

高温钛合金微滴沉积成形有限元分析

李素丽, 魏正英, 卢秉恒

(西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 研究了多层微滴冷却至室温后其内部残余应力变化以及在一层金属微滴滴下时和原来已经完全冷却区域间的残余应力分布情况. 通过有限元分析方法对钛合金微滴沉积成形过程中应力应变情况进行模拟仿真, 以参数化设计语言建立热分析模型, 采用间接耦合的方式模拟应力应变关系, 即首先分析计算冷却区域的温度场, 然后将温度场结果数据以温度载荷的形式加入结构分析中. 结果表明: 从不同时刻温度等效云图可以看出, 熔滴滴落完成时温度扩散程度很小; 经过一段时间冷却后, 热量由液滴区域向已经冷却区域传递, 温度进一步扩散; 最后接近于室温. 从垂直和水平方向分析应力应变可以看出: 后续液滴滴落中间区域向下凹陷, 明显的出现了收缩变形. 在水平方向, 不同层之间温度相差很小, 后期整体冷却, 致使应力分布比较均匀.

关键词: 钛合金; 微滴沉积; 有限元分析; 应力应变

中图分类号: TG494 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.04.030

0 引言

金属微滴沉积 3D 打印技术是一种新型的快速成形方法^[1], 它的原理是通过计算机控制金属熔滴沉积装置和三维位移平台的运动, 使熔滴逐点、逐层沉积在基板上, 从而实现零件的 3D 增材制造. 熔滴沉积成形技术是一种新型快速成型技术, 其原理(如图 1 所示)是在坩埚中, 利用电阻丝对金属(粉末、丝材)进行加热使其熔化, 通过施加一定的脉冲压力使熔融金属从喷头流出, 根据计算机的控制, 使均匀喷出的熔滴在经过加热的基板上准确定位, 逐点逐层进行堆积, 成形出复杂的几何形状. 为了防止金属氧化, 整个装置处在氩气保护中, 熔滴形态变化用高速 CCD 相机进行拍摄记录.

该方法的特点是成形工艺简单、不需要工模具等辅助工装而且熔滴大小、滴落路径可控性好等优点, 适宜于成形复杂微小金属零件. 目前, 肖渊等^[2]对锡铅合金和铝合金材料的微滴沉积喷射装置进行了研究, 结合超声给粉技术^[3]用于非均质金属制件的微滴成形; 王永先^[4]利用可控电磁力作为驱动源, 实现了钎料的微滴沉积; 加拿大

多伦多大学^[5]以压缩气体作为驱动源, 实现了铝合金熔滴的沉积. Melissa Orme 等^[6]对均匀液滴沉积技术制造的结构件进行力学性能分析, 表明在基本不改变制件密度的情况下, 用铝滴沉积得到的制件比纯铝块抗拉强度提高 30%, 硬度提高 100%, 并且制件微结构得到显著细化. 而对于微滴沉积零件内部应力研究较少.

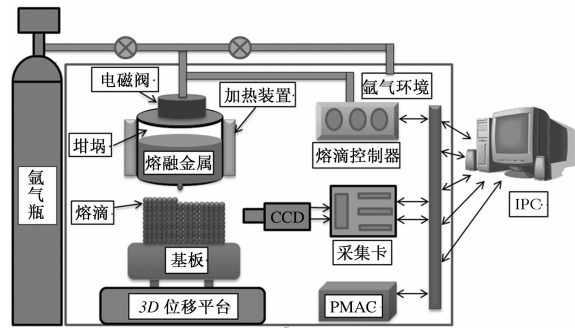


图 1 熔滴沉积原理图

Fig.1 Droplet principle diagram

笔者利用有限元分析方法对钛合金微型液滴成形热应力进行分析, 实现对不连续成型问题进行数值模拟、分析成型过程中的应力应变分布及其变化规律, 由此可为其他零件微滴沉积机理及

收稿日期:2014-03-30; 修订日期:2014-05-25

基金项目: 电力器材 3D 打印设备研制(20140530)

作者简介: 李素丽(1981-), 女, 山西太原人, 西安交通大学博士研究生, 主要从事熔融沉积 3D 方面的基础研究, E-mail:15802949318@163.com.

变形规律的研究提供理论依据和参考^[7].

