOULA N M, KARGER-KOCSIS J. Review Processes and Influencing Parameters of the Solid Particle Erosion of Polymers and Their Composites[J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(18): 3807-3820.

- [3] KULKARNI S. Influence of Matrix Modification on the Solid Particle Erosion of Glass/Epoxy Composites[J]. *Polymers & Polymer Composites*, 2001, 9(1): 25-30.
- [4] CLERICO M. Erosion of Polymers and Polymeric Composites[J]. *ANNALS*, 2003, 24: 26.
- [5] PATNAIK A, SATAPATHY A, CHAND N, et al. Solid Particle Erosion Wear Characteristics of Fiber and Particulate Filled Polymer Composites: A Review[J]. *Wear*, 2010, 268(1/2): 249-263.
- [6] FOUAD Y, EL-MENIAWI M, AFIFI A. Erosion Behaviour of Epoxy Based Unidirectional (GFRP) Composite Materials[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2011, 50(1): 29-34.
- [7] TILLY G. Sand Erosion of Metals and Plastics: A Brief Review[J]. *Wear*, 1969, 14(4): 241-248.
- [8] CLERICO M. Erosion of Polymers and Polymeric Composites[J]. *Annals*, 2003, 24: 26.
- [9] RUFF A W, IVES L K. Measurement of Solid Particle Velocity in Erosive Wear[J]. *Wear*, 1975, 35(1): 195-199.
- [10] DALILI N, EDRISY A, CARRIVEAU R. A Review of Surface Engineering Issues Critical to Wind Turbine Performance[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(2): 428-438.
- [11] BIJWE J, INDUMATHI J, RAJESH J J, et al. Friction and Wear Behavior of Polyetherimide Composites in Various Wear Modes[J]. *Wear*, 2001, 249(8): 715-726.
- [12] BARKOULA N M, PAPANICOLAOU G C, KARGER-KOCSIS J. Prediction of the Residual Tensile Strengths of Carbon-Fiber/Epoxy Laminates with and without Interleaves after Solid Particle Erosion[J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62(1): 121-130.
- [13] STACHOWIAK G W, BATCHELOR A W. 11—Abrasive, Erosive and Cavitation Wear[J]. *Engineering Tribology*, 2006: 501-551.
- [14] STACHOWIAK G W, BATCHELOR A W. *Engineering Tribology*[M]. Holland: Elsevier, 1993.
- [15] ROY M, VISHWANATHAN B, SUNDARARAJAN G. The Solid Particle Erosion of Polymer Matrix Composites[J]. *Wear*, 1994, 171(1/2): 149-161.
- [16] ELLIS M B. *Chemistry and Technology of Epoxy Resins*[M]. Berlin: Springer Netherlands, 1993.
- [17] BARKOULA N M, KARGER-KOCSIS J. Solid Particle Erosion of Unidirectional GF Reinforced EP Composites with Different Fiber/Matrix Adhesion[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2002, 21(15): 1377-1388.
- [18] ZHANG H, ZHANG Z, FRIEDRICH K. Effect of Fiber Length on the Wear Resistance of Short Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(2): 222-230.
- [19] TEWARI U S, HARSHA A P, HÄGER A M, et al. Solid Particle Erosion of Carbon Fibre- and Glass Fibre-Epoxy Composites[J]. *Composites Science & Technology*, 2003, 63(3/4): 549-557.
- [20] BARRÉ S, BENZEGGAGH M L. On the Use of Acoustic Emission to Investigate Damage Mechanisms in Glass-fibre-reinforced Polypropylene[J]. *Ndt & E International*, 1997, 52(3): 369-376.
- [21] GARRETT K, BAILEY J. Multiple Transverse Fracture in 90 Cross-Ply Laminates of a Glass Fibre-reinforced Polyester[J]. *Journal of Materials Science*, 1977, 12(1): 157-168.
- [22] 张磊, 孙清, 王虎长. E 玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料力学性能试验研究[J]. *电力建设*, 2010, 31(9): 118-121.
- ZHANG Lei, SUN Qing, WANG Hu-chang. Experimental Study on the Mechanical Properties of E-glass Fiber/Epoxy Composite Material[J]. *Electric Power Construction*, 2010, 31(9): 118-121.
- [23] 姜秉元. 玻璃纤维/环氧树脂复合材料的粒子冲击磨损研究[J]. *复合材料学报*, 1993, 10(4): 85-89.
- JIANG Bing-yuan. Study of Solid Particle Erosion in Glass Fiber/Epoxy Composite Materials[J]. *Acta Materialiae Composite Sinica*, 1993, 10(4): 85-89.
- [24] BISWAS S, DEO B, PATNAIK A, et al. Effect of Fiber Loading and Orientation on Mechanical and Erosion Wear Behaviors of Glass-Epoxy Composites[J]. *Polymer Composites*, 2011, 32(4): 665-674.
- [25] BALLOUT Y A, HOVIS S K, TALIA J E. Erosion in Glass-fiber Reinforced Epoxy Composite[J]. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1990, 24(1): 195-200.
- [26] BAGCI M, IMREK H. Solid Particle Erosion Behaviour of Glass Fibre Reinforced Boric Acid Filled Epoxy Resin Composites[J]. *Tribology International*, 2011, 44(12): 1704-1710.
- [27] BAGCI M, IMREK H. Application of Taguchi Method on Optimization of Testing Parameters for Erosion of Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite Materials[J]. *Materials & Design*, 2013, 46: 706-712.
- [28] SRIVASTAVA V. Effects of Wheat Starch on Erosive Wear of E-glass Fibre Reinforced Epoxy Resin Composite Materials[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 435(11): 282-287.
