DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2010.21.001

难加工材料激光快速成形的研究现状与展望

Reviews and Prospect for Laser Rapid Prototyping of Intractable Materials

南京航空航天大学　黄因慧　田宗军　高雪松　刘志东　赵剑峰　沈理达

黄因慧

南京航空航天大学机电学院教授，博士生导师。长期从事特种加工技术、激光快速成形、复合材料加工、纳米涂层技术等学科的教学和研究工作。先后主持和参加国家自然科学基金重点项目、面上项目、国防预研基金、航空科学基金、江苏省科技支撑计划项目、江苏省自然科学基金重点项目等20余项。获得省部级科技进步奖8项，获国家“有突出贡献的博士学位获得者”称号，享受国家特殊津贴，发表学术论文100 余篇。

激光快速成形技术突破了传统的材料变形成形和去除成形工艺方法的许多限制，基于增材制造的原理，迅速制造出形状复杂的三维实体模型，可直接对难加工材料进行成形。

难加工材料一直是机械加工领域的重点研究对象。科学地说，以材料的切削性能作为衡量标准，硬度>HB250、强度 σ >1000MPa、伸长率>80%、冲击值 α >0.98MJ/m^2、导热系数 k<41.8 的材料统称为难加工材料[1]。例如，钛合金由于导热系数低，切削时温度较高，刀具容易产生粘结磨损、氧化磨损；镍基高温合金硬度高，容易产生崩刃现象；而金属基复合材料、陶瓷材料由于脆性大更是很难进行加工。激光快速成形技术突破了传统的材料变形成形和去除成形工艺方法的许多限制，基于增材制造的原理，迅速制造出形状复杂的三维实体模型，可直接对难加工材料进行成形[2]。

本文主要针对激光快速成形技术在难加工材料领域的应用状况进行综述，探讨如何能使激光快速成形技术在机械加工领域占有更重要的地位。

金属材料

随着科学技术的不断发展，航空航天、工程机械设备及其构件工作条件日益苛刻，要求材料必须具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损、抗疲劳及耐冲蚀等特性，单纯的金属材料已不能满足要求。一些耐腐蚀、耐热的合金逐步出现，由于其自身的加工性能受到了影响，激光快速成形技术在该领域迅速得到应用。目前，难加工金属材料快速成形主要应用在航空航天结构件方向，如 316 不锈钢是航空发动机的主轴材料，钛合金为进气扇、压气叶片材料，而镍基高温合金为燃烧室和叶片的主要材料。它们都存在着利用常规方法难以加工的问题，尤其是叶片等薄壁材料，用常规切削方法

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

很难成形。

在国外，美国Texas大学Austin分校成功地制造了用于F-14战斗机和AIM-9导弹的INCONEL625超合金和Ti-6Al-4V合金的金属零件[3]。德国的汉诺威激光中心已对钴基（stellite6）和镍基合金（Incone1625）进行研究。德国EOS公司用直接金属激光烧结法制成了新的钴铬超合金零件[4]。钴铬合金零件的主要优点是强度高、耐高温侵蚀。美国Sandia实验室[5]对激光净成形技术进行了研究，所使用的材料包括镍基高温合金、钛合金、钨等。与传统工艺制造相比，在没有损失塑性的情况下，采用激光净成形工艺制造的近形金属件的强度显著提高。通过调整工艺参数，成形件的最小特征尺寸可达0.76 mm，制造的近形件与CAD模型的设计公差仅为0.002~0.015。其生产的Ti26Al24V零件相对密度达99.996%，伸长率和强度与传统方法相比均有很大提高。

在国内，沈以赴等[6-8]采用直接金属激光烧结的方法，对316不锈钢粉末进行了一系列烧结试验。结果表明激光与不锈钢粉末直接作用很容易产生球化现象，影响成形质量；而适当提高扫描速度或减小激光功率可以在一定程度上减小316不锈钢粉末激光烧结的球化效应，从而制备性能较高的不锈钢制件。

