

均一微滴制备技术研究进展

王同举^{1,2}, 张琦美^{1,2}, 张文倩^{1,2}, 雷永平^{3*}, 林健³, 符寒光³

1. 北华航天工业学院电子与控制工程学院, 廊坊 065000

2. 河北省微纳卫星协同创新中心, 廊坊 065000

3. 北京工业大学材料与制造学部, 北京 100000

摘要 均一微滴的应用十分广泛,生成方法越来越高效可控。阐述了射流扰动均一微滴制备技术和按需可控均一微滴制备技术的原理。基于脉冲力形成的原理不同,均一微滴制备技术分为压电式、电磁致动式、磁流体式、气压脉冲式和激光流体共振式,总结了5种模式的原理和技术现状。梳理了均一微滴制备技术在电子封装领域、喷墨彩印技术领域、微型件3D打印领域和生物制药等领域的应用现状,并展望了均一微滴制备技术的发展趋势。

关键词 均一微滴;射流扰动;按需可控;电子封装;3D打印

相比于其他类型的微滴制备技术(如切丝重熔法^[1-2]和雾化法^[3-4]),均一微滴制备技术具有结构简单、均一性好、成本低、定位精度高和节省原料等显著优势^[5]。迄今为止,均一微滴制备技术已经广泛应用到电子封装^[6]、喷墨彩印技术^[7]、微型件3D打印^[8]和生物制药^[9]等领域中。依据均一微滴产生的原理,均一微滴制备技术可分为射流扰动均一微滴制备技术(continue ink jet, CIJ)^[10]和按需可控均一微滴制备技术(drop on demand, DOD)^[11]。

射流扰动均一微滴制备技术^[10]是基于射流不

稳定理论,喷射腔内流体在压力作用下从喷嘴喷射出射流液柱,在周围气体介质的气动力、表面张力、黏性力和重力的作用下,射流液柱端头断裂形成微滴。通过调节脉冲力频率和气压,可以控制射流液柱端头断裂形成均一微滴,如图1(a)所示。对于射流扰动技术而言,影响均一微滴制备稳定性的关键因素是射流液柱上所施加的脉冲力信号,以及自由液面处所施加的恒定气压。按需可控均一微滴制备技术^[11]是利用喷嘴上方施加的脉冲力克服喷嘴出口处的表面张力和黏性力以实现喷嘴出口处

收稿日期:2023-12-18;修回日期:2024-03-05

基金项目:河北省科技重大专项(21280201Z);装备预研教育部联合基金项目(8091B022103);河北省自然科学基金项目(F2021409006);北华航天工业学院重点项目(ZD-2024-01);河北省高等学校科学技术研究项目(QN2023119)

作者简介:王同举,讲师,研究方向为电子封装技术与相关材料,电子信箱:wangtongju@126.com;雷永平(通信作者),教授,研究方向为电子封装技术与相关材料,电子信箱:418099916@qq.com

引用格式:王同举,张琦美,张文倩,等.均一微滴制备技术研究进展[J].科技导报,2024,42(18):76-90;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.06.00837

微液柱的产生。当喷嘴上方施加的脉冲力消失后,在表面张力及喷嘴出口处微液柱惯性力的作用下,喷嘴出口处微液柱断裂形成均一微滴,如图1(b)所示。

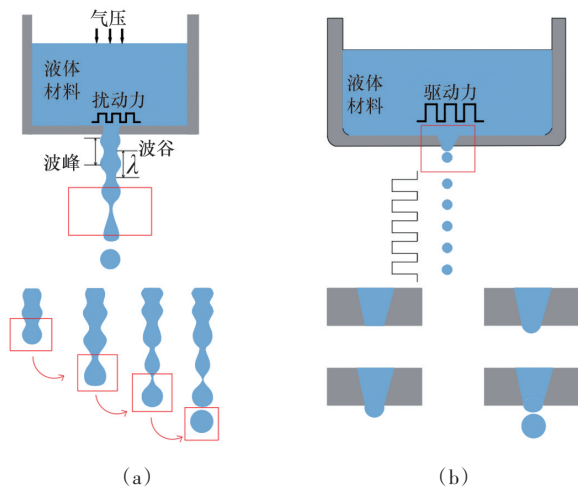


图1 射流扰动(a)和按需可控(b)技术制备均一微滴

射流扰动均一微滴制备技术中所需的均一扰动信号发生器,以及按需可控均一微滴制备技术所需的脉冲驱动发生器,其本质都是用于产生稳定可靠、均匀一致的脉冲力。其区别在于射流扰动均一微滴制备技术中均一扰动信号发生器所产生的脉冲力较小,用于在射流液柱表面形成一致的表面波,以控制射流液柱端头断裂形成均一微滴;按需可控均一微滴制备技术中脉冲驱动发生器所产生的脉冲力较大,用于克服喷嘴出口处微液柱形成阻力而产生微滴。综上所述,无论是按需可控还是射流扰动技术均需要均一稳定的周期性脉冲力,目前,可产生周期性脉冲力的模式有5种:压电模式^[12-23]、电磁致动模式^[24-25]、磁流体模式^[26-28]、气压脉冲模式^[29-33]以及激光流体共振模式^[34]。其中,压电模式、电磁致动模式和磁流体模式可用于产生射流扰动所需的脉冲力(较小)和按需可控技术所需的脉冲力(较大),具体如表1所示。

表1 不同脉冲力形成模式下均一微滴制备技术分类

制备技术	压电模式 ^[12-23]	电磁致动模式 ^[24-25]	磁流体模式 ^[26-28]	气压脉冲模式 ^[29-33]	激光流体共振模式 ^[34]
按需可控技术	√	√	√	√	×
射流扰动技术	√	√	√	×	√

本文在介绍射流扰动微滴制备技术与按需可控微滴制备技术的分类基础上,结合国内外研究现状,阐述射流扰动微滴制备技术与按需可控微滴制备技术产生均一微滴所涉及的各种模式原理及优缺点,并对微滴制备技术的发展趋势进行展望。

1 均一微滴制备模式

1.1 压电模式均一微滴制备技术

压电模式均一微滴制备技术是利用信号源和功率放大器产生的高频可变电信号控制压电陶瓷产生脉冲力,在脉冲力的作用下可实现按需可控和射流扰动两种模式制备均一微滴。根据压电陶瓷中陶瓷片放置位置的不同可分为弯曲构型^[35]、挤压构型^[36-43]和推杆构型^[44]。

1.1.1 弯曲构型

压电弯曲构型^[40]是把压电陶瓷密封在驱动腔体上方,以确保驱动腔体内的流体充满整个驱动腔体内部。当电压驱动信号驱动压电陶瓷运动时,将会在喷嘴上方产生周期性脉冲力。压电弯曲构型所使用的压电陶瓷与流体的接触面积较大,产生的变形驱动较大,可通过按需可控技术制备均一微滴,同时由于压电陶瓷的耐温性差,故多选择水或其他常温流体作为实验材料,结构原理如图2所示。

基于压电弯曲构型,江苏大学杨月星^[41]设计了一种单液滴发生装置,原理如图3(a)^[41]所示。以水为实验材料,在频率和喷嘴直径分别为30 Hz和0.16 mm的条件下实现了水滴的按需制备,如图4(a)^[41]所示。单液滴发生装置由微滴发生器,装置供液系统和移动平台3部分组成。基于压电弯曲

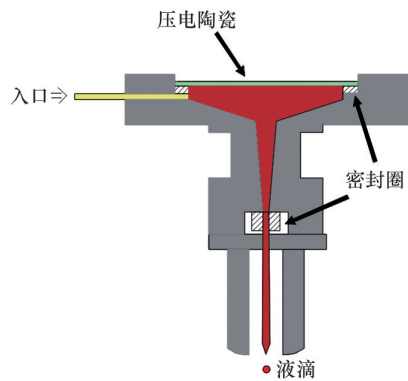


图2 弯曲构型结构原理

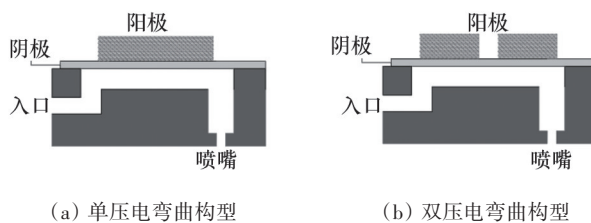
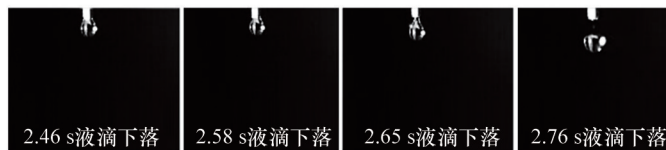
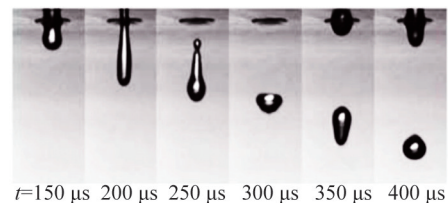


