

DOI: 10.16078/j.tribology.2019143

# 攻角对聚醚醚酮/泡沫镍双连续复合材料 料浆冲蚀行为的影响

杨晓光<sup>1,2</sup>, 姜胜利<sup>2</sup>, 张 雪<sup>2</sup>, 段德莉<sup>2\*</sup>, 李 曙<sup>2</sup>, 张会臣<sup>1</sup>

(1. 大连海事大学, 辽宁 大连 116026;

2. 中国科学院 金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:** 聚醚醚酮(PEEK)/泡沫镍双连续复合材料是一种新型复合材料, 它是由比强度高的PEEK树脂(基体相)和韧性较高的泡沫镍(增强相)牢固结合而成, 具有两相相互连通、拓扑连续和各向同性等特点。使用孔径为100 PPI(每英寸孔隙数目)的泡沫镍与PEEK树脂混合, 采用热压成型技术制备了PEEK/泡沫镍双连续复合材料(PEEK-Ni)。利用喷射式腐蚀冲蚀试验设备研究了纯PEEK树脂、金属镍和PEEK-Ni在5个攻角下( $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 和 $90^\circ$ )的料浆冲蚀行为。使用ANSYS Fluent有限元仿真软件对不同攻角下料浆的冲蚀过程进行建模和仿真, 并设置了边界条件。试验和仿真的结果均表明: 随着攻角增加, 冲蚀损伤形貌由月牙形损伤区域变为U型损伤区域, 并最终发展成为围绕驻点的环形损伤区域, 试验和仿真能相互吻合。由于泡沫镍具有遮挡效应和协同效应, PEEK-Ni比纯PEEK具有更低的冲蚀损伤量, 且对攻角不敏感。

**关键词:** 料浆冲蚀; 攻角; 仿真; 聚醚醚酮; 双连续复合材料; 损伤机理

中图分类号: TB333

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)06-0766-11

## The Influence of Impact Angle on Erosion Behavior of PEEK/Ni Foam Co-continuous Composite

YANG Xiaoguang<sup>1,2</sup>, JIANG Shengli<sup>2</sup>, ZHANG Xue<sup>2</sup>, DUAN Deli<sup>2\*</sup>, LI Shu<sup>2</sup>, ZHANG Huichen<sup>1</sup>

(1. Dalian Maritime University, Liaoning Dalian, 116026

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Liaoning Shenyang 110016, China)

**Abstract:** Polyether-ether-ether -ketone (PEEK)/Nickel co-continuous composites (“PEEK-Ni” for short) is a type of new structure composites. This material is composed of PEEK polymer with high specific strength (matrix phase) and nickel foam with high toughness (reinforcement phase), which has the characteristics of two-phase interconnection, topological continuity and isotropy. Hot pressing technology was used to obtain the PEEK-Ni by infiltrated the melt PEEK polymer into the nickel foam of 100 PPI (pores per inch). The slurry erosion behavior of pure PEEK resin, pure nickel and PEEK-Ni at 5 different impact angles ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  and  $90^\circ$ ) was investigated by slurry jet erosion test apparatus. The slurry erosion process with different impact angles was modeled and simulated by using ANSYS Fluent finite element simulation software, and the boundary conditions were set. The results showed that, with the increase of impact angle, the damage area changed from crescent-shaped to U-shaped, and finally it develop into the annular damage area around the stagnation point. The simulation results agreed well with the slurry erosion experiment. Due to the shielding effect and synergistic effect of nickel foam, PEEK-Ni has exhibited lower erosion damage than pure PEEK, and the slurry erosion damage of PEEK-Ni was not sensitive to the impact angle.

**Key words:** slurry erosion; impact angle; simulation; PEEK; Co-continuous phase composite; damage mechanism

Received 29 July 2019, revised 9 October 2019, accepted 14 October 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. E-mail: dundl@imr.ac.cn, Tel: +86-24-23971775.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51275506, 51801207).

国家自然科学基金项目(51275506, 51801207)资助。

双连续相复合材料(又被称为互穿相复合材料)是一种新型的具有三维网络增强结构的复合材料, 其基体相与增强相均在三维空间内各自连续分布, 并以拓扑贯穿的形式连通整个结构<sup>[1-3]</sup>。与颗粒或纤维增强复合材料相比, 双连续相复合材料还具有各项同性、利于分散和传递应力等优点, 即便将材料中的某一相从结构中去除, 另一种材料仍能保持完整的连续结构, 最值得关注的是, 两种材料均能在双连续相复合材料中表现出各自独特的性质。美国科学家David R Clarke<sup>[4]</sup>于1992年首先提出双连续相复合材料的概念, 并引起了各国学者的广泛关注。目前, 经过20多年的发展和研究, 双连续相复合材料已逐渐成为一个独立的复合材料体系。

冲蚀磨损是液体或固体以松散颗粒形式按一定速度和角度对材料表面进行冲击所造成的一种材料磨损现象, 其广泛存在于机械、冶金、能源、建材和航空等诸多领域中, 是引起材料破坏或设备失效的重要原因之一<sup>[5]</sup>。目前, 这些设备中常使用单一材料制作耐冲蚀部件, 如喷砂设备中使用陶瓷材料制作喷嘴<sup>[6]</sup>, 湿法冶金中使用金属材料制作搅拌釜, 在制药行业中常使用高分子材料制作反应釜中的搅拌器等。然而无论是金属、陶瓷还是树脂, 均不能在复杂的应用环境中提供足够的抗冲蚀能力<sup>[7]</sup>, 因此, 有学者提出通过多种类材料复合的方法解决材料的冲蚀磨损问题。吕广超等<sup>[8]</sup>制备了玻璃纤维/环氧树脂复合材料(GF/EP)并研究了其耐冲蚀行为, 结果表明: 纯EP的耐固体粒子冲蚀磨损性能远优于GF/EP复合材料, 这是由于复合材料中添加了大量脆性的玻璃纤维, 颗粒的冲击过程会使纤维提前出现破碎和断裂, 从而加剧了材料的流失。蔺文峰<sup>[9]</sup>使用纳米级别的CaCO<sub>3</sub>颗粒对聚氨酯(PU)进行改性, 冲蚀试验证明当CaCO<sub>3</sub>颗粒质量分数超过1%后, 复合材料的冲蚀性能急剧下降, 这是由于复合材料在制备的过程中, 纳米CaCO<sub>3</sub>颗粒容易发生团聚, 在冲蚀过程中颗粒大面积从基体中脱出, 最终导致材料的急剧流失。可见使用颗粒或纤维等对基体进行改性, 结果并不理想。

冲蚀磨损具有复杂的作用机制, 有限元方法可以模拟颗粒的冲击以及液流状态等。杜明超等<sup>[10]</sup>借助ABAQUS软件, 使用FEM-SPH耦合的方法模拟了单个硬质菱形颗粒冲击靶面的过程, 研究了颗粒在冲蚀过程中对靶材的作用机制。郑思佳等<sup>[11]</sup>使用CFD的方法, 模拟了输气管路弯头内壁面受喷砂冲蚀的过程, 并结合试验结果对传统冲蚀模型进行了适当修正。然

而, 采用有限元方法模拟射流冲蚀过程的研究鲜有报道, 此类模拟工作, 可以为材料的冲蚀机理研究提供必要的理论依据。

料浆冲蚀工况与喷砂冲蚀不同, 料浆中的液流载体会对靶材产生腐蚀作用, 使靶材的耐磨性能发生严重退化<sup>[12-13]</sup>。据研究, 在喷砂冲蚀中造成材料的质量流失的速度阈值大约在10 m/s, 而料浆冲蚀在10 m/s的流速下可以使材料出现明显的损伤, 可见料浆冲蚀与喷砂冲蚀对材料的作用机制和规律完全不同<sup>[14]</sup>。

