http://pmse.scu.edu.cn

固相剪切碾磨装备盘面结构的优化及理论分析

赖展宏，李怡俊，王琪

（先进高分子材料全国重点实验室（四川大学） 四川大学高分子研究所，四川 成都 610065）

摘要：基于固相力化学原理研发的固相剪切碾磨(S^3M)装备具有独特的三维剪切结构，可实现高分子材料的室温超细粉碎和超微分散，是废弃塑料回收再利用的重要加工装备。为提高 S^3M 装备的剪切碾磨效率，本文进一步优化 S^3M 装备盘面结构，在磨盘盘面的磨齿斜面上植入桩齿结构，采用计算流体力学(CFD)软件 Flow Simulation 研究了磨盘盘面桩齿结构对动态剪切应力场的影响。结果表明，磨盘盘面桩齿几何形状、高度、分布密度等影响碾磨最大等效剪应力，四棱台桩齿结构高度为 0.3 mm，分布密度为同列相邻桩齿结构相距 5 mm 的优化条件下，碾磨最大等效剪应力可达 29.3 MPa，比原磨盘提高 350 %。

关键词：固相剪切碾磨(S^3M)装备；盘面结构优化；桩齿；模拟；最大等效剪应力

中图分类号：TQ**32**

基于固相力化学原理研发的固相剪切碾磨（S^3M）加工装备(Fig.1(a))，具有独特的三维剪切结构，可在室温超细粉碎粘弹性高分子材料，快速实现多组分共混高分子材料的超微分散，广泛应用于废弃高分子材料回收利用领域[1-3]。S^3M 装备核心部件为两个相向放置的具有相同磨齿结构的磨盘，上下两个磨盘在相向相对旋转的剪切碾磨过程中，其内部磨齿结构在空间上交错形成数个碾磨腔室，这些腔室的形状和体积会在剪切碾磨过程中产生周期性变化，因而可对物料施加力化学作用[4, 5]，如Fig.1(b)~(d)所示。磨齿分布排列方式，磨盘齿形如磨齿倾角、磨齿高度和磨齿齿顶棱宽等重要参数的设计与选择，对 S^3M 装备的剪切碾磨质量和效能产生十分重要的影响[6-9]。

通过对磨盘剪切碾磨过程基础的理论分析[10]，建立了三维剪切结构（即碾磨腔室）的二面角数学模型(Fig.1(e), (f))，定量描述了物料的粉碎过程，证明在一个碾磨周期内，物料随二面角变化受到强大挤压和剪切作用力，是导致物料发生破碎的主要原因；物料在磨盘内部的运动轨迹呈螺线形，其运动路径远大于磨盘半径，使物料能够在磨盘内部受到充分的剪切碾磨作用。采用 Rosin-Rammler 和对数正态分布函数理论研究了 S^3M 装备的负载和转速对聚苯乙烯粉碎的影响[11]。结果表明，较低的转速和较高的负载有利于提高粉碎效率；采用比刀缘负荷(Specific edge load)理论[12]，证明 S^3M 装备比刀缘负荷远高于其他磨盘型加工设备，S^3M 装备具有更强的剪切碾磨能力。但 S^3M 装备磨盘结构还需进一

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0092
收稿日期：2025-12-18
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U24A20207)；天府永兴实验室重大科技攻关项目(2023KJGG11)
通讯联系人：王琪，主要从事高分子材料制备和加工新技术、环境友好高分子材料研究，E-mail: qiwang@scu.edu.cn

步优化，磨盘动态剪切应力场与磨盘结构关系需进一步研究。近年来，随着计算机模拟技术的快速发展，数值仿真已成为解析复杂动态机械加工过程的关键手段。现对于 S^3M 装备的模拟分析，主要采用局部模拟，以阐明破碎机理为主；基于计算流体力学(CFD)的计算机模拟技术将宏观模拟和微观分析相结合，可以模拟整个磨腔内部的物料运动情况，更有利于装备结构参数的优化。为更真实反映碾磨过程中物料的复杂流动行为，本研究采用计算流体力学（CFD）方法进行模拟，避免了将物料过度简化为连续介质或离散颗粒的局限，为固体粉碎装备的研究提供了新的路径。

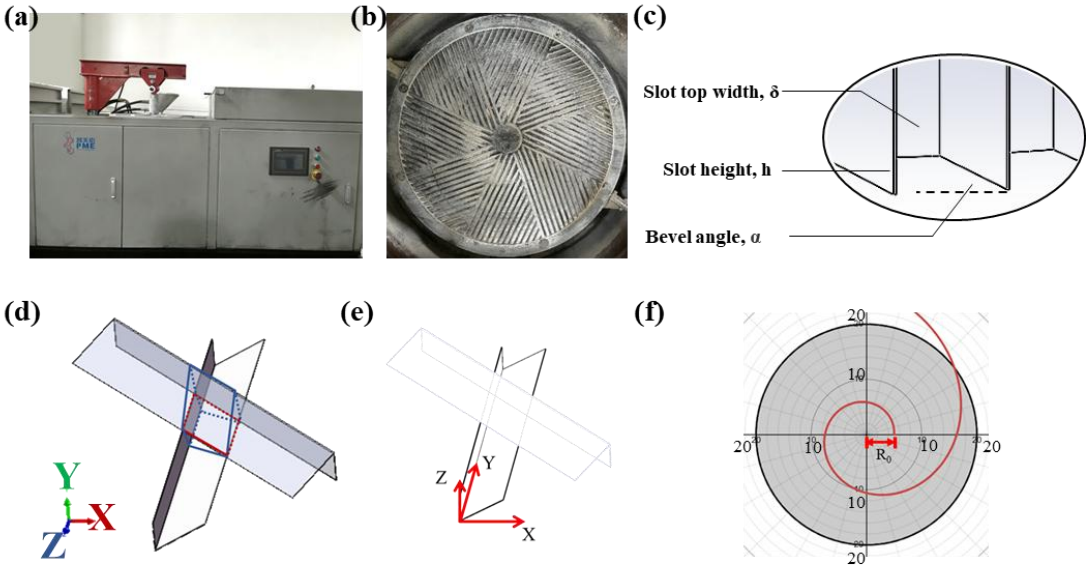


Fig. 1　Physical pictures of (a) S^3M equipment and (b) grinding disc; schematic diagram of (c) grinding teeth, (d) grinding chamber, (e) mathematical model of three-dimensional pruning structure and (f) trajectory of particle[1-3]