图3 2种压电弯曲构型微滴制备装置



(a) 单压电弯曲构型



(b) 双压电弯曲构型

图4 2种压电弯曲构型微滴制备装置实验结果

生脉冲力,目前该技术用于按需制备均一微滴,同时由于压电陶瓷的耐高温性差,故多选择水或其他常温流体作为实验材料,其结构原理如图5所示。2022年,Magazine等^[43]应用压电挤压构型,使用有机-无机硅氧烷的杂化材料为实验材料,制备出直径为100 μm的微透镜阵列,如图6^[43]所示。微滴喷射技术生产高折射率材料和渐变折射率(gradient refractive index, GRIN)膜的关键在于单体结合有机化合物和无机纳米颗粒的能力,而化合物在制剂中的分散性代表了控制微透镜光学性能的关键特性,实验中使用含硅烷、羧酸盐和硫醇基团的材料可起到分散纳米颗粒,防止纳米颗粒聚集的作用^[43]。

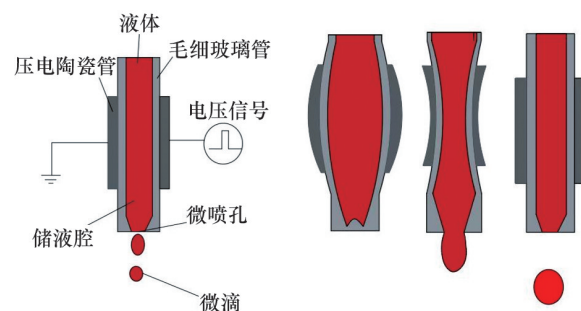


图5 挤压构型按需可控制备均一微滴原理

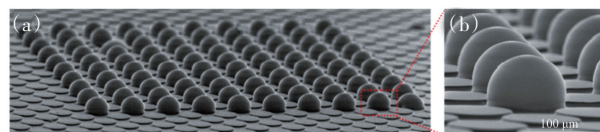


图6 直径为100 μm的微透镜阵列(标尺为100 μm)

构型, Kim等^[42]研究了一种双折射型锆钛酸铅驱动器,原理如图3(b)^[42]所示。以水为实验材料,在喷嘴直径为50 μm的条件下,实现了均一微滴的按需可控制备,实验结果如图4(b)^[42]所示。对比单压电喷射装置和双压电喷射装置,两种实验装置从 2.39×10^{-5} s运行到 3.97×10^{-5} s时,单压电喷射装置喷射速度从3.31 m/s下降到-1.57 m/s,双压电喷射装置的喷射速度从5.23 m/s下降到-2.54 m/s,因此顺序运行时流体速度的正峰值大于同时运行时,且双压电喷射装置速度振荡衰减率更大,可以减少卫星液滴的形成,从而保证更高的工作频率。因此,在最优扰动频率下,双压电喷射装置的性能、效率和喷射速度优于单压电喷射装置。

1.1.2 挤压构型

压电挤压构型的原理是把压电陶瓷密封在驱动腔体四周,当电压驱动信号驱动压电陶瓷运动挤压驱动腔四周的毛细玻璃管时,将会在喷嘴上方产

1.1.3 推杆构型

由于弯曲构型和挤压构型的压电陶瓷与液体直接接触,而压电陶瓷的耐温性差,因此弯曲构型和挤压构型微滴制备实验中多选择水或其他常温流体作为实验材料。为解决温度条件的限制问题,研究人员提出了液体与压电陶瓷不直接接触的压电推杆构型。压电推杆构型主要由叠层式压电陶瓷、推杆、喷嘴工作腔和微喷孔等构成。通过推杆将压电陶瓷与液体隔离,实现高温金属颗粒的制备。通过对压电陶瓷施加电压驱动信号控制压电陶瓷轴向伸缩产生形变^[39],使液体腔内液体体积变化,形成压力波动。在低频条件下脉冲力作用时间长,可以实现按需可控均一微滴制备;而在高频条件下产生的脉冲力较小,脉冲力传递到液柱,控制液柱端头断裂形成均一颗粒,实现射流扰动均一微滴制备,如图7所示。

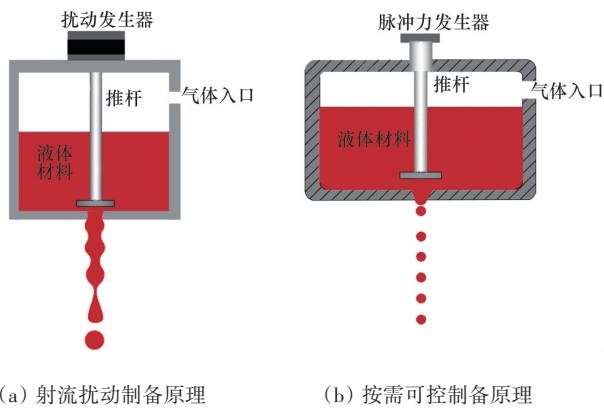


图7 压电推杆式均一微滴制备原理

2010年,西北工业大学齐乐华等^[44]以 $\text{Sn}_{63}\text{-Pb}_{37}$ 和 $\text{Sn}_{60}\text{-Pb}_{40}$ 作为实验材料,利用压电推杆构型,在喷嘴孔径为 $50\sim 150\ \mu\text{m}$ 时,实现了均一锡球微滴的射流扰动制备,如图8(a)^[44]所示。均一微滴的生成受脉冲宽度、输入电流的大小、输入电流的频率和幅值等可控参数的影响,调节脉冲宽度可以防止相邻液滴的结合,实现均一微滴“一脉一滴”的制备;输入电流的大小和生成均一微滴的频率呈正相关;输入电流的脉冲频率和生成微滴的速度呈负相关;输入电流幅值和生成微滴的速度呈正相关。2013年,大连理工大学付一凡^[45]设计研制了一套压电推杆构型喷射系统,以 $\text{Sn}_{63}\text{-Pb}_{37}$ 为实验材料,在频率为 $10\sim 200\ \text{Hz}$,喷嘴直径分别为 $200, 300, 350\ \mu\text{m}$,传动杆直径为 $6, 7\ \text{mm}$ 的条件下,实现了平均粒径为 $309.9\ \mu\text{m}$,标准差为 $2.57\ \mu\text{m}$ 的 $\text{Sn}_{63}\text{-Pb}_{37}$ 颗粒的按需制备,如图8(b)^[45]所示。实验结果表明:均一微滴生成速率受液体材料黏度的影响,随着黏度的增大缩颈时间增加;而均一微滴的粒径受喷嘴直径、坩埚内外压力差、压电陶瓷驱动电压、传动杆直径和压电陶瓷驱动波形上升沿时间的影响,以上可控参数均和均一微滴的直径呈正相关。2018年,西北工业大学伊浩^[46]应用压电推杆式实现了按需可控制备直径为 $800\ \mu\text{m}$ 的铝液滴,铝液滴沉积在带有 Ag 涂层的石膏表面,制备的铝液滴如图8(c)^[46]所示。实验结果表明:Ag 涂层通过液态 Al 和 Ag 层之间的相互作用抑制了 Al 液滴的反弹,使 Ag 在液态 Al 中溶解,并生成具有树枝状网络结构的 Al-Ag 金属间化合物 (intermetallic compound, IMC)。并

