·综述·

热塑性高分子功能化成型加工方法的研究进展

袁晨野 薛国庆 郑国强* 李梦鸽

(郑州大学材料科学与工程学院 郑州 450001)

摘要：热塑性高分子材料凭借可回收、易加工、性能易于调控等优势，在先进复合材料与功能器件领域应用广泛。热塑性高分子材料的成型加工过程是赋予其宏观结构的关键环节，同时也是决定其微观结构和功能性的重要手段。本文围绕热塑性高分子功能化成型加工技术，系统介绍了挤出成型、注塑成型、热压成型三大主流成型加工方法的基本原理，总结了基于上述成型加工方法改进而来的新型成型加工方法的研究现状和最新进展，为拓展热塑性高分子功能化成型加工方法的应用领域及研发新型成型加工装备提供借鉴。

关键词：热塑性高分子；成型加工；挤出成型；注塑成型；热压成型

Progress on Functionalized Processing Methods of Thermoplastic Polymers

YUAN Chen-ye, XUE Guo-qing, ZHENG Guo-qiang*, LI Meng-ge

(*School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001*)

Abstract: Thermoplastic polymers are widely used in the field of advanced composite materials and functional devices due to their advantages of recyclability, easy melt processing and facile control of performance. The molding process of thermoplastic polymer materials is the key link to endow them with macroscopic structure, and it is also an important means to determine their microstructure and functionality. This paper focuses on the functional processing technology of thermoplastic polymer, systematically introduces the basic principles of the three mainstream processing methods of extrusion molding, injection molding and hot pressing molding, and summarizes the research status and latest progress of the new processing methods based on the above processing methods. It provides a reference for expanding the application field of the functional processing method of thermoplastic polymer and developing new processing equipment.

Keywords: Thermoplastic polymers; Molding processing; Extrusion molding; Injection molding; Hot pressing molding

引用：袁晨野, 薛国庆, 郑国强, 李梦鸽. 热塑性高分子功能化成型加工方法的研究进展. 高分子通报, doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.242

Citation: Yuan, C. Y.; Xue, G. Q.; Zheng, G. Q.; Li, M. G. Progress on functionalized processing methods of thermoplastic polymers. *Polym. Bull.* (in Chinese), doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.242

目前，热塑性高分子的功能化，主要分为化学功能化与物理功能化。其中，化学功能化主要通过化学合成和改性2个策略来实现。合成是通过高分子材料在聚合反应阶段过程中添加带有目标功能的单体来实现高分子材料的功能化。改性则是以无特殊功能性的高分子材料为基体，借助

高分子加工专题；2026-06-09 收稿，2026-07-22 录用
基金项目：国家自然科学基金(基金号 52273046)，河南省高校科技创新团队(科技类)项目(项目号 20IRTSTHN002)
* 通信联系人：郑国强，E-mail: gqzheng@zzu.edu.cn
doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.242

分子链接枝等化学手段引入活性官能团，实现高分子材料的功能化。而物理功能化则是在不改变高分子材料的化学结构的情况下，仅依靠成型过程中的物理共混、各类热–机械场的作用，构建功能性微观结构，从而使材料获得优异的电、光、润湿性、生物特性等功能性。由于实现这些功能化的主要方式为成型加工，所以将其称为功能化成型加工。然而，传统加工设备及方法对实现材料功能化成型的能力有限，难以有效制备高性能、多功能的高分子制品[1]。为此，旋转挤出成型、体积拉伸流变加工技术、真空辅助热压成型、脉冲赋能模压成型等一系列改进的新型成型加工设备和方法相继出现。这类设备依靠引入物理场以及通过耦合调控物理场的方式，使高性能、多功能高分子制品难以制备的问题得到解决，突破了传统成型加工方法的局限，推动热塑性高分子制品的功能化成型加工并拓展其应用范围[2~4]。

1 挤出成型

挤出成型是热塑性高分子材料重要的成型加工方法之一。热塑性高分子材料在挤出机中经加热熔融、剪切塑化后，在螺杆压力作用下连续通过具有特定截面的口模形成型坯，经冷却定型后制得截面形状恒定、长度连续的制品。该成型加工方法具有连续高效、适应性强、易于规模化生产等优势，是热塑性高分子材料成型加工领域应用最为广泛的成型方法之一。

1.1 旋转挤出成型

旋转挤出是管材领域的新型成型加工方法，相较于传统成型挤出，该成型方法通过增设环向旋转机构，使口模、芯棒在熔体成型阶段发生环向转动，主要包括芯棒单独旋转、口模单独旋转及二者同步旋转3种形式，以此调控熔体剪切行为与取向结构。该成型方法可制备出高精度无缝塑料管材，且产品壁厚均匀、尺寸稳定性良好。旋转作用能够诱导高分子链双向有序排列，消除成型过程中的内应力，有效提升管材环向刚度、冲击强度与耐化学腐蚀性能，减小制品收缩形变。

早期旋转挤出环向应力场施加方式单一且挤出压力大，挤出温度高，取向结构难以保持。四川大学王琪团队[5,6]自主研发了一种新型旋转挤出流变仪，如图1(b)所示。通过安装在线检测和数据采集处理系统，实现挤管加工中复杂应力场和温度场的精确调控及在线测量，并且可以通过调节运动模式来应对不同的流变情况。其原理如图1(a)所示。之后，聂敏等[7]通过这种新型旋转挤出流变仪制备了高性能聚合物管，通过旋转挤出工艺制备的聚乙烯管材中观察到偏离轴向的串晶结构；与常规挤出管材相比，其环向拉伸强度提升约78%，裂纹引发时间延长约544%，显示出显著的力学性能与抗裂纹增长优势。

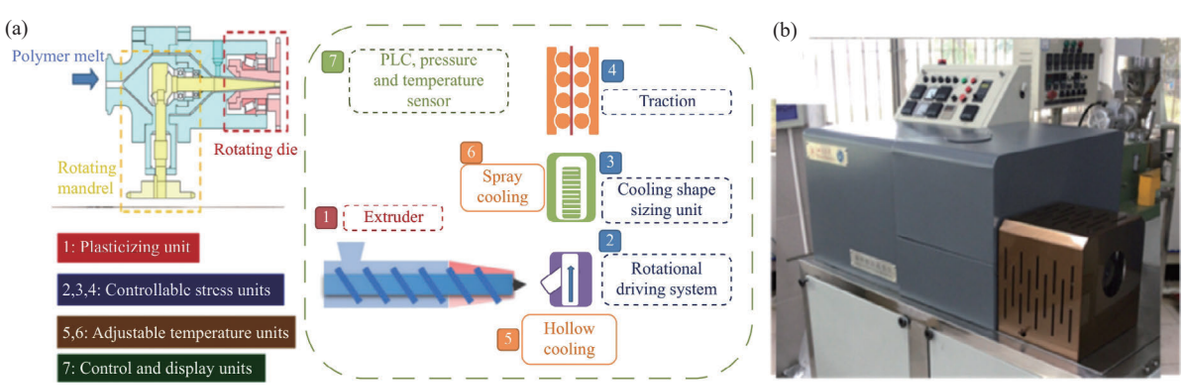

图 1 (a)旋转挤出流变仪的结构特征原理以及(b)旋转挤出流变仪样机[5] (2021 高分子学报版权许可)

Figure 1 (a) Structural feature and (b) prototype system of rotation-extrusion rheometer (Reprinted with permission from Ref. [5]; Copyright (2021) *Acta Polymerica Sinica*)

李怡俊等[8]在此基础上采用芯棒旋转模式成功制备了具有高抗扭结性能的聚乙烯(PE)医用微管。研究表明，在微管挤出过程中引入额外的环向剪切作用，可促使PE分子链沿剪切方向伸展并形成偏离轴向的串晶结构。如图2所示，当微管承受扭转载荷时，具有高强度和高模量的串晶在纯剪切应力方向上表现出较高的取向度，从而显著增强了PE微管的环向抗扭性能。微型旋转挤

