

激光直接沉积 TA2/TA15 梯度材料弯曲性能的有限元模拟

胡悦¹, 刘莎莎¹, 程序^{1*}, 刘栋^{1,2}

¹北京航空航天大学材料科学与工程学院, 大型金属构件增材制造国家工程实验室, 北京 102206;

²煜鼎增材制造研究院有限公司, 北京 100025

摘要 采用激光直接沉积技术制备 TA2/TA15 梯度材料,研究了该梯度材料的显微组织演变及弯曲性能,并通过有限元模拟重点探讨了弯曲过程中梯度过渡区不同成分合金的应力-应变行为。结果表明:由底部 TA15 合金向上过渡至 TA2 合金时,微观组织由网篮 $\alpha+\beta$ 相逐渐向单相 α 相过渡,合金元素种类和 β 相体积分数逐渐减少, α 相体积分数逐渐增加。随着 Al 元素含量增加,显微硬度增大,抗弯强度由 964 MPa 增大至 2156 MPa。有限元应力场模拟结果表明,试样在弯曲变形过程中,顶部受到压应力作用,底部受到拉应力作用。与 TA15 试样相比,Al 元素含量减少会降低梯度材料的抗弯强度,但会大幅提升其塑性能力,并实现应力均匀过渡。在所有的试样中,GZ-3 试样的综合性能最优。

关键词 激光技术; TA2/TA15 梯度材料; 微观组织; 弯曲性能; 有限元模拟

中图分类号 TG495

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1202006

Finite Element Simulation on Bending Properties of TA2/TA15 Gradient Material by Laser Direct Deposition

Hu Yue¹, Liu Shasha¹, Cheng Xu^{1*}, Liu Dong^{1,2}

¹National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components, School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 102206, China;

²Yu Ding Additive Manufacturing Research Institute Co., Ltd., Beijing 100025, China

Abstract TA2/TA15 gradient material was prepared using the laser direct deposition technique. The microstructural evolution and bending properties of this material were investigated, and the stress-strain behaviors of the gradient-transition zone with different compositions were discussed by finite-element simulation. The results show that when the alloy composition transitions from TA15 of bottom to TA2, the microstructure gradually changes from an $\alpha+\beta$ basket-weave phase to a single- α phase, the types of alloy elements and β -phase volume fraction gradually decrease, and the α -phase volume fraction gradually increases. The microhardness and bending strength increase with the increase of Al-element content and the bending strength gradually increases from 964 MPa to 2156 MPa. The finite element stress field simulation results show that the top is subjected to compressive stress and the bottom is subjected to tensile stress during bending deformation of the specimen. Compared with the TA15 sample, the decrease of Al content will reduce the bending strength of the gradient material but greatly improve the plastic ability and achieve the uniform stress transition. Among all the samples, GZ-3 has the best comprehensive properties.

Key words laser technique; TA2/TA15 gradient material; microstructure; bending performance; finite element simulation

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

收稿日期: 2020-06-22; 修回日期: 2020-07-17; 录用日期: 2020-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(51701009)

* E-mail: chengxu@buaa.edu.cn

1 引 言

随着高机动性先进飞行器的快速发展,其内部整体构件不同位置的受力条件差异越来越大,导致应力分布不均衡,从而缩短了整个构件的服役寿命^[1]。依据服役条件设计符合要求的梯度材料,使其内部应力变化更平缓,可延长构件的使用寿命^[2]。梯度材料的传统制备方法主要包括热喷涂^[3]、气相沉积^[4]、粉末冶金^[5]、铸造^[6]和自蔓延高温合成^[7],但这些工艺具有一定的局限性,只能制备种类单一、形状简单、尺寸有限的梯度材料^[8]。激光直接沉积技术是通过高能激光熔化金属粉末使其在基板上逐层沉积来成形构件的,适合制备大尺寸、高性能及形状复杂的梯度材料^[9-11]。目前,人们已采用该技术成功实现了异种钛合金^[12]、钛合金/镍基合金^[13]、镍基合金/高强度钢^[14]、金属基复合材料^[15]等组织和性能差异较大的梯度材料的制备。

TA2 钛合金具有优异的延展性以及较低的强度,且冲压性能优良,易于加工;TA15 钛合金具有较高的强度^[16]。激光直接沉积制备的 TA2/TA15 梯度材料可用作高温与复杂应力环境下承受弯曲变形的关键结构件,如飞机隔框和壁板^[17]。目前,国内外针对激光直接沉积制备 TA2/TA15 梯度材料的研究主要集中在其拉伸性能及疲劳性能等方面。Liang 等^[18]研究了 TA2/TA15 梯度区的力学性能,结果发现,梯度区的拉伸强度高于 TA2 低于 TA15;他们还对比度区的断裂失效机制进行了分析,结果发现裂纹均产生于 TA2,并且梯度区材料的延伸率主要取决于 TA15 和 TA2 的界面结合强度以及 TA2 的晶粒尺寸。Zhan 等^[19]研究了激光沉积制备的新型 TA2/TA15 钛合金的疲劳行为,并

表 1 TA2 和 TA15 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TA2 and TA15 alloys

Alloy	Mass fraction /%										
	Ti	Al	Zr	Mo	V	C	Fe	Si	O	N	H
TA2	Bal.	—	—	—	—	0.10	0.30	—	0.25	0.05	0.015
TA15	Bal.	5.5-7.0	1.5-2.5	0.5-2.0	0.8-2.5	0.10	0.25	0.15	0.15	0.05	0.015

沉积试验使用的激光直接沉积系统包括 GS-TFL-8000 CO₂ 激光发射器、同轴送粉喷嘴和 BSF-2 送粉器。沉积过程中采用氩气作为保护气体,其氧含量低于 5×10^{-5} (体积分数)。