本文进一步优化 S^3M 装备结构，在磨盘磨齿斜平面上植入桩齿，以提高剪应力，采用计算流体力学(CFD)软件 Flow simulation 研究了桩齿几何形状、高度、分布密度等结构参数对动态剪切应力场的影响，并制造了可视化透明磨盘装备进行实验验证。

1 实验部分

1.1 建立模型

采用 SOLIDWORKS 三维建模软件建立磨盘模型，无桩齿结构以磨齿倾角为 30°的原磨盘为例(Fig.2(a), (b))，具有桩齿结构以磨齿倾角为 30°，四棱台桩齿结构的高度为 0.3 mm，分布密度为同列相邻桩齿结构相距 5 mm 的磨盘为例(Fig.2(c), (d))。磨盘和磨齿结构参数如 Tab.1 所示。

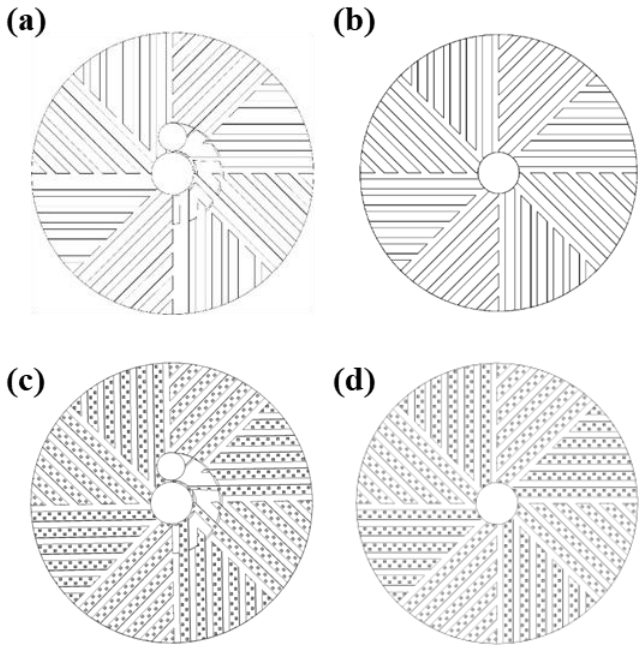


Fig. 2　Grinding disc model with ((a) fixed; (b) moving) no pile-tooth and ((c) fixed; (d) moving) pile-tooth

Tab. 1　Structure parameters of pan

Diameter of pan (mm)	Number of sectors	Slot top width (mm)	Slot top height (mm)	Bevel angle α (°)
200	8	4.5	4	30

1.2 设定边界

为了使模拟接近实际状态并且突出研究重点，选择熔融聚乙烯（非牛顿流体），材料物性基于 Flow Simulation 材料数据库，密度 1200 kg/m^3，粘度符合幂律模型，最大动力粘度 565 Pa*s，最小动力粘度 364 Pa*s，幂律指数 n 为 0.59。在进行流场模拟之前，对流体流动的基本参数进行设置，如 Fig.3(a)所示。在模拟条件中设定如下边界条件：

（1）入口体积流量：流体从入口处均匀进入，其体积流量为 0.00001 m^3/s；

（2）出口边界条件：出口处设置为自由出口(1 atm)；

（3）壁面边界条件：剪切碾磨过程中，上磨盘（定磨盘）处于静止状态，此处设定其为真实壁面（定子），即旋转速度为 0 rad/s；

（4）运动边界条件：下磨盘（动磨盘）为逆时针旋转，与上磨盘协效形成三维剪切结构，旋转速度大小为 12.56 rad/s；

（5）磨盘间隙：磨区内部的上下磨盘盘面间隙为 0.5 mm。

1.3 划分网格

为保证模拟结果的精确性，网格划分应当在磨盘表面与物料接触的部分进行细化。以磨齿倾角为

30°的磨盘为例，X、Y、Z 方向上的基础网格个数为 35、2、35 个，且在流固边界处的网格细化等级为 4，总网格数量为 2031360，流固边界处网格为 1137312。经验证网格细化等级达到 4 时，模拟数值几乎不随细化等级变化，网格划分结果和网格无关性验证结果如 Fig.3(b)和(c)所示。

1.4 模拟分析方法

以八分之一磨盘磨齿为基准，在磨盘间隙中心所在水平面和磨齿齿棱位置划取取样线，如 Fig.3(d)~(f)所示，以生成对应区域的流场（速度场、剪应力场和剪切率场）以及运动轨迹线的分析，说明桩齿对物料运动路径的影响，揭示其增强剪切的作用机理。

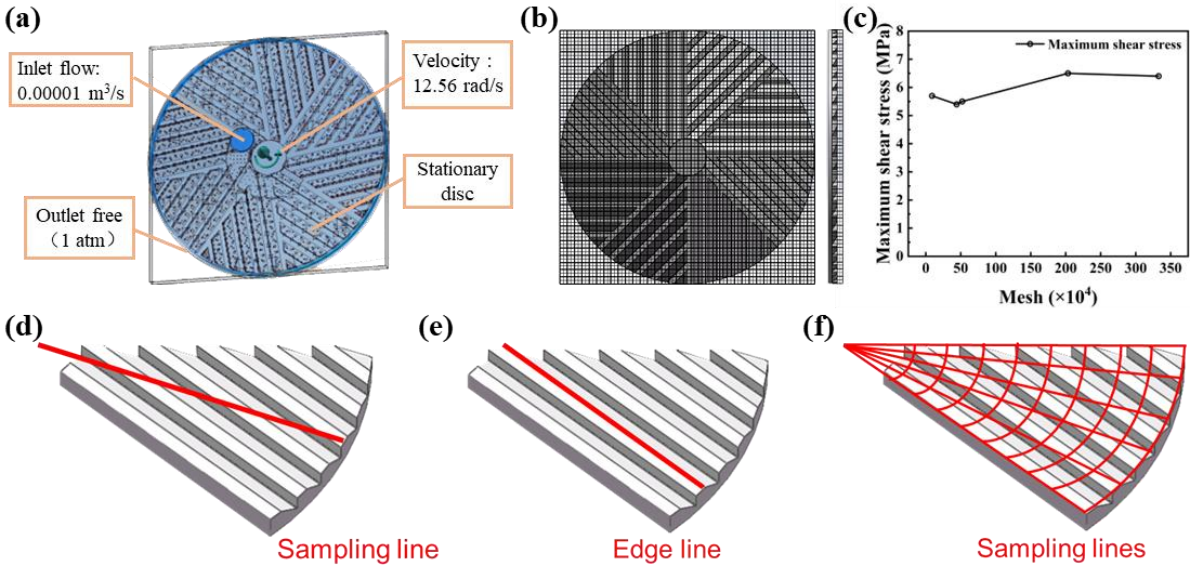


Fig. 3 (a) Boundary condition setting, (b) grid division, (c) verification of mesh, (d) sampling line of grinding disc gap, (e) edge line of grinding disc and (f) sampling lines of grinding disc gap