综上所述, 为进一步提高复合材料耐冲蚀性能, 本文作者选用耐温性好, 强度高的PEEK树脂作为基材, 使用热压成型技术制备了聚醚醚酮/泡沫镍双连续相复合材料(PEEK-Ni)。利用自制喷射式冲刷腐蚀试验装置, 研究PEEK-Ni、PEEK及镍在5个攻角下(30°、45°、60°、75°和90°)的耐料浆冲蚀行为。随后, 使用ANSYS Fluent软件对试验工况进行了模拟, 对料浆中的颗粒速度分布等参数进行了分析, 探索了材料在不同攻角下的损伤机理。

## 1 试验部分

### 1.1 试验材料及制备

作为PEEK-Ni的原材料, 本文中所使用到的PEEK粉末由长春吉大特塑工程研究有限公司提供, PEEK粉末原料牌号为085P, 该粉末粒度分布在30~80 μm之间; 泡沫镍由吉林卓尔新型材料有限公司提供, 选取孔径为100PPI的泡沫镍作为PEEK-Ni的增强体(骨架), 用于改善PEEK树脂的耐料浆冲蚀能力, 该泡沫镍骨架为正十二面体结构, 其结构示意图和微观形貌如图1所示, 泡沫镍详细参数列于表1中。

PEEK-Ni使用高温模压法制备<sup>[15]</sup>, 该方法首先需要对PEEK粉末施加不超过50 MPa的压力, 使粉末压实以减少粉末内部空气, 随后将压实的PEEK块体放在泡沫镍骨架上方; 使用高温炉将模具整体加热至380 °C并保温10 min, 缓慢施加不超过2 MPa的压力使熔融的PEEK树脂完全、充分地浸入泡沫镍骨架之中; 最后将模具降温至120 °C并保温40 min以保证PEEK的结晶程度, 使复合材料具有较好的综合力学性能。

### 1.2 试验方法

料浆冲蚀试验在自制的喷射式冲刷腐蚀试验装置中进行, 图2(a)为该装置的照片, 图2(b)为其结构示意图。该装置可模拟料浆冲蚀射流工况, 用于考察材料的耐料浆冲蚀性能。冲刷腐蚀试验装置主要由四部分组成, 分别是电控系统、循环系统、加速系统以及射

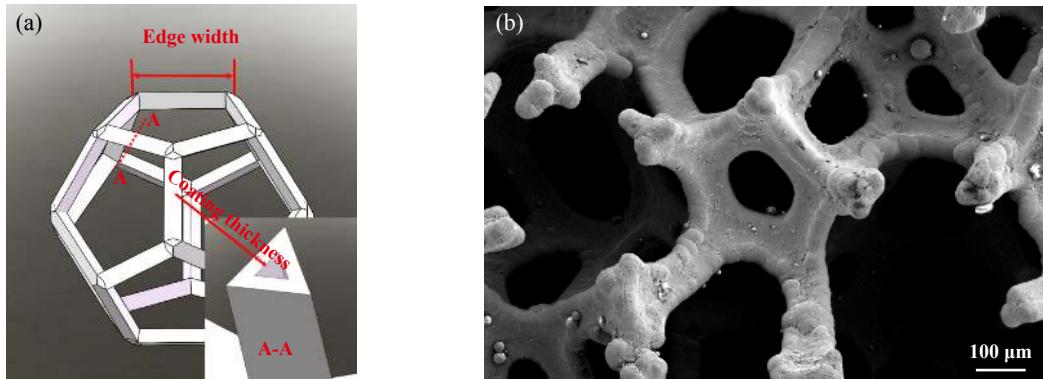


Fig. 1 The structure sketches (a) and microstructure (b) of the Ni foam

图1 泡沫镍结构示意图(a)及其微观形貌(b)

表1 泡沫镍规格参数

Table 1 Parameters of the nickel foam

Sample	Pores per inch(PPI)	Volume density/(g/cm <sup>3</sup> )	Coating thickness/μm	Edge width/μm
Nickel foam	100	0.214	11	100

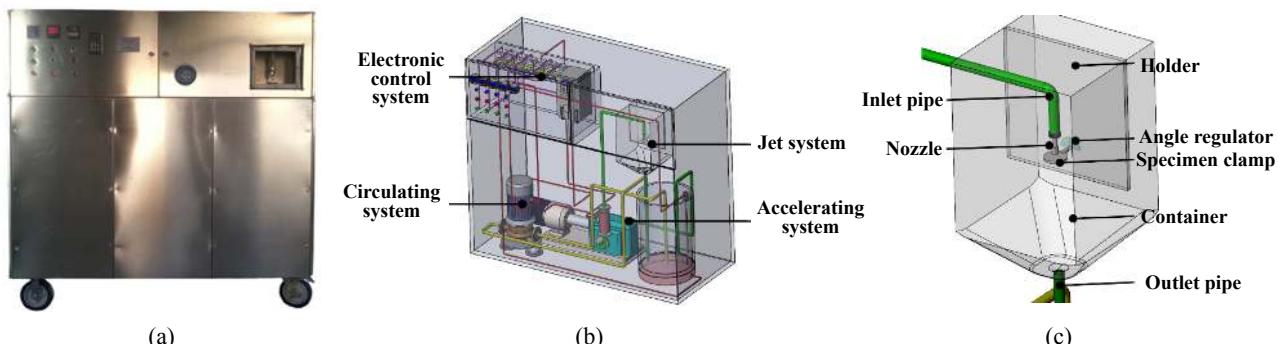


Fig. 2 Self-made slurry impinging jet apparatus (a) Photograph of the apparatus (b) Structure diagram of the apparatus and (c) Schematic diagram of the jet system

图2 自行研制的冲刷腐蚀试验装置(a)装置照片(b)装置结构示意图及(c)射流系统示意图

流系统。料浆经循环系统混合均匀后，由循环泵加速至所需流速，试验过程中的时间、温度和流速等参数均可以通过电控系统进行调整和控制。**图2(c)**为射流系统示意图，料浆流经喷嘴喷出后冲击至样品平台，试验的攻角可通过平台后方角度调节仪进行调整，冲击后的料浆流经容器短暂收集后回流至料浆罐。试验过程中样品与喷嘴均处于空气当中，为非浸没式冲刷试验。

将蒸馏水与质量分数为4%的石英砂混合配成冲蚀料浆，料浆中的石英砂粒径约为53 μm(275目)；喷嘴直径为2 mm；喷嘴中心到靶材表面的距离为5 mm；试验过程中料浆的冲蚀速度为30 m/s，该速度由数字流量控制器精确控制；料浆的冲击角度为液流与靶材所成的最小夹角( $\phi$ )，试验中选取30°、45°、60°、75°和90°作为料浆冲蚀的攻角，冲蚀时间设置为2 h；进行冲蚀试验的样品(靶材)尺寸为Φ12.5 mm×5 mm，每组试

验均重复2次以上以减小数据误差。

试验前，样品采用最高800#砂纸进行打磨，随后依次使用蒸馏水、酒精和石油醚等在超声波清洗器中对样品进行清洗，最后置于150 °C真空条件下烘干2 h以去除复合材料中的水分及其他杂质，使用排水法测量样品的室温体积；试验后使用同样方法对样品进行清洗和测量，试验前后体积差作为材料的体积损失量，本文作者据此评价材料的耐料浆冲蚀性能。

冲蚀试验结束后，使用基恩士VR-3200三维轮廓测量仪观察PEEK-Ni损伤表面形貌；采用电子扫描显微镜(SEM)观察样品损伤区域的微观形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料的冲蚀行为