多道多层沉积试验示意图如图 1(a)所示。先在基板上沉积 TA15 粉末,然后混合不同比例的 TA2 和 TA15 粉末,沉积不同成分的过渡层,使每

对 TA2/TA15 试样进行了单轴拉伸和疲劳试验,试验结果表明,TA2/TA15 梯度区的杨氏模量、屈服应力和疲劳极限介于 TA2 和 TA15 之间。

由于梯度材料过渡区的成分及组织均存在差异,因此,弄清梯度材料在梯度过渡区不同位置的变形行为,对衡量材料的总体力学性能及梯度过渡区合金成分优化具有重要意义。目前,梯度材料弯曲性能的研究主要是通过三点弯曲试验与有限元模拟相结合的方式进行的。Roumina 等^[20]采用有限元模拟研究了梯度钢以及均质马氏体钢在弯曲载荷下的变形行为,结果发现,梯度钢较均质马氏体钢的弯曲率更小,表现出了优异的弯曲性能。Seifoori 等^[21]通过有限元模拟与试验相结合的方式研究了玻璃纤维增强聚合物和碳纤维增强聚合物的弯曲行为,模拟了不同位移载荷下构件内部的应力分布,研究结果表明,三点弯曲试验结果与有限元模拟结果的拟合误差小于 6%。Li 等^[22]通过有限元模拟和试验对镁合金三点弯曲性能进行了深入研究,分析了镁合金在弯曲过程中的应变分布以及中性层位移的模拟和试验结果。

本文选取用于框梁结构的激光直接沉积 TA2/TA15 梯度材料作为研究对象,研究了它的显微组织演变;同时,本文采用室温三点弯曲试验与有限元模拟相结合的方法,分析了不同过渡层在承受弯曲载荷时的变形行为和应力-应变分布,以便更好地解释弯曲过程中梯度材料过渡层的作用。

2 试验方法

2.1 多道多层沉积试验

本文采用激光直接沉积技术制备 TA2/TA15 梯度材料。TA2、TA15 合金的成分如表 1 所示。

一过渡层中的 Al 含量(质量分数,下同)按照 6%、2.5%、1.5% 依次递减,然后再沉积 Al 含量为 0% 的 TA2 粉末,最后再混合不同比例的 TA2 和 TA15 粉末,沉积不同成分的过渡层,使每一过渡层中的 Al 含量按照 2.5%、4%、6% 依次递增,最终均为 Al 含量为 6% 的 TA15。工艺参数如下:激光功率为 6~7 kW,光斑直径为 8~10 mm,激光扫描速

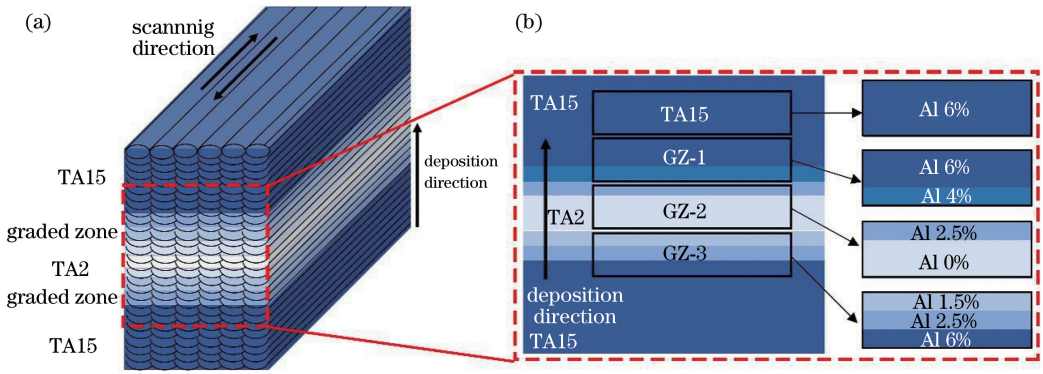


图 1 激光直接沉积过程示意图以及三点弯曲试验取样示意图

Fig. 1 Schematic of laser direct deposition process and sampling diagram for three-point bending experiment.

(a) Schematic of multi-channel and multi-layer deposition; (b) sampling diagram for three-point bending experiment

率为 500~600 mm/min,送粉率为 20 g/min。

2.2 显微组织分析与显微硬度测试

采用线切割工艺在试样过渡区切取一定尺寸的块状样品,将其热镶成直径分别为 22 mm 和 30 mm 的圆形块状试样,然后用 60 #、120 #、240 #、500 #、800 #、1000 #、2000 #、5000 # 砂纸研磨试样表面,再用抛光液(由 Fe₂O₃ 和 Cr₂O₃ 按 3:1 的质量比混合而成的悬浮液)进行机械抛光,最后用腐蚀液(由 HF、HNO₃ 和 H₂O 按 1:6:43 的体积比混合而成)进行腐蚀。腐蚀结束后,采用莱卡 DM4000 光学显微镜(OM)、JCM-6000Plus 扫描电镜(SEM)、Cam Scan 3400 扫描电镜(SEM)表征所有试样的微观组织。

采用 FM800 型显微维氏硬度计测量所有试样的显微硬度,多次测量取平均值,测试条件如下:加载载荷为 0.294 N,加载时间为 10 s。具体操作如下:从梯度区一侧开始,设定不同的排间距(非梯度区的排间距大,梯度区的排间距小),每排测量 3 个点。

2.3 室温弯曲性能测试

在图 1(b)所示的试样中取三点弯曲试样数根,试样尺寸为 3 mm×3 mm×35 mm,表面粗糙度 R_a≤0.8 μm。在室温环境下参考试验标准进行两端简支的三点弯曲试验。采用 SANS 电子万能试

验机(50 kN)进行位移控制方式的加载,加载速度为 1 mm/min,试验中的加载头和支座半径均为 2 mm,跨距为 30 mm。

在梯度过渡区,合金成分由 TA15 变为 TA2,由于合金中的 V、Zr、Mo 等元素含量较少且波动幅度较大,故选择 Al 元素含量标记试样种类。试样取样方式如图 1(b)所示,在 TA15 区域内取的样品记作 TA15;在梯度区内从上至下依次取样,试样分别记作 GZ-1、GZ-2、GZ-3。