2 结果与讨论

2.1 流动迹线图

物料在磨腔内部的流动迹线图如 Fig.4(a)所示，物料整体运动轨迹呈螺线形状，这与前文所述有关物料运动轨迹的数学模型相一致。物料从进料口均匀的竖直向下进入磨腔内部，受动磨盘的转动加速作用，在磨盘的边缘附近达到速度的最大值并离开磨盘。

2.2 动磨盘磨齿表面剪应力分布图

S^3M 装备对物料的剪切碾磨过程，是磨齿与物料的相互作用过程，磨齿表面剪应力分布和剪应力大小间接反映了磨齿与物料发生相互作用力分布状况和受力大小。如 Fig.4(b)所示，在动磨盘表面上，剪应力主要集中分布在磨齿齿顶棱面附近，即磨齿齿顶棱面附近的剪应力要明显大于磨齿齿槽内部受到的剪应力，且剪应力大小大部分超过了 0.3 MPa。

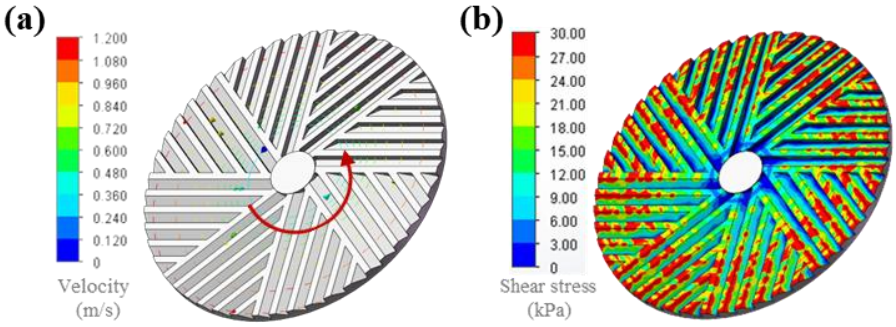


Fig. 4 Simulation results of (a) trajectory and (b) Mises equivalent shear stress

2.3 动磨盘磨齿表面剪应力的影响因素

2.3.1 *桩齿结构形状对表面剪应力的影响*：为提高 S^3M 装备的剪切碾磨效率，设计了一种具有桩齿结构的高剪应力磨盘。选择在磨齿倾角为 30°的磨齿斜面上植入桩齿结构，并与没有桩齿结构的磨齿作对比，以说明桩齿结构对物料的剪切作用和破碎效果，桩齿结构（四棱台，四棱锥，圆锥）在磨齿斜面上居中交错排布，底面边长（直径）为 2 mm，高度为 0.70 mm，如 Fig.5(a_1)~(d_1)和 Fig.5(a_2)~(d_2)所示。不同桩齿结构形状对磨盘表面剪应力分布的影响如 Fig.5(a_3)~(d_3)所示，剪应力主要分布于磨齿齿顶靠近斜面一侧的棱边附近，磨齿齿顶棱面和桩齿结构产生比较分散的剪切应力。如 Fig.6 所示，不同桩齿结构动磨盘间隙处的速度分布总体呈现以下规律：由于物料沿螺线轨迹运动，从磨盘中心到外缘的速度呈现周期性变化，且越靠近磨盘边缘，速度越大。棱锥与圆锥桩齿对物料有一定的阻碍作用，导致磨腔内物料运动速度较低，物料可能在磨腔齿槽内部发生局部堆积。相比之下，四棱台桩齿对物料的阻碍作用较弱，物料运动速度高，物料所受剪切作用增强。

由 Fig.7 的流动轨迹可知，棱锥与圆锥桩齿将大部分物料限制在齿槽内，阻碍其进入磨盘间隙区域。物料在齿槽内速度较低并发生堆积，未能及时排出，从而表现出明显的阻滞效果。不同桩齿结构下磨齿齿棱处的剪应力与剪切率分布如 Fig.8 和 Fig.9 所示。结果表明，磨盘在旋转过程中磨齿交错相遇时，齿棱处的剪应力与剪切率通常达到峰值，且二者均随径向位置呈周期性变化，趋势为离磨盘中心越远，数值越大。在四棱台桩齿模型中，齿棱剪应力略低于无桩齿磨盘，但剪切率显著提高，说明该结构对物料的剪切变形能力更强。

为了定量描述磨齿桩齿结构形状对磨盘表面剪应力大小的影响，采用 Mises 等效应力定量分析磨盘表面剪应力大小，磨盘表面最大等效剪应力结果如 Fig.10(a)和 Tab.2 所示。四棱台和四棱锥结构均提高了磨盘表面最大等效剪应力，且四棱台结构提高较大，圆锥结构却降低了磨盘表面最大等效剪应力。选择四棱台结构作为桩齿结构，在一定程度上提高了磨盘的剪切碾磨效率，但还需要后续优化条件参数。