在不同攻角下测试PEEK-Ni、PEEK树脂以及金

属镍的耐料浆冲蚀性能, 其结果如图3所示。从冲蚀体积损失量随攻角变化的曲线中可以观察到, PEEK树脂的损失量随攻角先增大后降低, PEEK树脂的最大损失量出现在75°攻角下; 而PEEK-Ni的冲蚀损失量随攻角略有增加, 最终在75°~90°间出现峰值, 任何攻角下其损失量均低于PEEK树脂。该结果与PEEK复合材料的喷砂冲蚀结果相差较大<sup>[16]</sup>, 这是由于二者损伤机理不同所致<sup>[17]</sup>。金属镍具有更优的韧性和强度, 其耐冲蚀性能要优于PEEK-Ni和PEEK树脂。金属镍的冲蚀损失量随攻角变化不明显, 峰值分别位于30°和75°攻角下, 90°攻角下损失量最小。

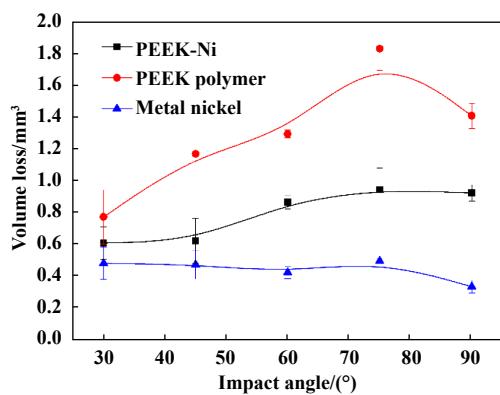


Fig. 3 The relationship between volume loss and impingement angle

图3 攻角-体积损失关系曲线图

图4为不同攻角下材料表面的宏观损伤形貌, 除90°攻角外, 在其他各攻角下料浆的冲蚀方向均为由下至上。

三种材料在相同攻角下均表现出极为相似的损伤形貌, 由于PEEK树脂与金属镍为均质材料, 其冲蚀形貌更具代表性。从图4中可以观察到, 三种材料无论攻角如何, 均出现了一处损伤较小的区域, 该区域为驻点区域, 以金属镍的损伤形貌为例, 图中标记的位置即为驻点区域的位置。在攻角为90°时, 驻点区域为圆形, 位于料浆冲击点(射流中心)正下方, 随着攻角的降低, 驻点区域不断被压缩, 面积逐渐缩小并远离料浆冲击点。

单纯观察材料的损伤区域形状, 在30°和45°攻角下, 材料表面展现出月牙形的损伤区域, 不同的是, 30°攻角月牙处的损伤较为严重; 60°攻角下, 损伤区域变为U形; 当攻角超过75°后, 损伤区域为封闭的环形。与其他两种材料相比, PEEK-Ni的损伤表面较为粗糙, 损伤表面镍棱要高于基体材料(见图4)。

## 2.2 有限元分析

在料浆冲蚀中, 料浆流的持续冲击是造成材料表面损伤的源头, 而液固两相流对材料表面的冲蚀过程, 无论在理论分析还是在试验测定上, 均较为困难。为详细了解样品表面受料浆的冲蚀情况, 使用ANSYS Fluent有限元分析软件对料浆冲蚀过程进行模拟和分析。

首先使用ANSYS workbench中的Spaceclaim软件对冲蚀喷嘴、流道及靶面等进行建模, 模型如图5所示; 使用非结构网格对复杂的三维模型进行网格划分, 以便网格能够更好地贴合模型; 以Realizable k-epsilon作为湍流模型, 在材料中添加液态水(water-

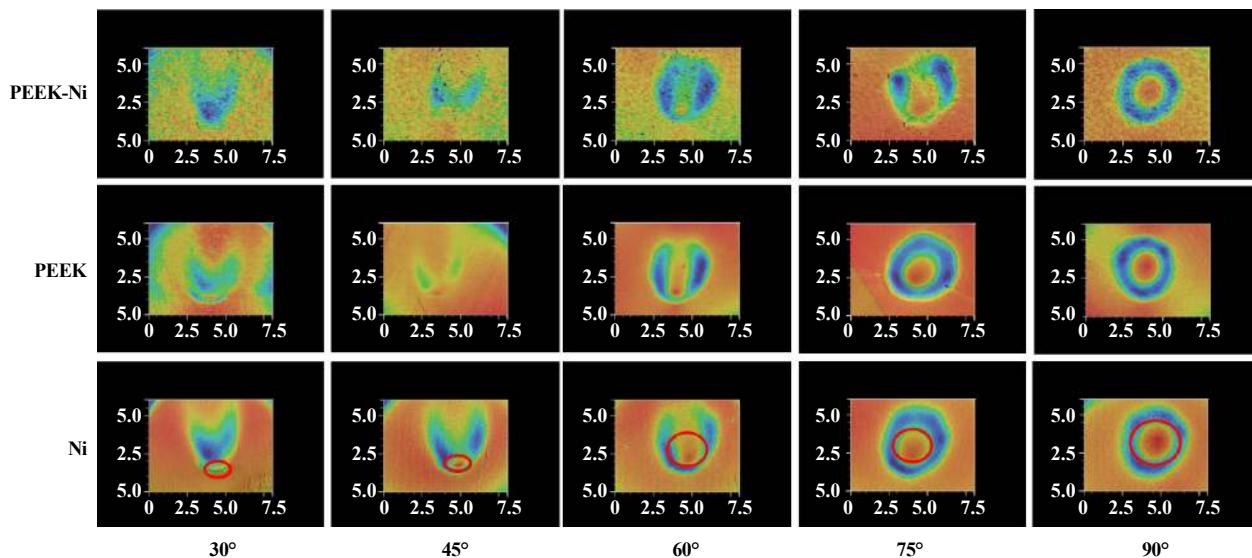


Fig. 4 The macro damage morphologies of the three materials after slurry erosion tests

图4 材料冲蚀后表面宏观损伤形貌

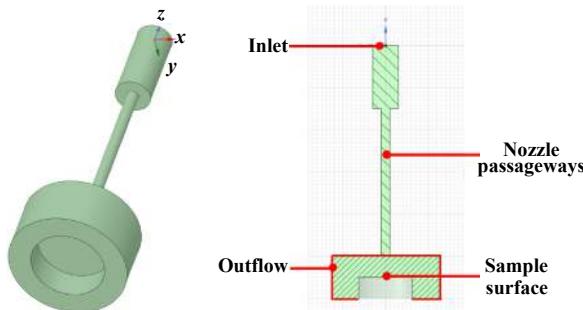


Fig. 5 Simulation modeling of slurry erosion process  
图5 料浆冲蚀过程的仿真建模

liquid)作为连续相; 设置进口为Velocity inlet、空间边界为outflow, 其余边界默认为壁面Wall, 其中, 在inlet边界条件中输入由数字流量计测得的液流速度, 计算100次迭代以获得初步的流体模型。随后开启离散相模型Discrete Phase Model(DPM), 在inject中设置颗粒注入面, 设置颗粒直径和质量流速等参数; 参考Huser及Edward等的文献<sup>[18-19]</sup>对壁面反弹系数(Discrete Phase Reflection coefficients)等进行设置, 最后在100次迭代的基础上继续计算迭代1 000步待结果收敛。图6为料浆冲击过程的仿真结果。

料浆喷出后发生扩散<sup>[20]</sup>, 该扩散角度与喷嘴结构、喷嘴尺寸以及料浆流速等有关, 当流速为30 m/s、喷嘴直径为2 mm时, 通过有限元分析计算可得此时扩散角 $\theta$ 约为5.71°。当喷嘴中心距离样品表面5 mm时, 样品主要处于料浆流的破裂段中<sup>[21]</sup>。经过扩散后, 部分料浆流的冲蚀方向发生改变, 这导致颗粒冲击靶面的角度也有所变化。本文中以 $\alpha$ 表示料浆流冲击靶面时, 与靶面之间所形成的夹角。从料浆冲蚀靶面示意图(图7)可以看出, 当攻角固定时, 在A点处料浆与靶面的夹角最大,  $\alpha_{\max}$ 为( $\pi-\Phi+\theta$ )°, 其中 $\Phi$ 为冲蚀攻角,  $\theta$ 为料浆流的扩散角。

