DOI: 10.3901/JME.2013.23.021

选择性激光熔化成形 TC4 钛合金 开裂行为及其机理研究*

张升 桂睿智 魏青松 史玉升

(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室 武汉 430074)

摘要: 裂纹是选择性激光熔化(Selective laser melting, SLM)成形 Ti6-Al4V(TC4)钛合金过程中最常见、破坏性最大的一种缺陷。采用逐行交替的扫描策略制备 TC4 钛合金试样,利用扫描电子显微镜及 X 射线能谱分析等检测方法,研究 SLM 成形 TC4 钛合金过程中裂纹的开裂行为及其形成机理。结果表明,SLM 成形 TC4 钛合金所产生的裂纹为冷裂纹,具有典型的穿晶开裂特征。采用逐行交替扫描策略成形的 TC4 钛合金,其组织为网篮状马氏体组织。SLM 成形过程中高温梯度导致制件内部存在较高的残余应力,抗裂强度较差的马氏体组织在残余应力的作用下而产生裂纹,粗大的裂纹最终分解为较小的裂纹而终止扩展。进一步分析认为,通过调整成形工艺参数,可以改变制件组织,同时削弱残余应力,从而达到减弱或消除裂纹的目的。

关键词: 选择性激光熔化 TC4 钛合金 裂纹 形成机理

中图分类号: TG142

Cracking Behavior and Formation Mechanism of TC4 Alloy Formed by Selective Laser Melting

ZHANG Sheng GUI Ruizhi WEI Qingsong SHI Yusheng

(State Key Lab of Materials Processing and Die & Mold Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: Crack is the most common and great destructive defect in selective laser melting (SLM) Ti6Al4V (TC4) alloy process. A TC4 alloy test specimen is fabricated by progressive alternative scan strategy in SLM process. The cracking behavior and formation mechanism is discussed in TC4 alloy SLM processing using scanning electron microscopy and X-ray energy spectrum analysis. The experimental results show that the crack is considered as cold cracking in SLM TC4 alloy part, which has typical characteristic of the transgranular fracture. By using the progressive alternative scan strategy, the basket-like martensitic structure is formed in SLM process. The high residual stress is caused by high temperature in forming process of SLM part. Under the residual stress, the crack will occur in the martensitic structure because it has poor cracking strength. Finally, the coarse crack decomposes into smaller cracks in the process of expansion and the extension is terminated. Further research shows that by improving the process parameters, the microstructure of TC4 alloy will be changed and the residual stress will be weakened. At the same time, achieving to the purpose of weakening or eliminating cracks.

Key words: Selective laser melting TC4 alloy Cracking Formation mechanism

0 前言

Ti6-Al4V(TC4)钛合金因具有密度低、比强度

高、耐热及耐腐蚀性好、生物相容性优异等优点,在航空、化工、兵器、核工业、运动器材及医疗等领域得到了广泛的应用^[1-3]。用锻造和铸造技术制备的 TC4 钛合金件已被成功地应用在高技术领域,如军用和商业飞机的机身结构件。但用锻造和铸造方法生产钛合金零件,由于工艺复杂、成材率低、产

* 国家科技支撑计划(2012BAF08B03)和国家自然科学基金(513751892)资助项目。20130113 收到初稿,20130908 收到修改稿

品成本高以及后续加工困难等不利因素,阻碍了其更为广泛的应用^[4]。近年来人们尝试用一系列新的技术手段^[5],如激光近净成形(Laser engineered net shaping, LENS)技术^[6]、电子束熔融(Electron beam melting, EBM)技术^[7]等一系列增材制造技术来制造 TC4 钛合金制件,部分制件已获得成功应用。其中,选择性激光熔化(Selective laser melting, SLM)技术是近年来新近发展起来的一种直接制造 TC4 钛合金零件的增材制造技术^[8]。

SLM 技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一种新型快速制造(Rapid manufacturing, RM)技术^[9],它根据零件的三维 CAD 模型,利用高能激光束逐层熔化处于松散状态的金属粉末材料,从而堆积成形三维金属零部件。与传统铸造、锻造等制造技术相比,SLM 技术具有诸多的优点,如它可以快速响应市场,无需昂贵的模具直接成形复杂结构的金属零部件,节省成本且提高了材料的利用率^[10]。此外,由于 SLM 技术是通过粉末逐层叠加的原理成形,所以它还可以制造传统技术手段无法成形的一些具有复杂几何特征的零件。