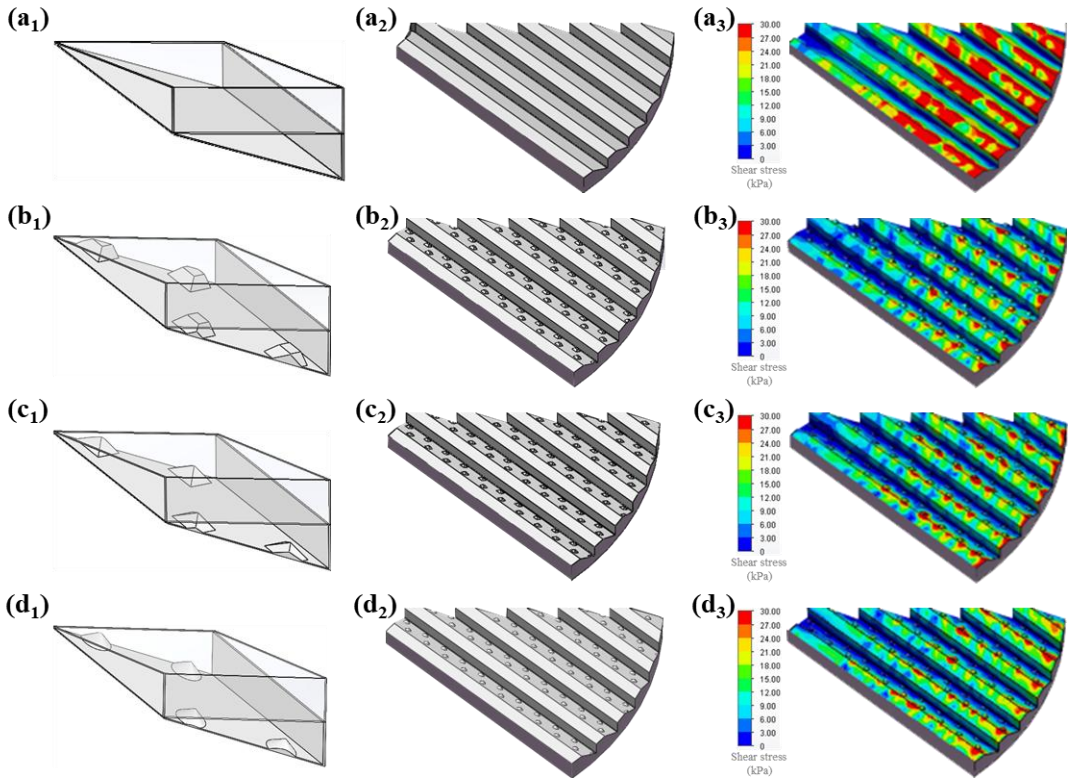


Fig. 5 (a_1)~(d_1) Grinding chamber view, (a_2)~(d_2) 3D model view, and (a_3)~(d_3) simulation results of grinding tooth with different pile-tooth structures

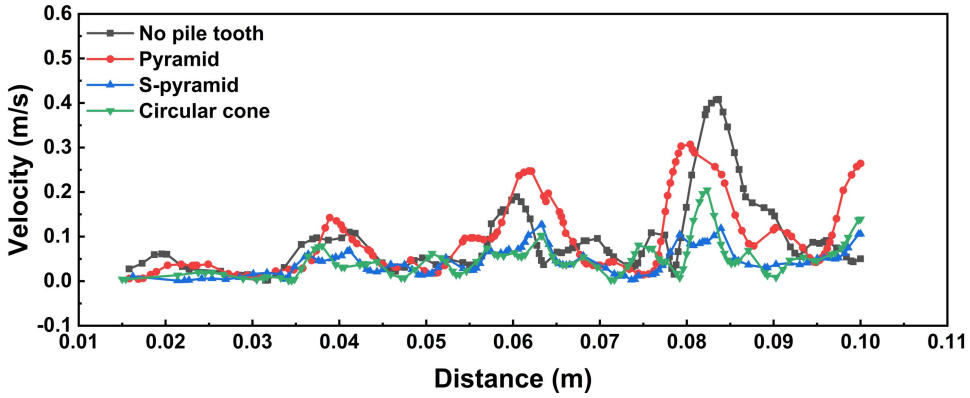


Fig. 6 Velocity distribution on the gap of grinding disc with different pile-tooth structures

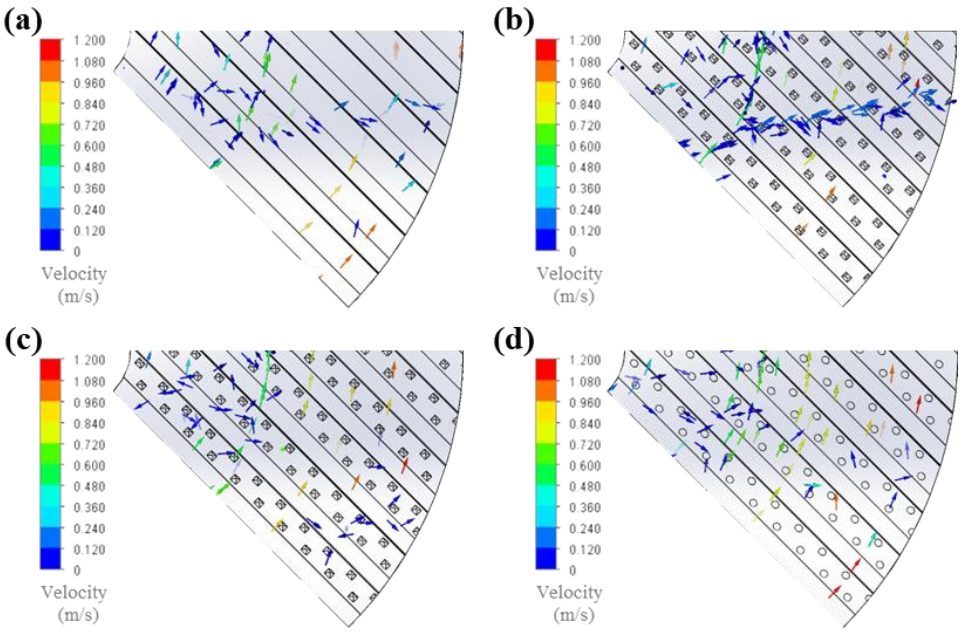


Fig. 7 Trajectory on the gap of grinding disc with different pile-tooth structures: (a) no pile-tooth; (b) pyramid; (c) s-pyramid; (d) circular cone

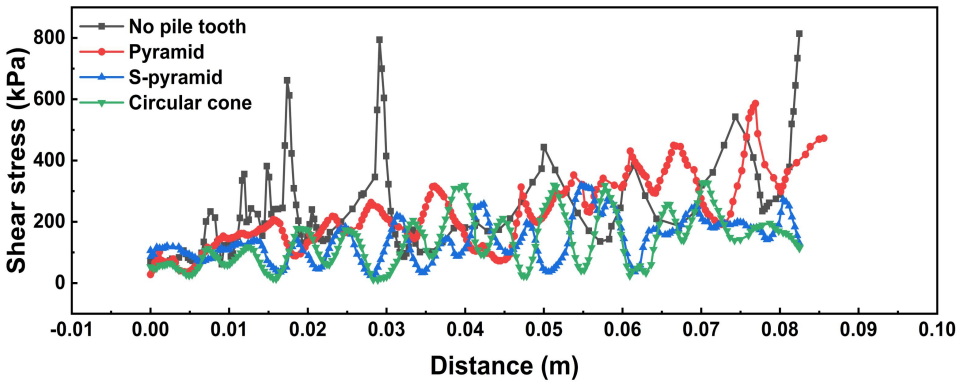


Fig. 8 Shear stress of edge line of grinding tooth with different pile-tooth structures