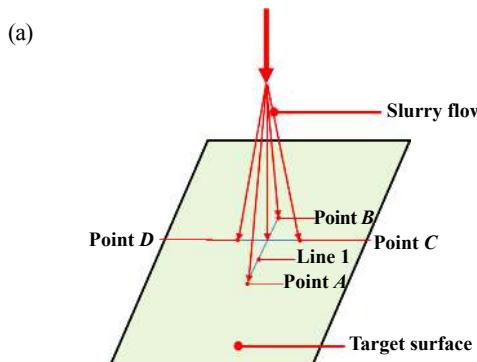


Fig. 7 The sketch of slurry erosion on the target surface (a) erosion range on the target surface (b) included angle between the slurry flow and the target surface on point A

图7 料浆冲蚀靶面示意图(a)靶面冲蚀范围 (b)A点处料浆与靶面夹角示意图

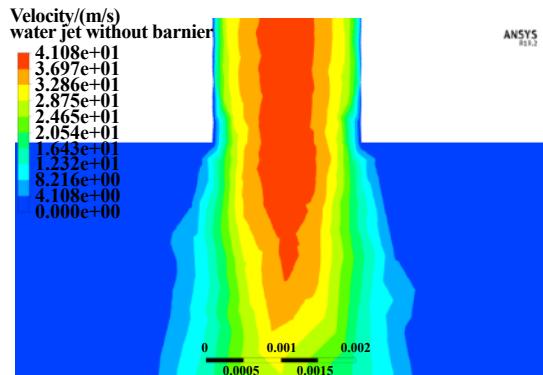
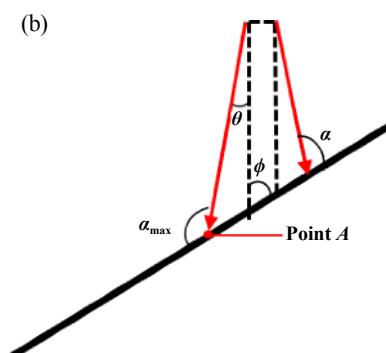


Fig. 6 The simulation results of slurry erosion test  
图6 料浆冲击过程仿真结果

料浆冲击表面时的动能及其流量决定了靶材的损伤程度, 因此考察料浆流在冲击靶材时的速度, 对于研究材料的损伤形貌和损伤机理至关重要。有限元软件将靶材理想化为一刚性材料, 当料浆流冲击到靶面的瞬间, 颗粒的速度均为零。正因如此, 本文中以高于靶面0.2 mm的平面作为基准面, 对速度、压力和颗粒轨迹等进行了仿真, 通过这种方法, 可以进一步了解即将冲击到靶面料浆流的状态。

图8所示分别为不同攻角下样品试验后截面损伤轮廓和通过Fluent分析获得的数据信息。各图中曲线意义如下: 黑色实线表示PEEK-Ni样品经不同攻角冲蚀后样品的截面轮廓; 红色实线为有限元仿真软件计算得到的料浆速度分布曲线; 蓝色和粉色实线依次代表料浆沿*i*、*j*两个坐标轴的速度分布[见图8(f)]。值得注意的是, 当*i*方向的颗粒速度为负时, 表示颗粒正以一定速度远离样品表面, 无法对样品造成损伤; 青色实线代表靶材表面上的压力分布, 该压力值是以喷嘴入口原点处(inlet)压力为基准的相对压力。

从图8中可以看出, 靶面的损伤程度与料浆流速



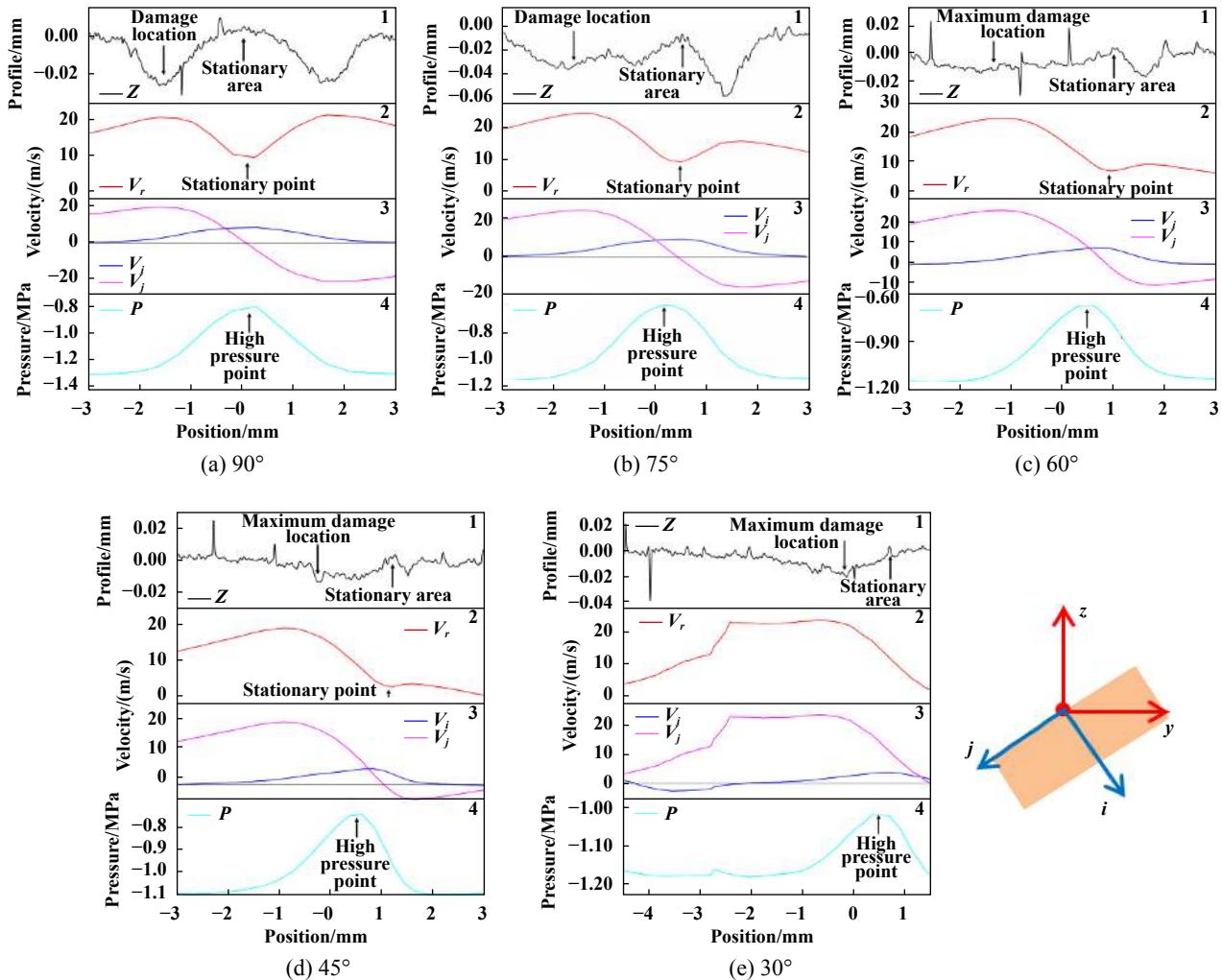


Fig. 8 The damage cross profile and the calculated slurry velocity and pressure distribution curves by Fluent at different impact angles

图8 不同攻角下样品截面损伤轮廓及Fluent计算得到的料浆速度及压力分布曲线.