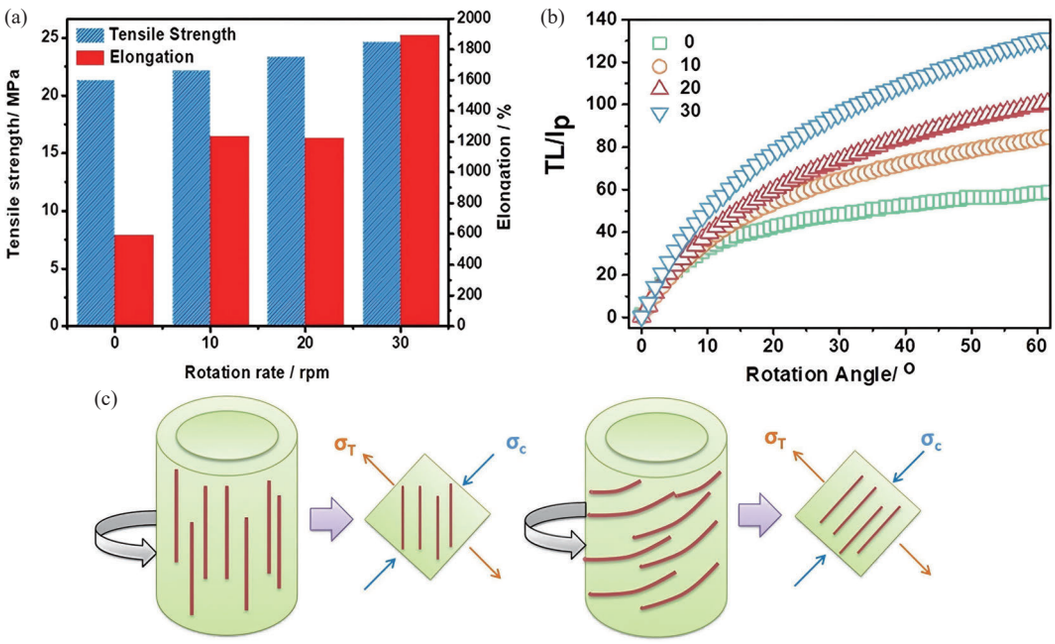

图 2　(a)芯棒内旋模式挤出 HDPE 微管的轴向拉伸强度及断裂伸长率；(b) HDPE 微管的扭矩－扭转角变化关系图；(c)螺旋增强结构扭转时受纯剪应力作用机理图，σ_T 及 σ_C 分别为拉伸及压缩应力[8] (2019 高分子通报版权许可)

Figure 2　(a) Tensile strength and elongation of the mandrel rotation extruded tubes in axial direction; (b) Typical torque-angles curves of HDPE tubes; (c) Schematics of a helix-reinforced plate, illustrative of a stress element at the inner surface of the HDPE tubes, subjected to pure shearstress when twisted. σ_T and σ_C are tensile and compressive stress, respectively (Reprinted with permission from Ref. [8]; Copyright (2019) *Polymer Bulletin*)

出PE微管的环向剪切模量最高可达1018.1 MPa，比非旋转制备的微管增加了89.3%。

Abudurezhake等[9]通过自主设计的旋转剪切装置，在旋转挤出PP管材过程中添加了β成核剂(TMB-5)，结果表明，该方法可显著提升PP管材的韧性与拉伸性能：0.025 wt%成核剂使剪切样品的断裂伸长率提高至243.30%；0.05 wt%成核剂时，拉伸强度达到40.98 MPa(未剪切PP为33.62 MPa)，断裂伸长率仍保持在108.09%。蠕变测试显示，经剪切与成核剂协同作用的PP管材最小蠕变位移为2.1 mm，最低蠕变速率为3.23×10^{-5} mm/s。此外，该材料还表现出优异的抗裂纹扩展能力，裂纹引发时间达24 h，裂纹扩展速率为0.08 mm/s。

1.2　振动挤出成型

振动挤出能够将机械、声波、气体等周期性的振动形式引入高分子熔体中，使熔体在受到原有热机械史的基础上再受到一个交变力场，在这种复合多外场的作用下，高分子材料的凝聚态结构、结晶度、流变性、取向发生改变，以此获得更高性能的高分子制品[10]。

Qu等[11~13]研制了一种电磁动态塑化挤出机，其工作原理是通过电磁耦合作用，使螺杆在旋转的同时产生轴向微幅振动，让聚合物物料处于旋转剪切与周期性拉伸压缩的复合力场中完成输送、塑化与挤出。并通过该设备制备了等规聚丙烯(*i*PP)片材，测试结果表明在适宜的振动参数下，挤出样品在流动方向和横向均实现了同步增强与增韧。振动挤出显著细化了PP的球晶结构并促进连接分子链生成，这些微结构演变是其在挤出方向及垂直挤出方向同时获得更高拉伸强度与冲击韧性的关键原因。

申开智团队[14]自行研制出一种超声振动挤出装置，其结构如图3所示。通过控制超声功率和冷却方式(水冷与空冷)，使分子链解缠结，熔体黏度下降，降低挤出压力，改善流动性、共混均匀性以及制品质量，并且依靠此设备研究了超声振动对聚苯乙烯(PS)熔体解缠结的影响。结果表明，在200 W以内超声未引起明显降解，挤出表观黏度下降主要由超声热效应(约56%)以及空化与机械效应(约44%)共同导致。定量分析缠结点间平均相对分子质量发现，水冷更有利于保留解缠结结构，使该值最大提升83%。熔体流动速率(MFR)数据显示，经过约600 s热历史后，各试样MFR趋

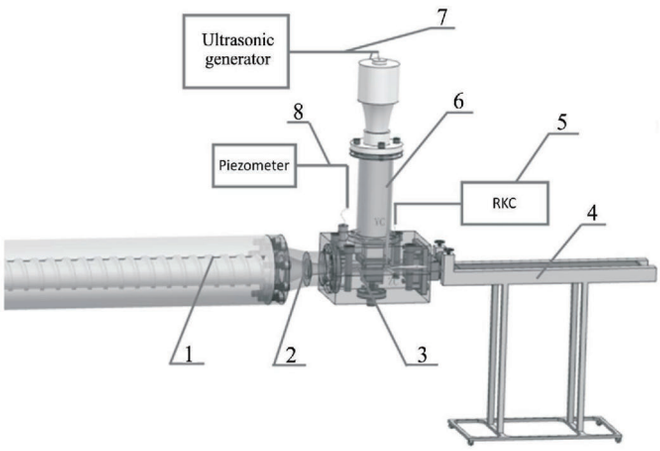

图 3 超声振动挤出装置的原理图[14] (2021 高分子材料科学与工程版权许可)

Figure 3 Schematic diagram of the ultrasonic extrusion device (Reprinted with permission from Ref. [14]; Copyright (2021) *Polymer Materials Science & Engineering*)

于一致，缠结结构基本恢复。

郭少云团队[15]为了制备更好性能的聚丙烯(PP)，通过在挤出机口模处施加超声振动，实现了低过氧化物浓度下的有效交联。动态流变、熔体流动速率和拉伸黏度测试表明，在功能单体和过氧化物含量不变的情况下，300 W超声可显著提高PP的凝胶含量和熔体强度。红外光谱、示差扫描量热和凝胶渗透色谱分析证实，超声在口模区域诱导PP分子链断裂与重组，是其凝胶含量和熔体强度提升的主要原因。

