

增材制造技术——现状与未来

卢秉恒^{1,2}

1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安, 710054

2. 增材制造国家创新中心, 西安, 710054

摘要: 论述了增材制造技术的国内外发展状况, 分析了我国在该技术领域面临的机遇与挑战, 认为未来增材制造技术应该围绕金属成形中的强非平衡态凝固学、极端条件下增材制造新机理、梯度材料、结构的增材制造机理, 以及组织工程支架活化生长和功能再生的生化、生命学原理等科学问题开展研究。建立“应用发展为先导、技术创新为驱动、产业发展为目标”的研究发展思路, 以推进增材制造技术的发展, 为创新型国家建设提供有力支撑。

关键词: 增材制造; 技术创新; 产业发展; 多学科融合

1 引言

增材制造 (additive manufacturing, AM) 技术 (也称为3D打印技术) 是20世纪80年代后期发展起来的新型制造技术。2013年美国麦肯锡咨询公司发布的“展望2025”报告中, 将增材制造技术列入决定未来经济的十二大颠覆技术之一。目前, 增材制造成形材料包含了金属、非金属、复合材料、生物材料甚至是生命材料, 成形工艺能量源包括激光、电子束、特殊波长光源、电弧以及以上能量源的组合, 成形尺寸从微纳米元器件到10m以上大型航空结构件, 为现代制造业的发展以及传统制造业的转型升级提供了巨大契机。增材制造以其强大的个性化制造能力充分满足未来社会大规模个性化定制的需求, 以其对设计创新的强力支撑颠覆高端装备的传统设计和制造途径, 形成前所未有的全新解决方

案, 使大量的产品概念发生革命性变化, 成为支撑我国制造业从转型到创新驱动发展模式的转换。

增材制造已经从开始的原型制造逐渐发展为直接制造、批量制造; 从3D打印, 到随时间或外场可变的4D打印; 从以形状控制为主要目的的模型、模具制造, 到形性兼具的结构功能一体化的部件、组件制造; 从一次性成形的构件的制造, 到具有生命力活体的打印; 从微纳米尺度的功能元器件制造到数十米大小的民用建筑物打印, 等等, 增材制造作为一项颠覆性的制造技术, 其应用领域不断扩展。

经过近40年的发展, 增材制造技术面向航空航天、轨道交通、新能源、新材料、医疗仪器等战略新兴产业领域已经展示了重大价值和广阔的应用前景, 是先进制造的重要发展方向, 是智能制造不可分割的重要组成部分。增材制造技术是满足国家重大需求、

支撑国民经济发展的“国之重器”, 已成为世界先进制造领域发展最快、技术研究最活跃、关注度最高的学科方向之一。发展自主创新的增材制造技术是我国由“制造大国”向“制造强国”跨越的必由之路, 对建设创新型国家、发展国民经济、维护国家安全、实现社会主义现代化具有重要的意义。

2 发展现状

2018年, 全球增材制造产业产值达到97.95亿美元, 较2017年增加24.59亿美元, 同比增长33.5%; 全球工业级增材制造装备的销量近20000台, 同比增长17.8%, 其中金属增材制造装备销量近2300台, 同比增长29.9%, 销售额达9.49亿美元, 均价41.3万美元。以美国GE公司为代表的航空应用企业开始采用增材制造技术批量化生产飞机发动机配件, 尝试整机制造, 并计划2021年启用一万台金属打印机, 显

示了增材制造技术的颠覆性意义。相应地，欧洲及日本等发达地区和国家也逐步把增材制造技术纳入未来制造技术的发展规划中，比如欧盟规模最大的研发创新计划“地平线2020”，计划7年内（2014—2020）投资800亿欧元，其中选择10个增材制造项目，总投资2300万欧元；2019年，德国经济和能源部发布《国家工业战略2030》草案中，将增材制造列为十个工业领域“关键工业部门”之一；2014年日本发布的《日本制造业白皮书》中，将机器人、下一代清洁能源汽车、再生医疗以及3D打印技术作为重点发展领域；2016年，日本将3D打印器官模型的费用纳入保险支付范围。