陈静等[9-10]对TC4钛合金的激光快速成形工艺进行了较为系统的研究。研究表明，激光快速成形TC4钛合金的工艺条件较为苛刻，主要体现在对粉末颗粒的尺寸范围要求较为苛刻，需要较高的激光功率密度，成形过程中熔覆组织易于被保护气中的O、N、H等杂质元素污染。但是，钛合金在成形过程中也有自己的独特优势。在成形过程中不易开裂，因而大尺寸、复杂形状零件的激光快速成形较易实现。同时，该实验室还针对氢化脱氢钛合金粉末氧含量较高的问题，研究了添加稀土钕对激光快速成形TC4合金组织的影响，使成形件抗拉强度达975 MPa，延伸率9.5%，满足锻件标准要求。王华明等[11]成功研究了国内首套用于制备钛合金高活性金属零件的动态密封、惰性气氛保护激光快速成形成套工艺装备，突破了钛合金复杂结构件激光快速成形的关键技术，成为国内首家、国际上少数几家全面掌握钛合金零件激光快速成形技术的研究单位之一。图1为其激光快速成形制TA15钛合金飞机结构件的过程及产品[12]。其主持完成的钛合金激光快速成型项目分别在飞机钛合金次承力结构件和飞机钛合金大型整体主承力结构件上得到了应用，并获得了国防科技进步一等奖。

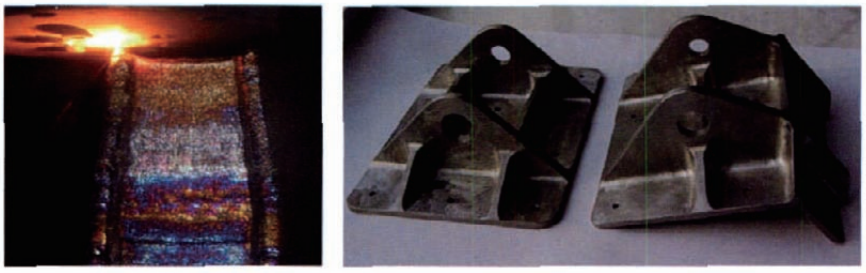
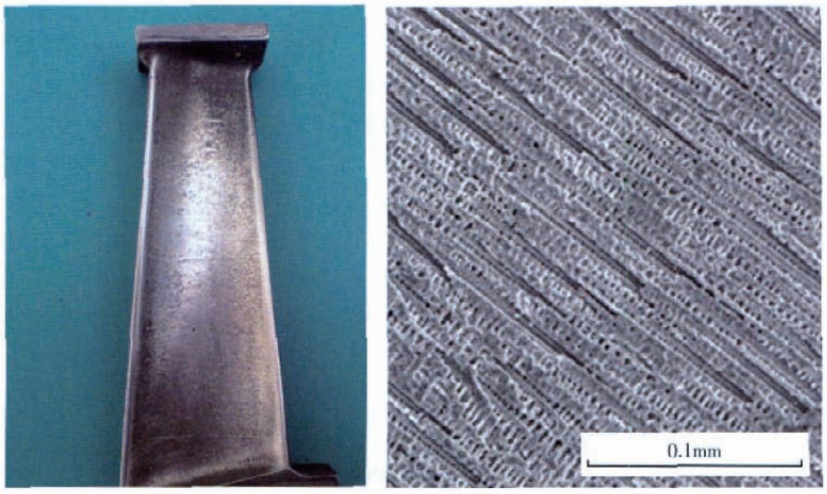


图1 激光快速成形钛合金飞机结构件的过程及产品

席明哲等[13]利用激光快速成形技术制备了致密、无裂纹的316L不锈钢/镍基合金/Ti6Al4V梯度薄壁件。结果表明，梯度薄壁件组织致密，未观察到孔洞、裂纹等缺陷，各相组织之间相容性良好。

