

性蛋白的表达和跳动能力。此外，分层定向的微米/亚微米导电支架更有利于原代心肌细胞的同步跳动。相关结果如图2所示。

5.2 类脑组织制造

脑科学是当今科学研究重要发展方向之一，也是世界各国间科学竞争的制高点之一。2013年美国总统奥巴马宣布启动脑科学计划（Brain Initiative），欧盟国家、日本随即予以响应，分别启动欧洲脑计划（The Human Brain Project）以及日本脑计划（Brain/Minds Project）。我国“十三五”规划的100个重大项目中，“脑科学与类脑研究”列第四位。世界卫生组织的统计数据表明，脑疾病（如帕金森病、阿尔茨海默病、自闭症、抑郁症等）给全球社会造成的负担已超过心血管疾病和癌症。由于其发病机制的认识有限，几乎所有的病例都缺乏有效的治疗。在脑科学及脑疾病的研究中，作为研究对象的人脑组织供体缺乏成为其主要的瓶颈，并且动物脑组织无法完全表征人脑组织特征，因此，体外构建接近自然人脑组织的模型是脑科学发展的必然需求。脑组织中的神经元功能与信号发生和交换是形成思维功能的基础，其内部细胞的排列及它们在皮质各层内的类型和密度是大脑皮质分区功能的基础，从“认识脑”到“创造脑”是发展类脑计算机的方向，在体外对脑组织进行形态和功能构建取决于对目标功能部位所对应的神经元类型、构筑结构及神经元组合的仿生设计和精确制造，是生物类脑功能5D打印应该发展的前瞻性方向。

在类脑组织体外构建的设备研发方面，我们设计并搭建了细胞打印/培养一体化系统，可同时实现多种细胞和基质成分的打印，其中打印头打印速度 $100 \sim 1000 \mu\text{L}/\text{min}$ ，x-y工作台移动精度不高于 $20 \mu\text{m}$ ，可打印组织层厚 $100 \sim 300 \mu\text{m}$ ，打印腔室温度保持为 $37 \pm 1^\circ\text{C}$ ，氧气和二氧化碳浓度可调且浓度偏差在 $\pm 1\%$ 以内，为实现多细胞类脑组织体外打印提供了设备平台，

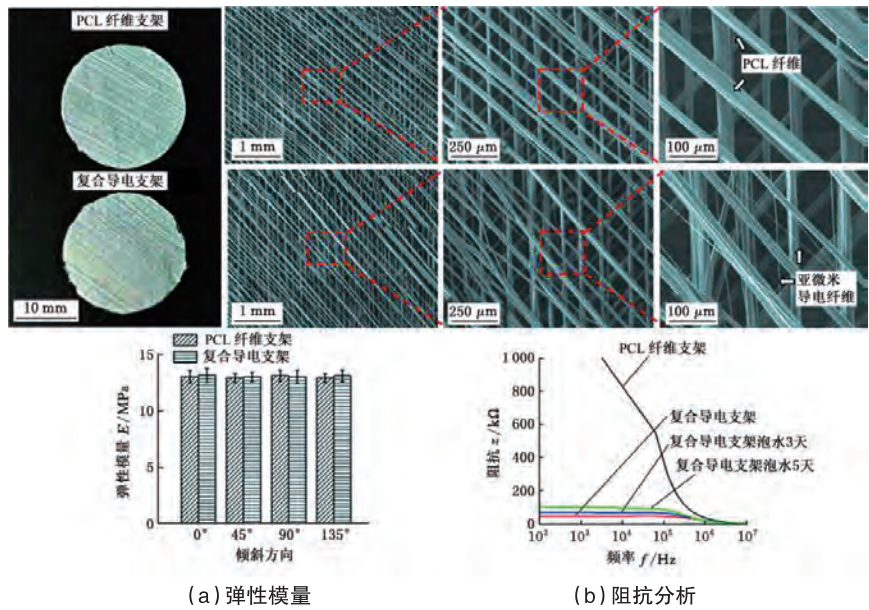


图1 静电打印的微米纤维/亚微米导电纤维复合支架及其性能表征^[2]

