

选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料研究现状及航空航天应用

周岩^{1,2}, 张冬云^{1,2}, 王卫东^{1,2}, 李泠杉^{1,2}

(1. 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124;
2. 北京市数字化医疗 3D 打印工程技术研究中心, 北京 100124)

[摘要] 综合评述了选区激光熔化(SLM)成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料国内外研究现状,分析了选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料的技术难点,介绍了碳化硅颗粒增强铝基复合材料在航空航天领域应用案例及选区激光熔化技术优势,最后对选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料研究进行了展望。

关键词: 选区激光熔化(SLM); 碳化硅颗粒; 铝基复合材料; 航空航天

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.10.068



周岩

硕士研究生,主要从事 SLM 成形铝基复合材料工艺研究与应用分析以及增材制造等行业分析与规划研究工作。

近年来,高性能轻质金属基复合材料在各应用领域的需求变得越来越强烈,碳化硅颗粒增强铝基复合材料作为理想的新型轻质材料,热膨胀

系数可调,同时具有高强度和高刚度以及优异的耐磨损、耐腐蚀、耐高温等性能,是金属基复合材料中研究和发展的重点。特别是在航空航天领域,碳化硅颗粒增强铝基复合材料的设计新思路与制备新技术正得到越来越多领域专家的关注,具有十分重要的研究价值^[1]。

选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术是 20 世纪 80 年代出现的新型金属零件制造技术^[2],融合了计算机图形学、控制技术、激光技术、新材料等多个学科。经过 20 多年的发展,现已成为世界各国竞相发展的热门技术^[3-4]。选区激光熔化技术不同于传统去除成形的加工方法,而是通过“自下而上”材料累加的方式制造零部件,显著缩短了零部件制造周期,增强了产品的竞争优势,该技术在结构复杂、个性化、小批量零部件制造方面优势明显,所

制造零件具有快速凝固组织特征,致密度较高,一般可直接满足使用要求^[5]。

现阶段,基于粉末冶金法、搅拌铸造法、熔体浸渗法和喷射沉积法等^[6-8]传统方法制备的碳化硅颗粒增强铝基复合材料已进入应用阶段。但是,在选区激光熔化技术制备碳化硅颗粒增强铝基复合材料方面研究较少,航空航天领域应用鲜见。本文对选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料国内外研究现状进行综合评述,对航空航天领域碳化硅颗粒增强铝基复合材料应用案例进行总结,分析了相关技术难点和技术优势,展望了应用前景,并提出几点研究建议。

选区激光熔化成形 碳化硅颗粒增强铝基复合材料 国内外研究现状

选区激光熔化技术作为一种新

型金属零部件制造技术,其独特的快速加热和冷却过程有利于复合材料显微组织的细化和机械性能的提高。随着技术的不断进步与发展,选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料的相关研究正得到足够重视并取得了一定成果。从国内外研究情况来看,澳大利亚西澳大学、伊朗沙力夫理工大学、葡萄牙里斯本科技大学以及国内南京航空航天大学等开展了部分研究工作,重点集中在激光加工参数对 SLM 成形试样显微组织及性能的影响、碳化硅颗粒与铝基体之间的界面反应及界面处新生相对材料性能的影响等问题上。

澳大利亚西澳大学 Astfalck 等^[9]使用选区激光熔化技术制备碳化硅颗粒增强铝基复合材料,研究了不同激光能量密度(E_p)对选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料过程中的加工性能、物相及显微组织演变的影响,建立了激光能量密度与物相和微观组织之间的关系,特别对铝基体和碳化硅颗粒之间的界面状态进行了分析。研究认为,在选区激光熔化过程中,铝基体与碳化硅颗粒之间会发生反应: $3SiC+4Al \rightarrow Al_4C_3+3Si$,导致在界面结合处形成 Al_4C_3 针状组织和初级 Si 颗粒。由于 Al_4C_3 属于脆性相,因此需要避免。伊朗沙力夫理工大学 Simchi 等^[10-11]使用激光技术制备碳化硅颗粒增强铝基复合材料,研究发现在激光成形过程中,碳化硅颗粒与铝基体之间发生反应: $4Al+4SiC \rightarrow Al_4SiC_4+3Si$,产生 Al_4SiC_4 新相。葡萄牙里斯本科技大学 Anandkumar 等^[12]利用激光熔覆技术制备 SiC/Al-12Si 涂层时,高温下碳化硅颗粒与液态铝发生剧烈反应也产生了 Al_4SiC_4 相,和 Si 颗粒分散在 $\alpha-Al+Si$ 共晶基体中。研究发现, Al_4SiC_4 相的产生提高了涂层的耐磨性能。对于碳化硅颗粒增强铝基复合材料激光成形过程,当熔池内