我国增材制造技术和产业发展速度快，规模稳步增长，技术体系和产业链条不断完善，产业格局初步形成，支撑体系逐渐健全，已逐步建立起较为完善的增材制造产业生态体系。根据中国增材制造产业联盟的统计，在2015—2017年三年间，我国增材制造产业规模年均增速超过30%，增速高于世界平均水平；我国本土企业实现快速成长，涌现出先临三维、铂力特、华曙高科等一批龙头企业，产业发展速度加快。

2.1 创造能力在不断提升

增材制造在相关国家科技计划的持续支持下，已为我国航空航天、动力能源领域高端装备的飞跃发展和品质提升作出了重要贡献。目前我国已初步建立了涵盖3D打印金属材料、工艺、装备技术到重大工程型号应用的全链条增材制造的技术创新体系，整体技术达到国际先进水平，并在部分领域处于国际领先水平，如我国采用激光熔覆沉积技术实现了世

界上最大、投影面积达16m²的飞机钛合金整体承力框的增材制造；制造出了长达1.2m的世界最大单方向尺寸的激光选区熔化钛合金制件，解决了传统方法难以实现的极端复杂结构的多结构、功能集成整体制造难题。同时，我国在增材制造技术的研究和产业发展方面已经形成一定的规模，从增材制造前处理模块产业到中游的设备制造和材料生产产业，再到下游的技术服务商和客户群体，已形成小规模产业链。

我国于2016年底建立了支撑增材制造技术发展的研发机构——国家增材制造创新中心，旨在开发创新型增材制造工艺装备，专注于服务产业的共性技术研究，推进增材制造在各领域的创新应用，聚焦技术成熟度介于4—7级的产业化技术的孵化与开发，为我国增材制造领域提供创新技术、共性技术以及信息化、检测检验、标准研究等服务。同时一批省级增材制造创新中心也相继成立或宣布筹建，形成了国家级、省级增材制造创新中心协同布局的发展格局，逐渐形成以企业为主体、市场为导向、政产学研用协同的“1+N”增材制造创新体系。

2.2 产业规模快速增长

我国增材制造产业仍处于快速发展阶段，产业规模逐步增长。2018年，中国增材制造产业产值约为130亿元，相较于2017年的100亿元，同比增长30%。根据中国增材制造产业联盟对40家重点联系企业的统计结果显示，2018年，这些企业的总产值达40.63亿元，比2017年的32.83亿元增加7.8亿元，同比增长23.8%。2018年，中国增材制造装备保有量占全球装备保有量的10.6%，仅次于美国（美国的该参数

为35.3%），位居全球第二。

我国增材制造产业已初步形成了以环渤海地区、长三角地区、珠三角地区为核心，中西部地区为纽带的产业空间发展格局。其中，环渤海地区是我国增材制造人才培养中心、技术研发中心和成果转化基地。长江三角洲地区具备良好经济发展优势、区位条件和较强的工业基础，已初步形成了包括增材制造材料制备、装备生产、软件开发、应用服务及相关配套服务完整的增材制造产业链。珠三角地区，随着粤港澳大湾区建设的推进，增材制造产业将得到进一步集聚。中西部地区，陕西、广东、湖北、山东、湖南等省份是我国增材制造技术中心和产业化发展的重点区域，集聚了一批龙头企业 and 重点园区。