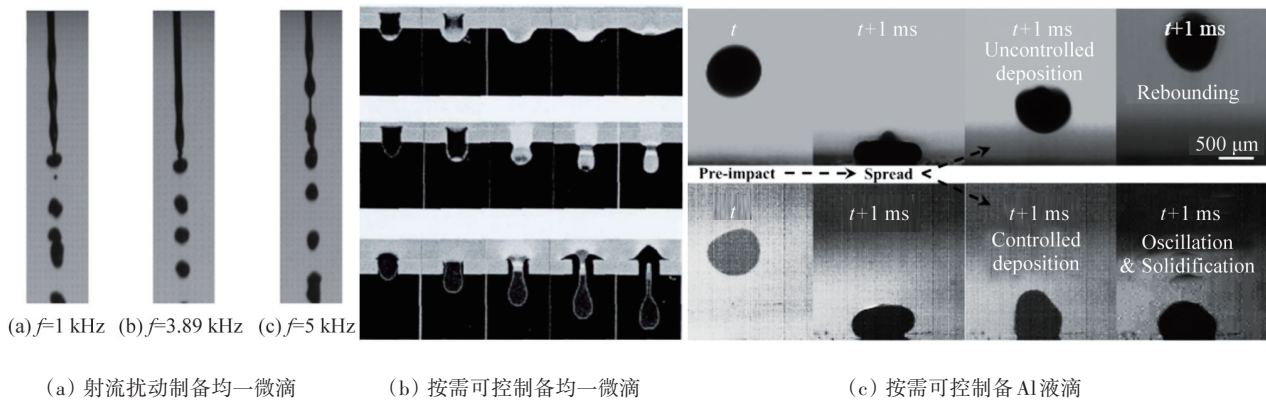


图8 压电推杆构型制备均一液滴实验结果

且IMC层的厚度随着衬底温度的升高而增加。生产出的带有Ag涂层的Al液滴可通过3D打印技术制造腔面光滑的管件。

为提高压电推杆构型按需制备均一微滴的稳定性,研究人员提出压电推杆膜片式按需制备均一微滴构型,利用叠层式压电陶瓷作为驱动部件,通过推杆推动膜片变形挤压驱动腔,以实现均一微滴按需可控制备,构型原理如图9所示。使用推杆驱动膜片代替压电晶片进行驱动,可提高驱动装置的稳定性^[13]。2013年,上海交通大学周诗贵等^[47]构建了压电推杆膜片式按需制备均一微滴的实验平台,如图10(a)^[47]所示,该系统包括压电驱动模块、运动控制模块、温度控制模块和测量采集模块等部分。驱动膜片选用304不锈钢,以甘油/水混合液体为喷射材料,在喷嘴直径为0.1 mm、背压为0.02 MPa、驱动电压为100 V、膜片预压为500 μm的实验条件下,调节微喷频率40~200 Hz,制备了直径为145.44~193.54 μm的均一微滴。微滴形成过程如图10(b)^[47]所示。实验结果表明:驱动力作用时间过长,液柱会产生二次缩颈,生成卫星液滴;在可稳定产生均一微滴的参数条件下,微滴的直径随着驱动力作用时间的增加而增大,两者在一定范围内呈线性系数约为0.235的线性关系;液体材料黏度增大会降低微滴喷射的速度。

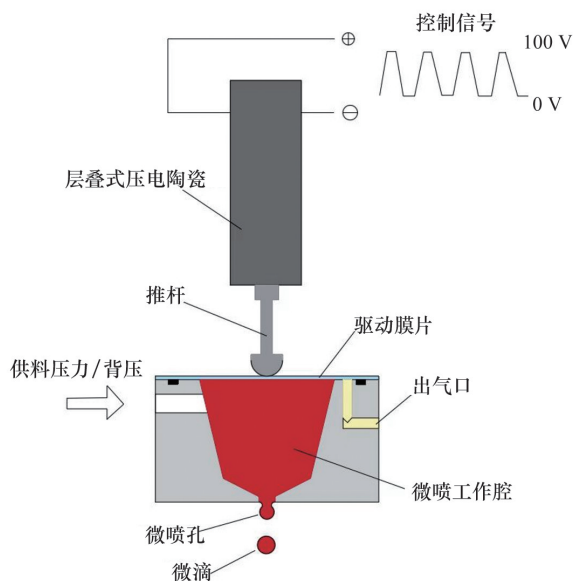


图9 压电推杆膜片式微滴按需制备原理

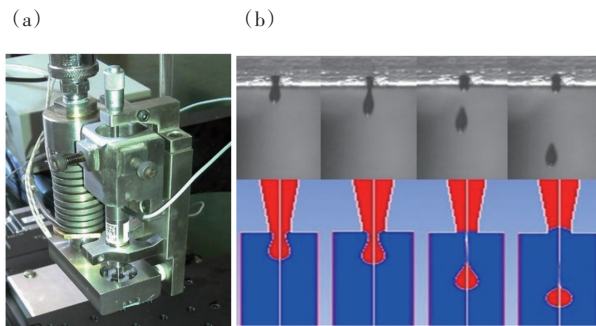


图10 压电推杆膜片式微滴按需制备装置(a)及微滴形成过程和成形机理(b)

1.2 电磁致动模式均一微滴制备技术

北京工业大学于洋等^[48]通过电磁致动射流扰动技术制备均一焊球,开发出相应样机,原理如图11(a)所示。通过电磁致动器的永磁铁吸引下方的振动杆,若永磁铁产生的磁力方向与通电螺线管产生的磁力方向一致,则永磁铁对振动杆的吸引力增大;反之,若永磁铁产生的磁力方向与通电螺线管产生的磁力方向相反,则永磁铁对振动杆的吸引力将降低。永磁铁对振动杆的吸引力的改变使振动杆对液体产生周期性扰动,从而控制射流液柱端头断裂形成均一微滴。于洋通过该装置制备出直径在200~800 μm的微焊球,并研究了稀土元素对微焊球质量的影响,制备出的Sn-3.8Ag-0.7Cu-1.0RE合金焊球相比于Sn-3.8Ag-0.7Cu合金焊球,初生树

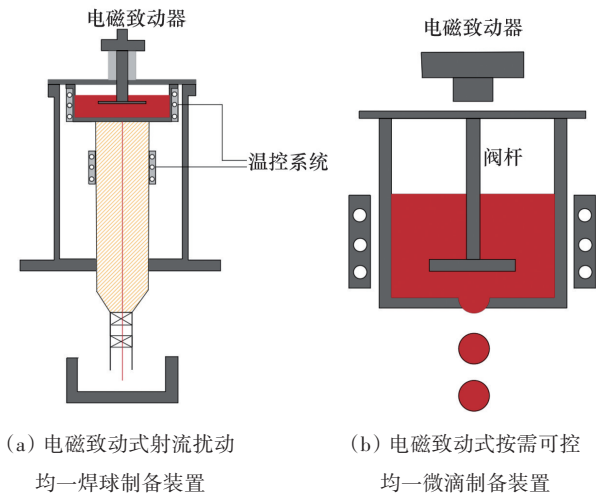
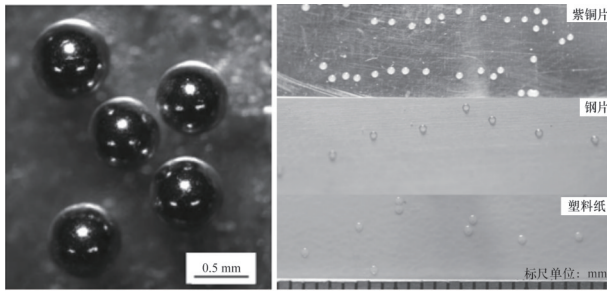


图11 电磁致动式射流扰动均一微滴制备装置



(a) 电磁致动式射流扰动均一焊球制备 (b) 电磁致动式按需可控均一微滴制备

图12 电磁致动式均一微滴制备实验结果

枝晶被细化且数量增加,证明了稀土元素可改善Sn-3.8Ag-0.7Cu焊球的表面状态。

在此基础上,2013年,西北工业大学唐勇等^[11]所在的团队设计实现了电磁致动式微滴按需制备装置,如图11(b)^[11]所示。唐勇通过该装置研究了不同脉冲宽度及不同脉冲频率对水微滴形成过程的影响规律,在喷射材料为熔融石蜡、喷嘴直径为100 μm 、喷射频率为10 Hz的条件下实现了电磁致动式按需可控均一微滴的制备,得到了平均直径约为482.7 μm 的石蜡凸点,直径标准偏差为26.5 μm ,如图12(b)^[11]所示。实验结果表明:电压脉冲频率和微滴直径呈负相关;电压脉冲脉宽和微滴直径呈正相关。

1.3 磁流体模式均一微滴制备技术

磁流体模式均一微滴制备技术^[26-28,49-54]是在带电液态金属腔体下方构建微细通道喷嘴,并在带电液体金属外部施加恒定磁场。当电流大小和方向可变的带电金属流体流经恒定磁场时,在腔体液态金属内产生大小和方向可变的电磁力。在高频条件下,脉冲电磁力将微扰动施加到喷嘴出口处的射流液柱表面以形成表面波,从而控制射流液柱端头断裂形成均一微滴,以实现射流扰动制备均一微滴。在低频条件下,液态金属内产生的大小和方向可变的电磁力作为脉冲力,腔体内的流体在喷嘴出口处周期性断裂形成均一微滴^[28],以实现按需可控制备均一微滴,原理如图13^[28]所示。