在 SLM 成形过程中,金属制件是通过高能激光束熔化金属粉末而直接成形,一方面成形材料的组织往往具有特殊的优越的组织结构,如晶粒高度细化,获得高度过饱和的固溶体等;另一方面,由于材料的熔化、凝固和冷却都是在极快的条件下进行,如果成形工艺控制不当,易于在成形件中形成裂纹、气孔等缺陷,而裂纹是成形过程中最常见、破坏性最大的一种缺陷。有裂纹产生的金属零件只能报废处理。现有研究主要集中在 SLM 成形 TC4 钛合金制件的性能及组织上,如比利时鲁汶大学的 THIJS 等^[11]研究了 SLM 成形过程中激光的扫描参数和扫描策略对 TC4 钛合金组织变化的影响,结果发现 SLM 成形 TC4 钛合金的主要组织为马氏体相;鲁汶大学的 HOOREWEDER 等^[12]对 SLM 成形 TC4 钛合金的断裂韧性及裂纹的扩展方式进行了研究;法国贝尔福科技大学的 SONG^[13]研究了成形工艺参数对 TC4 钛合金组织和性能的影响,发现工艺参数对 SLM 成形 TC4 钛合金的组织、致密度、粗糙度和硬度有显著的影响。国内西北工业大学的陈静等^[14-15]研究了 LENS 成形 TC4 钛合金、316 不锈钢、镍基合金等多种材料的裂纹形成机制。但国内外目前对 SLM 成形 TC4 钛合金制件过程中裂纹的形成机制鲜有研究。因此,揭示 SLM 成形 TC4 钛合金过程中裂纹形成机理,找到消除成形过程中裂纹产生的根源和控制方法,为防止裂纹的产生提供理论和实践依据,对该项技术的工程化应用具有非常重要的意义。

本试验采用扫描电子显微镜(Scanning electric microscope, SEM),能谱分析(Energy spectrum analysis, EDS)等方法,通过对 SLM 制件微观组织、元素成分分布及裂纹形貌等分析,探索 SLM 成形 TC4 钛合金制件中裂纹的形成机制及消除办法。

1 材料及试验方法

1.1 试验材料

本研究采用等离子旋转电极法生产的 TC4 钛合金粉末材料。材料的化学组分见表 1, TC4 钛合金粉末形貌见图 1,为规则的球形颗粒,粉末平均粒径为 74 μm 。

表 1 TC4 钛合金的化学成分 %

Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
6.0	4.0	0.12	0.02	0.09	0.01	0.002	其余

图 1 TC4 粉末形貌

1.2 试样的制备

试验所用的 SLM 设备是由华中科技大学快速制造中心自主研发的 RPM-I 型设备,该设备配备有 200 W 的光纤激光器(德国 IPG),成形时采用单缸下送粉方式来保证粉末的连续供给。成形工艺参数经优化为:激光功率 P (130 W)、扫描速度 v (300 mm/s)、扫描间距 d (0.06 mm)、铺粉层厚 h (0.03 mm),扫描策略如图 2 所示,为逐行交替扫描方式。

图 2 扫描策略示意图

为防止成形过程因氧化而造成污染, 成形前先 将成形腔内抽真空至 -0.1 MPa , 再通入高纯氩气 (99.999%)至标准大气压以保护成形过程。为保证熔 融的 TC4 钛合金与基材有良好的润湿性, 试验选用 工业纯钛板作为成形用基板, 试验前对基板表面依 次用砂纸打磨、酒精清洗, 以确保基板表面平整 干净。

1.3 结果检测

通过光学相机及扫描电子显微镜(JSM-7600F, 日本电子)观察 SLM 技术制备的 TC4 钛合金试样的 组织形貌及裂纹的微观形貌, 利用 SEM 附带的 X 射线能谱分析仪(Inca X-Max 50, 英国牛津)分析裂 纹终止处元素的分布情况。金相试样经常规切割、 打磨及抛光后腐蚀, 腐蚀剂选用含 $2\text{ mL HF} + 3\text{ mL HNO}_3 + 5\text{ mL H}_2\text{O}_2 + 90\text{ mL H}_2\text{O}$ 的溶液, 腐蚀 120 s 。

