

选择性激光熔化成形过程的球化反应研究

张晓博 党新安 杨立军

陕西科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 球化反应是选择性激光熔化(SLM)加工过程中的常见缺陷,是导致成形零件表面粗糙度高、内部出现孔隙、倾斜脱层等现象的主要原因,严重影响零件的致密度及力学性能。对选择性激光熔化成形过程中球化反应的分类及其形成机理、金属球(球化)的形成过程、球化反应的影响因素、球化反应的危害及国内外对球化反应的研究现状进行了比较系统的综述。研究表明球化反应的分类不同其形成机理也不同,球化反应形成过程复杂,影响因素众多,对成形过程及成形件的危害较大。但是目前国内外关于球化反应的研究还不够系统、全面、深入。对工艺参数、金属粉末的物化特性对球化反应的影响等方面进行更加深入的研究,将有利于解决选择性激光熔化成形过程中的球化问题。

关键词 激光技术; 球化反应; 选择性激光熔化; 分类; 成形机理; 研究现状

中图分类号 TG146 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.061401

Study on Balling Phenomena in Selective Laser Melting

Zhang Xiaobo Dang Xin'an Yang Lijun

College of Mechanical & Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology,
Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract Balling phenomena is a common defect in selective laser melting (SLM) process, it is the main reason causing high surface roughness, pores, tilt delamination and other defects, seriously affect the density and mechanical properties of parts. The classification and formation process of balls, influencing factors and hazards of balling phenomena at home and abroad are summarized systematically. Results show that different metal balls have different formation mechanisms. The formation process of balling phenomena is complex, and many factors during fabricating affect the formation of ball reaction. But the current researches at home and abroad of balling phenomena are not systematic, comprehensive and thorough enough. It will be useful for restraining and eliminating balling phenomena during SLM process to research on the influence of technological parameters, physical and chemical features of powders on balling.

Key words laser technique; balling phenomena; selective laser melting; classification; forming mechanism; research status

OCIS codes 140.3390; 150.5495; 350.3390

1 引言

选择性激光熔化技术(SLM)是近年来诞生的一种直接快速成形技术^[1-2],是快速原型制造(RP&M)技术的最新发展形式之一^[3-6]。该技术基于分层-叠加原理^[7],利用高能激光束将金属粉末分层熔化,堆积成形,能利用多种金属粉末成形出致密度接近100%、表面质量好、尺寸精度高的金属零件^[8-15]。与传统加工方法(车、铣、刨、磨)相比,SLM成形技术加工过程不需要工装模具、卡具、刀具,特别是在一些带有曲面、复杂内腔结构和特点,利用传统加工方法难以成形的零件的制造方面有独特的优势^[16],能广泛应用于航空航天、生物医学、军事装备等领域中关键部件的制造。因此,引起了国内外学者的广泛关注。

收稿日期: 2013-12-13; 收到修改稿日期: 2014-01-18; 网络出版日期: 2014-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(50972086)

作者简介: 张晓博(1989—),男,硕士研究生,主要从事选择性激光熔化成型技术方面的研究。

E-mail: zhangxb0305@163.com

导师简介: 党新安(1958—),男,硕士,教授,主要从事仿生人工骨的快速成型方面的技术研究。

E-mail: 710079339@qq.com

球化的形成机理、过程及防止措施是影响 SLM 技术发展的难点。李瑞迪等^[17-19]对 SLM 多参数下的线、面、体过程球化进行了综合研究,但是未对球化的形成过程进行研究。顾东东等^[20-23]利用 CO₂ 激光器对不锈钢粉末和铜基合金成形时的球化行为进行了研究,分析了其成形机理。Childs 等^[24]对激光单道扫描时,不同扫描速度和功率条件下的功率-速度-熔道特征进行研究,建立了加工窗口,揭示了球化的规律。Simchi^[25]对纯铁粉激光熔化时的表面状况进行分析,研究了扫描间距对球化的影响。目前国内外关于球化反应的研究还很少,而且现有的研究也不够深入、系统、全面^[26-30]。所以关于 SLM 成形过程中的球化问题,在其影响因素、弱化和避免球化出现等方面进行深入系统的研究十分必要。