1 钛合金 TC4 的选用原因

钛合金的特点:比强度高、使用温度宽范围、抗蚀性好和其他一些可利用的特性,是工业部门中广泛使用的结构材料. 由于钛合金与其它金属不可比,有着很大的优势. 笔者针对钛合金进行研究,分析过程中使用的物性参数如表 1 和表 2^[8-9].

表 1 钛合金高温热物性参数
Tab.1 The high temperature thermal physical property parameters of titanium alloy

温度/℃	热导率/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	比热/ (J · kg · K ⁻¹)	密度/ (kg · m ⁻³)
20	6.8	611	4 440
100	7.4	624	
200	8.7	653	
300	9.8	674	
400	10.3	691	
500	11.8	703	
600	12.4	708	
800	14.4	727	
1 000	15.8	751	
1 400	24.3	783	
1 600	22.2	898	

表 2 钛合金高温力学性能参数
Tab.2 The high temperature mechanics performance parameters of titanium alloy

温度/ ℃	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa	硬化模量/ GPa	热膨胀 系数
0	112	0.34	887	44	9.4E-6
200	104	0.34	668	41	
400	92	0.37	508	36	
600	76	0.39	212	32	
800	56	0.41	89	28	
1000	32	0.42	38	24	

2 建模

在成形过程中,小液滴的温度为 1 665 ℃,直径为 1 mm,下降速度 V 为 2 mm/s. 为了简化分析模型,以球形液滴直径为一个计量单位,分析长度方向的液滴数量为 9 个,高度方向一共沉积了 12 层,厚度方向的液滴数量为 1 个,其中下面 8 层液滴已经完全冷却,上面 4 层处在正在滴落的区域,没有冷却. 其具体三维分析模型如图 2 所示.

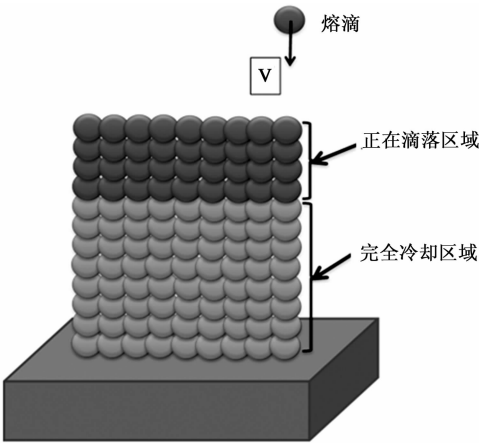


图 2 三维几何模型
Fig.2 3D geometric model

2.1 选择单元类型

单元类型选择 8 节点 SOLID70 各向同性单元, SOLID45 耦合分析结构单元. 采用定义热物性参数和结构物性参数的表格形式,使用双线性随动强化模型模拟钛合金的屈服过程. 但是,由于材料存在热胀冷缩,所以需要针对不同材料区域定义不同的参考温度,已经完全冷却的区域参考温度为室温 20 ℃,滴落的液滴参考温度为 800 ℃^[10].

2.2 施加载荷和边界条件

热分析,在分析区域外表面施加对流换热边界条件,一般金属对空气的对流换热系数为 11 ~ 30 W/(m² · K),这里取为 11 W/(m²/K). 室温取为 20 ℃.

结构分析,为了分析结构在热影响下的自由变形,在冷却区域底面选取 3 个节点,假设编号为 1,2 和 3. 在节点 1 上约束所有自由度,在节点 2 上仅约束 UZ 和 UY,在节点 3 上仅约束 UZ. 如图 3.

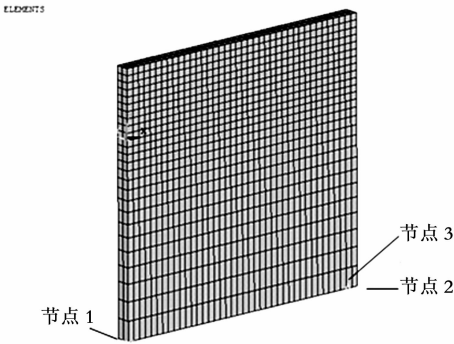


图 3 结构分析施加约束
Fig.3 Structural analysis applying constraints

3 温度场和应力场的有限元分析

液滴滴落时的初始为 1 665 ℃,使用单独的载荷步求解每个液滴滴落后对整体已经成形零件区域的影响.采用生死单元的方法,求解前将所有液滴区域单元进行“杀死”,每滴落一个液滴,激活相应区域的单元.选择这部分单元上的节点,使用自由度约束指定节点温度为 1 665 ℃,使用一个很小的时间步进行求解,然后删除刚才施加的温度自由度约束,此时液滴的初始温度已经施加上去,指定求解时间,进行后续计算.整体冷却时间取 10 h.