密切相关, 较为明显的是, 材料的最大损伤位置几乎与料浆的最大速度一一对应. 从料浆流法向和切向的速度上看: 样品在驻点区域附近, 靶面主要受垂直向下的料浆冲击, 此处料浆切向速度近乎为零(图8蓝色实线所示); 在距离驻点区域较远的损伤区域, 料浆的切向冲击速度远大于法向冲击速度(图8粉色实线所示). 除此以外, 还能够观察到除90°攻角外, 样品表面最大压力点与驻点位置并不重合, 驻点位置稍有滞后.

通过有限元软件仿真, 发现靶面上方存在1个高压区, 料浆流会受到高压区的阻力作用而发生绕流现象, 压差的存在是产生绕流的主要原因. 料浆流所受阻力可以从两方面看, 一方面使料浆流减速, 另一方面使料浆流发生偏转. 受偏转力的影响, 料浆在击中靶材前, 液流夹带颗粒会向周围分散. 显然, 夹角 $\alpha$ 越大, 料浆越容易在偏转力的影响下绕出靶材, 使得A点

[图7(a-b)]附近颗粒的命中率降低.

从样品表面压力分布图(图9)可知, 高压中心与射流中心(黑色十字)位于同一直线上, 但二者在低角度冲蚀时并不重合. 当攻角较低时, 样品表面高压区轮廓呈椭圆形, 其侧面轮廓下低上高, 如图9所示, 高压位置靠近图7所示B点一侧, 随着攻角的增加, 样品表面高压区轮廓由椭圆形变为圆形, 高压点逐渐与射流中心重合.

攻角改变后, 高压区域的形状和位置随之变化, 直接影响了料浆流的状态. 图10为不同攻角下颗粒的冲蚀轨迹, 在低攻角下料浆流主要向A点(图7所示)一侧冲刷, 随着攻角的增加, 料浆流逐渐向B、C和D点(见图7)方向分流, 到90°攻角时各个方向上的料浆流分布相同. 料浆流的分布必然影响靶材的损伤形貌, 把材料表面分为9个区(见图11), 红点处为射流中心.

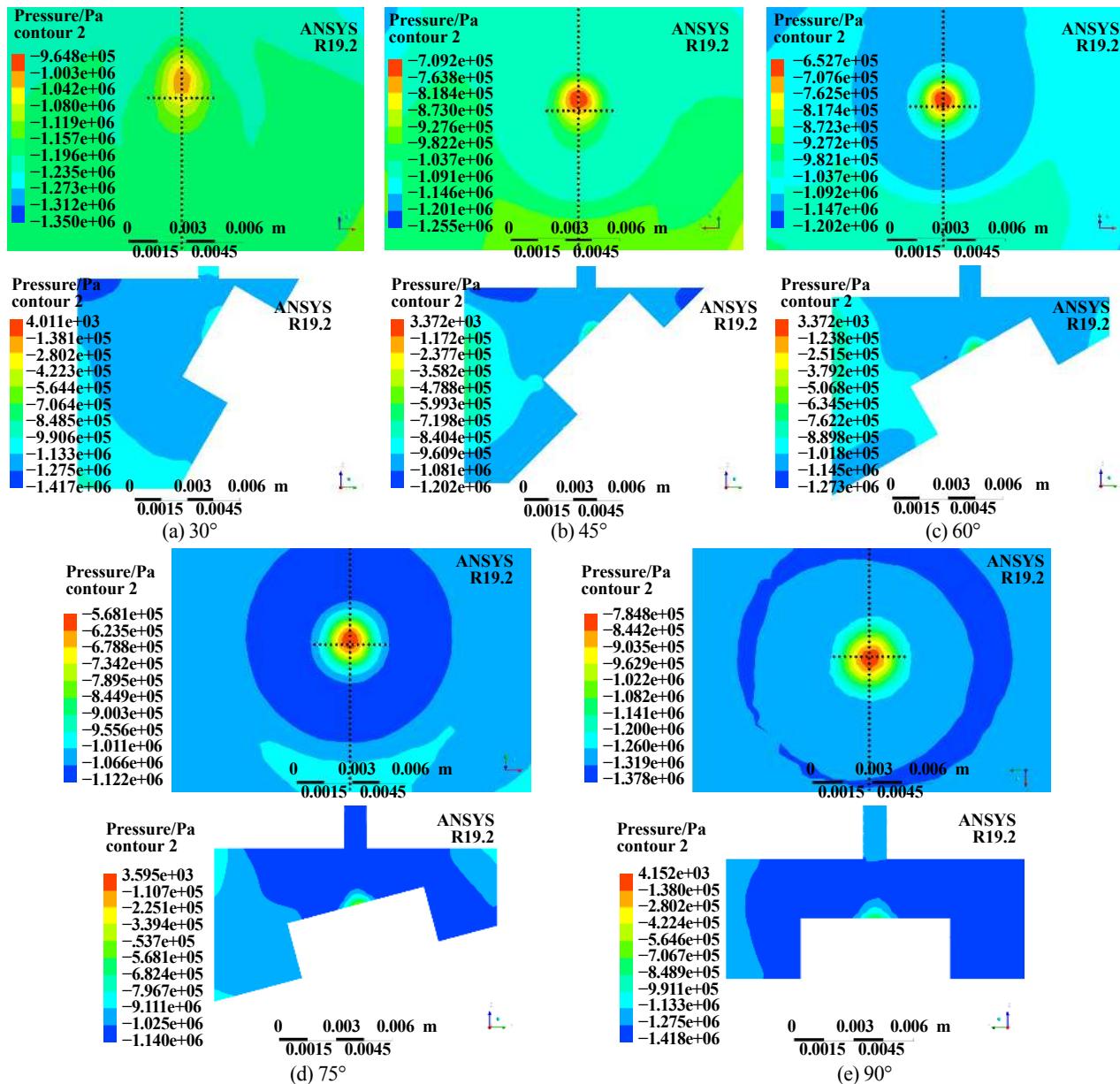


Fig. 9 The pressure distribution above the sample (1) the sample surface and (2) the plane perpendicular to the sample surface and through line 1

图9 样品上方压力分布情况(1)样品表面及(2)经过Line1并垂直于样品表面的平面

当样品处于30°攻角时,样品表面高压区中心紧贴B点一侧,位于区域VIII中,因此绝大部分料浆受偏转力影响而向B处下方一侧冲刷。而A处附近的料浆因具有最大的 $\alpha$ 角,因此几乎很难对区域II位置造成损伤。最终在料浆流流量和流速的综合作用下,区域IV、V、VI损伤严重,区域I、III损伤较轻,靶材表面最终形成如图5中30°攻角下所示的月牙型损伤区域。当材料处于45°攻角时,高压区向射流中心移动,部分料浆受此影响开始逐渐向C和D方向偏转,因此形成两侧深(区域I、IV和区域III、VI)而中部损伤减小(区域V)的月牙形损伤区域,如图5所示。随着高压区继续下移,更多

的料浆向射流中心上方和两侧偏转,向B、C和D方向冲刷的料浆流量增加,对靶材的区域I、III、IV、VI、VII、VIII和IX等造成严重损伤并形成U型损伤区域。此时随着攻角的提高,夹角 $\alpha_{max}$ 逐渐减小,偏转力对料浆影响减弱,这使得区域II处损伤有所增加;当攻角超过75°后,高压中心点与射流中心重合,此时各向支流的状态以及材料表面的损伤程度趋于一致,最终形成了1个封闭的圆环型损伤区域(图5中75°和90°攻角所示)。在75°攻角下,PEEK-Ni的损伤形貌与另外两种材料略有不同,这可能是由于泡沫镍的存在改变了料浆流的局部流向所致。