温度达到 933K 时,碳化硅颗粒与铝基体之间发生原位反应生成脆性相 Al_4C_3 ,当熔池内达到 1670K 以上时,则会反应生成一种性质非常稳定的陶瓷相 Al_4SiC_4 ^[13-15]。 Al_4SiC_4 具有高熔点、高强度、高化学稳定性以及优异的抗氧化和抗水化性,应用价值较高,通过控制选区激光熔化过程中的激光能量,可有效促进 Al_4SiC_4 相的生成,避免脆性相的产生。

南京航空航天大学顾冬冬课题组在选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料研究方面做了大量工作^[16],该课题组以 SiC 粉末和 AlSi10Mg 粉末为原料,采用选区激光熔化技术成功制备出具有高致密度的多相增强铝基复合材料。研究结果表明,随着激光能量输入的增加,复合材料致密度及显微组织均匀性逐渐提高。但是,过高的激光能量输入将导致增强相边缘处热量累积严重,晶粒粗化,凝固后材料内部较强的热应力造成界面处存在大量收缩孔隙,性能降低。研究还发现,界面处新生陶瓷相 Al_4SiC_4 以片状和颗粒状两种形态存在于铝基体内部,片状 Al_4SiC_4 陶瓷相的生长受所采用激光加工参数的影响,主要依附于碳化硅颗粒表面生长;颗粒状 Al_4SiC_4 陶瓷相结构的生长受激光能量和熔池黏度的影响,在合适的激光加工参数下,熔池内黏度较小,增强相颗粒分布均匀,避免了相互聚集生长,生成的 Al_4SiC_4 颗粒尺寸较小。在 SiC 及 Al_4SiC_4 多种增强相及强化机制的作用下,SLM 成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料显微硬度值显著提高,比 SLM 成形 AlSi10Mg 合金试样提高至少 50%。

众所周知,界面强度是影响复合材料性能的关键因素。然而,碳化硅颗粒与铝基体之间润湿性较差,同时选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料过程包含一系列非平衡物理化学过程,激光诱发界面反应

非常复杂。目前,相关研究尽管都对碳化硅颗粒与铝基体之间的界面反应进行了探讨,通过调整激光加工参数来提高增强相与基体之间的界面结合强度,努力实现成形试样的组织及性能的可控性。但是,在实际制备复合材料过程中,仍然面临着许多技术难点,成形试样仍存在诸如组织不均匀、气孔、裂纹等缺陷,这些缺陷的存在对试样件的致密度、尺寸精度、性能等产生不利影响,需要进一步的深入研究。

选区激光熔化成形 碳化硅颗粒增强铝基复合材料 技术难点分析

在选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料研究中,增强相颗粒强化机理的探讨对于优化技术工艺、分析技术难点、理解复合材料强化机理具有极其重要的意义。一般来说,颗粒增强铝基复合材料的强化机理主要包括细晶强化、位错强化、Orowan 强化和增强颗粒的载荷传递等^[17]。

当碳化硅颗粒粒径小于 $0.1 \mu m$ 时,增强行为可用 Orowan 强化机理来分析^[17]。对于 Orowan 强化,弥散分布于铝基体中的碳化硅颗粒阻碍位错运动,增加基体的变形抗力,提高复合材料的强度,表现为对材料性能的强化。哈尔滨工业大学晏伍博士^[18]在分析颗粒尺寸对 SiCp/Al 复合材料性能影响的研究中指出,随着增强相颗粒尺寸的减小,含量的提高,碳化硅颗粒对位错运动的阻碍能力越大,增强效果越明显。但是,当碳化硅颗粒尺寸较小时,容易出现团聚现象,导致颗粒间距增大,使 Orowan 强化机理作用减弱。对于微米级碳化硅颗粒增强铝基复合材料,细晶强化和位错强化发挥着重要作用^[19]。细晶强化即碳化硅颗粒的引入可以抑制铝原子的扩散,有效细化铝基体晶粒,使得晶界阻碍位错运动