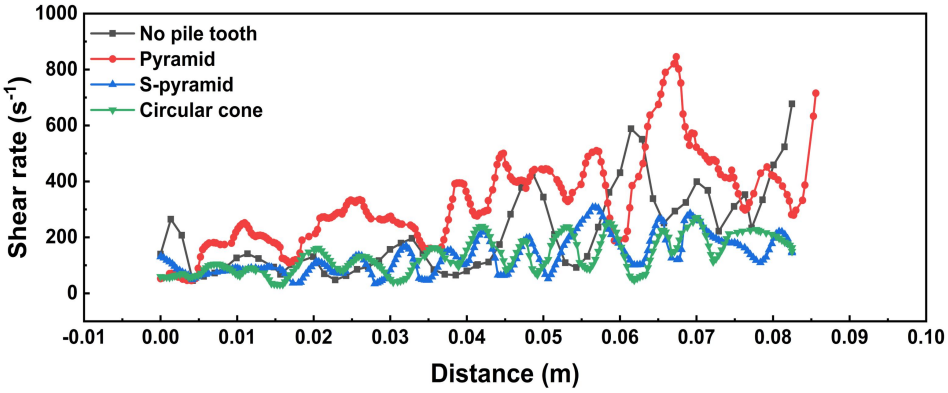


Fig. 9　Shear stress of edge line of grinding tooth with different pile-tooth structures

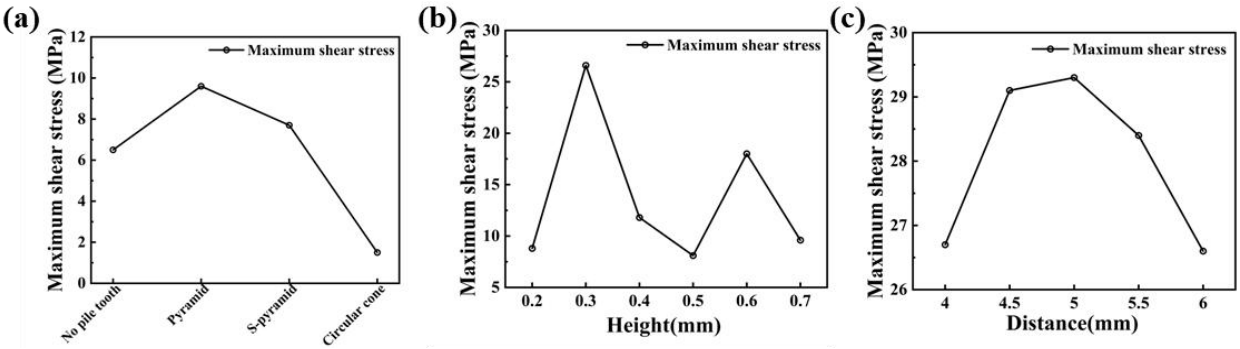


Fig. 10　Relationship between Mises equivalent shear stress and different pile-tooth structures: (a) shape; (b) height; (c) density

Tab. 2　Maximum equivalent shear stress of model with different pile-tooth structures

Pile-tooth structures	No pile-tooth	Pyramid	S-pyramid	Circular cone
Maximum shear stress /MPa	6.5	9.6	7.7	1.5

2.3.2 桩齿结构高度对表面剪应力的影响：为研究桩齿结构高度对表面剪应力分布及大小的影响，选择四棱台结构作为桩齿结构，棱台下底边长为 2 mm，上底边长为 1 mm，上下底面中心在垂直于磨齿斜面的竖直线上，创建不同桩齿结构（即四棱台）高度(0.2 mm~0.7 mm)的磨盘模型，如 Fig.11(a_1)~(f_1)和 Fig.11(a_2)~(f_2)所示。不同桩齿结构高度表面剪应力分布如 Fig.11(a_3)~(f_3)所示，桩齿高度在 0.3 mm~0.6 mm 之间时，磨盘所受剪应力集中在磨齿齿顶棱面和靠近斜面一侧的棱边附近。采用 Mises 等效应力定量分析磨盘表面剪应力大小，结果如 Fig.10(b)所示和 Tab.3 所示。随桩齿高度增加，磨盘表面最大等效剪应力呈先增大后减小趋势，磨盘表面最大等效剪应力在桩齿高度为 0.3 mm 时具有较高值。这

是由于桩齿高度较低时，对物料向磨齿齿顶运动的阻碍减弱，磨齿齿顶附近剪切力增加，但桩齿结构自身所提供剪切作用下降。考虑到桩齿磨损的因素，桩齿高度不宜过高。桩齿高度在 0.3 mm 时，桩齿结构自身所提供剪切作用和桩齿对物料的阻碍作用相对平衡，磨齿整体具有较好的剪切碾磨作用。