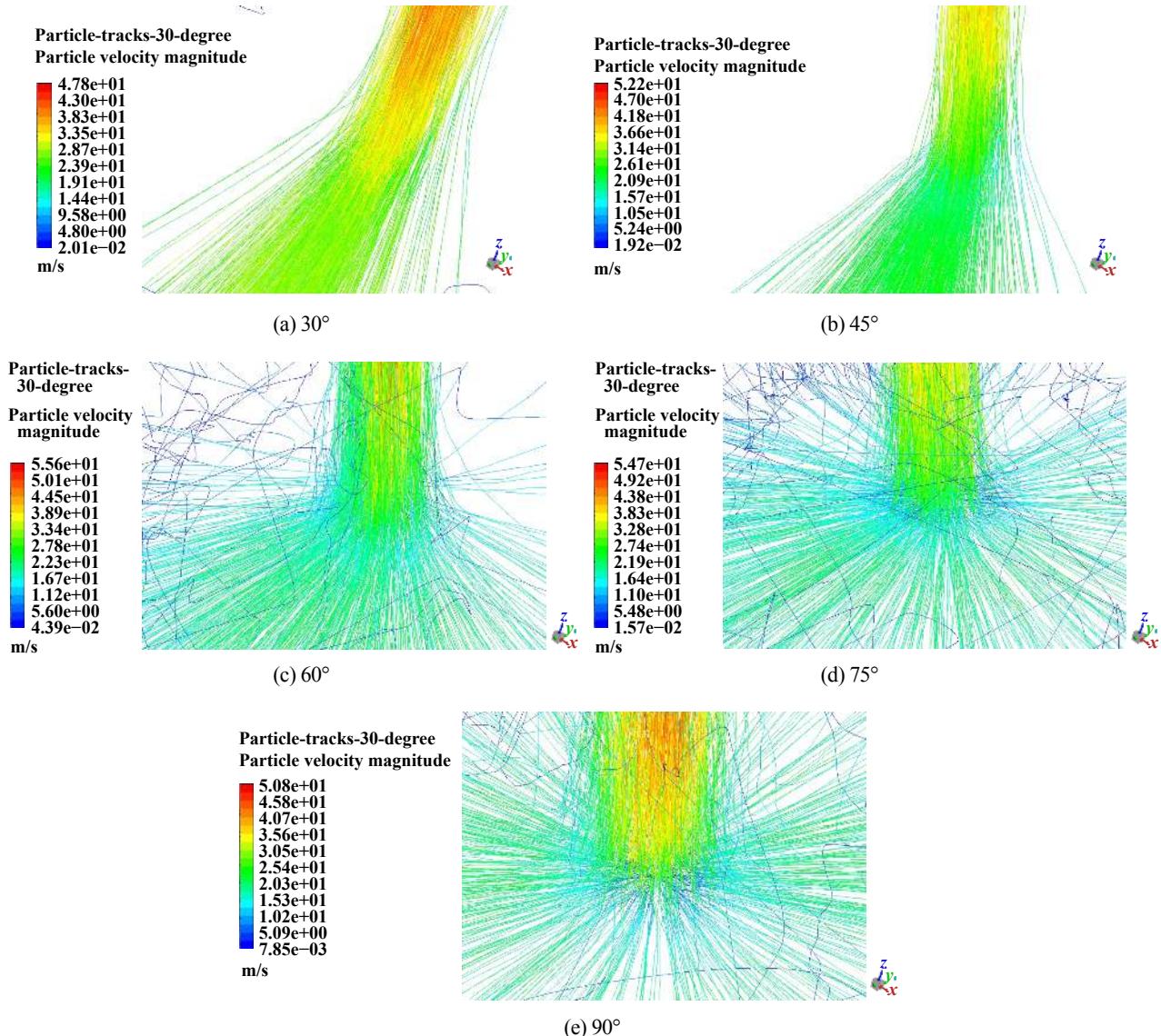


Fig. 10 The distribution of the slurry flow under impact angle of 30°, 45°, 60°, 75° and 90°

图 10 30°、45°、60°、75° 以及 90° 攻角下的料浆流的分布

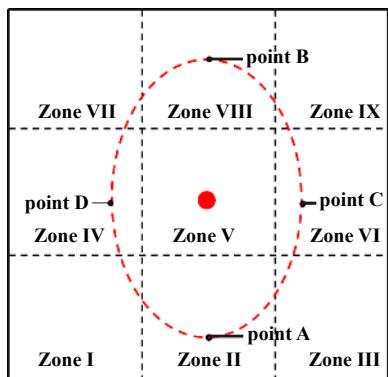


Fig. 11 The sketch of the damage area of the samples

图 11 样品损伤区域示意图

通过建模仿真, 计算了冲蚀过程中料浆流的速度和分布状态, 料浆流的速度与材料的损伤深度吻合,

仿真结果与试验结果符合性较好。

### 2.3 PEEK-Ni损伤机理

为进一步了解不同攻角下PEEK-Ni的损伤机理, 使用SEM对PEEK-Ni的表面微观损伤形貌进行了观察, SEM照片中深色部分为PEEK树脂基体, 浅灰色部分为金属镍骨架(图12)。重点观察了每组试验后靶面上的3个区域, 其中区域1位于驻点附近, 区域2和区域3位于材料表面损伤较大的位置。

从SEM照片中可以观察到, 区域1处表面划痕无明显的方向性, 损伤主要以翘起的唇片结构为主, 如图12(a~e)中的区域1所示, 这是由于该区域主要受料浆流的法向冲击所致。核心部分的高速料浆流会突破高压区域的影响到达样品表面, 对其进行持续的冲击<sup>[14]</sup>, 使得该处靶面损伤没有方向性, 呈现出锻打等特征。