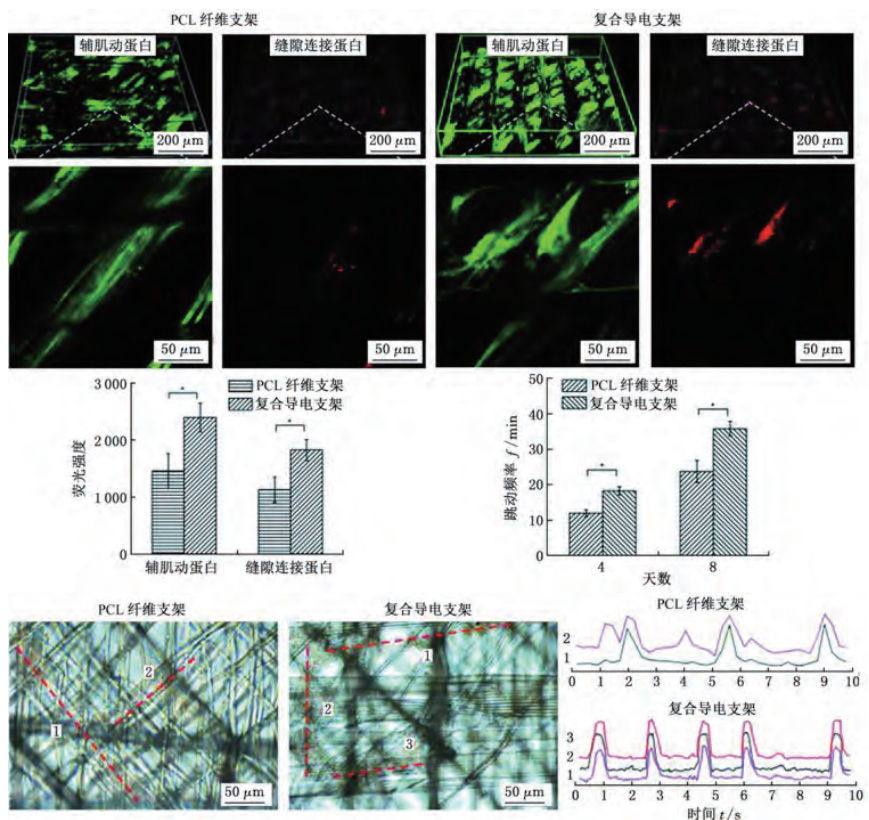


图2 大鼠原代心肌细胞在微米/亚微米复合导电纤维支架上的定向与同步跳动情况^[3]

养一体化系统，可同时实现多种细胞和基质成分的打印，其中打印头打印速度 $100 \sim 1000 \mu\text{L}/\text{min}$ ，x-y工作台移动精度不高于 $20 \mu\text{m}$ ，可打印组织层

厚 $100 \sim 300 \mu\text{m}$ ，打印腔室温度保持为 $37 \pm 1^\circ\text{C}$ ，氧气和二氧化碳浓度可调且浓度偏差在 $\pm 1\%$ 以内，为实现多细胞类脑组织体外打印提供了设备平台，

如图3所示。在打印设备的基础上,针对神经元细胞的打印需求,优化了相应的打印工艺参数,实现了包裹大鼠原代神经元细胞的三维活性神经组织的制备,打印后组织的细胞活性在94%以上。

自然脑组织是由神经元和神经胶质为主的两类神经细胞组成的。我们利用已搭建的制造平台构建了单纯神经元组织、神经元和胶质细胞混合组织,以及神经元和胶质细胞以一定的三维空间结构共同存在的组织模型,实现了活性类脑组织神经元和胶质细胞在体外不同方式和空间结构关系下的共培养^[5]。通过研究发现,相对于由体外单纯构建的神经元组织,与胶质细胞相邻但分层存在的神经元在体外可以有更接近自然脑组织的形态和生化表达。该模型的构建,从三维层面为神经胶质细胞和神经元共存的组织模型提供了更为接近自然脑组织的解释和研究基础,也为后续脑科学的开展及不同病理药理研究提供了体外模型的基础。

通过3D打印设备,我们构建了胶质细胞和神经元不同空间结构关系下的组织模型,所构建的模型中间为胶质区域,四周为神经元区域。通过研究验证了胶质细胞与神经元的空间关系对体外神经元的形态发育及功能有很大影响,研究了与神经胶质细胞不同空间位置和距离的神经元轴突的延伸情况(图4),结果表明,靠近胶质细胞区域的具有较长轴突的神经元($>100\mu\text{m}$)数目远多于远离神经胶质细胞区域,证明了在体外构建的三维活性组织中,胶质细胞的存在有利于神经元突触的形成及生长,即对神经元的生长发育及信号传