Xue等[16]通过平衡式三螺杆动态挤出工艺在不同振幅与频率的振动参数下制备了聚乳酸(PLA)/聚丁二酸丁二醇酯(PBS)/甲基丙烯酸缩水甘油酯三元共聚物(EGMA)。结果表明，振动力场可显著优化共混物分散性，进而提升其力学性能、热稳定性与结晶行为：6 Hz/1 mm振动参数下冲击强度从70.86 kJ/m^{2}提升至88.21 kJ/m^2，0.4 mm/10 Hz时达81.86 kJ/m^2。正交试验与熵权法分析显示，振动频率和振幅对力学性能优化起主导作用，加工温度与转子转速影响较小。SEM证实振动力场可减少相分离、促PBS与EGMA在PLA基体中精细均匀分散；TGA与DTG曲线表明，振动参数低于特定阈值时热稳定性下降，超过则显著提升(如1.0 mm振幅下从328.6 ℃升至333.7 ℃，10 Hz频率下达333.1 ℃)。

1.3 体积拉伸流变挤出技术

拉伸流变挤出是近年来发展的新型高分子成型加工方法。瞿金平等[17~20]最早提出了基于拉伸流变的高分子塑化输运理论，即以周期性熔融腔产生的体积拉伸流场为主导、弱化剪切作用，依靠正位移熔融腔强制输送，实现高分子物料快速低降解熔融塑化、高效混炼与稳定输运的新型高分子加工基础理论。并基于该理论研发出一种叶片拉伸流变塑化输运设备，实现了高分子材料成型加工从“剪切流变”向“拉伸流变”的技术转变。在此基础上，该团队进一步提出并研制了偏心转子体积脉动形变塑化输运理论与设备。实验表明，基于体积拉伸形变的塑化输运方法能够显著缩短热机械历程，降低能耗，提高分散混合性能，能够广泛适用于各种材料。

翟家驹等[21]采用偏心转子挤出机，利用拉伸流场在短时间内制备高性能线型低密度聚乙烯/超高分子量聚乙烯（LLDPE/UHMWPE）共混物。扫描电镜结果表明，UHMWPE与LLDPE相容性良好，在基体中分散均匀。示差扫描量热分析显示，共混物熔融温度与结晶度随UHMWPE含量增加而提高。当UHMWPE质量分数为10%~50%时，共混物冲击强度为纯LLDPE的1.05~1.4倍，力学性能显著提升。研究表明，偏心转子挤出机拉伸流场加工可制备相容性与力学性能优异的LLDPE/UHMWPE共混材料。

Zhang等[22]在偏心转子挤出机拉伸流场的基础下结合了环流协同吹塑技术，借助环流协同效应形成交叉取向微观结构并促进结晶，显著提升薄膜阻隔性能。如图4所示，其氧气、水蒸气透过率较商用保鲜膜分别降低31%与53%。改善薄膜纵横向力学性能均匀性，有效延长食品货架期，延缓果蔬变质，为食品包装用吹塑薄膜的开发提供了新路径。

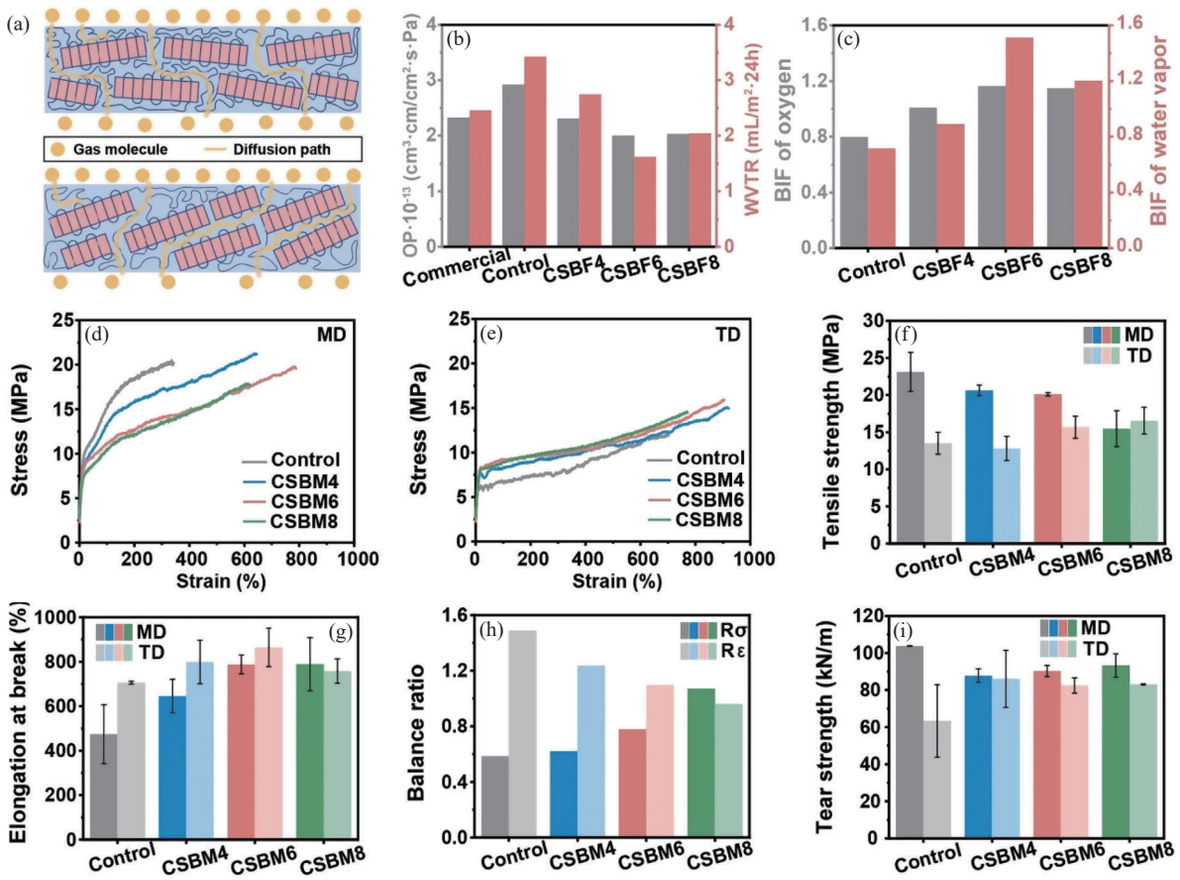

图 4　双层共挤出薄膜在不同加工条件下的性能：(a)障壁机制；(b)渗透率系数；(c)阻隔改善系数；(d)多层抗力–应变曲线；(e)多层抗力–应变曲线；(f)抗拉强度；(g)断裂伸长；(h)抗拉强度与断裂伸长比；(i)双层共挤出膜的撕裂强度[22] (2025 Elsevier 版权许可)

Figure 4　Performances of bilayer co-extrusion films under different processing conditions (a) Barrier mechanism; (b) Permeability coefficient; (c) Barrier improvement factor; (d) Stress-strain curves in MD; (e) Stress-strain curves in TD; (f) Tensile strength; (g) Elongation at break; (h) Balance ratio of tensile strength and elongation at break; (i) Tear strength of bilayer co-extrusion films (Reprinted with permission from Ref. [22]; Copyright (2025) Elsevier)

2　注塑成型

注塑成型是将热塑性高分子材料加入注塑机料筒内，经加热熔融塑化形成均匀熔体；在螺杆旋转或柱塞的高压驱动下，熔体通过喷嘴与流道系统高速注入闭合的模具型腔，待熔体冷却固化定型后，开模顶出即可获得与型腔轮廓一致的制品，是一种高效、规模化的塑料成型技术[23]。

2.1　动态保压注塑成型技术

动态保压注塑技术是借助专用模具结构，在聚合物注射成型的保压阶段对熔体施加可控的外部剪切作用，强制聚合物熔体在型腔厚度方向反复流动。以此调控聚合物基体的结晶行为、分子取向结构或分散相形态，实现对材料力学性能的定向优化，最终得到无内部缺陷、尺寸精度高、力学强、低应力的精密塑料制品。四川大学申开智团队[24]最早从事动态保压注塑技术研究，并且在英国学者Bevis所开发装置的基础上进行深入分析与改进，自主研制了适用于国内实验研究的动态保压注塑装置。