2.4 三点弯曲试验的有限元模拟

根据三点弯曲试样的尺寸以及试验所用压辊、支辊的尺寸建立有限元几何模型。三点弯曲试样长 35 mm,宽 3 mm,沿沉积方向高 3 mm,压辊和支辊半径均为 2 mm。压辊的位置在试样长度方向的中心处,两支辊关于试样长度方向的中心呈面对称,间距为 30 mm,压辊和支辊分别位于试样高度方向的两侧,与试验中的情况完全一致。压辊和支辊简化为解析刚体,即简化为半径为 2 mm 的圆柱形解析刚体单元。试样为 3D 拉伸实体模型,选用 C3D8R 计算单元对试样进行网格划分,网格总数为 2520,如图 2 所示(RP 为参考点)。

对压辊和支辊施加约束,对支辊施加固支约束。

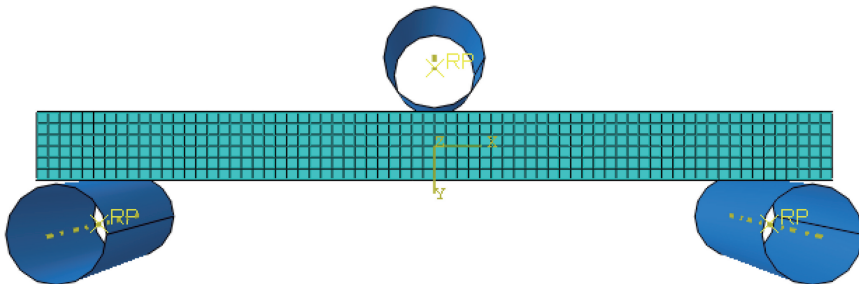


图 2 有限元模拟三点弯曲试验的几何模型及网格划分

Fig. 2 Geometric model and meshing of three-point bending experiment in finite element simulation

将在压辊上施加的载荷设为位移载荷,参考试验中的真实进给量设定位移载荷,同时完全限制另外两个方向的移动自由度和三个旋转自由度。压辊与试样之间的约束以及支辊与试样之间的接触约束均设定为面接触约束,即可以发生相互滑动但不能相互穿透,与试验情况一致。在赋予材料属性时,为简化模型,将试样沿沉积方向划分为三层,每层厚度均为 1 mm,按照成分测试 results 和室温拉伸试验获得的应力-应变曲线赋予对应的材料参数。沉积态 TA2、沉积态 TA15 以及 TA2/TA15 梯度材料的室温拉伸性能如表 2 所示。

选取 TA2、TA15 以及 Al 质量分数为 1.5%、
表 2 沉积态 TA2、TA15 及 TA2/TA15 梯度材料的
拉伸性能

Table 2 Tensile properties of as-deposited TA2,
TA15 and TA2/TA15 gradient materials

Material	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa
TA2	396	490
TA2/TA15 (mass fraction of Al is 1.5%)	561	653
TA2/TA15 (mass fraction of Al is 2.5%)	651	735
TA2/TA15 (mass fraction of Al is 4.0%)	763	862
TA15	946	1014

2.5%、4% 的 TA2/TA15 梯度材料作为代表成分,赋予模型相应的材料属性。参考实际的三点弯曲试样进行建模,TA15 模型对应 TA15 试样,其材料均为 TA15;GZ-1 模型对应 GZ-1 试样,此模型上两层为 TA15 材料,下层是 Al 质量分数为 4% 的 TA2/TA15 梯度材料(抗拉强度为 862 MPa);GZ-2 模型对应 GZ-2 试样,此模型上层是 Al 质量分数为 2.5% 的 TA2/TA15 梯度材料(抗拉强度为 735 MPa),下两层为 TA2 材料(抗拉强度为 490 MPa);GZ-3 模型对应 GZ-3 试样,此模型上层是 Al 质量分数为 1.5% 的 TA2/TA15 梯度材料(抗拉强度为 653 MPa)和 Al 质量分数为 2.5% 的 TA2/TA15 梯度材料(抗拉强度为 735 MPa),下层为 TA15 材料(抗拉强度为 1014 MPa)。

3 分析与讨论

3.1 梯度材料的显微组织

图 3 和图 4 为激光直接沉积 TA2/TA15 梯度材料中 TA15 合金和 TA2 合金区域的微观组织图。

图 3(a)为 TA15 区域的显微组织,可以观察到 α 板条纵横交错形成 $\alpha + \beta$ 网篮组织。TA2 区域的显微组织如图 3(b)所示, α 相没有规则的形状,且存在极少量 β 相,这是由沉积过程中新沉积层熔化部分前层材料造成的。这与 Qian 等^[8]观察到的 TA2/TA15 的显微组织略有差异。

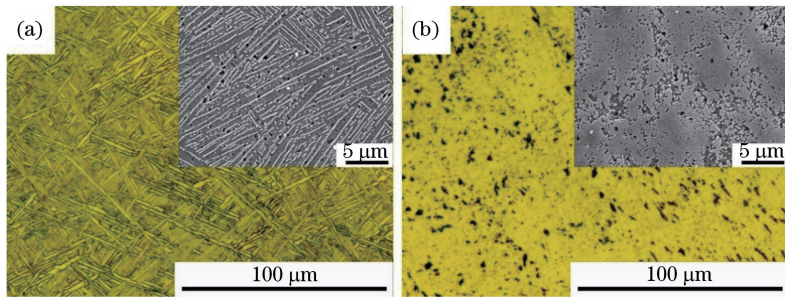


图 3 TA2/TA15 梯度材料中 TA15 和 TA2 合金区域的 OM 和 SEM 图。(a) TA15;(b) TA2

Fig. 3 OM and SEM images of TA15 and TA2 zones of TA2/TA15 gradient materials. (a) TA15; (b) TA2