2.3 应用领域持续拓展

增材制造技术应用已从简单的概念模型、功能型原型制作向功能部件直接制造方向发展，各领域应用持续拓展，尤其在航空、航天、医疗等领域的应用更为深入。以北京航空航天大学、西北工业大学、北京煜鼎增材制造研究院有限公司、西安铂力特增材技术股份有限公司为代表的金属增材制造产学研链条高校和企业，已初步建立了涵盖3D打印金属材料、工艺、装备技术到重大工程型号应用的全链条增材制造的技术创新体系，整体技术达到了国际先进水平，并在部分领域居于国际领先水平。除此之外，在航空航天领域，中国航空发动机集团成立了增材制造技术创新中心，旨在推动增材制造燃油喷嘴等零部件逐步走向规模化应用；2018年发射的嫦娥四号中继卫星搭载了多个采用增材制造技术研制的复杂形状铝合金结构

件。在医疗领域，目前已有5个3D打印医疗器械获得CFDA(中国食品药品监督管理总局)批准上市，尤其是2019年初，第二类医疗器械定制式增材制造膝关节矫形器获批上市，标志着CFDA认证的增材制造医疗器械正从标准化走向个性化。在消费领域，先临三维科技股份有限公司量产3D打印鞋的数量已超过一万双，显示了3D打印技术在制鞋行业中的应用前景。

3 问题与挑战

从总体研究和产业发展来看，与大多数“一带一路”新兴国家相比，我国增材制造技术处于绝对领先地位，但与欧洲、美国、日本等发达地区和国家相比，我国在基础理论、关键工艺技术以及高端装备等方面仍存在较大的差距。在高端增材制造装备商业化销售市场，美国和德国还占据着绝对优势；我国高端增材制造装备的核心元器件和商用软件还依赖进口；系统级创新设计引领的规模化工业应用还主要在美欧国家。欧美日等发达地区和国家借助资金、人才、技术和市场的优势，在增材制造与激光制造基础理论、核心器件、工艺和装备、产业应用等方面均处于领跑水平。我国增材制造研究及产业发展面临的问题和挑战主要包括以下几个方面。

3.1 原始创新和变革性技术不足

近些年增材制造具有变革性的技术均来源于国外，一些显著影响增材制造全局的重大技术进步都来自于美欧国家，如德国的电子束高效增材制造装备、MIT和惠普的金属粉末床黏结剂喷射打印技术、空客公司的增材制造专用铝合金Scalmalloy等。国内相关技术仍然处于跟跑位置，原始创新

能力有待加强和引导。

3.2 自主创新和标准的体系尚待完善

从技术创新层面看，知识产权和专利技术一直是各国抢占战略制高点的主要战场。目前以欧、美、日等发达国家和地区构建的专业技术壁垒对我国企业在增材制造和激光制造领域的布局和研究产生了较大程度的冲击。为打破国外技术壁垒和封锁，拥有一套核心自主知识产权体系是我国发展增材制造产业的重中之重。标准层面来看，技术标准研究往往引领产业发展，如何推行完善的行业准则，使增材制造和激光制造的产品符合商业化的应用是我国增材制造和激光制造标准化发展的瓶颈。因此，建立完善的专用材料、工艺和设备，以及产品的检测和评价规范与标准也是未来所面临的挑战之一。

3.3 增材制造形性主动控制难度大

控形与控性是增材制造工艺的两个重要考察指标。但是，增材制造过程中材料往往存在强烈的物理、化学变化以及复杂的物理冶金过程，同时伴随着复杂的形变过程，以上过程影响因素众多，涉及材料、结构设计、工艺过程、后处理等诸多因素，这也使得增材制造过程的材料—工艺—组织—性能关系往往难以准确把握，形性的主动、有效调控较难实现。因此，基于人工智能技术，发展形性可控的智能化增材制造技术和装备、构建完备的工艺质量体系是未来增材制造面临的挑战之一。

3.4 生物增材制造器官功能化困难

生物制造是未来的重点发展方向。现有生物墨水体系仿生度低、可打印性差、种类少，打印工艺稳定性及效率低、与生物墨水匹配性差，打印

组织结构存在营养物质输送局限，因而无法实现真正功能化。未来需要攻关的关键核心技术包括：高精度微观仿生设计及单细胞微纳跨尺度建模与组装；多尺度、多组织的生物3D打印高效调控技术；血管自组装与网络建立；保证打印大体积组织的维持、存活的生物反应器的制造。随着生物医用材料从“非活体”修复到“活体”修复的趋势转变，生物制造面临的战略性前瞻性重大科学问题包括：如何实现生物医用材料的活性化、功能化构建，甚至构建功能性组织器官，满足组织器官短缺、个性化新药研发等重大需求。