的能力增强,表现出材料抵抗载荷的能力增强,强度得到提高。对于位错强化,根据金属晶体缺陷理论,位错密度的增加有利于提高复合材料的强度。在碳化硅颗粒增强铝基复合材料中,铝基体热膨胀系数远远大于碳化硅颗粒,使得材料内部热应力较大,颗粒周围位错密度增加,材料强度提高。同时,在复合材料受载时,由于铝基体的弹性模量比碳化硅小,应力可以通过界面由铝基体传递到碳化硅颗粒上,使得硅颗粒承受部分载荷并起到约束铝基体变形的作用,材料得到强化。增强颗粒的载荷传递效果受颗粒粒度、形态、含量、分布均匀性等因素影响^[20]。

值得注意的是,碳化硅颗粒增强铝基复合材料表现出较好的性能,并不是某个强化机制单一作用的结果,而是多种机制协同作用的结果。在实际制备的复合材料中,界面、缺陷以及增强相颗粒分布不均匀等局部异常特性会产生急剧变化的结果,也可能同时影响多个强化机制。

目前,对于选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料的技术尚未能取得实质性突破,面临一些技术难点,主要体现在:一方面,铝基材料密度低、激光吸收率低、热导性高及易被氧化等自身特殊的物理性质决定了碳化硅颗粒增强铝基复合材料 SLM 成形的加工难度^[21-23]。选区激光熔化技术成形加工过程中,对粉末的流动性要求很高。由于铝基材料密度低、粉末流动性差,使得铺粉难度大,在基板上很难获得均匀的铺粉效果,对后期成形加工过程产生较大的影响。碳化硅颗粒的加入使得粉末流动性进一步降低,加工难度明显增加,使得成形过程产生严重的球化现象,影响材料加工成形的致密度和表面精度^[24]。铝基材料对激光吸收率很低,碳化硅颗粒的加入虽然能够在一定程度上提高粉体对激光的吸收率,但加入量过多则会导致材

料延伸性能的下降。同时,铝基材料较高的热导率使得吸收的热量快速消耗,熔池温度降低,熔池内黏度增加,不利于碳化硅颗粒的均匀分布和与铝熔体的充分接触。铝基材料易被氧化的特性使得在 SLM 成形过程中,熔池周围易形成氧化膜,降低熔体对基体的润湿性,并且易发生氧化的金属如铝合金成球现象尤其严重,易形成孔洞和裂纹等缺陷。另一方面,铝基体与增强体之间的界面结合状态是影响材料性能的关键因素。在激光选区熔化技术成形加工过程中,熔池内碳化硅颗粒与铝熔体会发生多种反应,反应产物对界面结合及材料性能产生较大影响。同时,由于碳化硅颗粒与铝基体之间的润湿性很差,两者之间具有较大热膨胀系数差异,导致在选区激光熔化成形过程中形成的液相不能均匀铺展,增强颗粒在基体中分散不均匀,同时在随后的凝固过程中产生较大的收缩应力而出现裂纹,这一现象随着增强相碳化硅颗粒体积分数的增加而不断加剧。上述问题需要在研究中一一克服。

碳化硅颗粒增强铝基复合材料在航空航天领域应用分析

碳化硅颗粒增强铝基复合材料作为轻质、高强、多功能复合材料,是目前具有较强竞争力的金属基复合材料之一,在航空航天领域具有广阔应用前景。基于传统方法制备的碳

化硅颗粒增强铝基复合材料已经作为承载结构件、光学及精密仪器构件、电子封装及热控元件等在航空航天领域获得实际应用,取得十分瞩目的成就。但是,基于选区激光熔化技术制备碳化硅颗粒增强铝基复合材料的研究还处在实验室阶段,在该领域的应用还不成熟。随着技术的快速发展必将带动碳化硅颗粒增强铝基复合材料在航空航天领域应用范围的进一步拓展和深化,未来发展潜力巨大。

1 低体积分数碳化硅颗粒增强铝基复合材料应用于结构件

作为结构材料,低体积分数(15%~20%)的结构级碳化硅颗粒增强铝基复合材料因其具有强度高、刚度高和耐磨等优异物理性能,作为承载结构件在航空航天领域应用广泛^[25-26]。早在 20 世纪 80 年代,利用碳化硅颗粒增强铝基复合材料制备的电子设备支架作为非主承载结构件成功应用于飞机。后来,经过技术的不断发展与进步,作为主承载结构件在飞机上的应用逐渐成熟。