球化反应是在受到表面张力、重力以及周边介质共同作用下,熔融金属液不能均匀地铺展于基板或者前一成形层,而形成大量彼此隔离的金属球的现象^[31-32]。该现象的出现会使金属粉末溶化后无法得到连续平滑的熔池,影响加工过程的正常进行,甚至形成疏松多孔的金属零件致使成形失败^[33]。因此,针对球化反应的产生原因、过程、危害等理论进行深入研究,有助于消除成形过程中的球化现象。本文主要针对 SLM 成形过程中球化反应的分类、球化的演变机制、球化反应的影响因素及其危害等进行综述。

2 球化反应研究

2.1 球化反应的分类

顾东东等^[20-23]采用的是 CO₂ 激光器对不锈钢的球化反应进行研究,将球化分为大球和小球两种类型。李瑞迪等^[17-18]用光纤激光器对 316L 不锈钢粉末进行了研究,根据成形试样表面的微观形貌将球化从形状和尺寸上分为两类:1) 椭球形,尺寸较大,直径为 500 μm 左右,形状不规则且具有非平整固结块特征;2) 球形,尺寸较小,直径 10 μm 左右,形状规则且球形度高。不同的学者根据不同的分类标准对于球化反应的分类都有过描述,如第一线球化、自球化^[17]等,但结论与大尺寸球化和小尺寸球化相似。

2.2 球化反应的形成机理

2.2.1 大尺寸球化的形成机理

大尺寸球化现象的产生原因可以归结为熔融液态金属与固态表面(基板和前一层的加工表面)的润湿问题^[32]。图 1^[34]所示为液态金属与固态金属的润湿示意图。当熔融金属液能均匀地铺展在前一层上时,润湿角 $\theta < 90^\circ$ 时固液金属润湿性良好,不会形成球化;当金属液很难铺展于固态表面时, $\theta > 90^\circ$ 时固液金属润湿性差,产生球化反应。加工过程中,熔融金属在金属液表面张力的作用下,表面积呈现缩小趋势。因为在体积相同时,球形的表面积是最小的,表面能也最低,最稳定^[34]。从热力学角度来看,该过程符合吉布斯自由能的能量最低原理。由于激光扫描速度相对较快,金属粉末的熔化与凝固仅仅为数毫秒,液态金属尚未收缩至体积最小的球形时已经凝固。所以当固液金属的润湿性较差时,液态金属倾向于形成大尺寸球。通过调整工艺参数改变熔池温度、预热基板等方式来改善液态金属与基板的润湿性,可以避免大尺寸球化的产生。

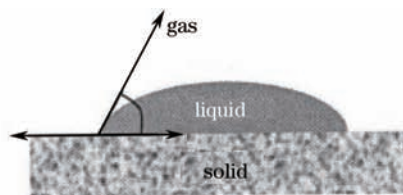


图 1 液固金属润湿示意图

Fig.1 Infiltrating schematic between liquid and solid metal

2.2.2 小尺寸球化的形成机理

有少部分小尺寸球化的形成,是因为在加工过程中发生了液体飞溅,在熔道上或熔道周围凝固成球,由于飞溅的金属液量较少,所以球的尺寸也比较小。大部分小尺寸球化的形成是由于高能激光束对熔池的冲击作用所致,高速传播的激光束会冲击熔池,激光束的部分能量及动能转化为金属液的表面能^[35]。此时的金属液同样只受重力作用,根据能量最低原理,只有形成球形才最稳定。同时,由于激光动能有限,受到冲击并吸收能量转化为球形的金属液很少,所以形成了小尺寸球。这部分小尺寸球是由于加工过程中的能量转化而形成的,难以避免。在大尺寸球化形成的过程中也会伴有这类小尺寸球化的产生。

2.3 球化反应的形成过程分析

光纤激光器激光束的能量呈高斯分布,当激光能量密度不足以穿透粉层时,形成的熔池截面接近碗状^[32]。SLM 加工过程是一个瞬间融化并凝固的过程,热量以热传导为主。由于松散粉末对熔池的约束力很小,几乎可以忽略不计,所以熔池形状主要由表面张力决定,根据能量最低时最稳定原理,在激光未能穿透粉层时熔池凝固会倾向于收卷成球,产生严重的球化现象。图2为激光未穿透粉层时球化形成示意图。