杜金松等[25]利用动态保压注塑装置对中等分子量高密度聚乙烯(HDPE)中同时添加HMWPE和LMWPE，并且研究其自增强串晶结构与力学性能的影响。研究显示在双组分诱导与动态保压技术DPIM工艺共同作用下，试样中形成大量串晶结构。160 ℃动态保压条件下，试样拉伸强度达111.6 MPa，为纯HDPE静态试样(24.5 MPa)的4.56倍，提升幅度为355.5%。广角X射线衍射(WAXD)、示差扫描量热(DSC)及扫描电子显微镜

(SEM)分析显示，DPIM可使材料形成紧密互锁的串晶结构；其中HMWPE可促进串晶脊纤维的形成，LMWPE有利于片晶增厚与完善，二者协同使串晶组织更加规整。

谢泽祥[26]在此基础上将动态保压注塑技术(DPIM)与仿真结合，结果发现DPIM所提供持续剪切速率超过了分子链伸直生成shish前驱体的临界剪切速率，揭示了动态保压技术(DPIM)制备高取向结晶的机理。同时对静态注塑成型加工(CIM)所制备的样品进行热拉伸处理和对比。研究结果显示CIM样品与DPIM样品的VST都随拉伸比升高而升高，分别由77.7 ℃提升到了82.6 ℃，以及由97.7 ℃提升到了103.5 ℃。CIM试样与DPIM试样的拉伸强度和弹性模量随着拉伸比的增加而增加。

2.2 脉动注塑成型技术

华南理工大学的瞿金平团队在动态保压注塑技术的发展原理上研制出了一种体积脉动注塑成型装置(VPIM)，其原理是在保压过程中叠加周期性振动，使物料在注射充模阶段经历周期性体积脉动作用。该团队通过此装置实现了对聚合物复合材料的高效加工，显著提高了材料性能[27,28]。Zhang等[29]使用体积脉动注塑成型装置制备HIPS/HDPE共混物以改善HIPS的耐环境应力开裂(ESC)性能。如图5所示，结果表明，相较于传

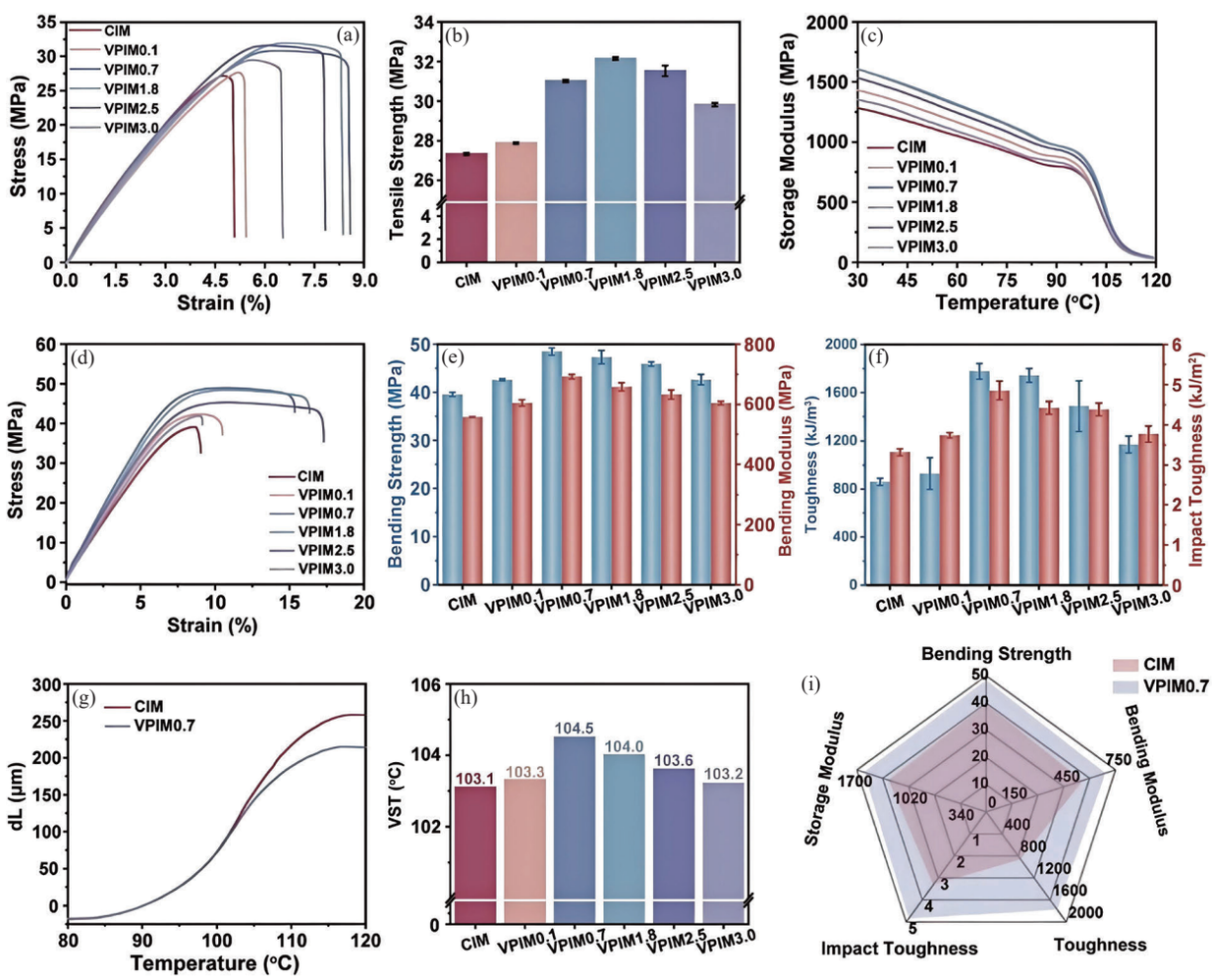

图5 加工频率对HIPS/HDPE共混物力学性能和热性能的影响：(a)拉伸曲线；(b)拉伸强度；(c)储能弹性系数；(d)弯曲曲线；(e)弯曲强度和弯曲弹性系数；(f)韧性和冲击韧性；(g)热稳定性试验；(h)维卡软化温度；(i)综合性能比较[29] (2024 Elsevier版权许可)

Figure 5 The influence of the process frequency on the mechanical and thermal properties of HIPS/HDPE blends: (a) tensile curves; (b) tensile strengths; (c) storage modulus; (d) bending curves; (e) bending strength and bending modulus; (f) toughness and impact toughness; (g) thermal stability tests; (h) Vicat softening temperatures; (i) comprehensive performance comparison (Reprinted with permission from Ref. [29]; Copyright (2024) Elsevier)

统注射成型(CIM)，VPIM技术制备的共混物兼具优异的综合力学性能与耐热变形性能。VPIM0.7的弯曲强度、拉伸韧性和冲击韧性较CIM试样分别提升22.55%、107.1%和46.5%；120 ℃下变形量由258 μm 降至214 μm。微观结构分析表明，HIPS基体中原位生成的HDPE微纤是性能提升的关键：HDPE微纤可延长溶剂扩散路径，减轻基体塑化与氧化作用；片晶区域增多则增强阻隔效应，抑制溶剂渗透。

3　热压成型

热压成型是一种广泛应用于热塑性高分子材料及其复合材料制品制造领域的关键工艺技术，其核心原理在于将原料置于加热模具中，通过同时施加温度与压力，使材料熔融流动并充满型腔，最终经冷却而定型[30]。热压成型工艺目前主要分为模压成型和辅助热压成型。该工艺在汽车制造、航空航天、电子电器及包装消费品等众多工业领域均发挥着关键作用。