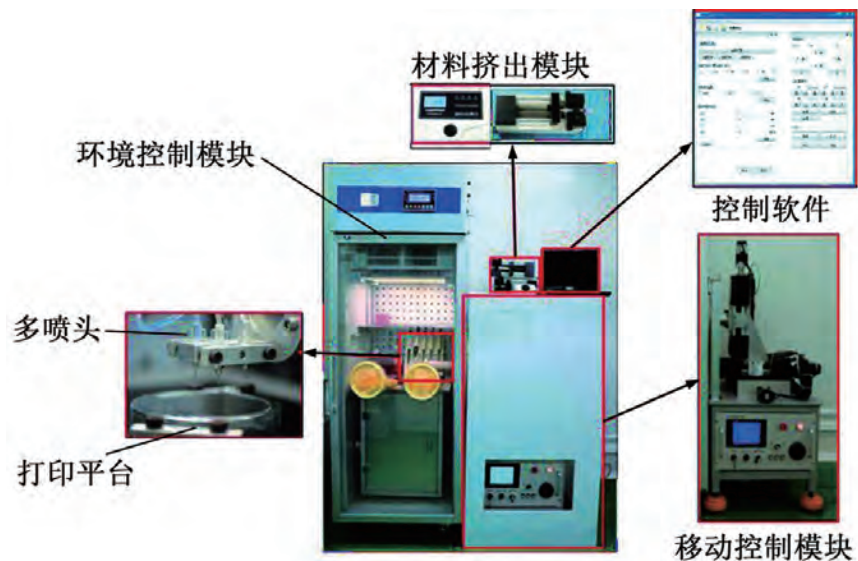


图3 体外类脑组织打印/培养一体化平台

递有促进作用^[6]。

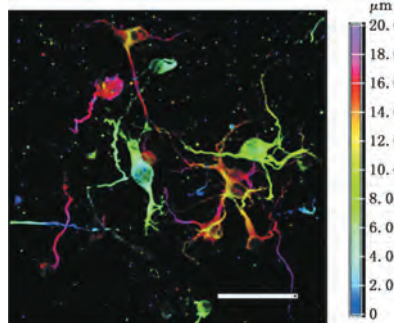


图4 培养至第7天的神经元免疫荧光图像
(不同颜色表示沿Z轴方向不同深度)

5.3 生物机械共生体

现有机器存在能量转化效率低、灵活性低等局限,具有高能量转化效率、本质安全性、运动灵活性的多自由度柔性类生命机器人是用生命肌肉组织或细胞驱动的生物共生机器的发展方向。为此,需研究类生命机器人多细胞/多材料复合制造方法,为具有生命体和机械体的类生命机器人提供一种从运动功能需求出发,可重复、可定制的快速制造新途径^[7-8]。

生命体设计方面,我们设计了一种用于肌细胞培养分化的负泊松比支架微结构,以提高肌细胞分化程度与

肌肉组织的收缩力,并为生命体提供必要的保护及生命维持养分,以利于其长期保持活性;生命体制造方面采用3D打印制造生命体构件,通过实验研究了骨骼肌细胞的生长分化情况,扫描电镜等结果表明,骨骼肌细胞可分化形成成熟的肌纤维,为功能化生命体的构建奠定了基础;生命体功能调控方面,搭建了生命体多场耦合刺激平台,研究了仿生环境富集刺激(例如电刺激、机械刺激等)对生命体驱动性能的调控作用机制。构建了一种以海蛞蝓为仿生原型的爬行生命机械混合机器人。在爬行生命机械混合机器人的设计与制造中,研究了蛞蝓的解剖学结构及其运动方式,建立了运动简化模型并进行了步态分析,在此基础上,设计了类生命机器人的本体结构,依据摩擦力的各向异性设计了其爬行步态,并通过3D打印制作了类生命机器人构件。有关类生命机器人的驱动性能研究方面,建立了基于二阶弹簧阻尼系统机器人的运动学与动力学模型,利用运动学与动力学实验平台开展了机器人驱动性能检测