图 4(a)~(d)为梯度材料过渡区的组织。图 4(a)为过渡区的宏观组织,可以明显看到过渡区分为 3 层;图 4(b)~(d)分别对应着过渡区的三层,此过渡区的下部为 TA15,上部为 TA2。图 4(b)中的显微组织依旧为网篮状,较 TA15 网篮组织中板条的 α 片层的平均宽度增大,且 α 板条的长宽比明显降低(长度约在 10 μm 以内),部分残余的 β 相呈点状,沿直线断续分布。在图 4(c)中可观察到明显的马氏体板条,板条呈典型的 V 字形,长度约为

100 μm ,马氏体周围分布细长的 α 板条(这可能是由于增材制造过程的冷速较快,所以形成了马氏体^[23]),马氏体的形貌随着过渡区组织的成分而变化。在后续沉积过程中,马氏体由于受到热影响而发生分解,形成了集束状 α 组织^[24],如图 4(d)所示。该过渡区中的 β 相多数呈点状或者细线状分布, α 板条的边界难以分辨,在右上角的 SEM 图中可以明显看到 β 相呈河流状分布, α 片层宽度较大。在后续沉积的 TA2 区域中可以观察到团状 α 相以及

极少量的 β 相,如图 3(b)所示。对于钛合金梯度材料,人们常用 Al 当量和 Mo 当量解释其微观组织的

演变^[25]。Liang 等^[18] 研究发现,Mo 当量的降低会增大 α 片层的宽度。

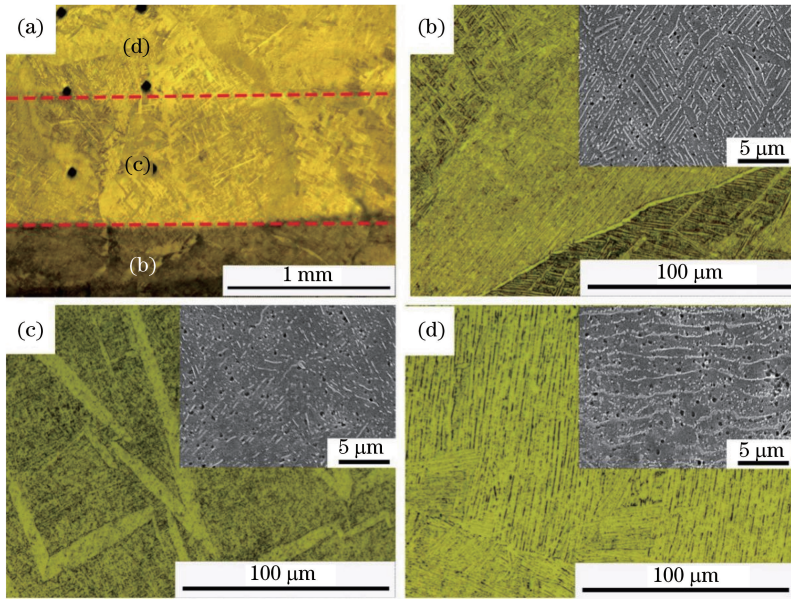


图 4 TA2/TA15 梯度材料过渡区的 OM 和 SEM 图。(a)过渡区的宏观组织;(b)(c)(d)不同过渡区的微观组织
Fig. 4 OM and SEM images of transition zone of TA2/TA15 gradient material. (a) Macrostructure image of transition zone; (b)(c)(d) microstructures of different transition zones

3.2 显微硬度

图 5 为激光直接沉积 TA2/TA15 梯度材料的显微硬度。从图中可以明显看到显微硬度随着铝元素的增加而增加:TA2 区的显微硬度为 (177 ± 13.3) HV;Al 质量分数为 1.5% 的 TA2/TA15 梯度材料的显微硬度为 (217 ± 25.2) HV,较 TA2 有小幅提高;Al 质量分数为 2.5% 的 TA2/TA15 梯度材料的显微硬度较 Al 质量分数为 1.5% 的 TA2/TA15 梯度材料略微增加;Al 质量分数为 4% 的 TA2/TA15 梯度材料的显微硬度较 Al 质量分数为 2.5% 的 TA2/TA15 梯度材料大幅提高;TA15 区

的显微硬度最高,为 (358 ± 8.7) HV。

TA2/TA15 的显微硬度由 (177 ± 13.3) HV 增大到 (358 ± 8.7) HV 的原因主要有两方面:1)固溶强化使 TA15 中的合金元素种类较 TA2 中的更多,导致晶格畸变增大,抗变形能力增强;2) β 相体积分数增加和 α 相体积分数减少使得 α/β 相界面增加,这与 Qian 等^[8] 和 Liang 等^[18] 得到的 TA2/TA15 过渡区的显微硬度结果一致。

3.3 三点弯曲试验的结果

三点弯曲试样的宏观变形图如图 6(a)所示,可以明显看到 TA15 试样在小变形下即发生了断裂,而 GZ-2 的变形程度最大且未发生断裂。

弯曲试样的位移-载荷曲线如图 6(b)所示,由图可知:所有试样的位移-载荷曲线均存在三个阶段;在弹性阶段,TA15 试样所受弯曲力最大,为 1292 N,然后依次为 GZ-1、GZ-3、GZ-2 试样。材料在塑性阶段的屈服点受其显微组织和合金成分的影响。

由图 6(d)可以明显看出,TA15 的位移在所有试样中是最小的,GZ-2 的位移最大并且是 TA15 的 3 倍。TA15 在高载荷下才开始变形,但其塑性较差,在较小的变形量下就断裂。梯度区试样 GZ-2 在低载荷下便发生弯曲,并且弯曲的程度最大,因为 GZ-2 试样底层材料为 TA2,TA2 合金的强度低但