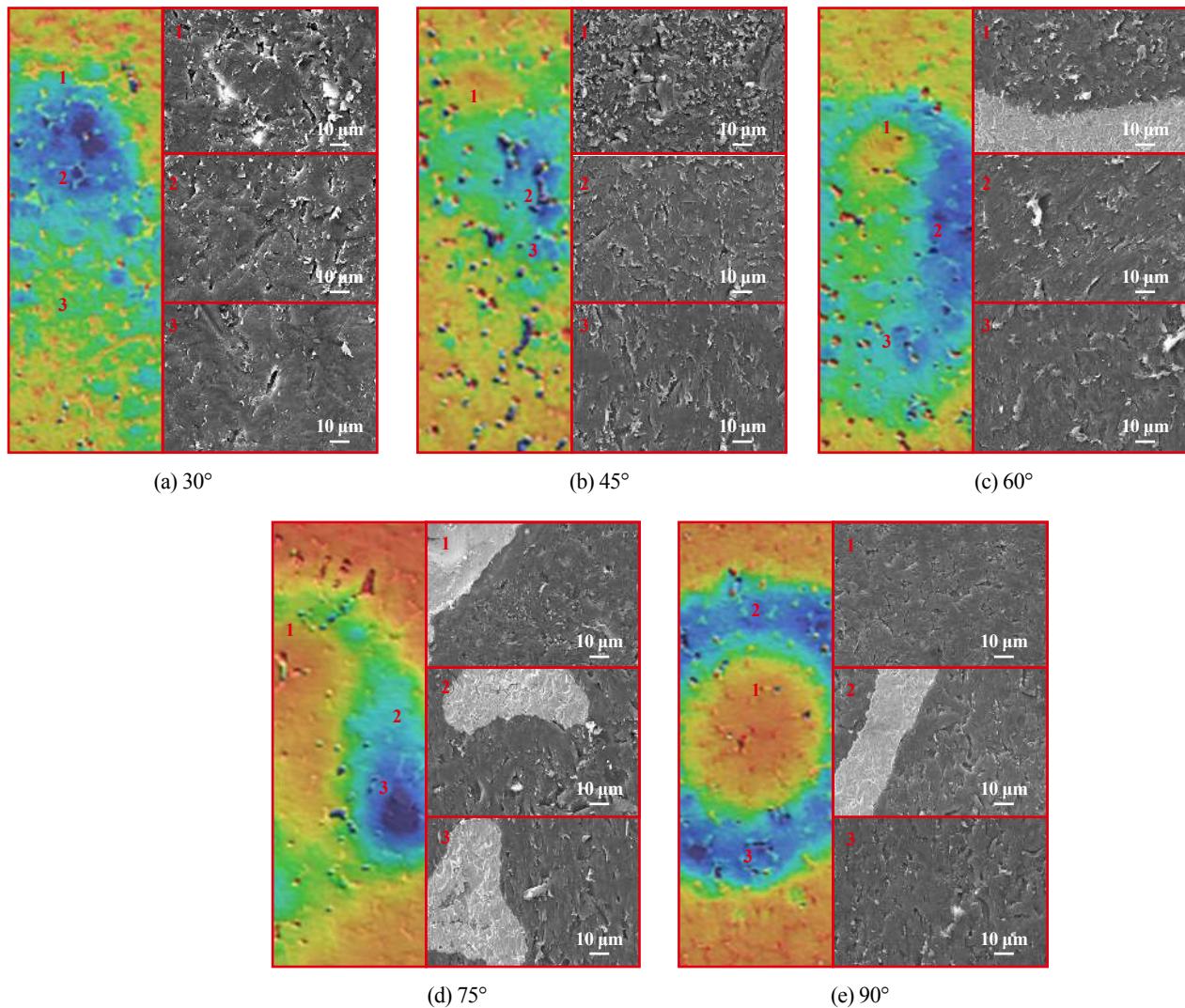


Fig. 12 The micro morphologies of PEEK-Ni after the erosion test

图 12 冲蚀试验后PEEK-Ni表面微观形貌

在颗粒的冲击和锻打过程中,树脂基体表面产生裂纹,并在裂纹上方形成唇片,唇片在颗粒的持续作用下发生断裂,最终以屑片的形式从母材表面脱落;泡沫镍因具有良好的韧性和强度,在受到料浆法向作用时,表面仅出现部分韧窝状形貌。

区域2和3处表面裂纹具有明显的方向性,裂纹沿着料浆冲蚀的方向有序扩展,损伤主要以微切削为主,如图12(a~e)中2、3所示,有所不同的是,当攻角较小时,裂纹长度较长,约为10~20 μm,而攻角较大时,尤其是在90°攻角时,裂纹长度仅有2~5 μm。PEEK-Ni在颗粒的剪切力作用下,材料表面出现微切削特征。当微切削损伤汇聚后,可以看到大面积的材料被去除。

仿真结果(图8)和材料的微观损伤形貌均表明,在任何攻角下,材料都受到料浆流的切向和法向力的共同作用,且部分区域切向力远大于法向力,但随着攻

角的增加,法向力的权重逐渐增加。值得注意的是75°攻角下,三种材料均出现了较大的损伤量,这可能是由于在75°攻角下料浆流的切向速度25 m/s和法向速度10 m/s均较高,材料处于料浆切向作用和法向作用的混合区,这种混合作用使材料的损伤比其他攻角更为严重。总体上看,PEEK随攻角的增加损失量增大,表现出脆性特征;金属镍随攻角的增加损失量减小,表现出韧性特征;PEEK和镍在PEEK-Ni中保持了各自的优势,使PEEK-Ni的损伤对攻角不敏感。

图13(a~e)为通过SEM观察到的PEEK-Ni在界面处的损伤形貌,金属镍表面几乎没有明显的剥落痕迹,仅在小角度冲蚀试验下出现微切削留下的划痕,而在大攻角下,金属表面则出现韧窝状粗糙形貌。金属与PEEK树脂基体在界面处结合良好,未观察到两相分离现象。树脂基上受到的冲击力能够通过相界传

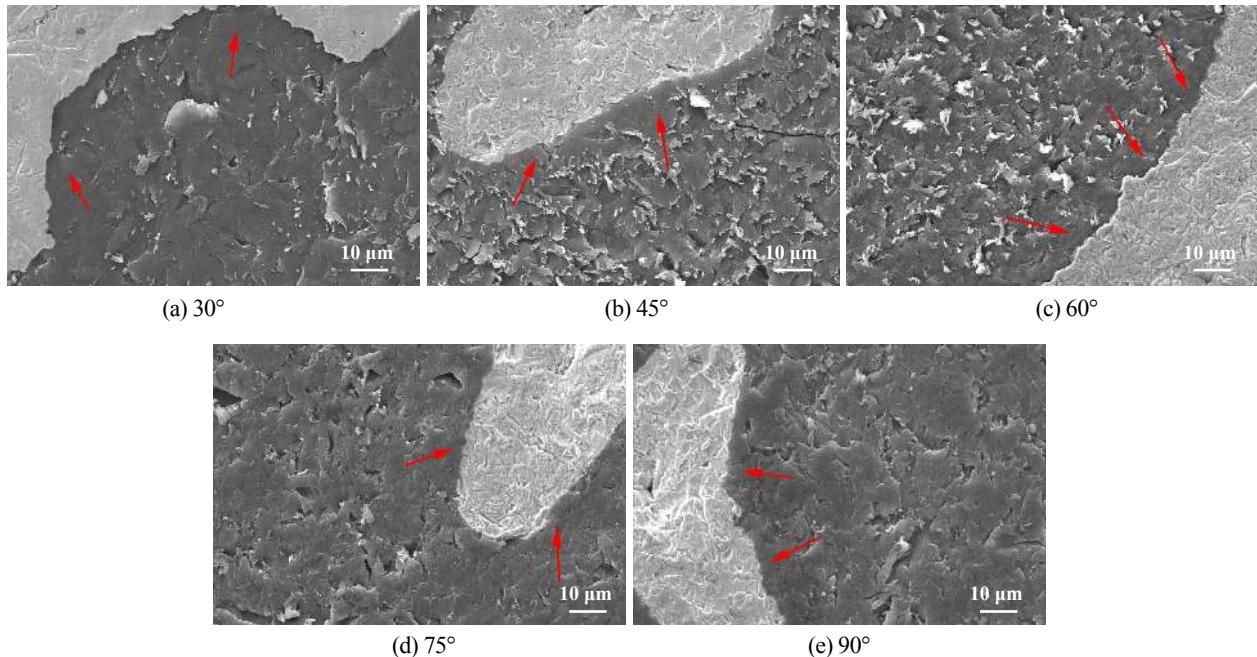


Fig. 13 The damage morphologies of the PEEK-Ni interface

图 13 PEEK-Ni界面处损伤形貌

递到金属镍中，并沿泡沫镍的网状结构向材料内部传递。泡沫镍的存在能够一定程度上传递和分散材料表面受到的冲击力，从而降低PEEK-Ni的损伤程度，该作用亦被称为协同效应。

金属镍的韧性和强度均优于PEEK树脂，因此当PEEK-Ni受到冲蚀后，泡沫结构的金属镍损伤较弱，随着冲蚀时间的延长，镍棱慢慢高出基体表面，如图5~6所示。凸出的镍棱能够似屏障一般遮挡并拦截颗粒的冲击，避免料浆流对基体的进一步冲刷，在距离两相界面5~10 μm处出现了一段明显的“无损伤或损伤较小”的区域，足以证明泡沫镍起到了遮挡效应(图13标记处)。因此，使用泡沫镍作为复合材料骨架，起到了支撑和传递能量的双重作用，能够有效改善PEEK树脂的耐冲蚀性能。