美国 DWA 复合材料公司与洛克希德·马丁空间系统公司及空军在国防部科技项目支持下展开一系列合作,利用粉末冶金法制备 17.5%SiC_p/6092Al 复合材料,最终作为腹鳍(图 1)在 F-16 战斗机上获得应用,与 2214 铝合金蒙皮原始材料相比,刚度提高 50%,寿命提高 4 倍^[25]。

欧洲直升机公司(Eurocopter

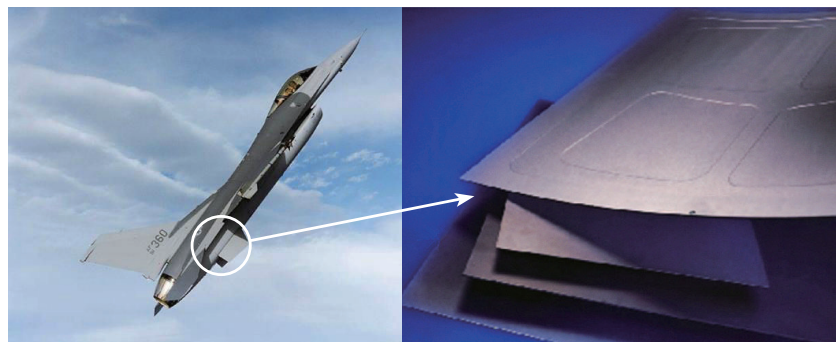


图1 F-16战斗机腹鳍
Fig.1 F-16 fighter fins

SA)将 15%SiC_p/2009Al 复合材料锻件成功应用于 EC-120 直升机旋翼连接件和 NH90 的动环与不动环,使得构件疲劳强度比铝合金提高 50%~70%,弹性模量提高 40%,构件重量与钛合金相比实现大幅降低,实现铝基复合材料首次在航空一级运动零件上的应用^[25]。

美国普拉特·惠特尼集团公司将生产的碳化硅颗粒增强变形铝基复合材料作为发动机(图 2)风扇出口导流叶片用于波音 777 上。应用结果显示,在耐冲击性能上,铝基复合材料要优于树脂基复合材料,抗冲蚀能力远远高于树脂基复合材料,并使成本下降 30% 以上^[26]。

2 中体积分数碳化硅颗粒增强铝基复合材料应用于光学及精密仪器构件

作为光学及精密仪器构件,中体积分数(35%~45%)的光学/仪表级碳化硅颗粒增强铝基复合材料比刚度高,热膨胀系数与铍材及钢材相当,尺寸稳定性高,功能化特性突出。

在作为光学级材料应用方面,ACMC 公司与亚利桑那大学合作利用碳化硅颗粒增强铝基复合材料制备超轻空间望远镜的主反射镜和次反射镜。铝基复合材料主镜和次镜的反射面带有经抛光的化学镀镍层,镍反射层与铝基复合材料基材结合良好、膨胀匹配。在 230~340K 之间

进行 320 次热循环后,镍反射层仍能保持 1/10 可见光波长的平面度。由于结构的改进,铝基复合材料反射镜比传统玻璃类反射镜轻 50% 以上^[27]。

在作为仪表级材料应用方面,DWA 复合材料公司生产的 25%SiC_p/6061Al 复合材料仪表支架已用于承载 Lockheed 飞机上的电子设备^[28]。美国海军飞行动力实验室研制成中体积分数碳化硅颗粒增强铝基复合材料薄板应用于新型舰载战斗机壳体材料的制备。同时,美国在 F-22 “猛禽”自动驾驶仪上采用中体积分数的碳化硅颗粒增强铝基复合材料,减重 70% 以上^[27]。在 ALE-50 型军机诱饵吊舱、摩托罗拉铱星及“探路者”和“卡西尼”等深空探测器上则装备有中体积分数 SiC_p/6061Al 复合材料电子构件。

3 高体积分数碳化硅颗粒增强铝基复合材料应用于电子封装及热控元件

作为电子封装及热控元件,高体积分数(60%~70%)的电子级碳化硅颗粒增强铝基复合材料具有低膨胀、高导热、轻质等优异性能。20 世纪 90 年代末,作为轻质电子封装及热控元件在先进航空航天器上成功应用。其中,在实际应用中,碳化硅颗粒铝基电子封装复合材料的制备多采用无压浸渗法。