4 方向发展

过去五年，增材制造实现了爆发式发展，从一个个的研究点发展为一个热点的科学技术领域。目前增材制造研究覆盖了增材制造新原理、新方法、控形控性原理与方法、材料设计、结构优化设计、装备质量与效能提升、质量检测与标准、复合增材制造等全系统，成为较为完整的学科方向。我国增材制造的发展要基于科学基础的研究，面向国家战略性产品和战略性领域的重大需求，瞄准世界先进制造技术与产业发展的制高点，抓住我国“换道超车”的历史性发展机遇，从而为我国2035年成为世界制造强国的重大战略目标提供支撑。为此，要以增材制造的多学科融合为核心，通过多制造技术融合、多制造功能融合，向制造的智能化、极端化和高性能化发展，必须通过自主创新重点掌握如下制造技术与装备。

4.1 加强基础科学问题研究

由于增材制造技术的发展历史较

短,随着技术的发展,很多传统的机理研究理论无法应用于增材制造的物理环境和成形机制。从基础科学入手加强增材制造新问题的研究是首先需要面对的科研方向。在近期内需要解决的科学问题主要有:

(1) 金属成形中的强非平衡态凝固学。由于增材制造过程中的材料与能量源交互作用时间极短,瞬间实现熔化—凝固的循环过程,尤其是对于金属材料来说,这样的强非平衡态凝固学机理是传统平衡凝固学理论无法完全解释的,因此建立强非平衡态下的金属凝固学理论是增材制造领域需要解决的一个重要的科学问题。

(2) 极端条件下增材制造新机理。随着人类越来越迫切的探索外太空的需求,增材制造技术被更多地应用于太空探索领域,人们甚至希望直接在外太空实现原位增材制造,这种情况及类似极端条件下的增材制造机理以及增材制造制件在这种服役环境下的寿命和失效机理的研究将是相关研究人员关注的问题。

(3) 梯度材料、结构的增材制造机理。增材制造是结构功能一体化实现的制造技术,甚至可以实现在同一构件中材料组成梯度连续变化、多种结构有机结合,实现这样的设计对材料力学和结构力学提出了挑战。

(4) 组织器官个性化制造及功能再生原理。具有生命活力的活体及器官个性化打印是增材制造在生物医疗领域中最重要应用之一,但无论是制造过程的生命体活力的保持,还是在使用过程中器官功能再创机理的研究,都还处于初期阶段,需要多个学科和领域的专家学者共同努力。

4.2 解决形性可控的智能化技术与装备

增材制造过程是涉及材料、结构、多种物理场和化学场的多因素、多层次和跨尺度耦合的极端复杂系统,在此条件下,“完全按照设计要求实现一致的、可重复的产品精度和性能”以及“使以往不能制造的全新结构和功能器件变为可能”是增材制造发展的核心目标。结合大数据和人工智能技术来研究这一极端复杂系统,在增材制造的多功能集成优化设计原理和方法上实现突破,发展形性主动可控的智能化增材制造技术,将为增材制造技术的材料、工艺、结构设计、产品质量和服役效能的跨越式提升奠定充分的科学和技术基础。在此基础上,发展具有自采集、自建模、自诊断、自学习、自决策的智能化增材制造装备也是未来增材制造技术实现大规模应用的重要基础。同时,重视与材料、软件、人工智能、生命与医学的学科交叉研究,开展重大技术原始创新研究,注重在航空航天航海、核电等新能源、医疗、建筑、文化创意等领域拓展增材制造技术的应用,是我国增材制造技术可望引领世界的关键之所在。形性主动可控的智能化增材制造技术和装备的发展将有望带动未来增材制造技术的前沿发展,从而提升增材制造技术应用的可靠性,创造出颠覆性新结构和新功能器件,更好地支撑国家及国防制造能力的提升。