2 结果与分析

2.1 试验结果

利用 SLM 技术成形的 TC4 钛合金条状试样如 图 3 所示。观察发现, 成形试样上表面(即 xy 面)平 整, 无明显裂纹产生, 但在试样的侧面(即垂直于 xy 平面)可以明显观察到多条裂纹。裂纹沿着粉末层 的方向(以下称横截面)扩展, 近似垂直于粉末层 的堆积方向(以下称纵截面), 在横截面上无明显的 宏观裂纹产生, 说明裂纹的扩展主要是沿着熔覆层 扩展, 产生于熔覆层之间, 具有显著的取向性。

图 3 SLM 成形的 TC4 钛合金试样照片

通过 SEM 观察纵截面上的裂纹形貌, 选取部 分典型的裂纹形貌, 如图 4 所示。可以看到, 纵截 面上的多处裂纹均起源于试样的边缘, 终止于试样 的内部, 且尺寸较大的裂纹(命名为“主裂纹”)的 边缘及终止处会伴随有尺寸较小的裂纹(命名为“次 裂纹”)产生, 说明次级纹的产生有助于阻碍裂纹的 扩展, 是阻止裂纹扩展的因素之一。TC4 钛合金制 件内裂纹的产生, 主要是由于在 SLM 成形过程中, 材料的瞬间热胀冷缩作用使制件内部产生大量的残 余拉应力^[16], 当基材的抗拉强度较小而残余拉应力

较大时, 就会导致制件内部产生裂纹, 通过裂纹的 产生及扩展, 释放出残留在制件内部的残余应力, 裂纹的产生容易发生于最大应力集中处。SLM 制 件是通过逐层熔化金属粉末成形的, 制件边缘常伴随 有黏粉等现象而导致制件表面粗糙度较大, 缺陷较 多, 如图 4 所示, 照片的边缘显示出凹凸不平的形 貌。同时制件的表面又因受较少的约束而具有较大 的自由度, 这就为裂纹的产生提供了条件, 故裂纹 起始于制件的边缘处。在裂纹扩展的过程中, 由于 制件内部残余应力的释放, 而使制件内的残余应力 逐渐减少, 此时主裂纹的扩展因需要较多的能量而 终止。但当主裂纹终止扩展, 仍然会有较多的残余 应力集中在试样内部时, 在集中应力的作用下, 主 裂纹的终止处就会产生多条次级裂纹而使集中应力 分散。当材料的抗拉强度足以克服分散后的残余应 力时, 主裂纹及次裂纹的扩展就会因能量的减弱而 终止扩展。

图 5 为 TC4 钛合金裂纹扩展及终止处纵截面微 观组织形貌及裂纹扩展区的表面形貌。图 5a 为一典 型裂纹及其周围微观组织形貌, 从图中可以看出, 裂纹两侧的针状组织具有连续性, 说明裂纹产生于 晶粒内部, 呈现出典型的穿晶开裂特征。图 5b 为裂 纹扩展区断面的表面微观形貌, 可以发现裂纹的扩 展区具有阶梯状或河流状的形貌, 为典型的解理断 裂特征。据此可以判定 SLM 成形 TC4 钛合金中所 形成的裂纹属于冷裂纹的范畴。这表明裂纹是在制 件成形后产生的, 而不是在成形过程中产生。说明 在此种工艺条件下, SLM 制件内部有较大的残余应 力存在。

图 6 为 TC4 裂纹终止处试样的微观组织形貌。 从图中可以看出, 在裂纹终止处的前沿, 仍然可以 清晰地看到成河流状的解理台阶, 但在裂纹的终止 处, 解理台阶消失, 裂纹顶端呈圆弧状, 避免了应 力的集中, 阻止了裂纹的扩展。观察裂纹周围的组 织形貌, 发现裂纹周围存在大量的针状马氏体组织。 为检测 TC4 裂纹终止处元素的分布情况, 对裂纹终 止处不同的位置进行 EDS 分析如图 7 所示, 结果如 表 2 所示, 在终止处裂纹内部 Al、V 元素的质量分 数低于裂纹周围组织 Al、V 元素的质量分数。TC4 钛合金在凝固过程中 Ti 与 Al 形成固溶体, 在裂纹 终止处 Al 元素的质量分数下降, 说明 TC4 钛合金 中出现的裂纹破坏了晶粒组织, 使固溶体分解造成 元素的偏析, 也是典型的穿晶断裂的特征。