考虑到液滴低落速度很快,且仅关注整体冷却到室温后的残余应力,仅将液滴滴落完成后冷却过程的温度场数据导入结构分析中进行求解.分析类型设为静态,其它求解选项保持默认设置^[11].

3.1 温度场分析结果

液滴下落的变化过程可以分为 4 个区域:即:开始时当液滴温度在形核温度以上时,液滴冷却属于正常冷却过程,液滴温度下降较快;在达到形核温度后,温度又突然升高,出现再辉现象;随后液滴在冷却过程中,由于有凝固潜热的释放,温度下降的速度降低;凝固完全后,液滴温度低于固相线温度,凝固潜热已完全释放,属于固体的正常冷却过程,冷却速度又加快.图 4 为不同时刻温度等值线云图.从图中可以看出,2.5 s 时液滴滴落完成,温度扩散程度很小;经过 1 h 冷却后,热量由液滴区域向已经冷却区域传递,最高温度为 437.085 ℃;经过 5 h 后,温度进一步扩散,最高温度将为 65.355 ℃;经过 10 h 后,最高温度将为 23.133 ℃,接近于室温 20 ℃.这也说明了空气中冷却速度比较慢.

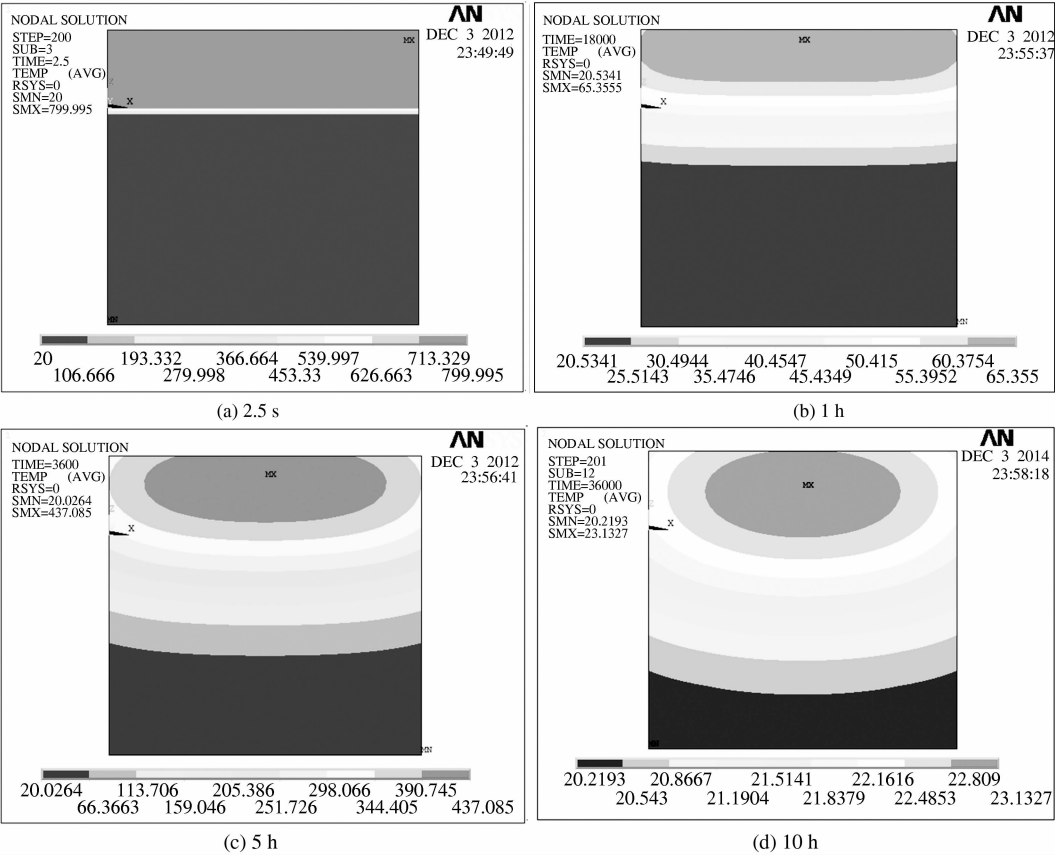


图 4 温度等值线云图
Fig.4 Temperature contour chart

3.2 应力场分析结果

微滴沉积过程中不可避免要考虑到:在沉积过程中,由于设备出现故障等原因,不能连续沉积,因此研究新一层液滴和原来已经完全冷却区

域间的残余应力分布情况势在必行.如图 5 为最后时刻整体几何变形分布云图.从图中可以看出,后滴落液滴区域出现了明显的收缩变形,中间区域向下凹陷,最大变形为 4.273 mm.第一层液滴