### 3 总结

采用热压成型技术制备了PEEK-Ni，考察了该材料在不同攻角下的耐冲蚀性能。使用有限元分析软件对冲蚀过程进行了模拟，对料浆冲蚀的机理进行了分析。模拟和试验结果表明：

a. 材料的损伤形貌由料浆流的分布和速度决定，随着攻角增大，损伤形貌由月牙形变为U形，最终成为圆环形。

b. 在所有攻角下，材料均受到法向力和切向力的共同作用，且除驻点区域外切向力远大于法向力。随

着攻角的增加，法向力的权重逐渐增加。在75°攻角下，材料受到较大的切向力和法向力的共同作用，损失量较大。

c. 在本文的冲蚀条件下，PEEK-Ni中PEEK和泡沫镍的界面结合紧密，没有受到破坏，基体相和增强相保持了各自的优势，使PEEK-Ni对攻角不敏感。

d. PEEK-Ni中泡沫镍作为骨架，减少了料浆对其周围树脂的损伤，具有遮挡效应；同时，能够通过界面传递树脂受到的冲击力，具有协同效应；在两种效应共同作用下，与PEEK相比，PEEK-Ni的耐冲蚀性能得到明显提升。

### 参考文献

- [1] Long Chunguang, Zhang Zhen, Guo Fangyu, et al. Effect of different porosity on aluminum alloy foam/polyformaldehyde interpenetrating phase composites[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 11(3): 88–94 (in Chinese) [龙春光, 张臻, 郭芳宇, 等. 泡沫铝合金孔隙率对泡沫铝合金/聚甲醛互穿复合材料的影响[J]. 长沙理工大学学报, 2014, 11(3): 88–94].
- [2] Jiang Shengli, Hou Sihan, Liu Yang, et al. Slurry erosion of nickel foam/epoxy/SiC co-continuous composite[J]. Tribology, 2017, 37(1): 44–51 (in Chinese) [姜胜利, 侯思焓, 刘洋, 等. 泡沫镍/环氧树脂/碳化硅双连续复合材料的料浆冲蚀行为研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(1): 44–51]. doi: 10.16078/j.tribology.2017.01.006.
- [3] R Jhaveri, H Tippur. Processing compression response and finite element modeling of syntactic foam based interpenetrating phase

- composite (IPC)[J]. Materials Science & Engineering: A, 2009, 499(1): 507–517.
- [4] D R Clarke. Interpenetrating phase composites[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 75(4): 739–758.
- [5] Ma Ying, Ren Jun, Li Yuandong, et al. Development of research on erosion of materials[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2005, 31(1): 21–25 (in Chinese) [马颖, 任峻, 李元东, 等. 冲蚀磨损研究的进展[J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(1): 21–25]. doi: [10.3969/j.issn.1673-5196.2005.01.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5196.2005.01.006).
- [6] Pan Mu, Luo Zhiping. Erosion of materials[J]. Materials Science & Engineering, 1999, 17(3): 92–96 (in Chinese) [潘牧, 罗志平. 材料的冲蚀问题[J]. 材料科学与工程, 1999, 17(3): 92–96].
- [7] M Meyers, K Chawla. Mechanical behavior of materials 2nd edition[M]. New York: Cambridge University Press, 2017: 205
- [8] Lv Guangchao, Lu Zhili, Dong Mengyao, et al. Effect of carbon nano-fiber on glass fiber/epoxy composite[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017, (6): 51–56 (in Chinese) [吕广超, 鲁智力, 董梦瑶, 等. 碳纳米纤维对单向玻纤/环氧复合材料的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017, (6): 51–56]. doi: [10.3969/j.issn.1003-0999.2017.06.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0999.2017.06.009)
- [9] Lan Wenfeng. Mechanical properties of nano-CaCO<sub>3</sub>/PU elastomer composites[J]. China rubber/plastics technology and equipment (plastics), 2018, 44(16): 15–20 (in Chinese) [蔺文峰. 纳米CaCO<sub>3</sub>/PU弹性体复合材料力学性能研究[J]. 橡塑技术与装备, 2018, 44(16): 15–20].
- [10] Du Mingchao, Li Zengliang, Dong Xiangwei, et al. Experimental and numerical study on erosion characteristics of rhomboid particles[J]. Tribology, 2018, 38(5): 501–511 (in Chinese) [杜明超, 李增亮, 董祥伟, 等. 菱形颗粒冲蚀磨损特性试验及仿真研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(5): 501–511]. doi: [10.16078/j.tribology.2018.05.002](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.05.002).
- [11] Zheng Sijia, Zhang Peng, Jing Jiaqiang, et al. Experimental and numerical study of surface erosion evolution at inner wall of elbow in gas flow line[J]. Tribology, 2015, 35(6): 754–760 (in Chinese) [郑思佳, 张鹏, 敬加强, 等. 输气管路弯头内壁面冲蚀进化的试验和数值模拟研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(6): 754–760]. doi: [10.16078/j.tribology.2015.06.015](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2015.06.015).
- [12] Liu M, Duan DL, Jiang SL, et al. Tribocorrosion behavior of 304 stainless steel in 0.5 mol/L sulfuric acid[J]. Acta Metallurgica Sinica(English Letters), 2018, 31(10): 1049–1058. doi: [10.1007/s40195-018-0773-x](https://doi.org/10.1007/s40195-018-0773-x).
- [13] Huang Weiji, Li Zhijun, Wang Junjun, et al. Investigation of erosion mechanism of tin brass in 3.5% NaCl liquid-solid two phase flow[J]. Tribology, 2016, 36(1): 27–34 (in Chinese) [黄伟九, 李志均, 王军军, 等. 锡黄铜在3.5% NaCl中的液固两相流冲蚀机理研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(1): 27–34]. doi: [10.16078/j.tribology.2016.01.005](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2016.01.005).
- [14] Li Shizhuo, Dong Xianglin. Erosion wear and fretting wear of material[M]. Beijing: Chinese Machine Press, 1987 (in Chinese) [李诗卓, 董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987].
- [15] Yang XG, Duan DL, Jiang SL, et al. Preparation and erosion-corrosion behavior of polyetheretherketone (PEEK)/nickel foam co-continuous composites[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2018, 25(2): 289–296. doi: [10.1515/secm-2015-0449](https://doi.org/10.1515/secm-2015-0449).
- [16] K Friedrich, A A Almajid. Solid particle erosion of polymers and composites[C]. Proceedings of the 7th International Conference on Times of Polymers and Composites(TOP), Ischia, Italy, 2014. AIP Conference Proceedings, 2015, 1599: 2–5.
- [17] Simon Ka-Keung Li, J AC. Humphrey, AV Levy. Erosive wear of ductile metals by a particle-laden high velocity liquid jet[J]. Wear, 1981, 73(2): 295–309. doi: [10.1016/0043-1648\(81\)90297-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90297-0).
- [18] A Huser, O Kvernold. Prediction of sand erosion in process and pipe components[C]. Proceedings of the 1st North American Conference on Multiphase Technology, Banff, Canada, 1998. BHR Group Conference Series Publication, 1998, 31: 217–228.
- [19] K Jeremy BSM Edwards, S A Shirazi. Evaluation of alternative pipe bend fittings in erosive service[C]. Proceedings of the 2000 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, New York, American, 2000. ASME Symposia Volumes, 2000, 2: 959–966.
- [20] Qin Guozhi, Tian Zhiming. Application of high pressure water jet cleaning techhique[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2001, (1): 38–40 (in Chinese) [秦国治, 田志明. 高压水射流清洗技术及其应用[J]. 管道技术与设备, 2001, (1): 38–40]. doi: [10.3969/j.issn.1004-9614.2001.01.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9614.2001.01.014).
- [21] Zhou Wenhui. Numerical and simulation research on the high pressure water jet nozzle in inside and outside efflux flow field[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008 (in Chinese) [周文会. 高压水射流喷嘴内外部流场的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008].