2020年,基于磁流体模式,北京工业大学王同举提出了电磁按需可控技术制备均一焊球^[28],并研

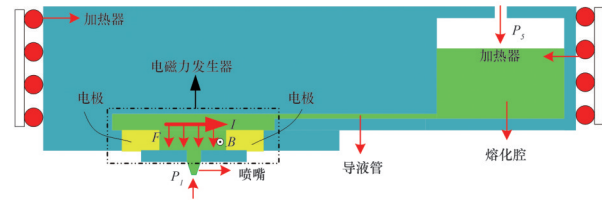
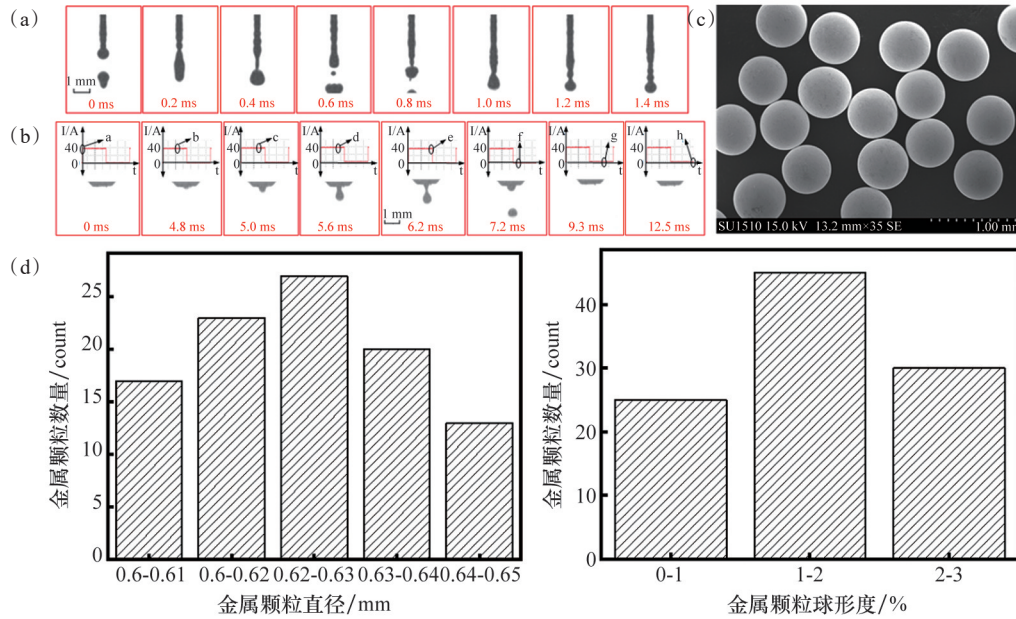


图13 电磁按需和射流扰动制备金属颗粒的发生器示意

制出相关装置,该技术可以实现不同大小喷嘴孔径下均一焊球的制备,解决了如何在较小的电磁力范围内通过压差调控实现较大孔径范围内的金属颗粒的按需可控制备,在喷嘴孔径为0.41 mm的条件下,按需制备了直径在0.60~0.65 mm的均一焊球。然而电磁驱动按需可控技术难以实现均一金属颗粒的高频制备,基于此,北京工业大学王同举又提出电磁射流扰动技术制备均一金属颗粒^[28],在喷嘴孔径为0.41 mm的条件下,射流扰动制备了直径在0.68~0.74 mm的均一焊球,解决了电磁驱动技术制备金属颗粒频率低的问题,研究了喷嘴孔径、电流输入波形、电流频率、压差和电流幅值对射流扰动制备均一金属颗粒的影响,实验结果如图14所示。

相较于其他模式,电磁按需可控和电磁射流扰动技术制备均一微滴的驱动力为体积力,实现了无接触驱动,没有机械磨损,且其外部电源电流的大小及波形易于控制,可实现脉冲电流和脉冲电磁力的瞬间响应。

结合气动膜片式和压电膜片式制备均一颗粒的启发,北京工业大学王同举首次提出了电磁膜片技术制备均一水滴^[28],该技术解决了电磁按需可控和电磁射流扰动技术只适用于金属颗粒制备的局限性,电磁膜片射流扰动技术的原理为:电磁力发生器内部加持相互垂直的永磁铁和电极。 $\text{Ga}_{0.75}\text{In}_{0.25}$ 合金充满电磁力发生器内的腔体。当电流通过电磁力发生器的电极,并流经喷嘴上方处于恒定磁场的 $\text{Ga}_{0.75}\text{In}_{0.25}$ 合金时,将会在弹性膜片上方产生电磁脉冲力。通过弹性膜片把该脉冲力传递到射流液柱表面形成表面波,从而控制射流液柱端头断裂形成均一水滴,如图15所示。研究了喷嘴孔径、压差、扰动频率、射流液柱端头扰动和表面波波长对射流液柱端头断裂成滴行为的影响。在喷



(a) 喷嘴出口处无气压和输入电流时射流断裂情况; (b) 喷嘴出口处所施加的气压、电流幅值和电流频率分别为 3 kPa、40 A 和 80 Hz;
(c) 金属颗粒在 0.41 mm 孔径下制备的实物; (d) 金属颗粒在喷嘴孔径为 0.41 mm 时焊球球形度分布图和直径分布

图 14 金属颗粒在 0.41 mm 孔径及相应实验条件下制备金属焊球的形成过程和结果

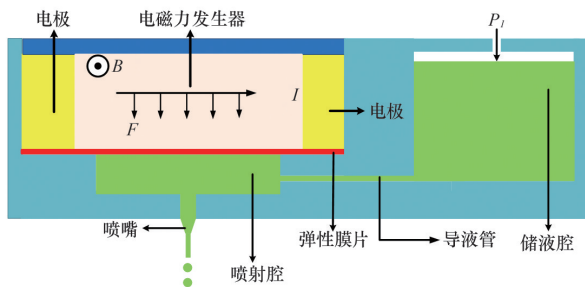


图 15 电磁膜片射流扰动均一水滴发生器示意

嘴孔径为 0.15 mm、扰动频率在 2000~2600 Hz 时,射流液柱端头可断裂形成均一水滴,直径为 0.23~0.27 mm。通过改变输入频率和液面气压,得到了输入电流频率和液面气压对水滴形成过程的影响。

1.4 气压脉冲模式均一微滴制备技术

2002 年,气压脉冲模式均一微滴制备技术^[55-58]由多伦多大学 Chandra 提出。目前,受限于电磁阀开通频率(最高 50 Hz),该技术在按需可控制备均一微滴方面有应用。其原理是利用电磁阀通断来控制自由液体表面瞬间产生脉冲驱动气压,以用于

在喷嘴出口处产生均一微滴,每个脉冲周期对应生成一个均一微滴。由于脉冲气压可耐高温,因此该技术在高温金属制备方面具有显著优势,但该技术受限于电磁阀开通频率,难以高频制备均一微滴,装置如图 16(a)^[59]所示。2019 年,西北工业大学伊浩选择铝合金(Al 88%, Si 12%)作为原料,利用气压脉冲微滴制备技术制备了铝液滴并实现了液滴沉积^[59],在以石膏和蒸馏水为主要材料的可溶性芯上沉积铝液滴,制造了具有高质量内表面的金属管,如图 16(b)^[59]所示。实验结果表明:当沉积频率

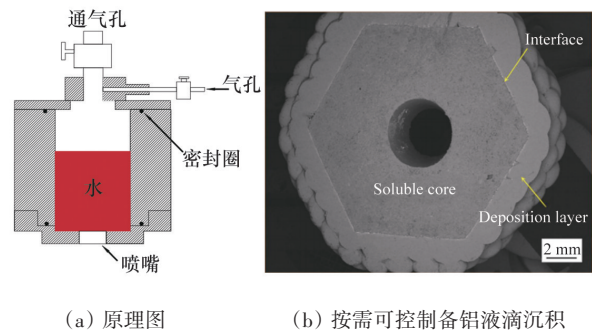


图 16 气压脉冲模式微滴制备技术原理及实验成果

较高时,热积聚效应会导致相邻液滴之间过度融合,破坏成形精度,降低制造零件的质量。

为提升气压脉冲的稳定性,在气压脉冲制备均一微滴技术的基础上,华中科技大学舒霞云^[60]所在的研究团队提出了气动膜片式均一微滴制备技术。原理如图 17(a)^[60]所示,气体脉冲力驱动膜片变形,变形膜片挤压腔体导致喷嘴出口处按需形成均一微滴^[61]。华中科技大学肖俊峰^[61]利用气动膜片式均一微滴制备装置,以 $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$ 为实验材料,在玻璃

喷嘴直径为 $100\ \mu\text{m}$ 的条件下,制备出直径在 $155\sim 196\ \mu\text{m}$ 的锡铅焊球,如图 17(b)^[61]所示。肖俊峰通过实验探究了驱动气压、脉冲宽度、频率和放气孔内径对均一微滴生成的影响,实验结果表明:液滴直径随驱动气压增大而变小;脉冲高电平时间越短,均一微滴生成需要的驱动气压越大;频率对均一微滴制备过程无明显影响;放气孔内径增大,生成均一微滴需要的驱动气压增大。