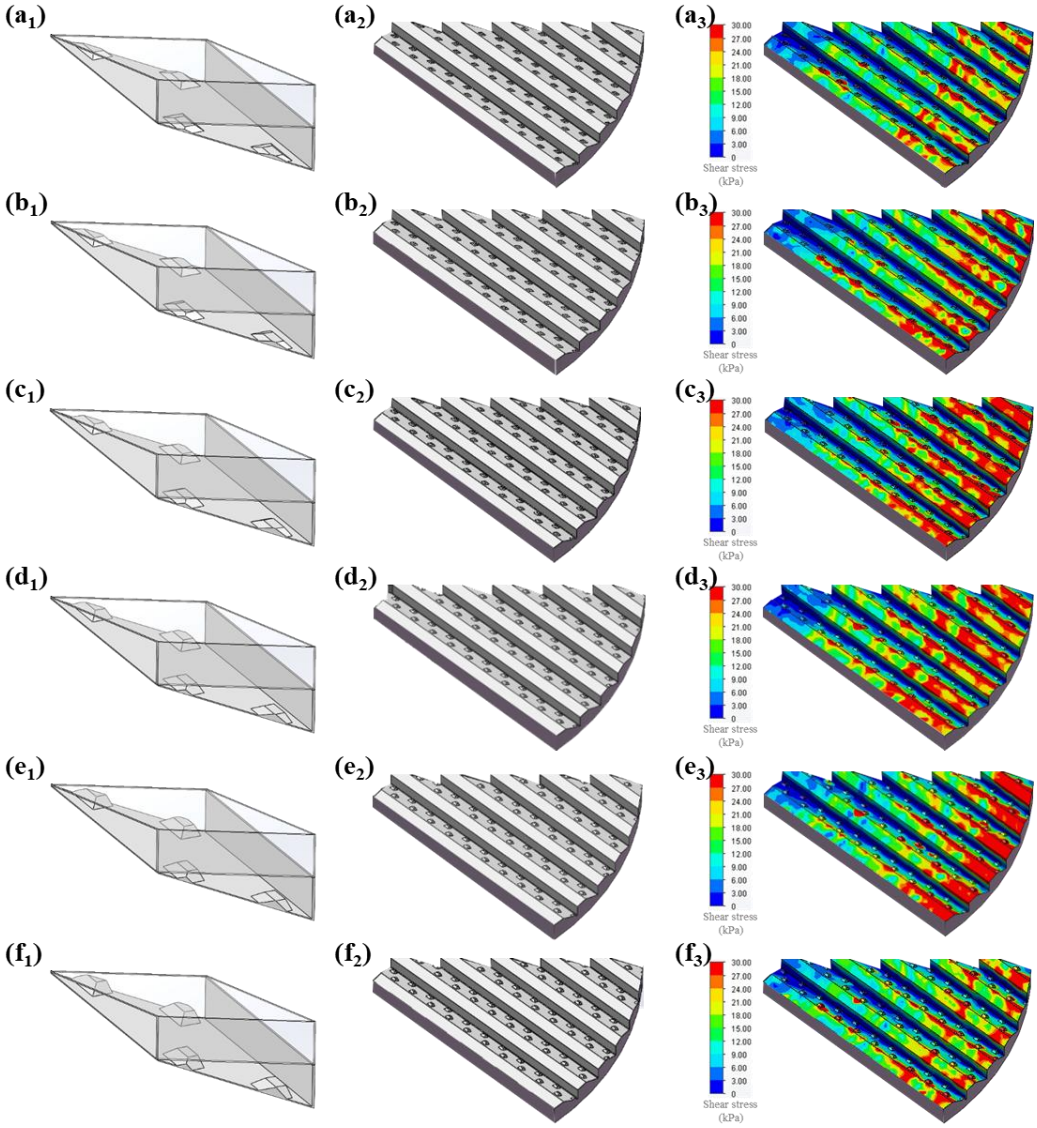


Fig. 11　(a_1)~(f_1) Grinding chamber view, (a_2)~(f_2) 3D model view, and (a_3)~(f_3) simulation results of grinding tooth with different pile-tooth structures height

Tab. 3　Maximum equivalent shear stress of model with different pile-tooth structures height

Height /mm	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7

Maximum shear stress /MPa	**8.8**	**26.6**	**11.8**	**8.1**	**18.0**	**9.6**

2.3.3 桩齿结构分布密度对表面剪应力的影响：为优化桩齿结构条件参数，以桩齿高度为 0.3 mm，桩齿在磨齿斜面上交错排列，创建不同桩齿分布密度（同列中相邻桩齿间距为 4 mm~6 mm）的磨盘模型，研究了不同桩齿结构分布密度对表面剪应力分布和大小的影响。如 Fig.12(a_1)~(e_1)和 Fig.12(a_2)~(e_2)所示，相邻桩齿间距越小，分布越密集，越向磨齿斜面中心线集中。不同桩齿结构分布密度对表面剪应力分布的影响如 Fig.12(a_3)~(e_3)所示，磨盘表面剪应力主要分布在磨齿齿顶棱面和齿槽桩齿附近。对比研究磨盘表面最大等效剪应力与磨齿桩齿结构分布密度的关系，结果如 Fig10(c)和 Tab.4 所示。磨盘表面最大等效剪应力都表现出较高水平，说明桩齿结构具有增加剪应力的作用，磨盘表面最大等效剪应力在同列桩齿相距为 5 mm 时具有最大值。这是由于桩齿的居中交错排列，桩齿间距减小，分布密度提高的同时，桩齿也向磨齿斜面中心线靠近，逐渐远离了磨齿齿顶齿棱处，导致桩齿结构对物料的剪切作用减弱。