3.1　真空辅助热压成型技术

真空辅助热压成型技术是指在真空腔体内同时施加加热与机械压力的成型工艺。该工艺主要依赖于真空热压机。真空热压机可在高真空环境下集成精准加热与可控压力机制，能有效抑制材料热降解并优化熔融充模过程。真空环境可隔绝氧气、抑制高温氧化，同时快速脱除体系内水分及低分子挥发物，避免热裂解及孔隙缺陷，从而保障制品的致密性。相较于常规压机易产生气泡、致密度不足、热氧老化等缺陷，真空条件可有效消除型腔内气体阻力，显著降低熔体表观黏度，促进熔体对微细结构的充分填充，实现制件完全致密化与高精度复制，并有效规避困气、分层及残余应力等问题。

近年来，随着真空热压工艺的不断发展，市面上涌现出多种规格的真空热压设备。然而，现有真空热压机多面向工业应用，以油压驱动为主，普遍存在设备体积庞大、能耗较高、动作响应迟缓等不足，对高校及科研院所等实验环境的使用需求缺乏针对性考量。针对上述行业痛点，郑州工匠机械设备有限公司专注于真空热压装备的自主研发，研发出多种系列的小型真空热压机，可根据应用场景与材料特性进行选用。该设备可用于无气泡、高致密度制品的制备，能够有效改善熔体充填行为，有利于大面积微结构阵列的成型加工[31]；配合专用模具，可实现流变测试试样、力学性能样条等标准试样的制备。在真空条件下，设备可克服熔体表面张力，提升微结构充填能力。同时设备均采用全自动控制模式，结构紧凑，运行噪声低，通过伺服电机驱动实现压力精准输出，可完成快速制样，能够满足高校及科研实验室的研究需求，具体如图6所示。

对于传统多层结构致动器组分相容性不足易出现界面剥离失效以及单层致动器制备工艺复杂的难题，Wang等[32]通过上述真空热压机在均质PVDF薄膜单侧成功构筑微脊阵列，制备了构筑单层均相Janus致动器(SHJA)。实现了依靠丙酮蒸气引发的非对称溶胀实现定向弯曲，同时兼具驱动稳定性以及耐用性，为高性能聚合物致动器的实用化开发提供新思路。

针对弹性压阻传感器型电子皮肤表面微图案制备工艺繁琐的问题，Zhang等[33]成功通过该真空热压机，在热塑性聚氨酯(TPU)薄膜表面高效制备有序排布的微脊结构(TM)，并通过浸渍涂覆法将MXene纳米片负载于该微结构基底，制得具备传感特性的复合敏感层(MN-TM)；与此同时，研究人员在覆盖叉指电极掩模板的TM基底表面进行金(Au)溅射处理，成功制备叉指电极基底(IG-TM)。随后将MN-TM与IG-TM两片基底进行面对面精准组装，构建出基于互锁微脊结构的高性能仿生电子皮肤。该互锁微结构设计能够有效强化器件接触位点处的局部应力集中效应，大幅优化传感性能，使得所制备的仿生电子皮肤实现了超高灵敏度(≈1502.5 kPa^{-1})、宽压力检测范围(≈160 kPa)、超快响应速度(10 ms)，且在10000次循环加载测试后仍保持性能稳定，展现出优异的耐用性。这种简便制备仿生互锁微脊的方法为高性能电子皮肤的实现开辟了一条新途径，并拓展了其在未来可穿戴智能系统中的应用前景。具体如图7所示。

3.2　超声辅助热压成型技术

超声辅助热压成型技术在传统热压温度场与压力场耦合作用的基础上，引入高频超声振动能量场协同作用，借助超声改善高分子熔体的流动、填充特性，实现高分子间的高效复合成型。相较于常规热压工艺，该技术能够显著降低成型温度与成型压力，减少制品内部孔隙、微裂纹及残余

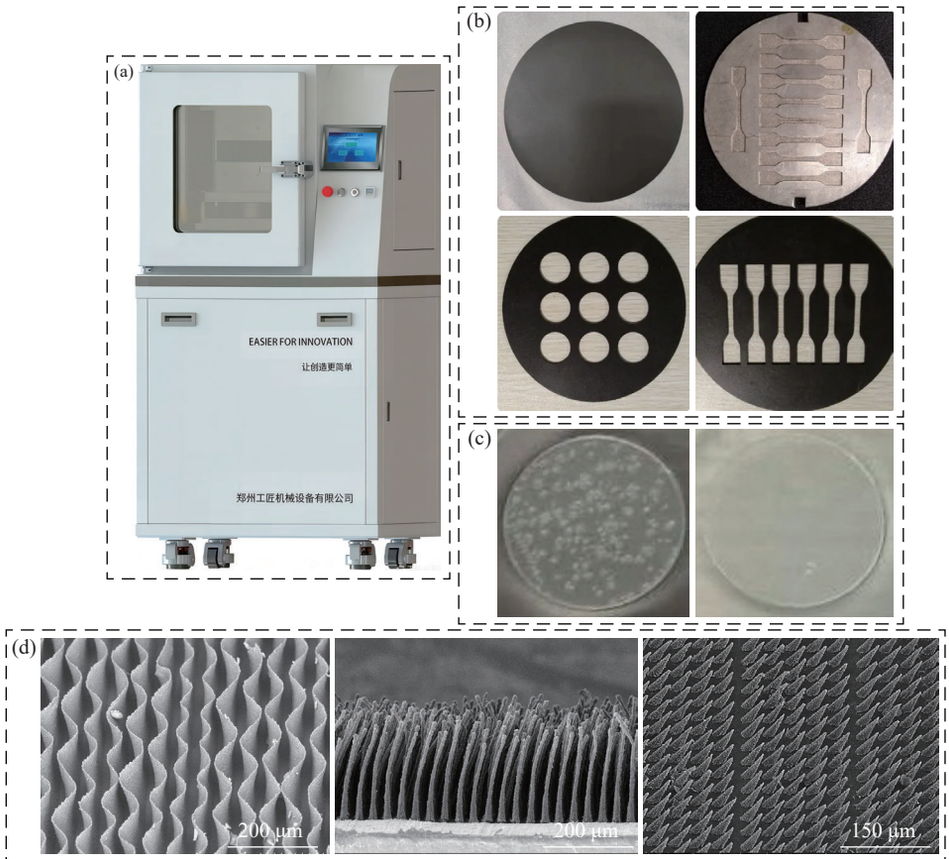

图 6 (a)真空热压机;(b)真空热压机专用样条模具;(c)热压机(左侧)及真空热压机(右侧)所制备性能试样对比;(d)真空热压机所制备的大面积微结构阵列

Figure 6 (a) Vacuum hot press machine; (b) Special spline mold for vacuum hot press machine; (c) Hot press machine (on the left) and vacuum hot press machine (on the right)-comparison of performance test samples prepared; (d) Large-area microstructure array prepared by vacuum hot press machine

应力等缺陷，实现晶粒细化与界面结合强度提升，最终制备出高致密度、结构均匀性良好、尺寸稳定性优异的成型制品。

黄进等[34]通过自主研发的超声辅助热压技术，成功实现聚丙烯/铝合金的直接复合成型；系统探究了超声波参数对该复合体系界面结构与结合性能的影响规律，并采用超薄切片、铝合金反溶解法对复合界面的微观形貌进行表征分析。拉伸–剪切测试结果表明，非超声热压成型试样的界面拉伸–剪切强度为12.04 MPa，界面层平均厚度6.47 μm，界面失效形式以混合失效为主；而经超声辅助热压成型的试样，其界面拉伸–剪切强度提升至19.90 MPa，较非超声试样提高65.3%，界面层平均厚度缩减至5.40 μm，且聚丙烯与铝合金微纳改性表面间形成了结合良好的微观机械互锁结构。