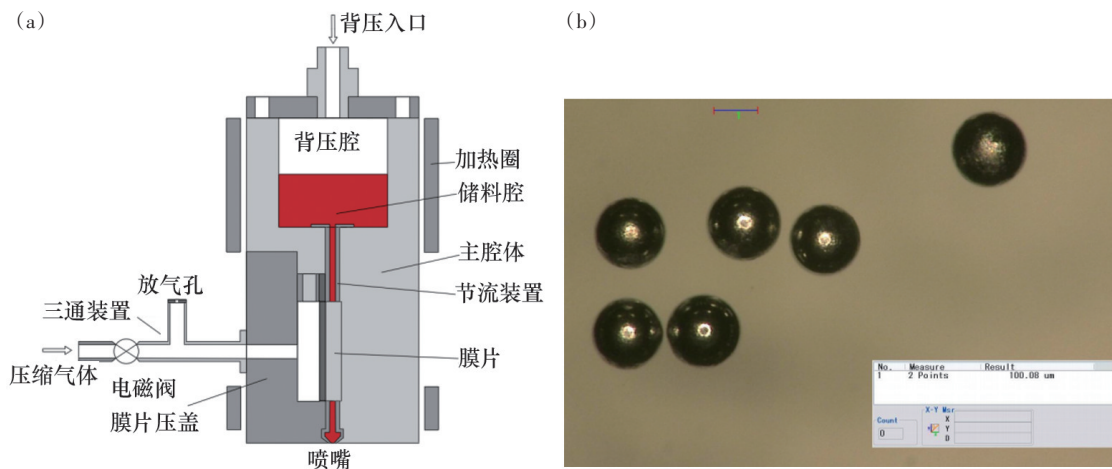
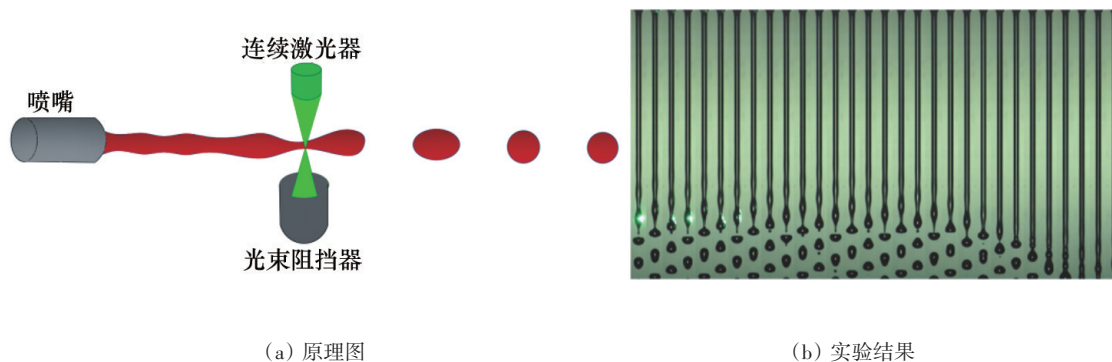


图 17 气动膜片式均一微滴制备原理(a)及制备的锡铅焊球(b)

1.5 激光流体共振模式均一微滴制备技术

2021年, Liu 等^[34]提出激光流体共振模式均一微滴制备技术,其原理为当连续波激光束照射透明射流液体(如水)时,会在射流液柱内部产生随时间变化的光压力,在光学压力的作用下射流液柱端头

将会断裂形成均一微滴。Liu^[34]以乙醇为实验材料,在乙醇流速为 $1.4\ \text{mL}/\text{min}$ 、激光波长为 $520\ \text{nm}$ 等条件下实现了激光流体共振模式均一微滴的制备。激光流体共振模式微滴制备技术原理如图 18^[34]所示。



(a) 原理图

(b) 实验结果

图 18 激光流体共振模式制备均一微滴原理及实验结果

1.6 不同模式下均一微滴制备技术的总结

微滴喷射技术受到国内外研究人员高度关注，

表2总结了国内外关于均一微滴产生的模式、成滴原理、优点和缺点等。

表2 均匀微滴制备技术国内外研究现状

模式	成滴技术原理	可喷射材料	优点	缺点
压电模式	按需可控技术、射流扰动技术	金属和非金属	稳定,容易控制	压电陶瓷的耐高温性差
电磁致动模式	按需可控技术、射流扰动技术	金属和非金属	装置简单	稳定性差
磁流体模式	按需可控技术、射流扰动技术	金属	稳定,容易控制	可喷射材料的熔点低
气压脉冲模式	按需可控技术	金属和非金属	喷射材料的熔点高	频率低
激光流体共振模式	射流扰动技术	非金属	稳定,容易控制	可喷射材料范围小

2 发展趋势及应用现状

2.1 发展趋势

随着均一微滴使用领域逐渐向高精度、小型化、高可靠性、高集成化和多层化发展,需要微滴的直径越来越小,对均一微滴发生装置的可靠性和精密性提出了更高的要求。目前,电子封装中的球栅阵列封装(ball grid array package, BGA)、芯片级封装(chip scale package, CSP)以及3D封装均需不同粒径和内控公差 of 的锡球,以用于机械连接和信号传输。BGA封装的锡球粒径范围为0.20~0.76 mm,内控公差为0.011 mm; CSP封装的锡球粒径范围为0.10~0.20 mm,内控公差为0.006 mm; 3D封装的锡球粒径范围小于0.1 mm,内控公差为0.004 mm。因此,均一微滴的直径越小对其精密性和可靠性的要求越高。

为实现小直径微滴的制备,科研人员采取了3种方案。第1种方案是减小喷嘴孔径,以实现小直径微滴的制备,原理如图19^[62]所示。2021年,Zhao等^[62]应用喷嘴孔直径为40 μm的MicroFab打印头(MJAL-01-40),以黏弹性油墨为实验材料,实现了(49.8±0.6) μm粒径均一微滴的按需可控制备。减

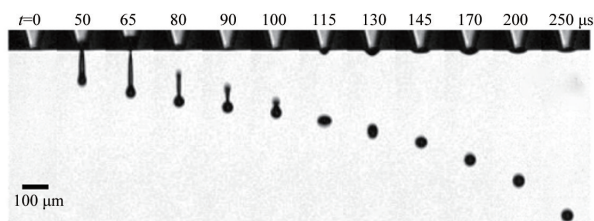


图19 小喷嘴孔径下实现均一微滴制备的过程

小喷嘴孔径较容易实现水滴或黏度较小的非金属溶液微滴的制备。然而对于金属微滴,容易造成喷嘴堵塞,难以通过减小喷嘴孔径以实现小直径金属颗粒/微滴的制备。

第2种方案是在大喷嘴孔径下制备出直径小于喷嘴孔径的均一微滴,这种方法适用于按需可控技术,需要较大的脉冲力,以使喷嘴出口处的微液柱获得较大的动能,从而断裂形成小微滴,如图20^[63]所示。基于气压脉冲模式,Amirzadeh等^[63]研发了一种可制备小于喷嘴孔径金属液滴实验装置。材料选用锡合金和锌合金,在喷嘴孔径为102 μm的条件下,通过调节实验参数可制备出平均直径为73 μm的金属微滴。

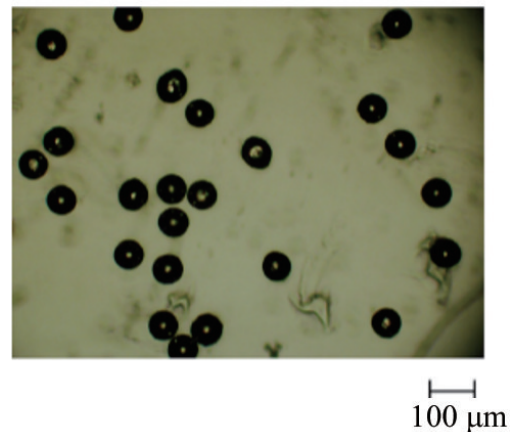


图20 大喷嘴孔径下制备的小直径微球

第3种方案是大喷嘴孔径流出的液柱通过气液流动聚焦的方式形成远小于喷嘴孔径的液柱,聚焦的射流液柱端头可自由断裂形成均一微滴,也可

在人为施加的扰动作用下断裂形成均一微滴^[64-72]。2009年,中国科学技术大学司廷等^[64]研究了气-液流动聚焦制备均一微滴,流动聚焦原理如图21(a)^[64]所示。在喷嘴内径和液体流量分别为700 μm 和25 mL/h时,通过调整聚焦气压等实验参数,可制备出直径为58 μm 的聚焦液柱。

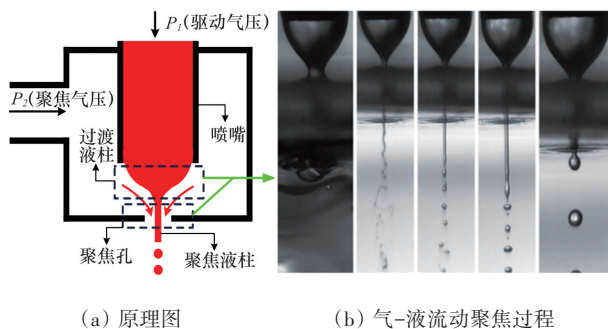


图21 气-液流动聚焦制备均一微滴的原理及聚焦过程

2.2 应用现状

均一微滴在电子封装领域、喷墨彩印领域、精密制备领域和生物医学领域等有着广泛应用,具体如下。

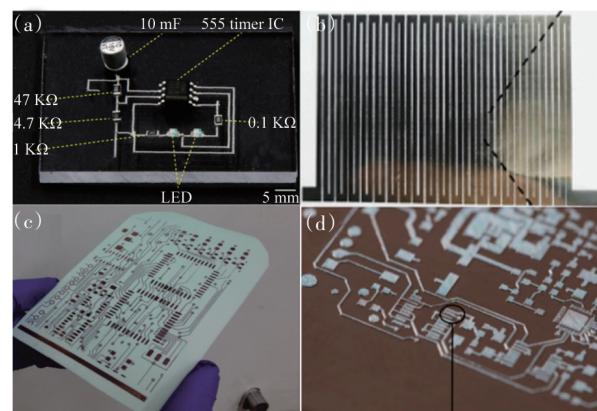
1) 电子封装领域。

均一微滴制备技术既可用于制备电子封装用微焊球,也可在电路板上直接打印所需电路,也可以按需打印电子器件所需的凸点阵列。

集成电路封装技术主要由四边扁平贴装片(quad flat package, QFP)、面积阵列封装(area array package)和高密度系统封装(system in a package, SIP)组成。集成电路封装技术向高密度、高脚位、小型化和薄型化的方向演变^[73-74]。传统的QFP封装已逐渐被淘汰;面积阵列封装目前已进入成熟期,且对锡基金属颗粒的需求越来越大。华中科技大学肖俊峰^[61]利用气动膜片式均一微滴制备装置,以 $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$ 为实验材料,在玻璃喷嘴直径为50 μm 的条件下,制备出锡铅焊球。随着BGA封装应用领域的拓展、封装密度的不断增大,研究者开始开发新型焊锡微球,如核壳为高熔点铜基合金、壳层为低熔点锡基合金的焊锡微球^[75],具有更好的散热性能,更适合在大功率电路中使用。