实验(图5),实验结果表明,在频率50 Hz、电压1 V的方波脉冲刺激下,机器人能以2mm/s的速度向前爬行^[9]。上述研究探索了生命体机器人未来的可能发展方向。

6 总结

5D打印的特征是在三维空间制造的基础上,除了增加时间维度外,增加了更为重要的功能再生维度。本文阐述了这一技术五个方面的关键问题:基于功能的生命体结构设计制造、5D打印的生命单元调控方法与活性保持、功能形成机理与构件功能形成、信息载体与传导组织构建、多功能器件或组织的制造与功能评价。结合5D打印理念,以三个方面的案例——心肌组织支架的制造、类脑神经组织制造、爬行生命机械混合机器人的初步研究成果,说明生命组织功能形成的可能途径和初步效果,相关研究为生物制造技术拓展新方向提供了新思路。^[7]

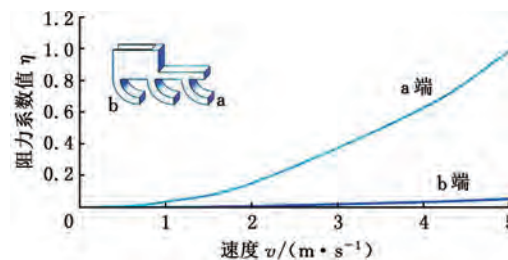
参考文献

[1] Grigoryan B, Paulsen S J, Corbett D C, et al. Multivascular Networks and Functional Intravascular Topologies within Biocompatible Hydrogels[J]. Science. 2019, 364(6439): 458-464.

[2] HE Jiankang, XU Fangyuan, D O N G R u o n a n , e t a l . Electrohydrodynamic 3D Printing



(a) 类生命机器人实体



(b) 流体动力学分析

图5 爬行类生命机器人的构建

of Microscale PCL Scaffolds with Multi-walled Carbon Nanotubes[J]. Biofabrication, 2017, 9:015007.

[3] LEI Qi, HE Jiankang, LI Dichen. Electrohydrodynamic 3D Printing of Layer-specifically Oriented, Multiscale Conductive Scaffolds for Cardiac Tissue Engineering[J]. Nanoscale, 2019, 11:15195-15205.

[4] MAO Mao, HE Jiankang, LI Zhi, et al. Multi-directional Cellular Alignment in 3D Guided by Electrohydrodynamically-printed Microlattices[J]. Acta Biomaterialia, 2020, 101:141-151.

[5] FANG Ao, LI Dichen, HAO Zhiyan, et al. Effects of Astrocyte on Neuronal Outgrowth in a Layered 3D Structure[J/OL]. BioMedical Engineering OnLine, 2019[2019-12-18].<https://doi.org/10.1186/s12938-019-0694-6>.

[6] FANG Ao, HAO Zhiyan, WANG Ling, et al. In Vitro Model of the Glial Scar[J/OL]. International Journal of Bioprinting, (2019-07-

03) [2019-12-18].

[7] PARK S J, GAZZOLA M, PARK K S, et al. Phototactic Guidance of a Tissue-engineered Soft-robotic Ray[J]. Science, 2016, 353:158-62.

[8] ZHANG Chuang, WANG Wenxue, XI Ning, et al. Development and Future Challenges of Bio-syncretic Robots[J]. Engineering, 2018, 4(4):452-63.

[9] AKHTARA M U, GAO Lin, WEN Haoyue, et al. A Biohybrid Robot by Mimicking the Gait Mechanism of Aplysia Californica[C] // 4th C I R P C o n f e r e n c e o n BioManufacturing. Guangzhou, 2019.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51675411,51675412)

作者简介: 李涤尘, 男, 1964年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为增材制造与生物制造。