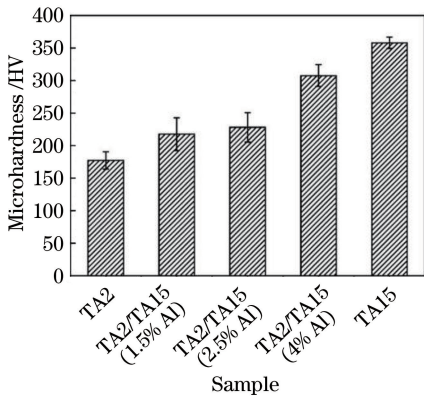


图 5 铝含量不同的 TA2/TA15 梯度材料的显微硬度
Fig. 5 Microhardness of TA2/TA15 gradient materials with different Al contents

塑性好^[17]。

图 6(c)给出了所有试样的平均抗弯强度,由图可知 TA15 的抗弯强度为 2156 MPa,梯度试样的抗弯强度范围为 964~1733 MPa。GZ-1 试样仅包含小部分梯度区域,过渡层中 Al 的质量分数分别为 6%和 4%,故其抗弯强度低于 TA15 试样。GZ-2 试样大部分区域为 TA2 材料,过渡层中 Al 的质量分数分别为 2.5%和 0,TA2 材料的强度低于 TA15 合金但塑性明显优于 TA15 合金,故其抗弯强度最低,在整个加载过程中可以发生较大变形而不易断

裂失效。GZ-3 试样涵盖了大部分梯度区,过渡层中 Al 的质量分数分别为 1.5%、2.5%、6%,并且微观组织形貌差异较大。在承受载荷过程中,该试样内部组织的变形协调复杂多样,最终在较大变形下发生断裂失效。

研究发现:成分越接近 TA15 的试样,其抗弯强度越高,但变形程度较低;成分越接近 TA2 的试样,其抗弯强度越低,塑性及变形程度越大;梯度过渡区试样的性能介于上述两者之间,抗弯性能及变形程度均居中,可协调塑性需求。

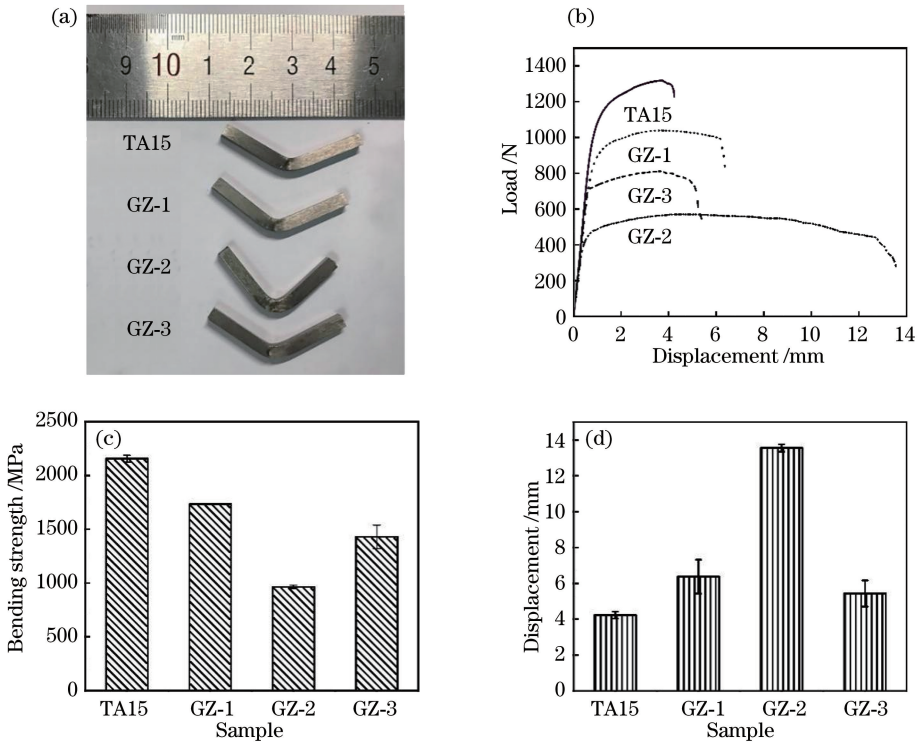


图 6 三点弯曲试验结果。(a)试样的宏观变形图;(b)试样的载荷-位移曲线;(c)试样的抗弯强度;(d)试样弯曲失效的位移

Fig. 6 Experimental result of three-point bending. (a) Macroscopic deformation of samples; (b) load-displacement curves of samples; (c) bending strength of specimens; (d) displacement of samples in bending failure

对弯曲测试失效后的试样表面进行观察,结果如图 7 所示。图 7(a)为 TA15 试样的失效表面。该试样顶部受压应力作用,试样中部为近中性层,裂纹从试样底端萌生后一直扩展至试样中部;试样底部受拉应力,从图 7(b)中可以看到在拉应力作用下试样表面产生了大量的微小裂纹,表面微小裂纹从底部萌生并垂直于拉应力向上扩展,各微小裂纹近似平行分布。

GZ-1 试样的失效表面与 TA15 试样失效表面大致相似,如图 7(c)所示,裂纹同样在试样底端萌生后一直扩展至试样中部,并在扩展过程中出现二次裂纹,而且二次裂纹的方向发生了变化,最终裂纹

终止于试样中上部。

GZ-2 试样的三点弯曲失效试样表面如图 7(d)所示,该试样的变形程度较大但并未断裂,试样表面可以观察到随变形产生的带状条纹及底部的微小裂纹,但在试样底部并未萌生垂直于拉应力方向的大裂纹,只是在试样中下部发现了微裂纹。

裂纹扩展路径的曲折度与显微组织密切相关^[26-27]。GZ-3 试样的裂纹扩展路径如图 8 所示,可以观察到图 8(a)中裂纹扩展路径的曲折度比图 8(b)中的大。GZ-3 试样的组织和成分变化较大,并且其裂纹扩展状况也比较复杂。图 8(a)是裂纹扩展路径的底部位置,能明显观察到 α 片层在应力作