焊膏是由合金焊粉、糊状焊剂以及一些特殊的添加物混合制成。在正常的环境中,这种焊膏能够将电子元器件固定在预设的位置。然后,当焊膏升温至特定的温度,伴随着溶剂和一些特殊添加物的蒸发,以及合金粉的熔化,焊膏会重新流动,从而使被焊接的元器件与焊盘相连,并且在冷却后形成永久性的焊点。2020年,大连理工大学董伟等^[76]利用均一微滴制备技术与离心雾化技术相结合的方式实现了 $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$ 和 $\text{Sn}_{0.3}\text{AgCu}$ 合金粉末的制备,拓展了均一微滴制备技术的应用范围。

利用均一微滴制备技术打印电子电路可节省材料,提升材料的利用率。同时,均一微滴制备技术的应用难度低及工艺简单,容易实现电子电路的可控打印。2021年,齐乐华等^[6]利用压电推杆式按需喷射技术,以银膏为实验材料,打印了555电路,如图22(a)^[6]所示。该电路包括4个SMD显示器、2个发光二极管(LED)、1个电容器和1个555定时器IC。2022年,Mu等^[77]应用电磁致动式微滴制备技术,采用聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)膜作为柔性基材,在其表面印刷纳米颗粒银油墨,然后用150 $^{\circ}\text{C}$ 的热风烧结以获得柔性Ag电路,如图22(b)^[77]所示。2014年,Zhang等^[78]利用压电式均一微滴制备技术在基板上打印金属颗粒,制造了具有高分辨率和高电导率的柔性铜基电子设备,如图22(c)^[78]所示。2022年,Gilani等^[53]应用磁流体微滴制备技术,



(a) 压电推杆式微滴制备技术制备的555电路;(b) 电磁致动式微滴制备技术制备的柔性电路;(c) 压电式微滴制备技术制备电路板;(d) 磁流体式微滴制备技术制备电子电路
图22 均一微滴制备技术在电子封装领域的应用

以液态锡为实验材料,在铜基板上印刷了电子电路,如图 22(d)^[53]所示。

2) 喷墨彩印领域。

目前,喷墨黑白打印已经被激光打印技术所取代,然而均一微滴制备技术在喷墨彩印技术领域具有支配地位。喷墨打印工艺可直接形成图案化的薄膜而无需掩模版,可以精密控制溶液沉积体积和位置,是一种非接触直印式形成图案的技术。喷墨彩印可以实现不同颜色微滴的高效可靠喷印,能够输出高质量图像。

2021年,Shah等^[7]应用压电挤压式微滴制备技术,以油墨为实验材料,喷墨彩印了花鸟图案(图 23(a)^[7])。Xu等^[79]应用压电推杆式均一微滴制备技术,以油墨为实验材料,完成了字母图像的喷墨彩印(图 23(b)^[79])。2017年,Li等^[80]应用压电式均一微滴制备技术,以油墨为实验材料,对蝴蝶图案进行了彩印(图 23(c)^[80])。2020年,桑瑞娟^[81]应用压电式均一微滴制备技术,以油墨为实验材料,打印了木纹图案(图 23(d)^[81])。



(a) 压电式微滴制备技术彩印的花鸟; (b) 压电推杆式微滴制备技术打印的字母; (c) 压电式微滴制备技术打印的蝴蝶; (d) 压电式微滴制备技术打印的木纹

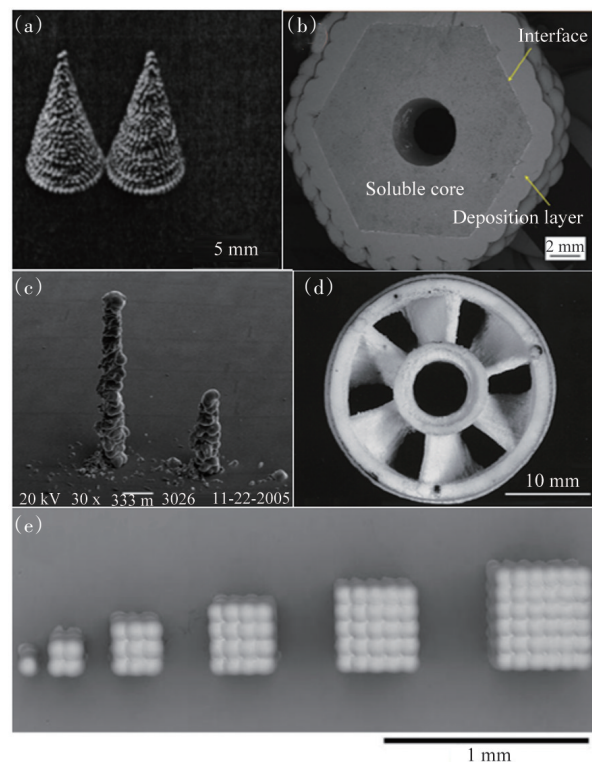
图 23 均一微滴制备技术在喷墨彩印领域的应用

3) 精密制备领域。

基于均一微滴制备技术而发展起来的微型件

3D打印成形技术,具有设备简单、无约束成形和喷射材料范围广的优点,在微小金属构件和电路板打印方面具有较高的应用前景。

大连理工大学鲁栋^[8]基于自主搭建的成型系统,以 $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$ 共晶合金为实验材料,应用压电推杆式均一微滴制备技术,制备了具有完美冶金结合状态的三维金属构件(图 24(a)^[8])。2019年,西北工业大学伊浩等^[59]选择铝合金作为实验原料,利用气压脉冲技术制备了铝液滴并实现了3D打印制造金属管(图 24(b)^[59])。2007年, Lee等^[82]的研究团队利用压电推杆式微滴制备技术,应用无铅焊料为实验材料,制备了高2100 μm 、柱径200 μm 的金属微柱(图 24(c)^[82])。2015年,Derby^[83]应用压电式微滴制备技术,制备了金属器件(图 24(d)^[83])。2019年,Simonelli等^[54]以锡为实验材料,应用磁流体微滴制备技术制备了高纵横比支柱(图 24(e)^[54])。



(a) 压电式微滴制备技术制备的器件; (b) 气压脉冲式微滴制备技术制备的金属管; (c) 压电推杆式微滴制备技术制备的微柱; (d) 挤压式微滴制备技术制备的器件; (e) 磁流体微滴制备技术制备高纵横比支柱的俯视图

图 24 均一微滴制备技术在3D打印领域的应用

针对复杂结构件的制备,与传统制造业相比,微型件3D打印成形技术的制造工艺更为高效简洁,适用于复杂部件的小批量生产,微型3D打印有能力生产比传统制造更复杂的零部件,以满足不同类型装置对材料的需求。

4) 生物医学领域。

均一微滴制备技术在药物领域中的应用具有如下优势:通过控制药物进入人体的方式和药物释放剂量,以精确输送特定含量的药物到靶向器官,从而提高患者的治疗效果^[84]。2022年,上海理工大学张宇琪等^[9]利用气压脉冲模式均一微滴制备技术,以海藻酸盐、低酯果胶和卵磷脂为复合壁材,制备了植物乳杆菌微胶囊(图25(a)^[9])。应用该植物乳杆菌微胶囊可以减少菌体受环境的侵害,提高菌体在宿主体内的存活率。2015年,甘肃中医药大学袁景^[85]应用3D-Bioplotter 3D打印机,制备了 β -磷酸三钙骨组织工程支架,该材料在成骨、降解吸收和抗结核方面有显著效果。

均一微滴制备技术在打印组织工程细胞载体框架方面具有较高的应用价值。在打印生物组织领域中,相比于传统的组织工程,生物微滴3D打印解决了其重复性差和无法模拟临床中所需的复杂