在 F-22 “猛禽”战斗机关键电

子系统上,碳化硅颗粒铝基电子封装复合材料替代包铜的钼及包铜的殷钢作为印刷电路板板芯,减重 70%。用于 F-22 战斗机电子元器件基座及外壳等热控结构,有效降低了电子模块的工作温度,减少了冷却需要。此外,F-18 “大黄蜂”战斗机、EA-6B “徘徊者”预警机、欧洲“台风”战斗机、ALE-50 型诱饵吊舱等航空器以及摩托罗拉铱星、火星“探路者”和“卡西尼”深空探测器等航天器均有相关应用。高体积分数碳化硅颗粒/铝基电子封装复合材料在航空航天电子元器件上的应用效果显著,潜力巨大,将带来显著的军事效益、可观的经济效益和社会效益。

4 选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料优势及应用前景分析

碳化硅颗粒增强铝基复合材料是由碳化硅颗粒与铝基材料复合而成,目前在实际应用中较为成熟的传统制备方法重复性差、工艺复杂、成本较高、生产能力参差不齐且复杂零件的生产比较困难^[30]。其加工过程需要昂贵的模具,对于个性化定制生产适用性不高,同时难以保证复杂结构零件的加工成形,在一定程度上限制了碳化硅颗粒增强铝基复合材料的发展。与传统制造方法相比,选区激光熔化技术的突出优势在于^[31-33]:(1)一体化成形复合材料零件,生产周期短;(2)成形过程中金属粉末完全熔化,得到冶金结合的高致密实体;(3)选区激光熔化成形过程具有很大的柔性,能够实现悬空、复杂内腔和型面等复杂构件的整体制造;(4)不同于传统去除成形的加工方法,它是通过“自下而上”材料累加的方式制造零部件,最大程度减少了材料的浪费。这成为航空航天领域中复杂薄壁精密构件高精度、高性能、高柔性、快速反应的理想制造方法。特别的,选区激光熔化技术作为一种新型激光快速成形技术,制备



图2 应用于波音777飞机的PW4000-112发动机
Fig.2 PW4000-112 engine applied to Boeing 777 aircraft

过程中温度梯度大,冷却凝固速度快,这一特点有利于复合材料显微组织的细化和弹性模量、强度等力学性能的提高。

选区激光熔化技术为航空航天领域的应用提供了一种革命性的制造方法,为相关复杂结构设计提供了全新的思路。从选区激光熔化技术发展趋势上看,未来将向成形大尺寸、制造高效率方向发展,除在钛合金、高温合金材料、工具钢等材料进行研究应用外,还将向陶瓷颗粒增强金属基复合材料、高熔点合金及陶瓷等材料延伸。选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料将是未来发展的一个重要趋势,有望变革复合材料传统制造方法,在航空航天领域应用空间巨大。

结论

通过多年的发展,我国在碳化硅颗粒增强铝基复合材料的研究水平上已有了大幅度的提高。基于传统制造方法,在材料显微组织、界面研究以及制备等方面已取得较多研究成果,利用碳化硅颗粒增强铝基复合材料制备的相关构件也已应用在航空航天领域。但是基于选区激光熔化技术制备碳化硅颗粒增强铝基复合材料方面的研究还相对较少,相关工艺及应用尚不成熟。为了进一步提高选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料的工艺水平,拓宽应用范围,建议应从4个方面着力:

(1)在SLM加工工艺、材料微观组织、力学性能及数值模拟等方面开展基础性研究,针对目前的技术瓶颈提出相关解决方案,实现选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料研究的突破性进展。

(2)颗粒强化机制研究对于复合材料的设计及性能预测具有极其重要的意义,在选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料强化机

制方面开展相关研究,有助于探明复合材料宏观力学性能与微观组织间的关系,揭示有关物理本质。

(3)在碳化硅颗粒分布均匀性及铝基体粉末流动性方面开展研究,研究如何使增强相颗粒均匀分布于铝基体的同时不破坏铝基体的球形度,努力提高选区激光熔化成形过程中的铺粉均匀性。