当激光能量密度足以穿透粉层并能熔化一定的固体基底时,可以沿着固体基底上表面将熔池划分为:上部金属粉末熔化熔池和下部固体基底熔化熔池,如图3所示。此时,整个熔池上共有液固界面、气液界面和液液界面三种。其中,液液界面是熔池上下部的分界线,如果基底材料与金属液是同种材料,或者两种材料能够相容,则液液界面会迅速消失,整个熔池中的液相成为一个整体,这对抑制球化有重要作用。

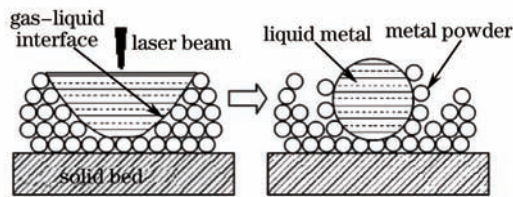


图2 激光未穿透粉层时球化形成示意图

Fig.2 Forming schematic of balling when laser does not penetrate the powder layer

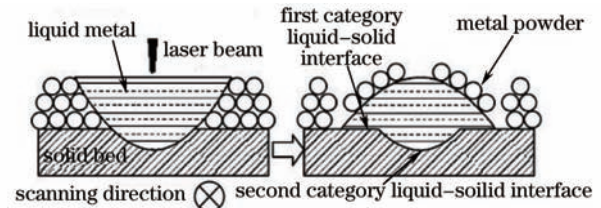


图3 激光穿透粉层时球化形成示意图

Fig.3 Forming schematic of balling when laser penetrates the powder layer

对于上部金属液而言,由于熔池温度较高,可以吸附周围金属粉末进入熔池并将其熔化,在重力作用下部分金属液会不断向下流动,直至与固体基底接触形成新的固液界面(第二类液固界面),其余未与固体基底接触的金属液则倾向于向表面积最小(球形)方向发展。如果新形成的固液界面上液态金属与固体润湿性良好,则新形成的固液界面就会固定在固态基底上并有可能继续铺展;若润湿性不好,则固液界面很不稳定且很难继续铺展。在SLM的第一层加工过程中,由于基板表面一般都附有一层氧化膜。此时的固液接触界面为液体金属/氧化膜,该界面属于异质材料润湿,润湿性很差,因此原来因重力作用粘附到基板上的金属液就可能在表面张力的作用下重新脱离基板,上部熔池形状倾向于向球形转变。对于第二层及以后各层的加工而言,其成形的固体基底为已凝固的同类金属凝固层。如果成形过程在保护气氛中进行,则当前层与前一层的液固界面的润湿性会比较好,在已凝固层上稳定下来,进而抑制球化反应的形成。下部固体基底的熔池的固液界面(第一类固液界面)温度相近且为同质金属,液固界面模糊,熔池在粘附作用下很难发生球化。

如上所述,熔池上下部之间的液液界面对阻碍上部熔池的球化作用明显。因此,在采用选择性激光熔化技术加工零件的时候,尽量采用跟金属粉末相同材质或能与金属液相溶材质的基板,可以通过调整工艺参数,保证对上一层有足够的重熔量,增大液液界面的方式来抑制或弱化球化效应的发生,使熔池稳定的固定在固体基底上。

2.4 球化反应的影响因素

SLM 成形过程中球化反应的影响因素总体来说可以分为两大方面:金属粉末自身特性的影响和加工过程环境及工艺参数的影响^[30]。

粉末本身特性对球化的影响较为明显,主要可分为以下两方面^[37-40]。1)粉末化学特性,如含粉末的成分、含氧量。以含氧量为例,随含氧量的增加熔池中金属球的尺寸将不断增大,最终将形成大尺寸球化,熔池表面漂浮的白色氧化物的量也会随之增加。2)粉末的物理特性,如粉末的颗粒形貌、颗粒度、松装密度等。颗粒较小的气雾化金属粉末的成形性能要好于形状不规则的水雾化金属粉末。因为前者的形状为规则的球形,松装密度大,相同的加工条件下,熔体的收缩量小,且润湿性好,利于熔体铺展。

加工过程中周围环境的氧含量也是影响球化的重要因素。在SLM成形过程中,氧元素的引入主要有两个方面:金属本身的氧含量和成形气氛中的氧含量。成形气氛中的氧容易与高温金属熔池发生反应,形成氧化膜,氧化膜不利于熔池与固体基底润湿、焊接,容易导致球化的产生。成形工艺参数对球化的影响主要