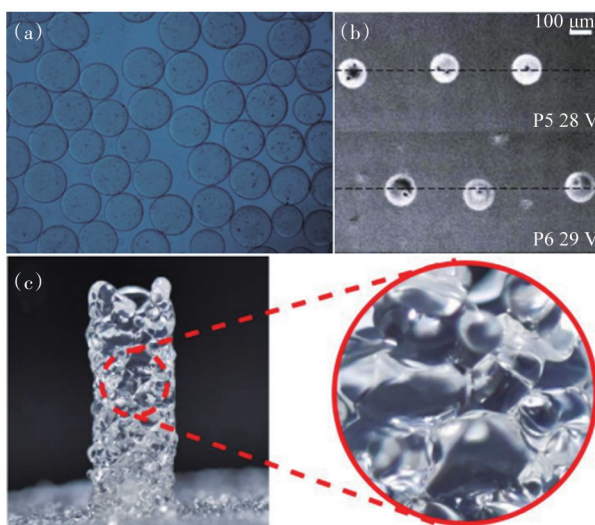
结构的问题。生物微滴3D打印首先通过三维图像分析和计算机断层扫描技术,获得所要打印生物组织或结构的几何数据。再利用生物微滴3D打印装备逐层精确打印出具有复杂几何结构的相关器官或组织。因此,众多研究人员将生物微滴3D打印技术应用在生物制造领域并取得迅速发展^[86]。2019年,东北大学时佳^[87]应用压电模式均一微滴制备技术,以含有细胞的生物墨水为实验材料,打印了封装细胞的液滴(图25(b)^[87])。生物3D打印在未来的器官移植以及医学研究方面具有广阔的发展空间。2020年,哈尔滨工业大学纪闯^[86]应用压电模式均一微滴制备技术,使用含有平滑肌细胞(smooth muscle cell, SMC)的甲基丙烯酰化明胶(gelatin methylacryloyl, GelMA)为实验材料,3D打印了人体血管结构(图25(c)^[86])。

3 结论

均一微滴制备技术经过近几十年的快速发展,已经在电子封装领域、喷墨彩印技术领域、微型件3D打印领域和生物制药领域展示出极大的应用前景。但随着人们对高品质产品需要的提高,对微滴的均一性要求越来越高,对微滴粒径需求越来越小,对均一微滴所属材料的范围要求越来越广。因此,要进一步推进均一微滴制备技术的应用和发展,尚需在以下2方面开展深入研究。

1) 0.1 mm以下均一金属微球的制备。制备粒径在0.1 mm以下的金属微球,需要的喷嘴孔径远小于0.1 mm,由于金属流体的黏度较大(相比于水)和金属流体内部少量表面氧化物的存在,极易造成喷嘴堵塞,影响生产过程中金属微球的制备效率。这需要通过改变工艺(如提高金属流体的温度,以降低金属流体的黏度等),或与其他技术(如流动聚焦技术)相结合以实现0.1 mm以下均一金属微球的制备。

2) 高熔点金属微球的高频制备(如铜球)。现有的模式中,只有气压脉冲模式可以实现高熔点金属微球的制备,但制备频率低,难以应用到生产实践中;压电模式和电磁致动模式,需要通过外接传



(a) 气压脉冲式微滴制备技术制备的微胶囊; (b) 压电式微滴制备技术制备的细胞液滴; (c) 压电式微滴制备技术制备的人体血管结构

图25 均一微滴制备技术在生物医学领域的应用

动杆的形式实现高熔点微球的制备,结构复杂;金属磁流体模式结构简单,可制备低熔点金属微球,受限于磁铁的使用温度,难以制备高熔点金属微球;激光流体共振模式可在透明射流液体(如水)上产生均一扰动,难以在金属射流液柱上有应用。因此需要探究新的可耐高温的扰动机制,以实现高熔点金属微球的高频制备。

参考文献(References)

- [1] 李涛. 高密封装用BGA焊球制备工艺研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.
- [2] 李涛, 闫焉服, 王广欣, 等. 球化介质对球栅阵列封装钎焊球质量的影响[J]. 机械工程材料, 2017, 41(10): 28-32.
- [3] Lehtonen J, Ge Y L, Ciftci N, et al. Phase structures of gas atomized equiatomic CrFeNiMn high entropy alloy powder[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 827: 154142.
- [4] Wang J Y, Yang H L, Ruan J M, et al. Microstructure and properties of CoCrNi medium-entropy alloy produced by gas atomization and spark plasma sintering[J]. Journal of Materials Research, 2019, 34(12): 2126-2136.
- [5] 罗志伟, 赵小双, 罗莹莹, 等. 微滴喷射技术的研究现状及应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2015(5): 27-32.
- [6] Dou Y B, Luo J, Qi L H, et al. Drop-on-demand printing of recyclable circuits by partially embedding molten metal droplets in plastic substrates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297: 117268.
- [7] Ali Shah M, Lee D G, Lee B Y, et al. Classifications and applications of inkjet printing technology: A review[J]. IEEE Access, 2021, 9: 140079-140102.
- [8] 鲁栋. 脉冲微孔均匀金属液滴喷射沉积成型技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [9] 张宇琪, 彭滢, 周新丽. 微滴喷射法制备植物乳杆菌微胶囊的试验研究[J]. 上海理工大学学报, 2022, 44(1): 34-41.
- [10] 蒋恒宇, 刘少锋. 喷射参数对微滴喷射系统喷射效果的影响[J]. 企业技术开发(学术版), 2011, 30(11): 91-93.
- [11] 唐勇, 齐乐华, 罗俊, 等. 电磁致动式微滴按需喷射装置的设计及实现[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(7): 946-949.
- [12] 李珍妮. 纵向扰动控制下液体射流破碎机理的研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [13] 周诗贵. 压电驱动膜片式微滴喷射技术仿真分析与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [14] 邓珺珺, 邓圭玲, 彭雯, 等. 压电驱动喷射点胶阀系统性能的仿真与实验[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(1): 46-49.
- [15] 张彦振, 李德格, 王凯新, 等. 用于喷墨打印的压电喷嘴研制及机理探究[J]. 电加工与模具, 2022(5): 48-52.
- [16] 宋家兴. 压电式微滴喷射3D打印头喷射性能研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [17] 黄杰光, 齐乐华, 罗俊. 金属微滴水平喷射关键参数调控机制及试验[J]. 航空学报, 2021, 42(10): 325-336.
- [18] 刘作平, 周健, 裴泽光, 等. 同轴气流作用下压电式微滴喷射过程的数值模拟[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2021, 47(4): 75-83.
- [19] 蔡昊. DOD压电式喷墨打印液滴形成和沉积过程的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [20] 袁方. 压电喷墨打印头结构优化及喷射性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [21] 刘作平. 同轴气流作用下压电式微滴喷射过程的数值模拟研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.
- [22] Wang S K, Zhong Y H, Fang H S. Deformation characteristics of a single droplet driven by a piezoelectric nozzle of the drop-on-demand inkjet system[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 869: 634-645.
- [23] Kang S H, Kim S, Sohn D K, et al. Analysis of drop-on-demand piezo inkjet performance[J]. Physics of Fluids, 2020, 32(2): 022007.
- [24] Bernasconi R, Brovelli S, Viviani P, et al. Piezoelectric drop-on-demand inkjet printing of high-viscosity inks[J]. Advanced Engineering Materials, 2022, 24(1): 2100733.
- [25] 季成炜, 朱丽, 肖纳, 等. 新型电磁铁驱动的撞针式微滴喷射装置[J]. 微纳电子技术, 2019, 56(11): 918-924.
- [26] 袁涛, 雷永平, 王同举, 等. 微滴制备及其均一性检测[J]. 仪表技术与传感器, 2020(8): 122-126.
- [27] 张楠, 林健, 王同举, 等. 用于打印柔性导线的液态金属微滴制备过程研究[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(7): 1-7.
- [28] 王同举. 基于磁流体技术制备均一颗粒的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
- [29] 赵玉佩. 气压阀控式微喷方法与控制技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [30] 王志海, 仝帅, 王飞, 等. 气动阀控微液滴产生系统的优化[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(1): 15-23.
- [31] 王晨. 金属微滴按需喷射及沉积过程研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [32] 李黎. 单分散金属微球的制备及快速凝固研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [33] 王志海, 王梦, 王璨, 等. 气动阀控式微米按需液滴喷射过程对细胞活性的影响[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(7): 631-637.
- [34] Liu H Y, Wang Z B, Gao L, et al. Optofluidic resonance of a transparent liquid jet excited by a continuous wave laser[J]. Physical Review Letters, 2021, 127(24): 244502.
- [35] 郑振粮. 3D打印按需滴化微喷射关键技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [36] 许立宁, 崔大付. 剪式压电微喷的设计及分析[J]. 压电