4.3 突破制造过程跨尺度建模仿真及材料物性变化的时空调控技术

增材制造过程中材料的物性变化、形态演化以及组织转化极大地影响了成形的质量和性能,是增材制造实现从“结构”可控成形到“功能”可控形成的基础和关键核心。开展增材

制造熔池强非平衡态凝固动力学理论研究、“制造过程的纳观—微观—宏观跨尺度建模仿真”技术研究,以及“微米—微秒介观时空尺度上材料物性变化的时空调控”研究,是提高我国增材制造领域竞争力、突破技术瓶颈的重要基础。

以功能需求为导向,主要研究针对高分子、陶瓷等有机/无机非金属材料,甚至细胞、因子、蛋白等生物活性材料的增材制造工艺,进行兼具成形性能和功能要求的制造过程纳观—微观—宏观跨尺度建模仿真,以及微米—微秒介观时空尺度上的原位和透视观测技术与装置的研究与开发,建立相应的多尺度、多场计算模拟模型,在高时空分辨率下,研究和揭示非金属、生物材料、细胞等在挤出、喷射、光固化等典型增材制造过程中的物性变化、形态演化、组织转化甚至细胞的基因转入等细节过程及其影响因素,掌握工艺现象的本质原理和成形缺陷的形成机制,为改进和提高现有工艺水平、提升制件质量、突破技术瓶颈奠定理论基础。在此基础之上,与人工智能、大数据和深度学习等技术结合,突破先进智能材料、柔性材料、响应性材料、生物活性墨水的增材制造关键技术工艺,研究打印过程中以及打印后材料物性变化规律和调控规律。

4.4 注重发展未来颠覆性技术

太空打印、生物打印(生物增材制造)是增材制造两个具有颠覆性引领性质的重大研究方向,它们既关系到我们的空天科技及生命科学前沿,又直接关系到我们的国防安全及健康生活。

太空打印可以以小设备制造大装
(下转09页)

纤维增强树脂基复合材料 增材制造技术与装备研究

单忠德, 范聪泽, 孙启利, 战 丽

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

摘 要: 在综述纤维增强树脂基复合材料增材制造技术的国内外研究现状基础上, 分析了短纤维、长纤维、连续纤维增强树脂基复合材料的成形方法、工艺及性能。针对高性能的连续纤维增强树脂基复合材料的增材制造成形, 研究了连续纤维增材制造成形机理及工艺, 揭示了其成形性能的影响规律。指出了纤维增强树脂基复合材料增材制造技术与装备的未来发展趋势: 亟需开展纤维增强复合材料的增材制造成形机理、成形工艺及装备研究, 更好地推进纤维增强树脂基复合材料的广泛应用。

关键词: 纤维增强; 连续纤维复合材料; 热塑性树脂; 增材制造

1 引言

纤维增强树脂基复合材料由短切的或连续的纤维及其织物增强热固性或热塑性树脂基体, 采用一定的成形工艺复合而成, 已广泛应用于航空航天、汽车制造等领域, 具有高比强度和比模量、抗疲劳、耐腐蚀、可设计性强、便于大面积整体成形以及特殊电磁性能等特点。树脂基复合材料种类繁多, 它通过基体和纤维间界面的应力传递, 为成形件提供更高的硬度、强度和热稳定性等力学性能。纤维增强复合材料在航空航天领域的大量应用不但减轻了结构重量, 而且通过结构和功能的一体化设计可提高装备的性能和质量。