黏附在原先已经冷却的区域,变形程度小于上面其它滴落层.

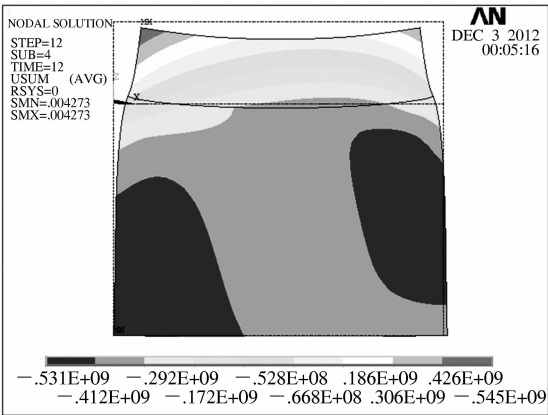


图 5 几何变形云图 (变形效果放大了 20 倍)
Fig.5 Geometrical deformation nephogram (20 times) deformation effect is magnified

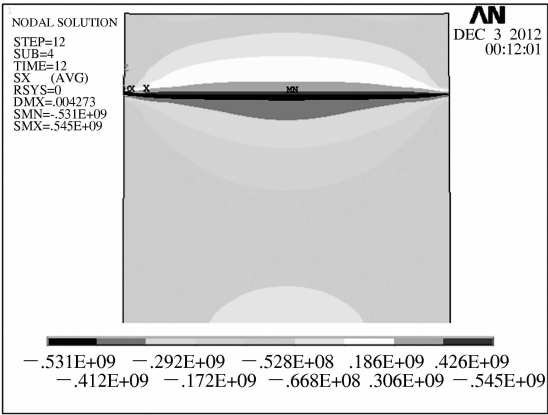


图 6 水平方向应力分布云图
Fig.6 Horizontal stress distribution deprogram

图 6 为水平方向应力分布云图. 应力为正表示受拉, 为负表示受压. 从图中可以看出, 在液滴区域和已经冷却区域分界面上存在明显的应力变化, 液滴区域靠近分界面附近受到拉应力, 最大为 545 MPa; 原先冷却区域靠近分界面处受到压应力, 最大为 531 MPa; 它们均小于 0 ℃ 对应的屈服应力 887 MPa, 这也表明第一层和原先冷却的区域不会开裂.

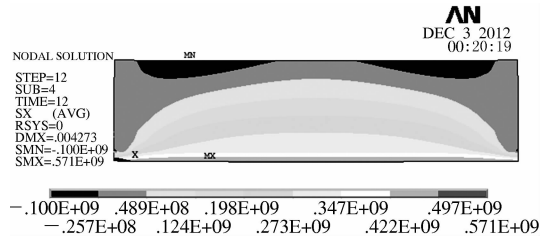


图 7 液滴区域水平方向应力分布云图
Fig.7 Cloud droplets regional horizontal stress istribution

图 7 为液滴区域水平方向应力分布云图. 从图中可以看出, 液滴区域内部水平方向应力沿厚度方向平滑过渡, 这可能是由于沉积过程中, 液滴低落速度很快, 不同层温度相差很小, 后期整体冷却, 致使应力分布比较均匀.