转自CME2020(01)83-88

3D打印连续纤维复合材料丝材的成形规律

范聪泽^{1,2} 单忠德¹ 邹贵生² 战丽¹ 刘晓军¹

1.机械科学研究总院集团有限公司先进成形技术与装备国家重点实验室,北京,100044

2.清华大学机械工程系,北京,100084

摘要: 针对3D打印连续纤维增强热塑性树脂复合材料,研究了热塑性树脂在螺杆挤出过程中的流动机理和在纤维界面的浸渍行为,揭示了螺杆转速和牵引速度对复合丝材成形直径和纤维含量的影响规律。提出使用实际浸渍时间和理论完全浸渍时间来共同表征树脂对纤维的浸渍程度,观察复合丝材断面的形貌可知,高浸渍程度的丝材内部空隙较少,树脂和纤维结合更紧密。进行3D打印成形测试,当丝材的浸渍程度从17.25%提高到40.02%,样件的拉伸强度可从132MPa 提高到160MPa,提高约21%。对样件进行动态力学性能分析(DMA)测试,试验结果表明浸渍程度高的复合材料成形件具有高的存储模量和损耗模量,表明其纤维和基体间的界面结合程度得到了提高和改善。

关键词: 热塑性树脂; 丝材成形; 增材制造; 3D打印; 复合材料

1 引言

热塑性树脂不仅具有韧性好、介电常数高、损伤容限大等优异的基础性能,而且兼具储存时间长、储存条件简单、可循环利用、无污染等特点,在航空航天工程、船舶工程、建筑工程以及车辆制造工业得到广泛应用^[1-3]。人们将增强体—纤维引入热塑性树脂基体中形成复合材料,从而获得更高的比强度和比模量,以满足复杂承重、承压环境的使用要求^[4],如短纤维被预混入树脂基体中,由于其在空间中的随机取向和排布,使得成形件具有良好的各向同性的力学性能^[5]。ZHONG等^[6]通过引入几种不同的改性剂(包括短玻璃纤维、增塑剂和增容剂),探究其对3D打印成形ABS构件性能的

影响。NING等^[7-8]使用熔融沉积成形(FDM)技术成形热塑性基体复合材料,通过改变纤维含量和长度来改善成形件的力学性能。KU等^[9]将生物可降解的天然纤维作为增强材料,研究纤维与基体间的界面结合特性,通过Halpin-Tsai方程预测复合材料的弹性模量。近年来,一些科研人员使用连续纤维作为增强体加入到热塑性树脂基体中,通过连续纤维密集有序地排布来提高复合材料的力学性能,经研究其强度甚至可以与金属媲美^[10-11]。随着连续纤维增强复合材料的发展和应,众多科研机构提出了多种成形方法^[12-13],如缠绕成形、树脂传递模塑成形、自动铺丝铺带成形等。

为实现单件、小批量快速制造,一些研究人员使用3D打印技术成形

连续纤维增强复合材料^[14]。常用的3D打印连续纤维有碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维,常用的热塑性树脂有聚乳酸(PLA)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)、聚酰胺(PA)等。TIAN等^[15]将纤维和树脂分别通入熔融腔室,在210℃下熔化浸渍,分析了成形速度、层厚、成形道路宽度等参数对成形件弯曲性能的影响。以PLA为基体,使用碳纤维束为增强体,测得FDM成形后标准试样的强度可达纯树脂的3倍左右。但是,通过断面扫描可观察到纤维束和树脂间空隙较多,界面结合性能较差,致使成形件的层间剪切强度较低。美国Mark Forged公司研制了一系列连续纤维增强热塑性树脂基复合材料打印机,该打印机使用两个喷头分别成形连续纤维复

合材料和短纤维复合材料,可通过优化多种打印参数提高成形件的质量。CAMINERO等^[16]使用该打印机研究了不同层厚和纤维含量对成形件层间性能的影响。DICKSON等^[17]通过改变打印策略,成形了芳纶纤维、玻璃纤维和碳纤维增强的热塑性树脂,成形实验中碳纤维的含量可达33%,且增强效果优于其他两种纤维。

目前,一些研究机构将连续纤维和树脂基体分别送入加热块熔融腔室内原位浸渍,进而层层堆积成形,由于连续纤维刚性差,运送纤维速度不易掌握,因而难以精确控制树脂-纤维配比;此外,熔融腔室内结构复杂,连续纤维和树脂接触时间较短,难以实现良好的浸渍效果。尤其在成形高纤维体积分数结构件时,复合材料丝材中树脂较少,成形质量难以保证。为此,本研究中预先制备连续纤维增强热塑性复合材料丝材,为解决连续纤维和树脂浸渍效果差的问题,研究了树脂在螺杆挤出过程中的流动机理,揭示了螺杆转速和牵引速度对复合丝材成形直径和纤维含量的影响规律。通过理论和试验探究纤维浸渍程度对复合材料3D打印成形件性能的影响关系。