邢清松等[35]采用热压工艺在聚丙烯(PP)表面构筑规整纳米结构阵列，通过超声辅助处理后，借助超声空化效应使PP表面纳米结构转变为类花瓣状微纳结构。测试结果表明，超声处理后PP表面接触角由152.3°提升至160.0°，滚动角从11.5°降至1.8°，表面黏附力由75 μN减小至38 μN。如图8所示，展现出典型的超疏水低黏附特性，且自清洁效果显著。该制备方法具有操作简便、成本低廉、改性效果优异的优势，在超疏水微纳表面的工业化制备中具有良好的应用前景。

3.3 脉冲赋能模压成型技术

脉冲赋能模压成型技术是近年来华南理工大学研发的面向高分子材料及复合材料加工的新型热压成型工艺。核心是在传统模压成型的热-压基础上引入脉冲振动及压力赋能，通过动态能量输入调控高分子链缠结，促进链段滑移松弛，减少材料微孔缺陷，同时细化晶粒，均匀结晶结构，有效抑制长时间高温导致的分子链热降解。形成的微观组织结构能够显著规避传统成型方法存在

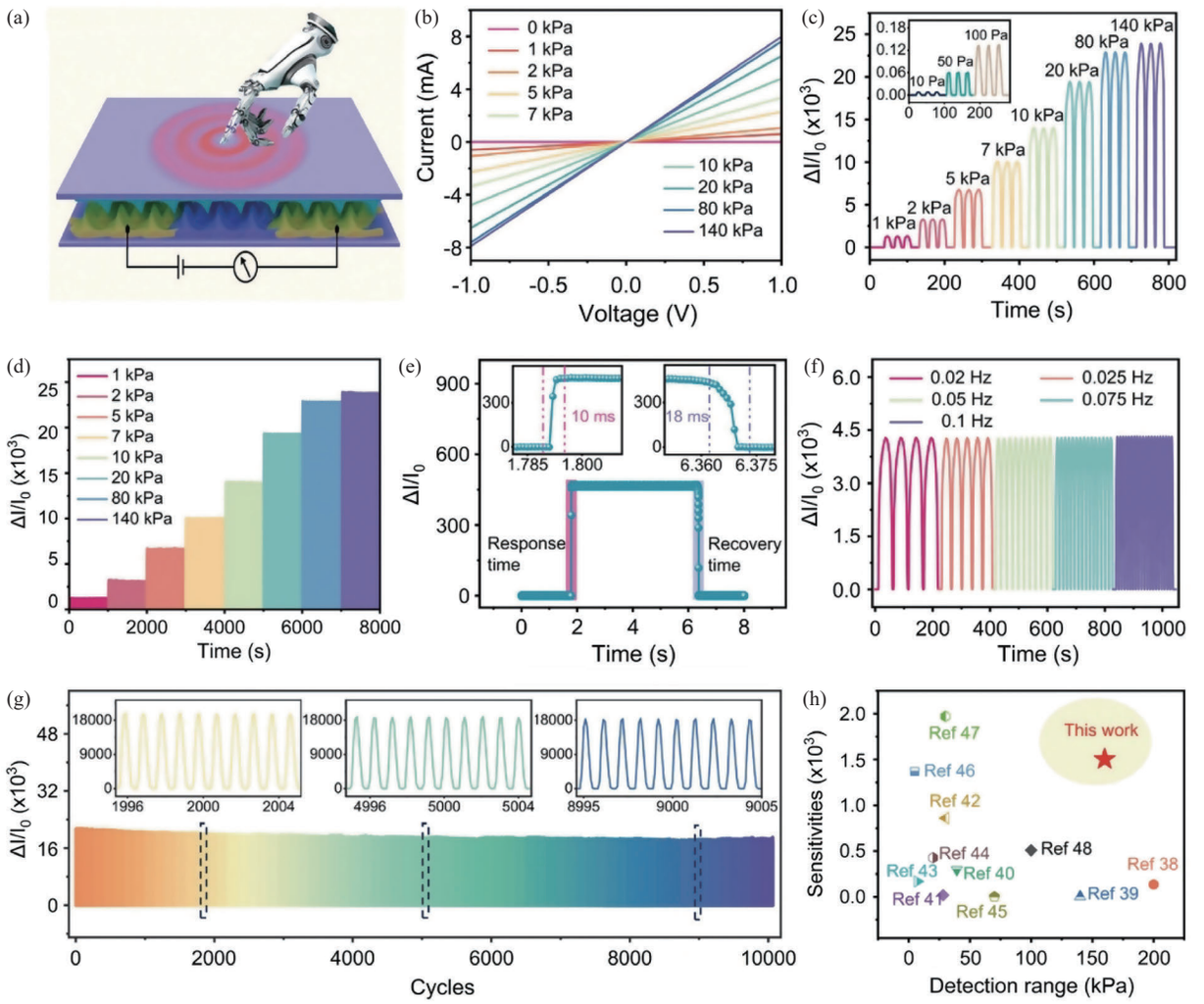

图 7　(a) MN-TM/IG-TM 电子皮肤在外加压力作用下的工作示意图；(b)不同压力下 MN-TM/IG-TM 电子皮肤的电流－电压(*I-V*)扫描曲线；(c)不同压力加载/卸载循环测试中相对电流变化 $\Delta I/I_0$ 的变化曲线；(d)不同压力下 MN-TM/IG-TM 电子皮肤在 1000 s 加载/卸载测试中的稳定性；(e) 0.5 kPa 压力下 MN-TM/IG-TM 电子皮肤的响应/恢复时间；(f) 4 kPa 压力、不同频率(0.02~0.1 Hz)下相对电流变化 $\Delta I/I_0$ 的变化；(g) 50 kPa 压力下 MN-TM/IG-TM 电子皮肤经过 10000 次加载/卸载循环后的耐久性；(h)所制备 MN-TM/IG-TM 电子皮肤与已报道的其他 MXene 基压阻式电子皮肤在灵敏度与检测范围上的对比[33] (2025 John Wiley and Sons 版权许可)

Figure 7　(a) Schematic diagram of external pressure applied on MN-TM/IG-TM e-skin; (b) Current-voltage (*I-V*) scanning curves of MN-TM/IG-TM e-skin upon various pressures; (c) $\Delta I/I_0$ changes upon loading/unloading cyclic test at various applied pressures; (d) Durability of MN-TM/IG-TM e-skin upon loading/unloading test for 1000 s at various applied pressures; (e) Response/recovery time of MN-TM/IG-TM e-skin upon 0.5 kPa; (f) Change of $\Delta I/I_0$ upon 4 kPa at different frequencies (0.02 to 0.1 Hz); (g) Durability of MN-TM/IG-TM e-skin upon loading/unloading experiment for 10000 cycles at an applied pressure of 50 kPa; (h) Sensitivity and detection range of MN-TM/IG-TM e-skin in this work compared with other previously reported MXene-based piezoresistive e-skins (Reprinted with permission from Ref. [33]; Copyright (2025) John Wiley and Sons)

的结构缺陷，并缩短成型周期，降低加工能耗，同时大幅提升制品致密度、力学强度与尺寸稳定性，解决了传统静态模压工艺性能难以兼顾的痛点，尤其适用于超高分子量聚乙烯(UHMWPE)等难加工高分子材料高效成型。

Huang 等[36]首次采用在热压过程中引入循环脉动压力的方法，成功制备出晶相结构可控的 β 晶型聚偏氟乙烯(PVDF)，并且借助傅里叶变换红外光谱(FTIR)和广角 X 射线衍射(WAXD)，系统阐明了 β 晶相含量与循环脉动压力参数之间的内在关联。研究结果表明，在最高压力仅为 40 MPa 的温和热压条件下，通过熔融加工即可获得 β 晶