- [29] 张新元, 何碧霞, 李建利, 等. 高性能碳纤维的性能及其应用[J]. *棉纺织技术*, 2011, 39(4): 65-68.
- ZHNAG Xin-yuan, HE Bi-xia, LI Jian-li, et al. Property and Application of High Performance Carbon Fiber[J]. *Cotton Textile Technology*, 2011, 39(4): 65-68.
- [30] 刘保英, 王孝军, 杨杰, 等. 碳纤维表面改性研究进展[J]. *化学研究*, 2015, 26(2): 111-120.
- LIU Bao-ying, WANG Xiao-jun, YANG Jie, et al. Research Progress of Surface Modification of Carbon Fiber[J]. *Chemical Research*, 2015, 26(2): 111-120.
- [31] 张娜, 龙春光, 何宏燕, 等. 碳纳米纤维纸-玻纤/环氧复合材料对风力发电叶片的影响[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(1): 90-95.
- ZHANG Na, LONG Chun-guang, HE Hong-yan, et al. Effect of Carbon Nano-Fiber Paper-Glass Fiber/Epoxy

- Composite Used for Wind Turbineblade[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(1): 90-95.
- [32] CAI F, GAO F, PANT S, et al. Solid Particle Erosion Behaviors of Carbon-fiber Epoxy Composite and Pure Titanium[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 25(1): 290-296.
- [33] KIM A, KIM I. Solid Particle Erosion of CFRP Composite with Different Laminate Orientations[J]. *Wear*, 2009, 267(11): 1922-1926.
- [34] ZHANG N, YANG F, GUERRA D, et al. Enhancing Particle Erosion Resistance of Glass-reinforced Polymeric Composites Using Carbon Nanofiber-based Nanopaper Coatings[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 129(4): 1875-1881.
- [35] ZHANG N, YANG F, SHEN C, et al. Particle Erosion on Carbon Nanofiber Paper Coated Carbon Fiber/Epoxy Composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 54: 209-214.
- [36] BISWAS S, SATAPATHY A. An Assessment of Erosion Wear Response of SiC Filled Epoxy Composites Reinforced with Glass and Bamboo Fibers[J]. *International Polymer Processing*, 2010, 25(3): 205-222.
- [37] BISWAS S. Erosion Wear Behaviour of Copper Slag Filled Short Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composites[J]. *International Journal of Engineering and Technology*, 2014, 6(2): 91-94.
- [38] MISHRA P, ACHARYA S K. Anisotropy Abrasive Wear Behavior of Bagasse Fiber Reinforced Polymer Composite[J]. *International Journal of Engineering Science & Technology*, 2011, 2(11): 1839-1846.
- [39] KARUPPUSAMY K, RAMANAICKER P, SOMASUNDARAM V. Investigation of the Mechanical Properties of Bagasse Fiber-reinforced Epoxy Composite Using Taguchi and Response Surface Methodology [J]. *Bioresources*, 2015, 10(2): 3749-3756.
- [40] 郑融, 洗杏娟, 叶颖薇, 等. 黄麻纤维/环氧复合材料及其性能分析[J]. *复合材料学报*, 1995, 12(1): 18-25.
- ZHENG Rong, XIAN Xing-juan, YE Ying-wei, et al. Analysis and Properties of Jute/Epoxy Composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1995, 12(1): 18-25.
- [41] OKUBO K, FUJII T, YAMAMOTO Y. Development of Bamboo-based Polymer Composites and Their Mechanical Properties[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2004, 35(3): 377-383.
- [42] RANA A K, MITRA B C, BANERJEE A N. Short Jute Fiber-reinforced Polypropylene Composites: Dynamic Mechanical Study[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1999, 71(4): 531-539.
- [43] GUPTA A, KUMAR A, PATNAIK A, et al. Effect of Different Parameters on Mechanical and Erosion Wear Behavior of Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composites[J]. *International Journal of Polymer Science*, 2011, 2011(7): 609-618.
- [44] MISHRA V, BISWAS S. Three-body Abrasive Wear Behavior of Short Jute Fiber Reinforced Epoxy Composites[J]. *Polymer Composites*, 2016, 37(1): 270-278.
- [45] MISHRA P, ACHARYA S K. Solid Particle Erosion of Bagasse Fiber Reinforced Epoxy Composite[J]. *International Journal of Physical Sciences*, 2009, 5(2): 109-115.
- [46] CHEN X, GUO Q, MI Y. Bamboo Fiber-reinforced Polypropylene Composites: A Study of the Mechanical Properties[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1998, 69(10): 1891-1899.
- [47] SAI N V, KISHORE P N, KUMAR C H P. Investigation on Dynamic Behaviour of Hybrid Sisal/Bagasse Fiber Reinforced Epoxy Composites[J]. *Int J Innov Res Adv Eng*, 2014, 1: 357-360.
- [48] BAGCI M. Influence of Fiber Orientation on Solid Particle Erosion of Uni/Multidirectional Carbon Fiber/Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2017, 231(5): 594-603.
- [49] DALBEHERA S, ACHARYA S K. Impact of Stacking Sequence on Tribological Wear Performance of Woven Jute-Glass Hybrid Epoxy Composites[J]. *Tribology-Materials Surfaces & Interfaces*, 2016, 9(4): 196-201.
- [50] BISWAS S, XESS P A. Erosion Wear Behaviour of Bamboo/Glass Fiber Reinforced Epoxy Based Hybrid Composites[J]. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2012, 1(4): 79-83.
- [51] BISWAS S, SATAPATHY A. A Comparative Study on Erosion Characteristics of Red Mud Filled Bamboo-Epoxy and Glass-Epoxy Composites[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(4): 1752-1767.