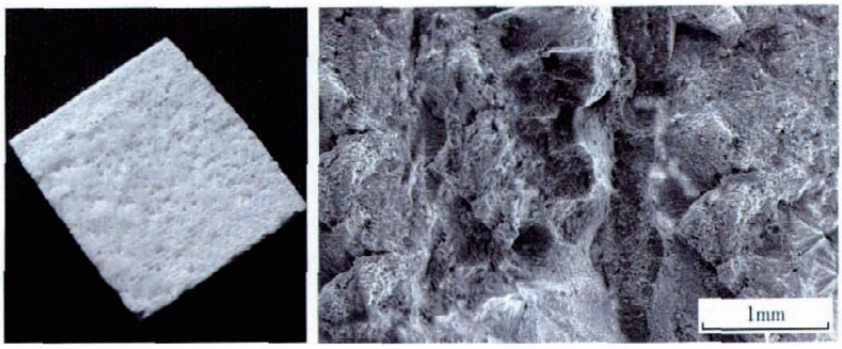
本课题组是国内较早展开激光直接烧结制备镍基高温合金结构件的单位之一[14-16]。针对难加工的FGH95镍基高温合金做了系统性的烧结试验，分析了烧结成形过程中缺陷（如孔洞、裂纹、球化现象等）产生的原因及防止措施，并对烧结参数（如功率、扫描速度、扫描路径）对烧结性能的影响做了详细的分析。图2（a）是本课题组利用选区激光烧结技术结合后处理技术制备的飞机发动机叶片，从图中可以看出成形质量较好。图2（b）为该发动机叶片的显微形貌图，从图中可以看出，激光烧结过程中液相保持了良好的流动性，充分润湿了粉体及其界面间隙，形成了致密的烧结实体，由于其快速熔融和凝固的特点，形成较大温



（a）试样照片　　（b）显微组织

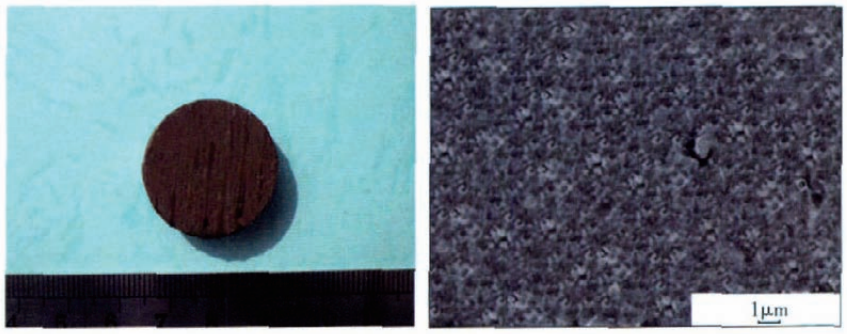
图2 利用选区激光烧结技术结合后处理技术制备的飞机发动机叶片

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 陶瓷试样　　(b) 断口形貌

图3　激光直接烧结的纳米Al_2O_3陶瓷块体



(a) 陶瓷试样　　(b) 显微形貌

图4　利用冷等静压激光烧结复合技术制备的Al_2O_3-TiO_2陶瓷块体

度梯度，有利于枝晶的形成及生长，并且枝晶沿着激光扫描方向生长，呈现很好的生长取向。该合金块体的抗拉强度达到700MPa以上，高温冲击韧性可达101.82J/cm^2。

激光快速成形技术可以克服难加工金属材料常规加工问题，实现薄壁及复杂形状的直接成形，具有很鲜明的特色。但该技术也存在一定的局限性，如其成形不够致密、存在内应力，这些都是有待解决的问题。

陶瓷材料

陶瓷材料具有高强度、高硬度、耐高温、耐腐蚀等优异特性，在各个领域都有着广泛的应用。但由于陶瓷材料硬而脆的特点使其加工成形尤其困难。在激光直接快速烧结时液相表面张力大，在快速凝固过程中会产生较大的热应力，从而形成较多微裂纹。目前，陶瓷直接快速成形工艺尚未成熟，国内外正处于研究阶段，还没有实现商品化。现有陶瓷快速成形原理是在陶瓷中添加一定的粘结剂，利用激光与粘结剂的液相烧结作用而使陶瓷相成形，再进行后处理加工。