相含量高达72.2%的纯相无填充PVDF，其介电性能与力学性能均得到显著提升。为简单、高效、温和的加工条件下制备晶相结构可控的聚偏氟乙烯材料开辟了新路径。

Huang等[37]采用脉冲赋能模压技术对石墨烯在超高分子量聚乙烯(UHMWPE)基体中的分散状态与取向结构进行定向调控，促使石墨烯形成致密的构筑结构。如图9所示，结果表明该加工方法有效增强了填料与基体之间的界面结合作用，同时优化了复合材料内部的应力传递效率，

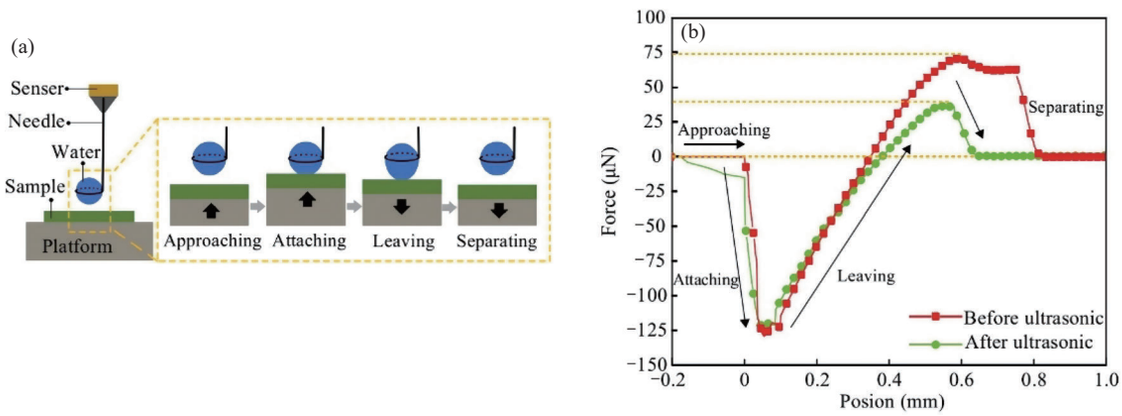

图 8 (a)悬滴法测量黏附力的示意图；(b)黏附力测试过程中试样表面的实时记录力–距离曲线[35] (2022 高分子学报版权许可)

Figure 8 (a) Schematics of hanging droplet method for adhesion force measurement; (b) Real -time recorded force- distance curves for sample surfaces during the adhesion force measurements. (Reprinted with permission from Ref. [35]; Copyright (2022) *Acta Polymerica Sinica*)

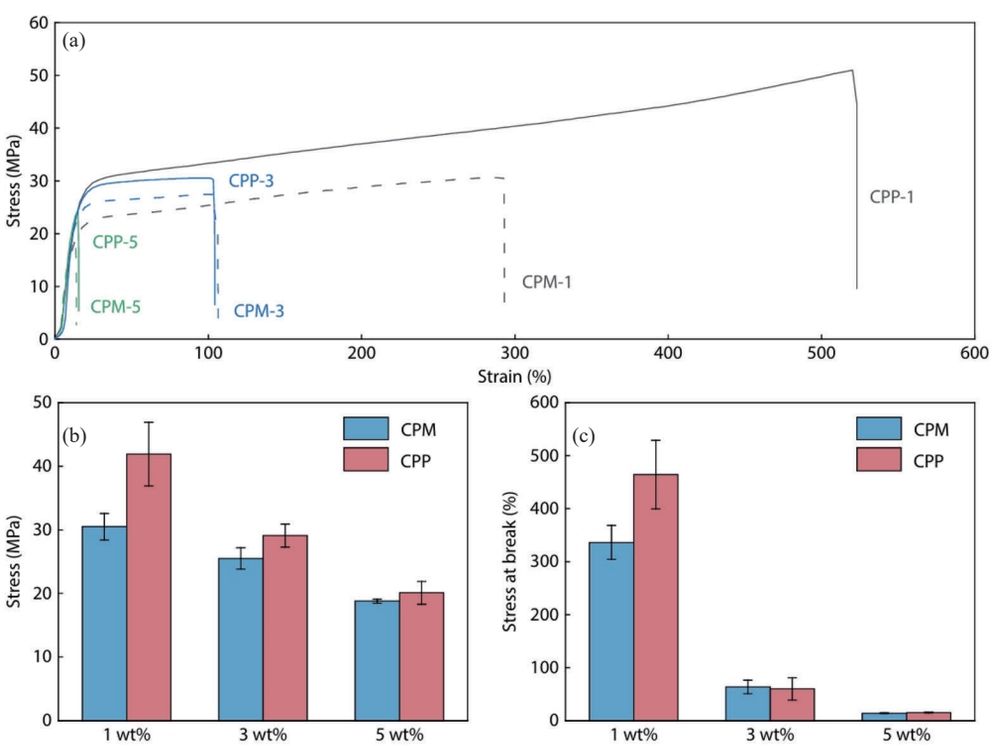

图 9 采用传统单螺杆挤出(SS)与协同等离子体处理单螺杆挤出(CPP-SS)制备的超高分子量聚乙烯/石墨烯复合材料的力学性能：(a)拉伸应力–应变曲线；(b)各试样的详细拉伸强度；(c)断裂伸长率[37] (2024 Springer Nature 版权许可)

Figure 9 The mechanical properties of UHMWPE/graphene composites fabricated *via* conventional SS and CPP-SS: (a) Tensile stress-strain curves; (b) Detailed tensile strength; (c) Strain at break of each sample (Reprinted with permission from Ref. [37]; Copyright (2024) Springer Nature)

从而克服了传统偏析结构固有的力学性能短板，显著提升了超高分子量聚乙烯/石墨烯复合材料的拉伸强度与断裂韧性。经脉冲赋能制备的试样与传统单螺杆挤出制备的试样进行对比后发现，其拉伸强度与断裂伸长率分别可达41.9 MPa和464.3%。为制备高性能、高强度、轻量化聚合物基电磁屏蔽材料提供一种简单高效的新途径。

4　结论

经过数十年发展，热塑性高分子材料已逐步形成以挤出、注塑、热压为主的成型加工方法。它们均可通过施加物理场对高分子材料的微观结构以及综合性能进行调控，实现了成型加工从简单的塑化定型转变为材料功能化成型精准调控的重要技术。基于传统的成型加工方法，本文重点综述了热塑性高分子材料的功能化成型加工方法。不同于化学改性，功能化成型加工仅基于物理场的耦合，不仅可以显著提升材料的力学性能，而且能够实现物理功能结构的构筑，最终实现具有特定功能性的高分子制品制备。以上方法具备加工成本低、绿色环保、适配性广等诸多优势，具有显著的产业化价值。

然而，上述新型热塑性高分子功能化成型加工仍存在许多问题：相较于传统成型加工设备，新型成型加工设备的机械控制结构更为复杂，设备零部件精度要求高，物理场的匹配及耦合更加繁琐。同时，其操作方法也较为复杂，与传统成型加工已经标准化的操作流程相比，新型成型加工技术需要根据高分子材料的种类、制品功能需求等因素，对多项工艺参数进行调控。因此，操作人员需具备更专业的工艺调试与设备操控能力，极大限制各类新型功能化成型加工技术的规模化工业推广。综上，未来应对新型成型加工设备结构进行简化，降低设备制造和操作难度。同时，要提高设备智能化程度，简化操作流程，实现标准化、批量化的成型加工体系。以此推动更多高性能、多功能热塑性高分子材料的工业化生产及应用，满足高端特殊领域的应用需求。

参考文献

1　瞿金平，翁梦蔓，保楠楠. 塑料加工创新技术研究进展. 现代塑料加工应用, **2025**, 37(1), 1–8.

2　王帅，刘莉. 塑料加工成型技术的现状及进展. 橡塑技术与装备, **2022**, 48(5), 14–19.

3　刘红燕. 塑料加工成型技术现状及研究进展. 合成树脂及塑料, **2017**, 34(6), 93–96.