是通过影响液态金属的润湿性、熔池的温度等来实现的^[41-44]。熔池温度影响金属液粘度,粘度越低流动性越好,有利于金属液的铺展避免形成球化。激光功率及扫描速度决定线能量密度,线能量密度越高越有利于增加熔池温度和流动性,能有效抑制球化;对于连续无球化的扫描线,扫描间距对球化无明显影响^[45];采用能对加工表面进行重熔的扫描方式加工,可以在一定程度上减少球化;铺粉厚度应尽量小^[46],但一般要大于粉末粒径,通常选 20~60 μm 。

2.5 球化反应的危害

球化反应是 SLM 成形过程的常见现象,严重阻碍了该技术的进步与发展^[47-49]。其危害可以归纳为以下几方面: 1) 球化反应形成的大尺寸金属球会与铺粉辊摩擦,引起铺粉辊上下震动,导致铺粉不均匀;如果摩擦剧烈,将导致成形无法进行。2) 大尺寸金属球阻碍铺粉辊的运动,容易导致成形面在铺粉辊运动方向移动,使成形件倾斜变形,甚至导致零件的破裂。3) 球化反应会增加成形件的表面粗糙度,成形零件须经后续处理才能使用,难以保证零件的尺寸精度。4) 产生球化时,扫描轨迹不连续,会有大量孔隙产生,这大大降低了成形件的致密度,影响零件的力学性能。

3 结 论

球化反应是 SLM 成形过程中的常见现象,也是影响该技术推广应用的关键因素之一。通过调研发现,不同的学者根据不同的标准,将球化反应进行了不同形式的分类,以大尺寸球化和小尺寸球化的普遍适用性最强。每种球化现象的产生机理不尽相同,成形过程复杂、影响因素众多,尺寸较大的金属球容易导致成形件中出现裂纹、孔隙等缺陷,严重时还会影响加工过程中铺粉的均匀性,甚至阻碍铺粉辊的正常运动,导致加工过程中断或成形件倾斜,最终成形失败。尺寸较小的球则对成形过程影响不大。因此,在工艺参数、金属粉末的物化特性对球化反应的影响等方向进行更加深入的研究,对于解决选择性激光熔化成形过程中的球化问题显得十分必要。

参 考 文 献

- 1 Shi Yusheng, Lu Zhongliang, Zhang Wenxian, *et al.*. The technology and equipment of selective laser melting [J]. *China Surface Engineering*, 2006, 19(5): 150-153.
史玉升, 鲁中良, 章文献, 等. 选择性激光熔化快速成形技术与装备[J]. *中国表面工程*, 2006, 19(5): 150-153.
- 2 Lai Kexian, Yang Yongqiang, Zhang Linhua. Fiber laser and its application in rapid prototyping of selective laser melting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(3): 32-36.
来克娴, 杨永强, 张林华. 光纤激光器及其在选区激光熔化快速原型制造中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(3): 32-36.
- 3 Yang Yongqiang, Luo Ziyi, Su Xubin, *et al.*. Study on the manufacturing and influencing factors in selective laser melting of stainless steel thin-walled parts[J]. *Chinese J Laser*, 2011, 38(1): 0103001.
杨永强, 罗子艺, 苏旭彬, 等. 不锈钢薄壁零件选区激光熔化制造及影响因素研究[J]. *中国激光*, 2011, 38 (1): 0103001.
- 4 Fox P, Pogson S, Sutcliffe C J, *et al.*. Interface interactions between porous titanium/tantalum coatings produced by Selective Laser Melting (SLM) on a cobalt-chromium alloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(20): 5001-5007.
- 5 Kruth J P, Froyen L, Vaerenbergh J V, *et al.*. Selective laser melting of iron-based powder[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1): 616-622.
- 6 Yasa Evren, Deckers Jan, Kruth Jean-Pierre, *et al.*. Investigation of sectoral scanning in selective laser melting[C]. *ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 2010, 4: 695-703.
- 7 Osakada K, Shiomi M. Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(11): 1188-1193.
- 8 Louvis Eleftherios, Fox Peter, Sutcliffe Christopher J. Selective laser melting of aluminum components[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(2): 275-284.
- 9 Kruth J P, Mercelis P VanVaerenbergh J, Craeghs T. Feedback control of Selective Laser Melting[C]. *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping: Virtual and Rapid Manufacturing Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, 2007. 521-527.