增材制造技术是一种材料逐层累加的“自下而上”的自动化、数字化成形制造技术, 具有材料利用率高、结构设计制造一体化、无需模具等优点,

可以实现材料制备与构件成形制造一体化, 为单件小批量复杂零件和模具的快速制造提供了数字化解决方案。纤维增强树脂基复合材料增材制造技术是当前国内外研究的热点之一。为解决传统纤维增强复合材料成形中存在的问题以及满足航空航天、汽车、轨道交通等领域发展的急需, 国内外开展了高性能的连续纤维增强树脂基复合材料工艺及装备研究, 以更好地满足复杂零件结构的轻量化、精确成形、短周期和高质量制造需求。

2 纤维增强复合材料增材制造技术国内外发展情况

纤维增强复合材料增材制造技术发展了不同的工艺方法, 主要包括三维打印黏结成形、熔融沉积成形等, 复合材料增强体包含短纤维、纳米纤维、长纤维、连续纤维等。不同方法在成形复合材料中具有自身的优点和局

限性, 成形件的力学性能也不同。针对不同的产品及其性能要求, 根据成形材料、成形速度和成形精度等要求选择合适的增材制造方法, 以制造出满足性能要求的复合材料结构件。

3 连续纤维增强复合材料增材制造成形技术研究

为解决纤维浸渍效果差的问题, 实现高性能连续纤维复合材料增材制造, 机械科学研究总院开展了复合材料丝材成形材料、成形工艺及复合材料丝材成形设备研究, 开展了连续纤维增强复合材料的增材制造成形工艺及装备研究, 开发出了连续纤维增强复合材料增材制造成形机, 并对成形工艺参数进行了优化研究。

3.1 连续纤维增材制造用丝材成形工艺

在连续纤维丝材成形过程中, 熔融的热塑性树脂从螺杆推进面开始, 向拖曳面逐步蔓延, 直至流道内熔体

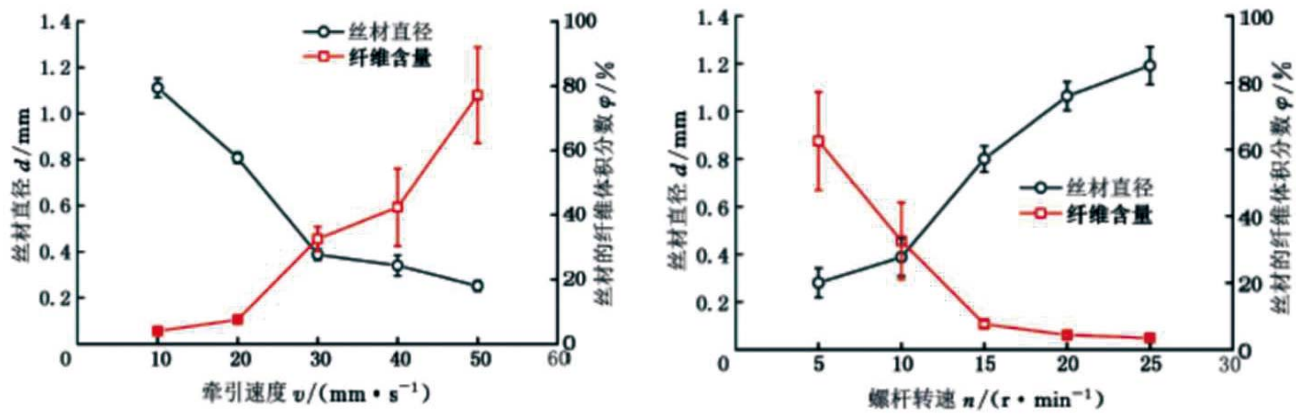


图1 螺杆转速和牵引速度对成形复合丝材直径和纤维含量的影响

分数达到稳定最大值，进而可保证机头（纤维和树脂混合浸渍位置）处熔体压力和流速的稳定。图1所示为螺杆转速和牵引速度对成形复合丝材直径和纤维含量的影响关系，复合丝材直径随着螺杆转速的增大而增大，且增大的趋势逐渐趋于平缓，直径随着牵引速度的增大而减小；与之对应，当成形丝材的直径减小（即纤维束表面包裹的树脂量减少）时，纤维含量增加。工艺优化后，螺杆转速区间为5~25r/min，牵引速度区间为10~50mm/s，可通过调整参数来实现丝材型号和纤维含量的精确可控成形。