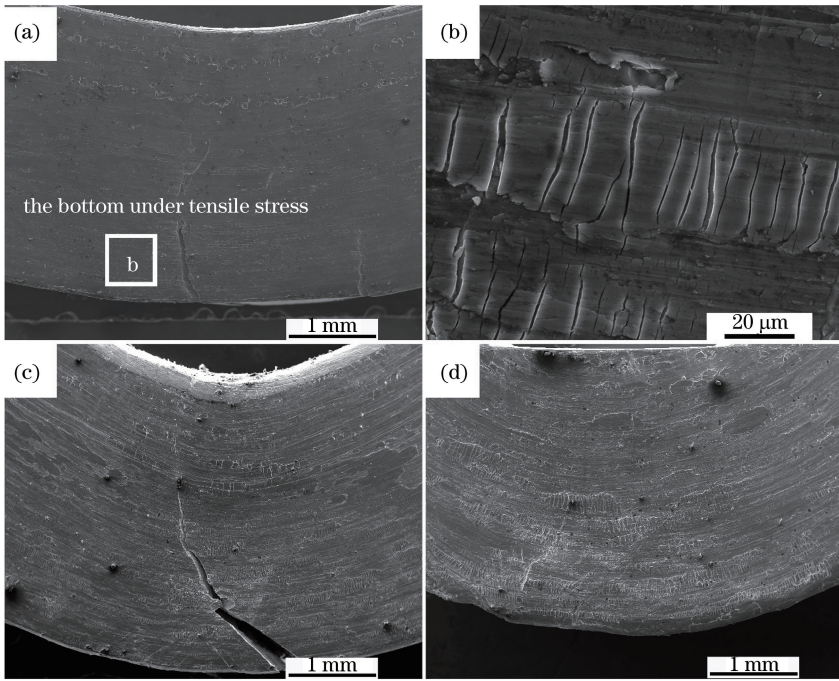


图 7 试样弯曲失效的 SEM 图。(a)(b) TA15 试样;(c) GZ-1 试样;(d) GZ-2 试样
Fig. 7 SEM images of samples after failure during bending experiment. (a)(b) TA15 sample;
(c) GZ-1 sample; (d) GZ-2 sample

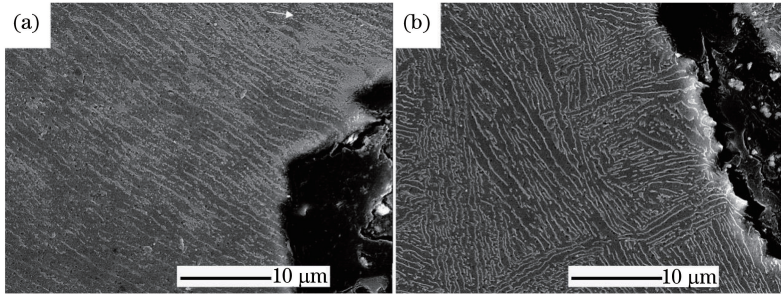


图 8 GZ-3 试样中裂纹的扩展路径图。(a)裂纹扩展路径的底部位置;(b)裂纹扩展路径的开始位置
Fig. 8 Images of crack propagation path of GZ-3 sample. (a) Bottom of crack propagation path;
(b) beginning position of crack propagation path

用下发生了微变形,并且裂纹扩展路径曲折,由于该区域 α 片层的宽度较大并呈集束状分布,导致裂纹扩展穿过集束状 α 片层需要很高的能量^[28],因此裂纹扩展路径的曲折度大。图 8(b)是裂纹扩展路径的开始位置,该位置处网篮组织的长宽比小,并且 α 片层的厚度较小,裂纹穿过片层消耗的能量低,故裂纹扩展路径较为平缓。

3.4 有限元模拟结果

对于三点弯曲测试,试样开始变形时,顶部受压应力作用,底部受拉应力作用。载荷直接作用位置(即试样在 x 方向上的中心)处的应力较大,而试样两侧的应力较小。本文选取 x 方向最大真实应变为 0.005、0.05、0.1 的梯度材料的有限元模拟应力分布进行分析。

由图 9(a)可以看出:随着应变增大,TA15 模型的应力场逐渐增大,并且应变为 0.05 时 TA15 模型底部开始出现裂纹,此时的拉应力超过了 TA15 的抗拉强度(灰色区域);随着应变继续增大,裂纹继续扩展,可以明显看到最大应变为 0.1 时的裂纹扩展区域增大,最终将导致试样断裂失效。当合金成分从 TA15 过渡到 TA2 时,材料的弹性模量和屈服强度均下降^[17]。

图 9(b)中 GZ-1 模型底部 Al 的质量分数为 4%,中下部在应变为 0.05 时的拉应力超过了底部材料的抗拉强度,因而出现了微裂纹(灰色区域)。随着应变增大,应力场逐渐增大,当最大应变为 0.1 时,裂纹扩展区域增加。

如图 9(c)所示,GZ-2 模型在所有模型中的应

力水平最低。该模型顶层是 Al 质量分数为 2.5% 的 TA2/TA15 梯度材料,中间层和底层为 TA2,TA2 的弹性模量和屈服强度较小,在较低拉应力水平下该试样就开始屈服变形,顶层梯度材料受压产生较大的压应变,底层 TA2 出现拉应力集中;应变增大到 0.1 时发现裂纹开始萌生,并且之后应变增大试样也不会失效,这是由于 TA2 的塑性优异,起到了改善应力分布的作用。

图 9(d)所示的是 GZ-3 模型的应力场分布,该模型的顶层是 Al 质量分数为 1.5% 的 TA2/TA15 梯度材料,中层是 Al 质量分数为 2.5% 的 TA2/TA15 梯度材料,底层是 TA15 材料。GZ-3 的塑性优于 TA15,因此该模型整个区域的拉应力水平均低于图 9(a)所示的 TA15 模型,最大应变为 0.05 时顶部和中部的梯度材料起到了调控应力的作用。