图 4 TC4 试样纵截面上不同位置的裂纹扩展形貌

(a) 裂纹两侧组织微观形貌

(b) 裂纹侧面微观形貌

图 5 TC4 试样裂纹扩展区纵截面微观形貌

图 6 TC4 裂纹终止处微观组织形貌

在选择性激光熔化成形冷却过程中, 冷却速度较快, 使 TC4 钛合金发生马氏体转变, 形成过饱和

的 α 固溶体^[17]。这种组织强度和硬度高, 但塑性和韧性低, 脆性大, 抗裂性能较差。在制件后期冷却的过程中, 制件内部组织的抗拉强度不足以抵抗内部残余应力而使制件内部产生了裂纹。

2.2 裂纹的扩展与中止

在激光束扫描 TC4 钛合金粉末熔化成形的过程中, 热流方向与粉末沉积方向垂直, 使制件不均匀受热并产生拉伸应力^[18]。在成形过程中, 处于工作台底部的钛合金在加热平台的作用下, 凝固时温度梯度较小, 冷却速度慢, 而试样顶端凝固时温度梯度较大, 冷却速度快, 从而产生残余应力。在残余应力的作用下, 使得搭接区域成为开裂的敏感区域。

图 7 TC4 裂纹终止处不同区域的能谱点

表 2 能谱分析结果(元素质量相对质量分数, %)

谱图编号	Al	Ti	V
谱图 1	6.26	90.26	3.49
谱图 2	6.46	90.02	3.52
谱图 3	3.35	92.24	4.42
谱图 4	0.16	97.04	2.80

由于试样的冷却速度较快,在此过程中会产生淬硬性的马氏体组织并在残余应力作用下发生解理断裂。在断裂过程中,解理台阶合并是一个逐步的过程。许多较小的台阶(即较小的支流)到下游又汇合成较大的台阶(即较大的支流),河流的流向恰好与裂纹扩展方向一致。已有研究表明,当相邻晶粒之间是小角度晶界、且该晶界是由刃型位错所组成时,由于晶界两侧的晶体仅是相互倾斜一个小角度,因此相邻晶粒内的解理面位相差较小,一旦解理裂纹与该小角度倾斜晶界相交截,新的解理裂纹能在晶界不同位置萌生并继续扩展,从而出现“连续型河流”形貌,如图 5b 所示。

2.3 裂纹的影响因素

2.3.1 组织的影响

在 SLM 成形过程中,由于具有高温梯度,TC4 钛合金的微观组织为马氏体^[11]。通过 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)技术可以确定,SLM 工艺成形的 TC4 钛合金中马氏体相为针状马氏体相或者是六方 α' 相^[11]。同时,因在 SLM 成形过程中,没有凝固形核的壁垒产生,故晶粒会呈现出外延生长的趋势。

图 8 为 SLM 制备的 TC4 钛合金试样的微观组织形貌图。从图 8 中可以看出,试样的纵截面(图 8a)和横截面(图 8b)都可以看到细长的晶粒,且晶粒的取向具有明显的方向性,细长的晶粒相互交错形成网篮状的马氏体组织。THIJS 等^[11]在其研究中指之处,激光的扫描速度和扫描策略对晶粒的取向具有显著的影响。在 SLM 过程中,TC4 晶粒的生长方向主要是由其传热方向决定的,而扫描方式直接影