在复合材料丝材成形过程中，随工艺参数的改变，纤维和树脂的浸渍压力和浸渍时间等关键参数随之变化。模具的结构尺寸不变，当纤维在树脂内部停留的时间缩短或浸渍压力较小时，由于树脂的黏度高，使得树脂渗透进入纤维束的过程较为缓慢，故纤维中的空隙来不及被树脂置换，图2所示为不同浸渍程度的连续纤维复合材料丝材。

3.2 连续纤维增强复合材料增材制造成形工艺

热塑性树脂熔融温度高、黏度大，对连续纤维材料的浸润性差，从

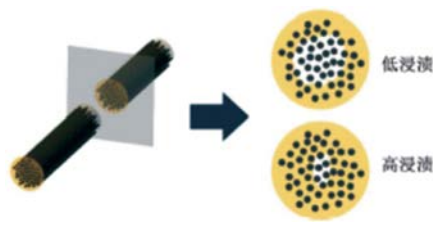


图2 不同浸渍程度的连续纤维复合材料丝材

而导致纤维和树脂浸渍程度低，界面结合性能差。为提高连续纤维复合材料制件的力学性能，使外载荷通过基体传递到增强体纤维，本文研究了增材制造过程中温度、压力、速度等参数对复合材料构件成形性能的影响规律。不同的界面结合性能将导致不同的断裂方式，且裂纹的增长也将影响复合材料的机械性能，图3所示为拉伸测试过程中界面结合性能对断裂模式的影响关系。当树脂对纤维的浸渍程度高时，拉伸过程中纤维和树脂的脱粘现象不明显，测试件可吸收断裂

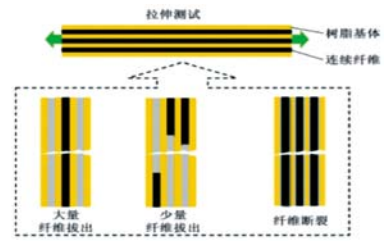


图3 拉伸测试过程中界面结合性能对断裂模式的影响

能并防止裂纹扩展，从而具有优异的力学性能。当浸渍程度低且界面结合性能较弱时，拉伸过程中大量纤维被拔出，无法起到承载和增强作用，这使得裂纹迅速扩展并导致材料断裂。

成形喷嘴的温度是增材制造的关键参数之一，对纤维和基体的融合浸渍有重要影响，进而影响成形件的道与道之间和相邻两层之间的结合性能。如图4所示，成形件的拉伸强度和弯曲强度随温度从180℃升高至220℃而不断增大，拉伸强度从188MPa 增大至225MPa，提高了约20%，弯曲强

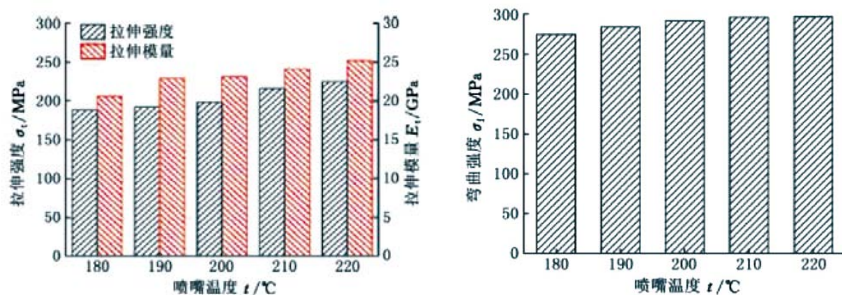


图4 喷嘴的温度对成形件的拉伸性能和弯曲性能的影响