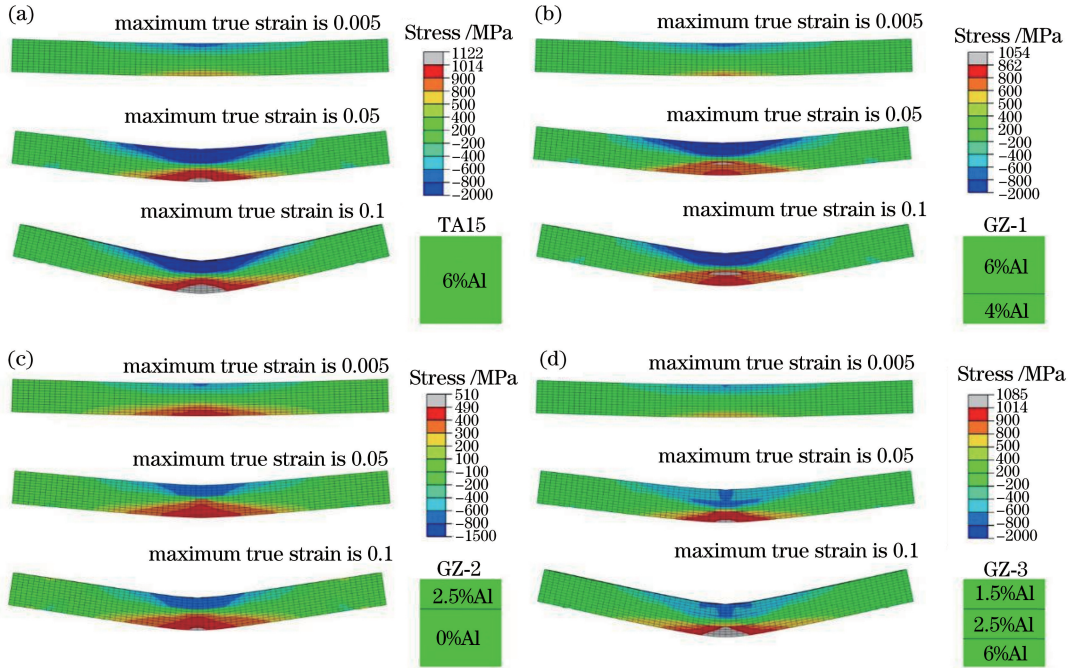


图 9 x 方向上最大真实应变为 0.005、0.05、0.1 时有限元模拟梯度材料的应力场分布图。

(a) TA15 模型;(b) GZ-1 模型;(c) GZ-2 模型;(d) GZ-3 模型

Fig. 9 Stress field distribution diagrams of gradient materials obtained by finite element simulation when the maximum true strain in x direction is 0.005, 0.05, and 0.1. (a) TA15 model; (b) GZ-1 model; (c) GZ-2 model; (d) GZ-3 model

图 10 为梯度材料在不同外加载荷下的应力分布。从图 10 中可以明显看出,随着外加载荷增大,梯度材料底部和顶部的应力均增大,且底部增大的幅度远大于顶部。由图 10(a)可以明显看出,随着外加载荷增大,TA15 底部的应力逐渐增加,在外加载荷为 600 N 时 TA15 并未明显变形。从图 10(b)中可看出,在外加载荷为 600 N 时,GZ-1 的应力场明显弱于 TA15,这是因为其底部是 Al 质量分数为 4% 的梯度材料,该材料改善了应力分布。由图 10(c)可以发现,TA2 在外加载荷为 600 N 时已经失效,其在载荷为 200 N 和 400 N 时的位移图如图 6(b)所示,其应力是所有材料中最小的,这是由于 TA2 的抗弯强度较弱但塑性优异。由图 10(d)可知,在外加载荷为 400 N 和 600 N 时,GZ-3 顶部和底部的应力均弱于 TA15,这是由于该试样顶部的

过渡层改善了应力分布。

3.5 三点弯曲试验与有限元模拟

图 11 为三点弯曲试验与有限元模拟得到的 TA15 试样的载荷-位移曲线,可以看出,有限元模拟和三点弯曲试验得到的载荷-位移曲线在弹性阶段吻合得较好,而塑性阶段两者出现了一定偏差。在塑性阶段,材料的性能与微观组织密切相关,而有限元无法模拟材料的微观组织,因此塑性阶段的模拟存在一定偏差。图 6 中不同梯度材料的失效位移不同,这与微观组织密切相关。材料失效后的裂纹扩展路径与不同梯度材料的微观组织密切相关,其中 TA15、GZ-1、GZ-3 失效后出现了长裂纹,而 GZ-2 失效后仅出现了微裂纹,并未发生断裂。这些裂纹均是在载荷作用下产生的,而有限元模拟可以得到不同模型材料在弯曲过程中的应力场分布,为材