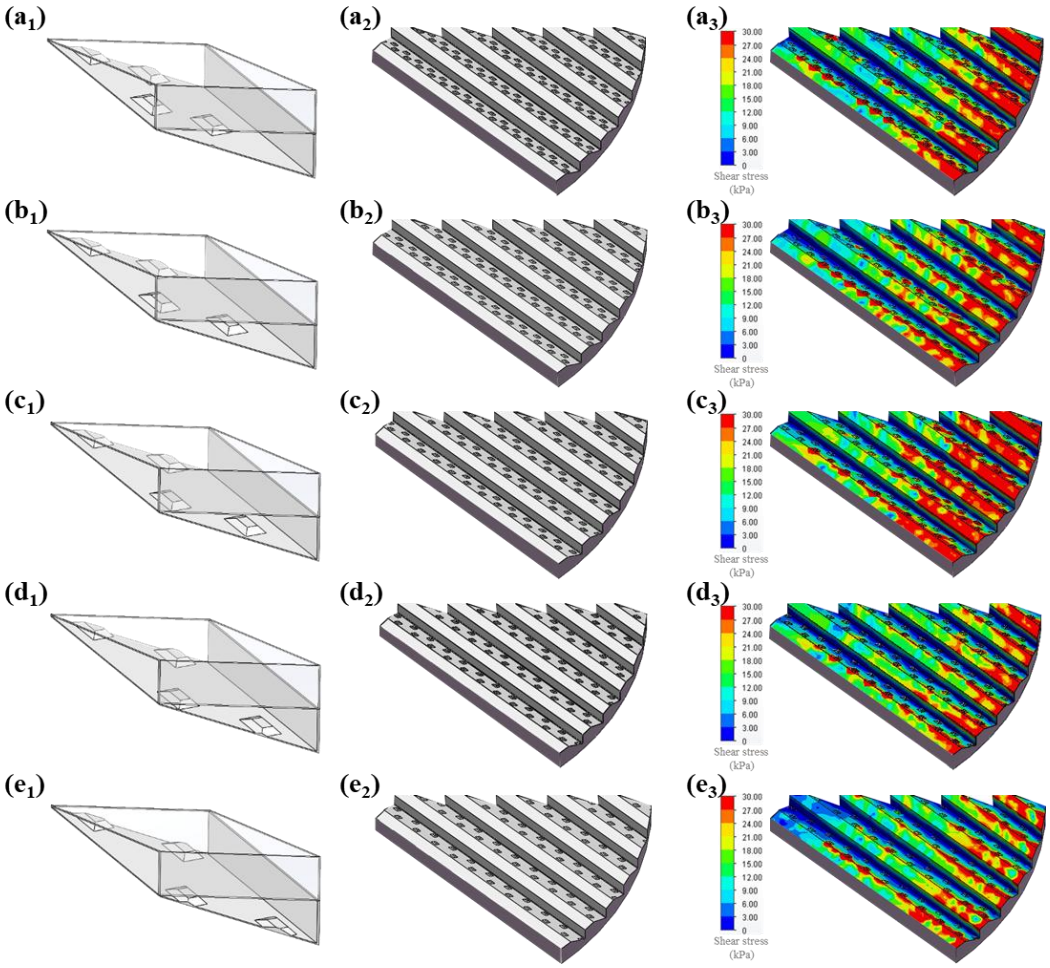


Fig. 12 (a_1)~(e_1) Grinding chamber view, (a_2)~(e_2) 3D model view, and (a_3)~(e_3) simulation results of grinding tooth with different pile-tooth structures density

Tab. 4 Maximum equivalent shear stress of model with different pile-tooth structures density

Distance /mm	4	4.5	5	5.5	6
Maximum shear stress /MPa	26.7	29.1	29.3	28.4	26.6

2.4 透明磨盘装备实物验证实验

为便于观测流场与变形，选用丙烯酸酯透明材料制作磨盘并配合脆质淀粉粒开展可视化试验，该材料组合虽在力学强度上与实际工况存在差异，但能够有效捕捉应力分布与物料运移的主要特征，支撑本研究在机理层面的分析。根据 SOLIDWORKS 三维建模软件建立磨盘模型，利用 3D 打印光固化技术制备出丙烯酸酯透明磨盘模型，无桩齿结构以磨齿倾角为 30°的原磨盘为例(Fig.13(a))，具有桩齿结构以磨齿倾角为 30°，四棱台桩齿结构的高度为 0.3 mm，分布密度为同列相邻桩齿结构相距 5 mm 的磨盘为例(Fig.13(b))，其上桩齿结构细节图，如 Fig.13(d)所示。利用有机玻璃透明材料基板、电机等装备，制造了可视化透明的 S^3M 装备，如 Fig.13(c)所示。

采用淀粉颗粒（如 Fig.14(a)所示，粒径约 4 mm）实验验证不同磨盘结构对材料的剪切破碎效果，分别对未植入桩齿的磨齿倾角为 30°的磨盘和磨齿倾角为 30°，四棱台桩齿结构的高度为 0.3 mm，分布密度为同列相邻桩齿结构相距 5 mm 的优化条件下的新磨盘进行了淀粉颗粒碾磨对比试验，实验结果分别如 Fig.14(b), (c)所示。在挤压和剪切作用下，淀粉颗粒被直接粉碎成较小颗粒，且明显经新磨盘碾磨后颗粒更细。为了定量描述不同磨盘结构对淀粉颗粒碾磨效果的影响，采用淀粉粒径评估淀粉颗粒碾磨效果，结果如 Fig.14(d)所示。新磨盘碾磨后粒径远远小于原磨盘，经桩齿结构优化的新磨盘碾磨后颗粒平均粒径比未植入桩齿的原磨盘减小 40%，碾磨效果更佳，与模拟实验相符合。这是因为，相较于未植入桩齿的磨盘，新磨盘桩齿结构优化了物料颗粒在碾磨腔室的排布方式，利于物料与桩齿和磨齿三者之间发生力学相互作用，增加了物料所受剪切作用，提高了碾磨效能。

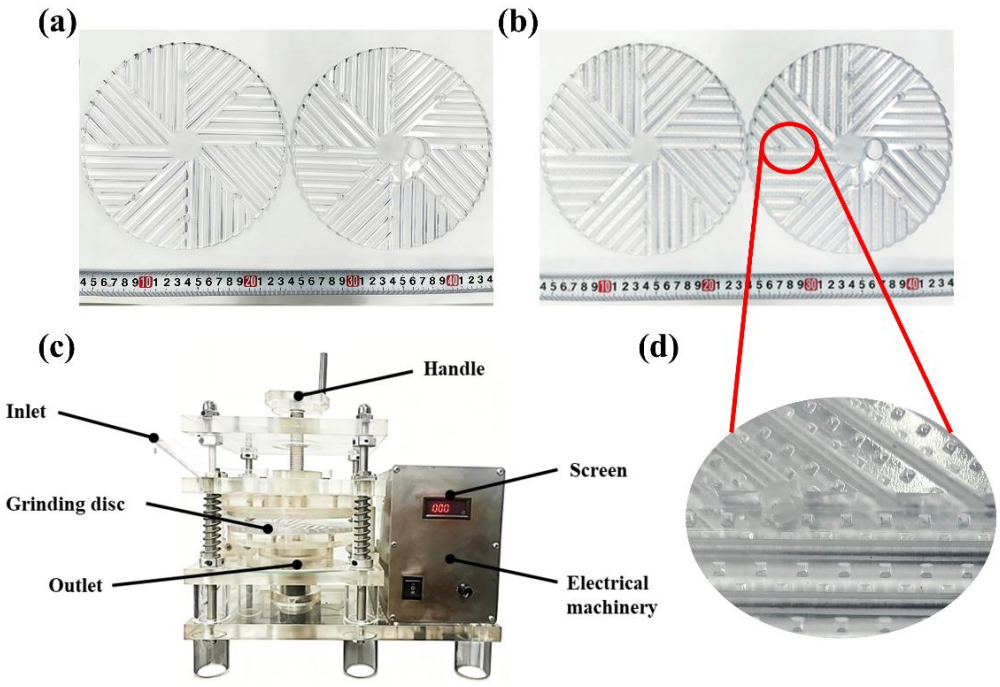


Fig. 13　Grinding disc model of 3D printed with (a) no pile-tooth, (b, d) pile-tooth and (c) transparent S³M equipment