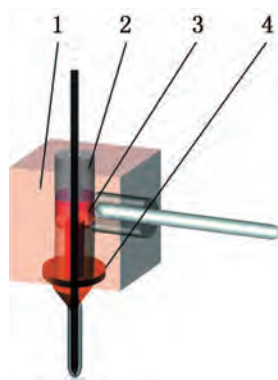
2 试验研究所用材料、设备及测试方法

2.1 所用材料

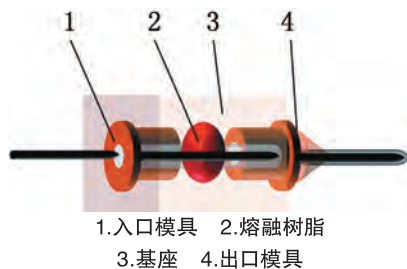
本研究中选择具有良好生物可降解性的PLA作为树脂基体,PLA的玻璃化转变温度为50~80℃,熔融温度和黏度适中,适用于3D打印成形。PLA粒料为美国NatureWorks公司生产的4032D型号,密度为1.25g/cm³,为浅黄色或透明的物质,熔点约175℃,

不溶于水、乙醇、甲醇等,易水解成乳酸,PLA成形件的抗拉强度不小于30MPa,伸长率约3.0%,收缩率0.19%。连续纤维选择日本TORAY公司生产的T300型号的1K和3K碳纤维,其中1K纤维束包含1000根纤维单丝,其拉伸强度约3530MPa,拉伸模量约230GPa,伸长率约1.5%,密度1.76g/cm³,纤维单丝直径7μm。

2.2 复合材料丝材成形设备



1.加热块 2.喉管 3.熔融树脂 4.喷嘴
图11 传统连续纤维3D打印头的结构



1.入口模具 2.熔融树脂
3.基座 4.出口模具
图2 复合材料丝材的成形腔室

传统3D打印成形方式中,连续纤维和树脂分别被送入喷头中^[15],如图1所示,在加热块内部的熔融腔室中混合浸渍。混合浸渍过程的打印速度、打印温度、送料速度等参数是根据成形件特征设计的,并未考虑纤维和树脂的浸渍程度,而且打印过程中存在喷头的加速、减速和停顿,导致树脂和纤维的浸渍效果较差。为克服以上方法的局限性,本文参照热塑性树脂注塑机的设计原理,选择螺杆作为熔融

树脂输送机构成形复合丝材^[18-19],树脂中的温度场稳定可控,出料均匀性好,可精确掌握复合材料丝材中连续纤维和树脂的配比,同时改善纤维和树脂的浸渍效果。复合材料丝材成形设备最核心的机构是成形腔室,如图2所示,主要包括基座、入口模具、出口模具三部分。复合材料丝材成形过程中的螺杆转速、收卷速度可实时调控。此外,成形腔室的结构尺寸、螺杆转速、加热温度和收卷机构的收卷速度配合,可改善纤维和树脂的浸渍效果,改善复合材料丝材中纤维对中性、成形尺寸精度等。

2.3 连续纤维样件打印机及测试方法

本研究中选用机械科学研究总院开发的AM-FW300(成形尺寸300mm×300mm×300mm)3D打印机来成形测试件。经过工艺优化试验,选择表1所示的工艺参数来成形测试样件。拉伸试样的尺寸为200mm×18mm×3mm,弯曲试样尺寸为160mm×10mm×3mm,在25℃条件下,使用美国INSTRON-5567万能试验机来测试样件的拉伸和弯曲性能。拉伸测试按照ISO527-4:1997标准进行,预加载5N,标距为50mm,加载速度为5mm/min;弯曲测试按照ISO14125:1998标准进行,加载速度为10mm/min。使用日本奥林巴斯BX51M光学纤维显微镜对样品断面进行分析,观察测试样品断裂截面中的孔隙及纤维树脂的结合效果。使用美国TA公司的DMA-Q800动态热机械分析仪测试40mm×10mm×2mm样件,在单悬臂模式下选择1Hz的频率和50μm的幅度,测试温度范围为30~100℃,加热速率为5℃/min。