(4)在碳化硅颗粒与铝基体界面结合等方面开展研究,避免碳化硅颗粒与铝合金熔体发生不良化学反应生成不稳定化合物,保证在激光加工过程中碳化硅颗粒增强相与基体之间良好的润湿性能和避免因热物性差异过大而导致在凝固过程中的开裂情况。

随着选区激光熔化技术的不断发展及该领域研究的不断深入,选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料研究终将取得突破性进展,其基础理论及制备技术会有重大突破并在航空航天领域进入实际生产应用阶段。

参考文献

[1] KAVSHIK Y, SUMANKANT, JAWALKAR C S, et al. Fabrication of aluminium metal matrix composites with particulate reinforcement: a review[J]. *Materials Today Proceedings*, 2017, 4(2): 2927-2936.

[2] 李怀学, 巩水利, 孙帆, 等. 金属零件激光增材制造技术的发展及应用[J]. *航空制造技术*, 2012, 55(20): 26-31.

LI Huaixue, GONG Shuili, SUN Fan, et al. Development and application of laser additive manufacturing for metal component[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 55(20): 26-31.

[3] 刘业胜, 韩品连, 胡寿丰, 等. 金属材料激光增材制造技术及在航空发动机上的应用[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(10): 62-67.

LIU Yesheng, HAN Pinlian, HU Shoufeng, et al. Development of laser additive manufacturing with metallic materials and its application in aviation engines[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(10): 62-67.

[4] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. *航空学报*,

2014, 35(10): 2690-2698.

WANG Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2690-2698.

[5] KUNZE K, ETTER T, GRÄSSLIN J, et al. Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN738LC alloy processed by selective laser melting (SLM)[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 620: 213-222.

[6] KUMAR K K A, VISWANATH A, RAJAN T P D, et al. Physical, mechanical, and tribological attributes of stir-cast AZ91/SiC_p composite[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 27(2): 295-305.

[7] SHANKAR M C G, JAYASHREE P K, SHETTYA R, et al. Individual and combined effect of reinforcements on stir cast aluminium metal matrix composites—A review[J]. *International Journal of Current Engineering & Technology*, 2013, 3(3): 922-934.

[8] 孔亚茹, 郭强, 张获. 颗粒增强铝基复合材料界面性能的研究[J]. *材料导报*, 2015, 29(9): 34-43.

KONG Yaru, GUO Qiang, ZHANG Di. Review on interfacial properties of particle-reinforced aluminum matrix composites[J]. *Materials Review*, 2015, 29(9): 34-43.

[9] ASTFALCK L C, KELLY G K, LI X P, et al. On the breakdown of SiC during the selective laser melting of aluminum matrix composites[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2017, 19(8): [2017-05-11]. <http://doi.org/10.1002/adem.201600835>.

[10] SIMCHI A, GODLINSKI D. Densification and microstructural evolution during laser sintering of A356/SiC composite powders[J]. *Journal of materials science*, 2011, 46(5): 1446-1454.

[11] SIMCHI A, GODLINSKI D. Effect of SiC particles on the laser sintering of Al-7Si-0.3Mg alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59(2): 199-202.

[12] ANANDKUMAR R, ALMEIDA A, VILAR R, et al. Influence of powder particle injection velocity on the microstructure of Al-12Si/SiC_p coatings produced by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, 204(3): 285-290.

[13] INOUE Z, INOMATA Y, TANAKA H, et al. X-ray crystallographic data on aluminum silicon carbide, α -Al₄SiC₄ and Al₄Si₂C₃[J].