- 10 Yang Yongqiang, Wang Di, Wu Weihui. Research progress on selective laser melting in metal parts[J]. Chinese J Laser, 2011, 38(6): 0601007.
杨永强, 王 迪, 吴伟辉. 金属零件选区激光熔化直接成型技术研究进展[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0601007.
- 11 Rehme O, Emmelmann C. Reproducibility for properties of selective laser melting[C]. Proceedings of the Third International WLT: Conference on Lasers in Manufacturing. Munich: WLT, 2005. 1-6.
- 12 Deng Qilin, Xie Anning, Ge Zhijun, *et al.*. Experimental researches on rapid forming full compacted metal parts by selective laser melting[C]. Materials Science Forum, 2006, 532: 428-431.
- 13 Wong Matthew, Tsopanos Sozon, Sutcliffe Chris J, *et al.*. Selective laser melting of heat transfer devices[J]. Rapid Prototyping Journal, 2007, 13(5): 291-297.
- 14 Yang Yongqiang, Huang Yanlu, Wu Weihui. One-step shaping of NiTi biomaterial by selective laser melting[C]. SPIE, 2007: 68250C.
- 15 Campanelli S L, Contuzzi N, Ludovico A D. Manufacturing of 18 Ni Marage 300 steel samples by selective laser melting [J]. Advanced Materials Research, 2010, 83: 850-857.
- 16 Zhang Dongyun. Model manufacturing process from aluminum alloys using selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(12): 1700-1704.
张冬云. 采用区域选择激光熔化法制造铝合金模型[J]. 中国激光, 2007, 34(12): 1700-1704.
- 17 Li Ruidi. Critical and Foundation Technology Study of Metal Powder in Selective Laser Melting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
李瑞迪. 金属粉末选择性激光熔化成形的关键基础问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- 18 Li Ruidi, Wei Qingsong, Liu Jinhui, *et al.*. Critical and foundation technology research in selective laser melting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 5: 26-31.
李瑞迪, 魏青松, 刘锦辉, 等. 选择性激光熔化成形关键基础问题的研究进展[J]. 航空制造技术, 2012, 5: 26-31.
- 19 Wang Li, Wei Qingsong, He Wenting, *et al.*. Influence of powder characteristics and process parameters on the formation of SLM[J]. Journal of Huazhong Science and Technology University (Natural Science Edition), 2012, 40(6): 20-23.
王 黎, 魏青松, 贺文婷, 等. 粉末特性与工艺参数对 SLM 成形的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 20-23.
- 20 Gu D D, Shen Y F. Balling phenomena during direct laser sintering of multi-component Cu-based metal powder[J]. J Alloy Compd, 2007, 432(1): 163-166.
- 21 Gu D D, Shen Y F. Balling Phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: metallurgical mechanisms and control methods[J]. Materials & Design, 2009, 30(8): 2903-2910.
- 22 Meng Guangbin, Gu Dongdong, Li Chuang, *et al.*. Forming process and performance of block TiC/Ti nanocomposites fabricated by selective laser melting[J]. Chinese J Laser, 2011, 38(6): 0603024.
孟广斌, 顾冬冬, 李 闯, 等. 选区激光熔化制备块体 TiC/Ti 纳米复合材料的成形工艺及性能[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603024.
- 23 Shen Y F, Gu D D, Pan Y F. Balling Process in selective laser sintering 316 stainless steel powder[J]. Key Engineering Materials, 2006, 315: 357-360.
- 24 Childs T H C, Hauser C, Badrossamay M. Mapping and modeling single scan track formation in direct metal selective laser melting[J]. Cirp Annal-Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 191-194.
- 25 Simchi A. Direct laser sintering of metal powders: mechanism, kinetics and microstructural features[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 428(1): 148-158.
- 26 Wu Zhengqiang, Lai Kexian. Status and development of metal parts in selective laser melting rapid prototyping technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(z3): 399-404.
吴峥强, 来克娴. 金属零件选区激光熔化快速成型技术的现状及发展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(z3): 399-404.
- 27 Sun Manlong. Microstructure and properties of Fe-base alloy fabricated using selective laser melting[C]. SPIE, 2002, 4426: 139-142.
- 28 Mumtaz K A, Hopkinson N. Selective laser melting of thin wall parts using pulse shaping[J]. Materials Processing Technology, 2010, 210(2): 279-287.
- 29 Kruth J P, Mercelis P, Vaerenbergh J V. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting [J].