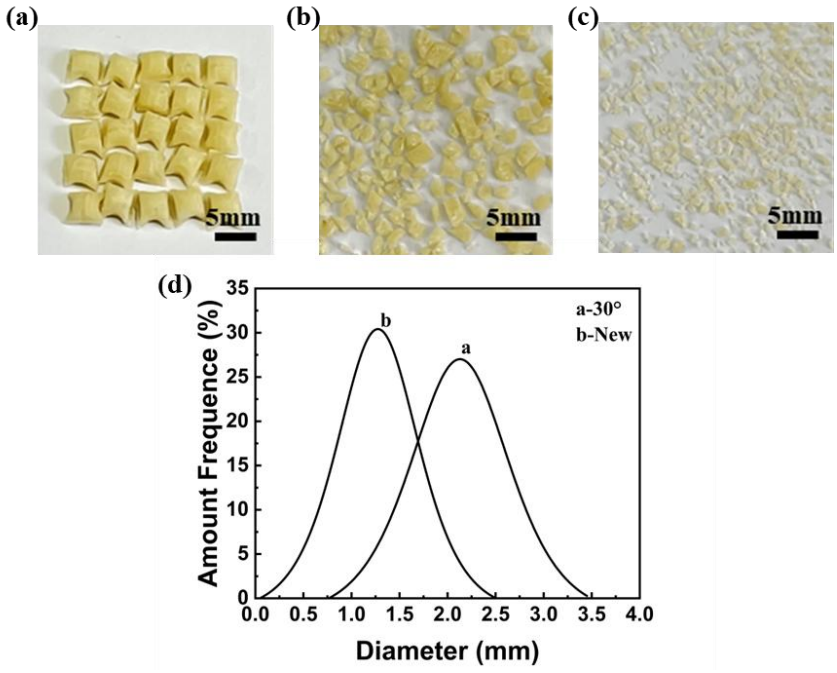


Fig. 14　Grinding verification experiment of (a) not grinding; disc of bevel angle of (b) 30° and (c) new disc. (d) Statistics on results of diameter

3 结论

本文在 S³M 装备磨齿斜面上植入桩齿结构，棱台型桩齿结构尖锐的棱缘相当于“切削刃”，物料与

桩齿接触时在棱缘处产生强烈的应力集中，并且在旋转过程中，不同棱面依次与物料接触，对物料施加局部高强度剪切作用，提高 S^3M 装备碾磨剪应力和粉碎效率。通过 CFD 软件的模拟实验表明，在四棱台桩齿结构的高度为 0.3 mm，分布密度为同列相邻桩齿结构相距 5 mm 的优化条件下，碾磨最大等效剪应力可达 29.3 MPa，比原磨盘提高 350 %。通过淀粉颗粒的验证实验表明，经桩齿结构优化的新磨盘碾磨后颗粒平均粒径比原磨盘减小 40%。综上所述，本文通过模拟与实验相结合的方法，明确了桩齿结构对提升碾磨剪切性能的作用机制，为相关装备的结构优化提供了理论依据与设计参考。

参考文献：

[1] Luo D W, Yang S Q, Wang Q, et al. Upcycling wind turbine blades into durable super-hydrophobic coating for high-efficiency anti-icing application[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 507: 160323-160335.

[2] Luo D W, Yang S Q, Wang Q. Reuse of wind turbine blades for high-performance flame-retardant epoxy composites via surface modification[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2025, 13: 6598-6610.

[3] Wang F J, Wang Q, Yang S Q. Mechanochemical recycling of acid anhydride-cured epoxy resin for functional applications[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2024, 13: 647-657.

[4] 徐僖, 王琪. 力化学反应器: 中国, 95111258.9[P]. 1996-01-17.

[5] 王琪, 卢灿辉, 夏和生. 高分子力化学研究进展[J]. 高分子通报, 2013(9): 35-49.
Wang Q, Lu C H, Xia H S. Research progress in polymer mechanochemistry[J]. Polymer Bulletin, 2013(9): 35-49.

[6] 白元彰, 白时兵, 李怡俊, 等.一种高效率磨盘型粉碎装置盘面:中国, 202121183464.2[P]. 2023-05-16.

[7] 白时兵, 王琪, 白元彰, 等. 一种工业用磨盘形固相力化学反应器: 中国, 202210302106.1[P]. 2022-05-27.

[8] 杨双桥, 韦宝杰, 徐大伟, 等. 铝塑复合包装的应用及废弃物回收利用新技术[J]. 化工学报, 2022, 73(8): 3326-3337.
Yang S Q, Wei B J, Xu D W, et al. Application of aluminum-plastic packaging and new recycling technology of the waste[J]. CIESC Journal, 2022, 73(8): 3326-3337.

[9] Wei L F, Wang C, Duan R X, et al. Finite element analysis of the structure and working principle of solid-state shear milling(S^3M) equipment[J]. Materials, 2024, 17: 4210-4222.

[10] Xu X, Wang Q, Kong X. Pan mill type equipment designed for polymer stress reactions: theoretical analysis of structure and milling process of equipment[J]. Plastics Rubber & Composites Processing & Applications, 1996, 25: 152-158.

[11] Wang Q, Cao J, Xu X, A study on the pan-milling process and the pulverizing efficiency of pan-mill type equipment[J]. Polymer Engineering and Science, 1997, 37: 1091-1101.

[12] Wang X T, Yang S Q, Wang Q. The experiment and simulation of enhanced mechanical performance for polyethylene terephthalate/high-density polyethylene composites via domain size control[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2023, 34: 3356-3369.

Optimization and Theoretical Analysis of the Milling Disc Structure of Solid State Shear Milling Equipment

Zhanhong Lai, Yijun Li, Qi Wang

(State Key Laboratory of Advanced Polymer Materials (Sichuan University), Polymer Research Institute of Sichuan University, Chengdu 610065, China)

ABSTRACT: Solid-state shear milling (S^3M) equipment, developed based on the principles of solid-state mechanochemistry, employs a unique three-dimensional shear field, enabling the ultrafine pulverization and micro-nano dispersion of polymer materials at room temperature. It is thus a crucial technology for waste

plastic recycling. To enhance the grinding efficiency of the S^3M equipment, this paper further optimized its structural design by incorporating pile-tooth structures on the inclined surfaces of the grinding teeth. Computational fluid dynamics (CFD) simulations, performed using Flow Simulation software, were employed to evaluate the resulting dynamic shear-stress field. The results demonstrate that key structural parameters, including the geometry, height, and distribution density of the pile tooth, significantly influence the generated maximum equivalent shear stress. Under the optimized configuration (the quadrangular prism pile tooth with a height of 0.3 mm, and an inter-pillar spacing of 5 mm within each column), the maximum equivalent shear stress reaches 29.3 MPa. These values correspond to increases of 350% over those generated by a conventional disc design without pile tooth.

Keywords: solid-state shear milling (S^3M) equipment; optimization of disc structure; pile tooth; simulation; maximum equivalent shear stress