- Journal of Materials Science, 1980, 15(3): 575–580.
- [14] INOUE K, YAMAGUCHI A. Synthesis of Al_4SiC_4 [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2003, 86(6): 1028–1030.
- [15] ANANDKUMAR R, ALMEIDA A, COLAÇO R, et al. Microstructure and wear studies of laser clad Al–Si/SiC_(p) composite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(24): 9497–9505.
- [16] CHANG F, GU D D, DAI D H, et al. Selective laser melting of in-situ Al_4SiC_4 +SiC hybrid reinforced Al matrix composites: Influence of starting SiC particle size[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 272: 15–24.
- [17] 赵玉涛, 戴起勋, 陈刚. 金属基复合材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- ZHAO Yutao, DAI Qixun, CHEN Gang. Metal matrix composites[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007.
- [18] 晏义伍. 颗粒尺寸对 SiC_p/Al 复合材料性能的影响规律及其数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- YAN Yiwu. Effect of particle size on properties of SiC_p/Al composites and its numerical simulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [19] 郝世明, 谢敬佩, 王爱琴. 微米级 SiC 颗粒增强铝基复合材料的强化机制[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(5): 1–6.
- HAO Shiming, XIE Jingpei, WANG Ai Qin. Strengthening mechanism of micrometer SiC particle reinforced aluminum matrix composites[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(5): 1–6.
- [20] 华波, 朱和国. 颗粒增强铝基复合材料强化机制的研究现状评述[J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(1): 151–156.
- HUA Bo, ZHU Heguo. State of the art of particle reinforced aluminum matrix composites[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2015, 33(1): 151–156.
- [21] ZHANG D Y. Development of selective laser melting (SLM) for aluminium alloys [D]. Aachen: Shaker-Verlag, 2004.
- [22] GU D D, MEINERS W, WISSENBACH K, et al. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms[J]. International Materials Reviews, 2012, 57(3): 133–164.
- [23] LOUVIS E, FOX P, SUTCLIFFE C J. Selective laser melting of aluminium components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(2): 275–284.
- [24] GU D D, ZHANG G Q. Selective laser melting of novel nanocomposites parts with enhanced tribological performance[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2013, 8: 11–18.
- [25] MOURITZ A. Introduction to aerospace materials[M]. Sawston: Woodhead Publishing Limited, 2012: 394–400.
- [26] CHAWLA N, CHAWLA K K. Metal matrix composites[M]. New York: Springer Science Business Media Incorporated, 2006: 353–355.
- [27] ARPON R, MOLINA J M, SARAVANAN R A, et al. Thermal expansion behavior of aluminium–SiC composites with bimodal particle distributions[J]. Acta Materialia, 2003, 51(11): 3145–3156.
- [28] HUNT W H, HERLING D R. Aluminum metal matrix composites[J]. Advanced Materials and Processes, 2004, 162(2): 39–44.
- [29] 崔岩. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的航空航天应用[J]. 材料工程, 2002(6): 3–6.
- CUI Yan. Aerospace applications of silicon carbide particulate reinforced aluminium matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2002(6): 3–6.
- [30] 王春伟, 袁战伟, 张晓峰, 等. SiC 颗粒增强铝基复合材料制备技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2017(12): 6–9.
- WANG Chunwei, YUAN Zhanwei, ZHANG Xiaofeng, et al. Review on fabrication technology of SiC particle reinforced aluminum matrix composites[J]. Hot Working Technology, 2017(12): 6–9.
- [31] MURR L E, GAYTAN S M, RAMIREZ D A, et al. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012, 28(1): 1–14.
- [32] YAVARI S A, WAUTHLÉ R, VANDER STOK J, et al. Fatigue behavior of porous biomaterials manufactured using selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: C, 2013, 33(8): 4849–4858.
- [33] 杨永强, 吴伟辉, 来克娴, 等. 金属零件选区激光熔化直接快速成形工艺及最新进展[J]. 航空制造技术, 2006, 49(2): 73–76.
- YANG Yongqiang, WU Weihui, LAI Kexian, et al. Newest progress of direct rapid prototyping of metal part by selective laser melting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(2): 73–76.

通讯作者: 张冬云, 博士、副研究员, 研究方向为金属 3D 打印, E-mail: zhangdy@bjut.edu.cn.

Current Situation and Aerospace Applications Analysis Based on SiC Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites Manufactured by Selective Laser Melting

ZHOU Yan^{1,2}, ZHANG Dongyun^{1,2}, WANG Weidong^{1,2}, LI Lingshan^{1,2}

(1. Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Engineering Research Center of 3D Printing for Digital Medical Health, Beijing 100124, China)

[ABSTRACT] In this paper, the current research situations of SiC particle reinforced aluminum matrix composites manufactured by selective laser melting (SLM) at home and abroad are synthetically reviewed. And the technical difficulties of SiC particle reinforced aluminum matrix composites processed by SLM technology are also analyzed. The application cases of SiC particle reinforced aluminum matrix composites in the field of aerospace and the advantages of SLM technology are then introduced. Finally, the paper makes a prospect of the research of SiC particle reinforced aluminum matrix composites processed by SLM technology.

Keywords: Selective laser melting (SLM); SiC particle; Aluminum matrix composites; Aerospace (责编 铃兰)