(a) 纵截面微观组织形貌

(b) 横截面微观组织形貌

图 8 TC4 试样内部的典型微观组织形貌

响到成形过程中熔池的传热方向,因本研究中采用的是 x - y 交替扫描的方式,故传热方向也有近似平行于 x 和平行于 y 的两种方向,故晶粒取向成相互交错的网状结构。这种组织强度和硬度高,但塑性和韧性低,脆性大,抗裂性能较差,是导致冷裂纹产生的重要原因之一。图 9^[18]显示了经过计算的晶粒倾角与 SLM 过程温度场之间的关系,在 x - z 平面上晶粒的生长方向与其外围的等温线垂直,因此晶粒的生长方向平行于基体的传热方向,所以晶粒的生长方向决定于激光束的扫描方式和扫描速度。因此,通过控制成形的工艺参数(如扫描速度、扫描策略等)来控制晶粒大小和生长方向,可以达到调控制件微观组织的目的,从改善制件的性能,减少并抑制裂纹的产生。

图 9 TC4 基体上激光熔化 TC4 粉末层的温度场分布

2.3.2 成形过程产生的残余应力的影响

在 SLM 成形 TC4 钛合金制件的过程中局部热输入造成的不均匀温度场(图 9)而产生残余应力,是成形件开裂的主要因素。MURR 等^[17]通过对 SLM 成形 TC4 钛合金残余应力的测试,表明成形件主要受拉伸应力的作用,可达几百 MPa。孔源等^[19]通过对成形过程中热力耦合场的数值模拟发现,试样内的温度梯度主要沿 z 轴方向分布,熔池区内的温度梯度非常大。可见调整和消除残余应力对抑制成形过程裂纹的产生具有重要意义。残余应力是一种不稳定的应力状态,在外界因素的作用下将发生松弛或衰减。残余应力的调整和消除目前主要的措施有:① 调整加工工艺,减少残余应力在制件形成的过程中残留或集中;② 加热处理,使制件内部的残余应力得到释放;③ 施加静载或动载,逐步使残余应力在抵抗载荷的过程中释放。THIJS 等^[11]研究发现扫描参数和扫描策略对 SLM 成形 TC4 钛合金的组织 and 晶粒取向有着显著的影响,采用不同的扫描策略及扫描参数,即可获得组织具有显著差异的制件。而具有不同组织的 TC4 制件,其内部的残余应力及抗变形能力也会有所不同。因此,若 SLM 制件在成形过程中因残余应力的影响而产生了不可逆转的裂纹,加热或施加载荷的后处理工艺已不能使制件中的裂纹得以减少或消除,故通过调整成形过程中的加工工艺,如控制激光能量的输入、控制激光的扫描速度、控制熔滴的体积等方式,即可达到控制制件组织的同时减小成形过程中的温度梯度,从而达到防止制件内部产生裂纹的目的。

3 结 论

(1) SLM 成形 TC4 钛合金制件中的裂纹为冷裂纹,具有典型的穿晶开裂特征,在裂纹断口处有明显的连续型河流状形貌的解理断口。在成形过程中,由于过高的温度梯度而产生的残余应力是裂纹形成的本质因素。

(2) SLM 成形 TC4 钛合金所产生的裂纹起源于制件的边缘,终止于制件的内部,在主裂纹的终止处伴随有多条次裂纹的产生,次裂纹的产生一方面分散了主裂纹中的应力,另一方面使裂纹的扩展需要更多的能量,从而终止了裂纹的扩展。

(3) 在 SLM 成形 TC4 钛合金过程熔池的冷却速度快,且成形过程中采用了交替扫描策略,因此制件中形成大量的网篮状马氏体组织,该组织的抗裂能力差也是裂纹形成的重要原因之一,通过对工艺参数的调整,可以改善制件内部的组织结构,从