Austin大学于20世纪90年代提出用选择性激光烧结法快速制造陶瓷零件，并得到迅速推广。Bertrand等[17]研究了不同种类的ZrO_2-Y_2O_3陶瓷选区激光烧结工艺。研究表明，颗粒的表面形貌及原始尺寸对陶瓷材料的烧结性能非常重要，陶瓷颗粒尺寸越小，表面越接近圆球形，陶瓷层的烧结质量越好；同时激光参数对陶瓷材料的最终成形影响也非常大，其中粉末分层、激光扫描方式、温度场控制都是影响最终成形的重要因素。Gtiffin等[18]烧结成形的Al_2O_3陶瓷部件，坯体密度可达53%～65%的理论密度。Li L[19]利用SHS（自蔓延高温合成）和SLS合成了TiC_2/Al_2O_3 复合材料。史玉升等[20]人研究了选择性激光烧结Al_2O_3/SiO_2复相陶瓷零件。随着SiO_2含量的增加，烧结件的强度和密度也随之提高；当SiO_2（体积分数）达到20%时，成形件经1450℃高温烧结8h抗弯强度达到45MPa，密度为2.35×10^{3}kg/m^3。

本课题组也展开了较多的研究工作[21-23]。图3（a）为激光直接烧结的纳米Al_2O_3陶瓷块体，没有添加粘结剂，由于材料为纳米材料，自然条件下堆积的密度较低，所以在烧结过程中表层很难形成致密的陶瓷体。图3（b）为该块体的端口形貌，从图中可以看出该组织结构仍然致密，表明激光烧结在保证烧结后晶粒尺寸纳米尺度的前提下，有能力获得致密的纳米材料。

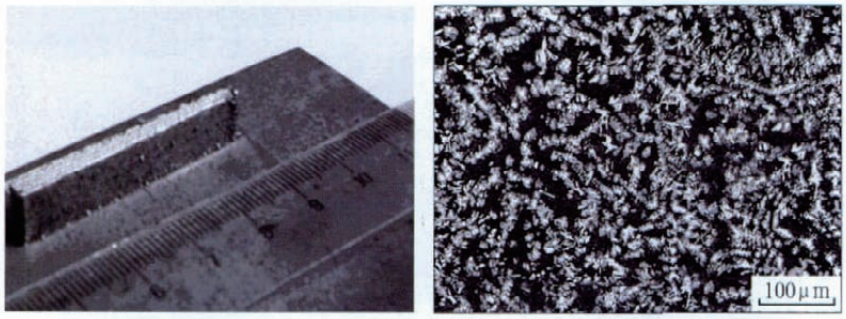
图4（a）为本课题组利用冷等静压激光烧结复合技术制备的Al_2O_3-TiO_2复合陶瓷块体。陶瓷材料选用球形的Al_2O_3-TiO_2纳米团聚体，利用冷等静压使铺粉陶瓷层的致密度达到70%左右，再利用激光进行烧结，得到了成形较好的陶瓷块体。图4（b）为该陶瓷块体的高倍显微形貌图，从图中可知，陶瓷块体的组织结构致密，晶粒结构细小，这种结构极其有利于提高陶瓷的韧性。

陶瓷材料由于具有自身优异的高温性能，一直是代替发动机高温叶片材料的首选，但由于其自身的成形性能差等缺点，限制了其应用。利用激光快速成形技术可以克服陶瓷自身脆性难加工的特点，使其成形。但如何解决陶瓷与激光作用时的烧结性能是陶瓷激光快速成形成功与否的关键。

金属陶瓷复合材料

以陶瓷为增强材料，金属材料为基体材料制成的金属基陶瓷复合材料具有比强度高、比模量高、耐磨损、耐高温等优良性能，具有金属和陶瓷材料的双重特性，是目前航空航天领域最有发展优势的材料。如金属基

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 试样照片　　(b) 显微形貌

图5　利用激光直接烧结技术制备的薄壁件

复合材料装甲已用作美国空军C－130 运输机的防护装甲、第三代航空航天惯性器件材料等。

Vaucher 等[24]对选区激光烧结Al-SiC、Ti/SiC金属基复合材料进行了研究。结果表明，SiC陶瓷块体均匀地分布于金属相中，金属相与陶瓷相边界接触良好，没有因热膨胀系数不同而产生裂纹。Ramesh 等[25]利用激光直接烧结技术制备了Fe/SiC复合材料，并对材料的摩擦磨损性能进行了测试。研究表明，随着SiC含量的增加，材料的摩擦性能明显升高，相对于其他复合材料，Fe/SiC复合材料展现了极其优良的抗摩擦性能。Maeda 等[26]研究了硬质金属的选区激光烧结技术。激光烧结的WC-Co复合材料显微硬度可以达到860HV，而且其硬度随着WC含量的加大会更高。