4 结论

- (1) 利用有限元标准化建模工具建立分析区域几何模型, 针对钛合金多层熔滴冷却至室温后内部残余应力分布以及新一层液滴和原来已经完全冷却区域间的残余应力分布两种工况下的微型液滴成形热应力情况进行分析.
- (2) 采用有限元分析模型, 分析了不同时刻温度等效云图. 可以看出, 熔滴滴落完成时温度扩散程度很小; 经过一段时间冷却后, 热量由液滴区域向已经冷却区域传递, 温度进一步扩散; 最后接近于室温. 大概需要经过 10 h, 说明了液滴在空气中冷却速度比较慢.

(3) 从垂直和水平方向分析应力应变可以看出: 后续液滴滴落中间区域向下凹陷, 明显的出现了收缩变形. 在液滴区域和已经冷却区域的分界面上存在明显应力变化, 在靠近分界面附近的液滴区域受到拉应力; 在水平方向, 液滴区域内部应力沿厚度方向平滑过渡, 这是由于熔滴沉积过程中, 液滴滴落速度很快, 不同层之间温度相差很小, 后期整体冷却, 致使应力分布比较均匀.

参考文献:

[1] TAO Yuan, YANG Fang, LNO Jun, et al. Based on stress wave driven metal droplets on-demand jet device development and research [J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49 (7): 162 - 168.

[2] XIAO Yuan, MINOIE M, HUANG Hua, et al. Pneumatic driving metal drop on-demand jet device design and implementation [J]. Journal of Beijing institute of technology university, 2010, 30 (7): 780 - 784.

[3] ZENG Xiang-hui, QI Le-hua, HUANG Hua, et al. Control system development and experimental study on ultrasonic vibration feeding [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24 (6): 1083 - 1088.

[4] WAVG Yong-xian. The electromagnetic drive solder micro-injection principle and experimental research [C]//Wuhan: huazhong university of science and technology, 2007.

[5] CHENG S X, LI Tie-gang, CHANDRA S. Producing molten metal droplets with a pneumatic droplet-on-demand generator [J]. Journal of Materials Processing

- Technology, 2005, 159(3): 295 – 302.
- [6] MELISSA O, ROBERT F. Smith. Enhanced Deposition Aluminum Properties by means of Precise Droplet and Engineering [J]. Journal of Manufacturing Science, 2000, 122: 484 – 493
- [7] CAO Wen-bin, MIYAMOTO Y. Freeform fabrication of aluminum parts by direct deposition of molten aluminum [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 173(2): 209 – 212.
- [8] HUANG Hua, MINOLE M. Ultrasonic vibration amplitude to trace the feed mechanism and the effects of powder rate [J]. Journal of mechanical engineering, 2009 (1): 267 – 272.
- [9] LIU Ji-chang, Li Li-jun. Laser cladding forming metal thin-walled structure experimental study [J]. Journal of mechanical engineering, 2004, 40 (10): 185 – 188.
- [10] ZHOU Zhao-feng, CHEN Ming. Numerical simulation of thermal stress of titanium alloy school form study [J]. Journal of nanjing university of aeronautics and astronautics, 2009 (10): 620 – 626.
- [11] ZHAO Dan, LIU Zhi-dong, TIAN Zong-jun. Laser remelting high temperature oxidation resistance coating on titanium alloy surface temperature field simulation [J]. Journal of heat treatment and assembly technology, 2007 (12): 23 – 29.

Finite Element Analysis of Titanium Alloy Droplet Deposition Forming

LI Su-li, WEI Zheng-ying, LU Bing-heng

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering of Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to study the cooling process the temperature field calculation and analysis area first, and then temperature field results data in the form of temperature load in structure analysis. Utilizing the general finite element analysis software ANSYS thermal stress forming process of TC4 titanium alloy droplets deposition changes are simulated. Based on the parametric design language APDL of ANSYS finite element analysis model, adopt the way of indirect coupling simulation of the thermal stress, the research on multi-layer droplet internal residual stress distribution after cooling to room temperature, and a new layer when the droplet drips and original cooling region has been completely between the residual stress distribution. The result shows that the finished temperature diffusion degree of molten droplets is small in the equivalent temperature from different time; After a period of time after cooling, heat from the droplet area to have the cooling area, temperature further proliferation; The last is close to room temperature. From the vertical and horizontal analysis of stress and strain, It can be seen the subsequent droplet drip area middle sag down, contraction deformation emerge. Between different layers in horizontal direction, the temperature difference is small. The stress distribution is more uniform at the late overall cooling.

Key words: titanium alloy; deposit forming; finite element analysis; thermal stress