而减少或消除裂纹的产生。

参 考 文 献

- [1] 陈静,杨海欧,汤慧萍,等. 成形气氛中氧含量对 TC4 钛合金激光快速成形工艺的影响[J]. 稀有金属快报, 2004, 23(3): 23-26.
CHEN Jing, YANG Haiou, TANG Huiping, et al. The effects of oxygen to forming process in laser rapid forming TC4 alloy[J]. Rare Metals Letters, 2004, 23(3): 23-26.
- [2] 宋建丽,李永堂,邓琦林,等. 激光熔覆成形技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 29-38.
SONG Jianli, LI Yongtang, DENG Qilin, et al. Research progress of laser cladding forming technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 29-38.
- [3] 左铁钊,陈虹. 21 世纪的绿色制造——激光制造技术及应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 106-110.
ZUO Tiechuan, CHEN Hong. Green manufacture in 21 century : Laser manufacturing technology and application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 106-110.
- [4] 赵瑶,贺跃辉,江焱. 粉末冶金 Ti6Al4V 合金的研制进展[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2008, 13(2): 70-78.
ZHAO Yao, HE Yuehui, JIANG Yao. Research progress of Ti6Al4V alloy prepared by powder metallurgy[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2008, 13(2): 70-78.
- [5] 姚山,曾峰. 新的激光快速成形方法及应用[J]. 机械工程学报, 2007, 43(5): 230-234.
YAO Shan, ZENG Feng. New laser rapid prototyping method and it's applications[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5): 230-234.
- [6] 陈静,张霜银,薛蕾,等. 激光快速成形 Ti-6Al-4V 合金力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36 (3): 475-479.
CHEN Jing, ZHANG Shuangyin, XUE Lei, et al. Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy by laser rapid forming[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(3): 475-479.
- [7] SAFDAR A, HE H Z, WEI L Y, et al. Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V[J]. Rapid Prototyping Journal, 2012, 18(5): 401-408.
- [8] KRUTH J P, LEVY G, KLOCKE F, et al. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing[J]. CIRP Annals Manufacturing

- Technology, 2007, 56(2): 730-759.
- [9] BRANDL E, HECKENBERGER U, HOLZINGER V, et al. Additive manufactured AlSi10Mg samples using selective laser melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior[J]. Materials & Design, 2012, 34: 159-169.
- [10] JEVREMOVIC D, PUSKAR T, KOSEC B, et al. The analysis of the mechanical properties of F75 Co-Cr alloy for use in selective laser melting (SLM) manufacturing of removable partial dentures (RPD)[J]. Metalurgija, 2012, 51(2): 171-174.
- [11] THIJS L, VERHAEGHE F, CRAEGHS T, et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. Acta Materialia, 2010, 58(9): 3303-3312.
- [12] HOOREWEDER B V, MOENS D, BOONEN R, et al. Analysis of fracture toughness and crack propagation of Ti6Al4V produced by selective laser melting[J]. Advanced Engineering Materials, 2012, 14(1-2): 92-97.
- [13] SONG B, DONG S J, ZHANG B C, et al. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V[J]. Materials & Design, 2012, 35: 120-125.
- [14] 陈静, 杨海欧, 李延民, 等. 激光快速成形过程中熔覆层的两种开裂行为及其机理研究[J]. 应用激光, 2002, 22(3): 300-304.
- CHEN Jing, YANG Haiou, LI Yanming, et al. The research on two kinds of cracking behavior and mechanism of cladding in rapid laser forming process[J]. Applied Laser, 2002, 22(3): 300-304.
- [15] 陈静, 林鑫, 王涛, 等. 316L 不锈钢激光快速成形过程中熔覆层的热裂机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(3): 183-186.
- CHEN Jing, LIN Xin, WANG Tao, et al. The hot cracking mechanism of 316L stainless steel cladding in rapid laser forming process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(3): 183-186.
- [16] 李佳桂. 金属粉末选择性激光熔化成形模拟及试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- LI Jiagui. Numerical simulation and experiment study on selective laser melting of metal powders[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [17] MURR L E, QUINONES S A, GAYTAN S M, et al. Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications[J]. Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2009, 2(1): 20-32.
- [18] VERHAEGHE F, CRAEGHS T, HEULENS J, et al. A pragmatic model for selective laser melting with evaporation[J]. Acta Materialia, 2009, 57(20): 6006-6012.
- [19] 孔源, 刘伟军, 王越超, 等. 钛合金激光直接成形过程中热力耦合场的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24): 74-82.
- KONG Yuan, LIU Weijun, WANG Yuechao, et al. Numerical simulation of temperature field and stress field of direct laser metal deposition shaping process of titanium alloys[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24): 74-82.
-
- 作者简介: 张升, 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要研究方向为快速制造。
- E-mail: zhangyufeng198785@163.com
- 魏青松 (通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为近净成形与快速制造。
- E-mail: wqs_xn@163.com