- Rapid Prototyping Journal, 2005, 11(1): 26-36.
- 30 Gusarov A V, Yadroitsev I, Bertrand Ph, *et al.*. Heat transfer modeling and stability analysis of selective laser melting [J]. Appl Surf Sci, 2007, 254(4): 975-979.
- 31 Tolochko N K, Mozzharov S E, Yadroitsev I A, *et al.*. Balling processes during selective laser treatment of powders [J]. Rapid Prototyping Journal, 2004, 10(2): 78-87.
- 32 Wu Weihui, Yang Yongqiang, Wang Di. Balling phenomena in selective laser melting[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(5): 110-115.
吴伟辉, 杨永强, 王迪. 选区激光熔化成型过程的球化现象[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 110-115.
- 33 Wu Weihui, Yang Yongqiang, Lai Kexian. Process analysis of rapid prototyping with selective laser melting[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 35(3): 22-27.
吴伟辉, 杨永强, 来克娴. 选区激光熔化快速成型过程分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 22-27.
- 34 Shi Deke. Fundamentals of Materials Science[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1999.
石德珂. 材料科学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- 35 Gusarov A V, Smurov I. Two-dimensional numerical modeling of radiation transfer in powder beds at selective laser melting[J]. Appl Surf Sci, 2009, 255(10): 5595-5599.
- 36 Liu A, Chua C K, Leong K F. Properties of test coupons fabricated by selective laser melting[J]. Key Engineering Materials, 2010, 447: 780-784.
- 37 Abe F, Osakada K, Shiomi M, *et al.*. The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting [J]. Materials Processing Technology, 2001, 111(1): 210-213.
- 38 Wu Weihui, Yang Yongqiang, Huang Yanlu. Direct manufacture of Cu-based alloy parts by selective laser melting[J]. Chin Opt Lett, 2007, 5(1): 37-40.
- 39 Childs T H C, Hauser C. Raster scan selective laser melting of the surface layer of a tool steel powder bed[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2005, 219(4): 379-384.
- 40 Liu Jie, Yang Yongqiang, Wang Di, *et al.*. The optimization of computer aided process parameters in overhanging structure formed by selective laser melting[J]. Chinese J Laser, 2012, 39(5): 0503001.
刘杰, 杨永强, 王迪, 等. 选区激光熔化成型悬垂结构的计算机辅助工艺参数优化[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0503001.
- 41 Meier H, Haberland Ch. Experimental studies on selective laser melting of metallic parts[J]. Material Wissenschaft und Werkstofftechnik, 2008, 39(9): 665-670.
- 42 Chen Guangxia, Guan Kai. Research of metallic part fabrication by selective laser melting[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 120: 284-287.
- 43 Zaeh, Michael F Branner, Gregor. Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting[J]. Production Engineering, 2010, 4(1): 35-45.
- 44 Sutcliffe C, Brooks W, Cantwell W, *et al.*. The rapid manufacture of micro hierarchical structures by selective laser melting[C]. 24th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, 2005, 10: 1082-1088.
- 45 Simchi A, Pohl H. Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 359(1): 119-128.
- 46 Kruth J P, Froyen L, Van Vaerenbergh J, *et al.*. Selective laser melting of iron-based powder[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1-3): 616-622.
- 47 Yadroitsev I, Bertrand Ph, Smurov I. Parametric analysis of the selective laser melting process[J]. Appl Surf Sci, 2007, 253(19): 8064-8069.
- 48 Badrossamay M, Childs TH C. Further studies in selective laser melting of stainless and tool steel powders[J]. Int J Mach Tools Manuf, 2007, 47(5): 779-784.
- 49 Santos E C, Osakada K, Shiomi M, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of pure titanium models fabricated by selective laser melting[J]. Mechanical Engineering Science, 2004, 218(7): 711-719.