4　于贵营，李春海，郭少云. 新型塑料管材加工方法研究进展. 高分子通报, **2022**, 35(1), 1–7.

5　李怡俊，聂敏，皮林，白时兵，王琪. 新型旋转挤出流变仪. 高分子学报, **2021**, 52(12), 1547–1558.

6　王琪. 新型聚合物管旋转挤出流变仪及其应用. 高分子材料工程国家重点实验室(四川大学)，四川大学高分子研究所, **2017**, 2.

7　王琪，聂敏，白时兵，郭岳，张杰. 旋转挤出加工制备高性能聚合物管. 高分子通报, **2014**, 27(2), 1–9.

8　李怡俊，皮林，聂敏，王琪. 旋转挤出加工制备高性能聚乙烯医用微管. 高分子通报, **2019**, 32(1), 31–38.

9　Abudurezhake, A.; Yang, M. H.; Gong, J. W.; Zhong, G. J.; Li, Z. M.; Fu, Q.; Gao, X. Q. Effect of β nucleating agent and rotational shear on morphology and mechanical properties of polypropylene pipes. *Polym. Eng. Sci.*, **2024**, 64(12), 6215–6233.

10　高雪芹，李又兵，陈长森，申开智. 聚合物熔体振动挤出成型技术的研究进展. 高分子材料科学与工程, **2004**, 20(6), 42–45.

11　Qu, J. P.; Shi, B. S.; Feng, Y. H.; He, H. Z. Dependence of solids conveying on screw axial vibration in single screw extruders. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2006**, 102(3), 2998–3007.

12　华南理工大学. 电磁式聚合物动态注射成型方法及装置. 中国专利, CN96108387.5. **2000-12-20**.

13　Qu, J. P.; Qin, X. M.; Cao, X. W.; Jin, G. Effect of vibrating extrusion on the structure and mechanical properties of isotactic polypropylene. *Polym. Plast. Technol. Eng.*, **2006**, 45(9), 1065–1071.

14　杜祖臣，张雪颂，傅强，申开智，高雪芹. 超声振动对聚苯乙烯熔体解缠结的影响. 高分子材料科学与工程, **2021**, 37(2), 96–101.

15　Yang, M. T.; Li, J.; Guo, S. Y. A reactive extrusion process with the aid of ultrasound for preparing cross-linked polypropylene. *Polym. Eng. Sci.*, **2017**, 57(8), 821–829.

16　Xue, B.; Li, J.; Yang, Q.; Wei, D. X.; Wu, G. T. Study on the effects of vibration force field on the mixing and structural properties of PLA/PBS/EGMA blends. *Polymers*, **2025**, 17(7), 947.

17　华南理工大学，广州华新科实业有限公司. 一种偏心转子体积脉动形变塑化输运方法及装置. 中国专利, CN201410206552.8. **2015-10-28**.

18　瞿金平，吴婷. 体积拉伸流变塑化输运技术助力材料创新发展. 科技导报, **2020**, 38(14), 54–62.

19　华南理工大学. 基于拉伸流变的高分子材料塑化输运方法及设备. 中国专利, CN200810026054.X. **2009-**

06-10.

20 黄照夏, 瞿金平. 拉伸流场诱导聚丙烯/聚乙烯结构性能演变. 高分子材料科学与工程, **2021**, 37(1), 8–15.

21 翟家驹, 瞿金平. 偏心转子挤出机制备LLDPE/UHMWPE共混物的形态、流变行为和力学性能的研究. 塑料工业, **2021**, 49(6), 71–77.

22 Zhang, S. H.; Gao, T. Y.; Xie, Z. X.; Zhou, S. S.; Fang, C.; Gao, Z. K.; Jiang, H. W.; Qu, J. P. Self-enhancement of food packaging film based on regulable microstructure evolution *via* circumfluent synergistic blow molding. *Food Packag. Shelf Life*, **2025**, 47, 101412.

23 马丽华, 盛利军, 张振, 滕岩. 我国动态保压注塑技术的研究进展. 工程塑料应用, **2014**, 42(7), 127–131.

24 官青, 申开智, 吉继亮. 动态保压注射成型技术研究. 成都科技大学学报, **1995**, (5), 20–26.

25 杜金松, 曹建国, 李宁, 赵琬倩, 申开智. 动态保压成型下中等分子量聚乙烯串晶形成的影响. 功能材料, **2015**, 46(15), 15133–15137.

26 谢泽祥. 动态保压成型HDPE试样的成型仿真及热拉伸研究. 四川大学硕士学位论文, **2021**.

27 Qin, S.; Lu, X.; Lv, S. Y.; Xu, W. H.; Zhang, H. H.; Tan, L. C.; Qu, J. P. Simultaneously toughening and reinforcing high-density polyethylene *via* an industrial volume-pulsatile injection molding machine and Poly(ethylene terephthalate). *Compos. Part B Eng.*, **2020**, 198, 108243.

28 Qin, S.; Jiang, H. W.; Zhang, H. H.; Huang, Z. X.; Qu, J. P. Simultaneously achieving super toughness and reinforcement of immiscible high-density polyethylene/poly(ethylene terephthalate) composite *via* oriented spherical crystal structure. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2022**, 163, 107186.

29 Zhang, S. H.; Zhang, H. H.; Liu, M. J.; Liang, J. F.; Deng, Y. H.; Jiang, Y. P.; Huang, Z. X.; Qu, J. P. Improving the anti-environmental stress cracking performance of amorphous polymer through volume pulsation injection molding with semi-crystalline polymer. *Polymer*, **2024**, 308, 127364.

30 高利珍, 贾志欣, 刘立君, 李继强, 荣迪, 赵川涛, 马军. 复合材料热压–注塑一体成型技术综述. 塑料, **2024**, 53(4), 67–72.

31 Zhao, Y. J.; Shang, Y. H.; Lu, B.; Dai, K.; Jiang, Z. Y.; Mi, L. W.; Zheng, G. Q.; Liu, C. T.; Shen, C. Y. Facile fabricating high aspect-ratio micro/nano pillars: mechanical mechanism and superhydrophobicity. *Polymer*, **2026**, 346, 129661.

32 Wang, P. L.; Zheng, G. Q.; Dai, K.; Liu, C. T.; Shen, C. Y. Programmable micropatterned surface for single-layer homogeneous-polymer Janus actuator. *Chem. Eng. J.*, **2022**, 430, 133052.

33 Zhang, Y. J.; Qiu, M. F.; Zhang, X. Y.; Zheng, G. Q.; Dai, K.; Liu, C. T.; Shen, C. Y. Skin-inspired high-performance E-skin with interlocked microridges for intelligent perception. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35, 2412065.

34 黄进, 温翊, 李素兰, 胡文金, 姜渝, 李又兵, 杨朝龙, 瞿伦君, 夏天. 超声波辅助热压成型的聚丙烯/铝合金界面微-纳互锁结构与性能研究. 机械工程学报, **2022**, 58(16), 215–223.

35 邢清松, 陈旭龙, 陶嘉宇, 陈安伏, 张艳梅, 雷彩红. 超声辅助制备超疏水聚丙烯表面花瓣状微纳结构. 高分子学报, **2022**, 53(6), 645–652.

36 Huang, Z. X.; Wang, M. M.; Feng, Y. H.; Qu, J. P. *β*-Phase formation of polyvinylidene fluoride *via* hot pressing under cyclic pulsating pressure. *Macromolecules*, **2020**, 53(19), 8494–8501.

37 Huang, Y. Z.; Liu, X. X.; Li, L. W.; Huang, G. M.; Huang, Z. X.; Qu, J. P. Cyclic pulsating pressure enhanced segregating structuration of ultra-high molecular weight polyethylene/graphene composites as high-performance light-weight EMI shields. *Chinese J. Polym. Sci.*, **2024**, 42(7), 958–967.