顾冬冬等[27-28]对选区激光烧结WC-Co颗粒增强Cu材料体系进行了系统的研究。结果表明，粉末激光成形是基于液相烧结机制，其中Cu、Co充当粘结相，WC充当增强相。烧结试样显微硬度平均值$HV_{0.1}$为3898 MPa，且分布平稳。同时研究了稀土氧化物La_2O_3添加量对激光烧结直接成形（WC-Co）颗粒增强Cu基复合材料的影响。添加La_2O_3可细化激光烧结组织，提高增强颗粒分散均匀性以及颗粒／基体界面结合性能，成形致密度高达理论密度的96.3%，显微硬度可达403.1HV。

本课题组也做了一些有益的尝试[29-31]，利用激光直接烧结技术制备如图5(a)所示的薄壁件。从图5(b)中可以看出，该零件的表面烧结质量较好，只有少许毛刺，无需二次加工。该零件的主要成份为镍基合金和WC，从图5（b）中可以明显地看出烧结组织较为致密，无明显的激光烧结裂纹体系及微观孔洞，可以确定混合粉末之间有着良好的润湿性；且增强相WC以微细颗粒及枝晶形态弥散于基体中。试样横截面上的显微硬度平均值为1183.6HV。

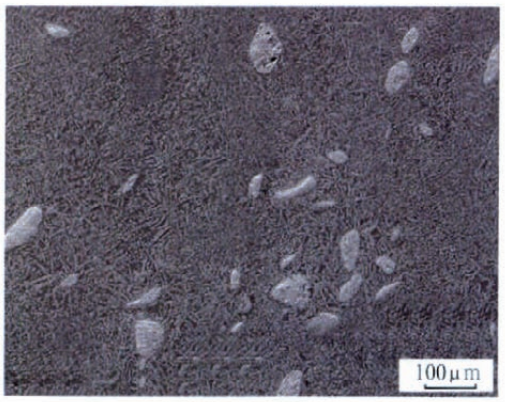


图6 激光烧结纳米SiC增强FGH95复合陶瓷显微形貌

图6为激光烧结纳米SiC增强WC/FGH95镍基高温合金材料的显微形貌图。从图中可以看出，复合材料中的WC以枝晶和颗粒2种形式存在于组织结构中，SiC颗粒以弥撒的形式存在其中，使得材料的摩擦性能明显提升。

该材料属于金属相与陶瓷相共同作用，其特性正好适合于激光快速烧结的特点，即利用金属相的低熔点作为液相从而包围陶瓷相，达到液相烧结的结果，成形性能高，可制备复杂结构件，是激光快速成形技术的重要发展方向。如何解决陶瓷相在金属基体的弥散及陶瓷相与金属基体界面问题是这一方向的主要研究趋势。

结束语

应当指出，由于难加工材料自身物理条件的原因，激光快速成形具有一定的难度，许多工艺（如陶瓷烧结、金属基复合材料烧结成形等）尚处于研究阶段，但其发展前景仍然相当好。难加工材料的成形技术主要有如下几个方面的趋势。

（1）目前，由于难加工材料种类较多，没有统一的标准，很少有专门用于激光快速成形所用的材料，所以研制专门用于激光快速成形的材料成为当务之急。根据以往的研究结果，材料除保持原有的自身特征外，还要尽量保持多尺寸颗粒分布和保持球形形状，以达到最好的烧结效果。

（2）难加工材料由于成形效果较差，所以在进行激光成形过程中质量和精度都难以控制。制备成形的坯体质量和精度常常不能符合要求，因而往往不能直接作为功能部件使用，只能作为原形。因此提高成形质量和精度将使激光快速成形迎来一个新的时期。

（3）研发激光烧结复合工艺，以使各种加工方法之间互相补充。例如，可以将激光烧结方法与高温自蔓延技术相互结合来提高烧结材料的平整性；采用冷等静压技术提前预制压片，进行激光扫描成形，其成形原理近似于LOM技术。

本文共有参考文献31篇，因篇幅所限未能一一列出，读者如有需要请向本刊编辑部索取。

（责编　小颖）

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net