- 与声光, 2006, 28(4): 397-399.
- [37] 未永, 吕玉山. 收缩管型压电微滴喷射理论分析与实验研究[J]. 压电与声光, 2014, 36(3): 476-479.
- [38] 魏振先, 魏修亭, 郭翠平, 等. 收缩管型压电喷头微滴喷射仿真及实验研究[J]. 现代制造工程, 2017, 12: 96-100.
- [39] 徐磊. 压电喷墨喷射特性及残余振荡抑制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [40] Li X, Xu C H, Liu C Q, et al. The ultracompact HL-2040 and HL-2070N are recent additions to Brother's line of personal laser printers[J]. Chinese Chemical Letters, 2013, 8998(8): 471-494.
- [41] 杨月星. 压电式单液滴发生装置的设计与实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- [42] Kim S, Sung J, Lee M H. Pressure wave and fluid velocity in a bend-mode inkjet nozzle with double PZT actuators[J]. Journal of Thermal Science, 2013, 22(1): 29-35.
- [43] Magazine R, van Bochove B, Borandeh S, et al. 3D inkjet-printing of photo-crosslinkable resins for microlens fabrication[J]. Additive Manufacturing, 2022, 50: 102534.
- [44] Qi L H, Jiang X S, Luo J, et al. Dominant factors of metal jet breakup in micro droplet deposition manufacturing technique[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(4): 495-500.
- [45] 付一凡. 脉冲微孔喷射法均匀球形微米级粒子的制备及其影响因素研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [46] Yi H, Qi L H, Luo J, et al. Elimination of droplet rebound off soluble substrate in metal droplet deposition[J]. Materials Letters, 2018, 216: 232-235.
- [47] 周诗贵, 刁俊通. 压电驱动膜片式微滴喷射仿真与尺度一致性试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 178-185.
- [48] 于洋, 史耀武, 夏志东, 等. BGA焊球表面状态与微观结构关系的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(6): 1092-1094.
- [49] Wang T J, Lin J, Guo X Y, et al. A new method for producing uniform droplets by continuous-ink-jet technology[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(8): 0850081-0850086.
- [50] Wang T J, Lin J, Lei Y P, et al. Dominant factors to produce single droplet per cycle using drop-on-demand technology driven by pulse electromagnetic force[J]. Vacuum, 2018, 156: 128-134.
- [51] Wang T J, Lin J, Lei Y P, et al. Droplets generator: Formation and control of main and satellite droplets[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 558: 303-312.
- [52] Wang T J, Lin J, Lei Y P, et al. Research on the droplets formation of gallium based eutectic alloys based on the mode of pulse electromagnetic force[J]. Vacuum, 2019, 163: 158-163.
- [53] Gilani N, Aboulkhair N T, Simonelli M, et al. From impact to solidification in drop-on-demand metal additive manufacturing using MetalJet[J]. Additive Manufacturing, 2022, 55: 102827.
- [54] Simonelli M, Aboulkhair N, Rasa M, et al. Towards digital metal additive manufacturing via high-temperature drop-on-demand jetting[J]. Additive Manufacturing, 2019, 30: 100930.
- [55] 朱兴晨. 气动式金属微滴按需喷射过程数值模拟与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [56] Zhong S Y, Qi L H, Luo J, et al. Effect of process parameters on copper droplet ejecting by pneumatic drop-on-demand technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 3089-3097.
- [57] Moqadam S I, Mädler L, Ellendt N. Microstructure adjustment of spherical micro-samples for high-throughput analysis using a drop-on-demand droplet generator[J]. Materials, 2019, 12(22): 3769.
- [58] Moqadam S I, Mädler L, Ellendt N. A High temperature drop-on-demand droplet generator for metallic Melts[J]. micromachines, 2019, 10(7): 477.
- [59] Yi H, Qi L H, Luo J, et al. Direct fabrication of metal tubes with high-quality inner surfaces via droplet deposition over soluble cores[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 264: 145-154.
- [60] 舒霞云. 气动膜片式金属微滴喷射理论与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [61] 肖峻峰. 气动膜片式微滴喷射系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [62] Zhao D K, Zhou H Z, Wang Y F, et al. Drop-on-demand (DOD) inkjet dynamics of printing viscoelastic conductive ink[J]. Additive Manufacturing, 2021, 48: 102451.
- [63] Amirzadeh A, Raessi M, Chandra S. Producing molten metal droplets smaller than the nozzle diameter using a pneumatic drop-on-demand generator[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 47: 26-33.
- [64] Si T, Li F, Yin X Y, et al. Modes in flow focusing and instability of coaxial liquid-gas jets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 629: 1-23.
- [65] 穆恺, 司廷. 毛细流动聚焦的实验方法及过程控制[J]. 实验流体力学, 2020, 34(2): 46-56.
- [66] 司廷, 尹协振. 流动聚焦研究进展及其应用[J]. 科学通报, 2011, 56(8): 537-546.
- [67] 康鹏, 郭鉴锋, 穆恺, 等. 流动聚焦中液体锥形形态和流动结构实验研究[J]. 实验流体力学, 2022, 36(2): 74-81.
- [68] 李帅兵, 司廷. 射流破碎的线性不稳定性分析方法[J]. 空气动力学学报, 2019, 37(3): 356-372.
- [69] 司廷, 李广滨, 尹协振. 流动聚焦及射流不稳定性[J]. 力学进展, 2017, 47: 201706.
- [70] 司廷. 流动聚焦的实验和理论研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.

- [71] 司廷, 刘志勇, 尹协振. 流动聚焦中锥形和射流直径影响因素的实验研究[J]. 实验流体力学, 2008, 22(1): 21-26.
- [72] 司廷, 刘志勇, 尹协振. 流动聚焦实验[J]. 力学季刊, 2007, 28(4): 533-538.
- [73] Hara K, Kurashima Y, Hashimoto N, et al. Optimization for chip stack in 3-D packaging[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2005, 28(3): 367-376.
- [74] Yamada H, Togasaki T, Kimura M, et al. High-density 3-D packaging technology based on the sidewall interconnection method and its application for CCD micro-camera visual inspection system[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2003, 26(2): 113-121.
- [75] Wang C P, Liu X J, Ohnuma I, et al. Formation of immiscible alloy powders with egg-type microstructure[J]. Science, 2002, 297(5583): 990-993.
- [76] 董伟, 孟瑶, 许富民, 等. 基于单分散逐液滴雾化法制备锡合金微细球形金属粉末[J]. 材料工程, 2020, 48(9): 124-131.
- [77] Mu B Y, Xu Y N, Xu J C, et al. Inkjet direct printing approach for flexible electronic[J]. Results in Engineering, 2022, 14: 100466.
- [78] Zhang T Y, Wang X L, Li T J, et al. Fabrication of flexible copper-based electronics with high-resolution and high-conductivity on paper via inkjet printing[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2014, 2(2): 286-294.
- [79] Xu Y, Qi F J, Gao X Y, et al. Direct droplet writing-A novel droplet-punching capillary-splitting 3D printing method for highly viscous materials[J]. Procedia Manufacturing, 2021, 53: 472-483.
- [80] Li K, Liu J K, Chen W S, et al. Controllable printing droplets on demand by piezoelectric inkjet: Applications and methods[J]. Microsystem Technologies, 2018, 24(2): 879-889.
- [81] 桑瑞娟. UV喷墨3D打印木材研究现状与发展前景[J]. 林业工程学报, 2020, 5(6): 20-28.
- [82] Lee T M, Kang T G, Yang J S, et al. 3D metal microstructure fabrication using a Molten Metal DOD Inkjet System[C]//Proceedings of TRANSDUCERS 2007-2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 1637-1640.
- [83] Derby B. Additive manufacture of ceramics components by inkjet printing[J]. Engineering, 2015, 1(1): 113-123.
- [84] 韩县伟, 张洪武, 罗洪艳, 等. 基于微流控液滴形成技术的聚乙烯醇微球制备[J]. 分析化学, 2018, 46(8): 1269-1274.
- [85] 袁景. 多孔 β -磷酸三钙骨组织工程支架负载抗结核药物缓释系统的3D打印制备及初步研究[D]. 兰州: 甘肃中医学院, 2015.
- [86] 纪闯. 高粘度生物材料的压电式微喷射3D打印关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [87] 时佳. 压电式按需滴化微喷射生物3D打印技术的研究与优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.

Research progress of uniform droplets formation technology

WANG Tongjiu^{1,2}, ZHANG Qimei^{1,2}, ZHANG Wenqian^{1,2}, LEI Yongping^{3*}, LIN Jian³, FU Hanguang³

1. School of Electronic and Control Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China

2. Hebei Key Laboratory of Micro Spacecraft Technology, Langfang 065000, China

3. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100000, China

Abstract The application of uniform droplets is extensive, and the generation methods are increasingly efficient and controllable. This paper describes the principles of continue ink jet (CIJ) and drop-on-demand (DOD). Based on different pulse force formation principles, the technology for producing uniform droplets can be categorized into piezoelectric mode, electromagnetic vibration mode, magnetic fluid mode, gas pulse actuation mode and laser fluid resonance mode. The principles and technical status of these five modes are analyzed and summarized. Furthermore, this paper summarizes the application status of uniform droplet production technology in electronic packaging, inkjet printing technology, micro 3D printing, and biopharmaceuticals. And it provides a prospect for the development trend of uniform droplet production technology.

Keywords uniform droplets; continue ink jet; drop on demand; electronic packaging; 3D printing ●



(责任编辑 傅雪)