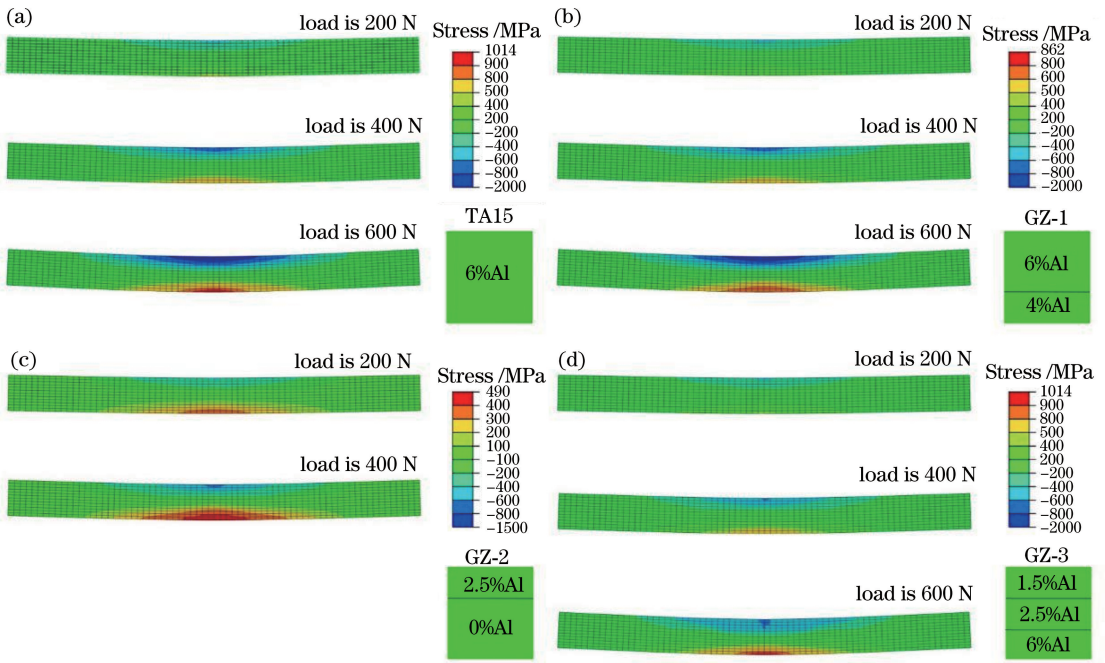


图 10 外加载荷分别为 200,400,600 N 时有限元模拟梯度材料的应力场分布图。

(a) TA15 模型;(b) GZ-1 模型;(c) GZ-2 模型;(d) GZ-3 模型

Fig. 10 Stress field distribution of gradient materials obtained by finite element simulation when the load is 200 N, 400 N, and 600 N. (a) TA15 model; (b) GZ-1 model; (c) GZ-2 model; (d) GZ-3 model

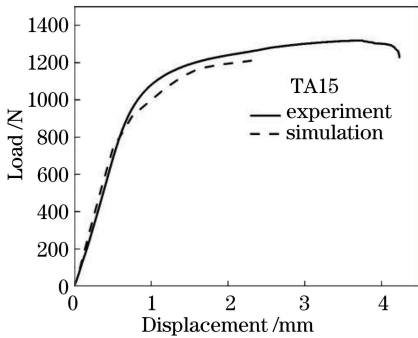


图 11 三点弯曲试验与有限元模拟得到的 TA15 试样的
载荷-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of TA15 sample obtained by three-point bending test and finite element simulation
材料的弯曲变形分析提供更多的理论依据。通过有限元模拟得到的不同载荷下材料的应力分布如图 10 所示,其中 TA2 的应力值在所有模型中是最小的,但其在外加载荷为 600 N 时便已失效。图 9 所示为最大真实应变为 0.005、0.05、0.1 时有限元模拟梯度材料的应力分布图,其中 GZ-3 模型中含有三个不同 Al 含量的过渡层,通过应力分布不仅可以看到过渡区应力的变化,并且对比应力分布可以具体分析材料的失效过程。因此,将有限元模拟与三点弯曲试验相结合不仅可以从微观组织角度上分析材料失效的原因,也可以得到失效时的应力分布,为合

理调控成分提供参考。

4 结 论

TA2/TA15 梯度材料由底部 TA15 向 TA2 过渡时,微观组织由网篮 $\alpha+\beta$ 相逐渐向单相 α 相过渡, β 相的含量逐渐减少。梯度区的显微硬度和抗弯强度均随 Al 含量的增加而增大,显微硬度由 (177 ± 13.3) HV(TA2)增大到 (358 ± 8.7) HV(TA15),抗弯强度由 964 MPa 逐渐增大至 2156 MPa。

应力场的有限元模拟结果表明,应力分布与合金成分密切相关。相比 TA15 试样,梯度材料平衡了强度与塑性,其组织与成分的均匀过渡降低了梯度材料受力过程的应力集中。GZ-3 的综合性能最优。

TA2/TA15 材料的抗弯强度与其微观组织及 Al 元素含量密切相关,Al 元素含量影响着材料的微观组织,而微观组织又影响弯曲过程中裂纹的萌生及扩展。因此,Al 元素含量影响着材料的应力分布。合理调控 Al 元素含量分布不仅可以提高材料的综合性能,更能使其在弯曲变形过程中发挥重要作用。

参 考 文 献

[1] Wang R J, Cheng H M, Li J Y. Stress strain

- analysis of notched specimen based on material property gradient [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 31: 360-365.
- [2] Larson E A, Ren X D, Adu-Gyamfi S, et al. Effects of scanning path gradient on the residual stress distribution and fatigue life of AA2024-T351 aluminium alloy induced by LSP [J]. *Results in Physics*, 2019, 13: 102123.
- [3] Khor K A, Dong Z L, Gu Y W. Plasma sprayed functionally graded thermal barrier coatings [J]. *Materials Letters*, 1999, 38(6): 437-444.
- [4] Kawase M, Tago T, Kurosawa M, et al. Chemical vapor infiltration and deposition to produce a silicon carbide-carbon functionally gradient material [J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, 54 (15/16): 3327-3334.
- [5] Canakci A, Varol T. Microstructure and properties of AA7075/Al-SiC composites fabricated using powder metallurgy and hot pressing [J]. *Powder Technology*, 2014, 268: 72-79.
- [6] Pasha B A M, Mohamed K. Taguchi approach to influence of processing parameters on erosive wear behaviour of Al7034-T6 composites[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27 (10): 2163-2171.
- [7] Ghorbantabar Omran J, Shafiee Afarani M, Sharifitabar M. Fast synthesis of $MgAl_2O_4$ -W and $MgAl_2O_4$ -W-W2B composite powders by self-propagating high-temperature synthesis reactions[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(6): 6508-6513.
- [8] Qian T T, Liu D, Tian X J, et al. Microstructure of TA2/TA15 graded structural material by laser additive manufacturing process [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(9): 2729-2736.
- [9] Santos E C, Shiomi M, Osakada K, et al. Rapid manufacturing of metal components by laser forming [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(12/13): 1459-1468.
- [10] Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500002.
顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造 [J]. *中国激光*, 2020, 47 (5): 0500002.
- [11] Yao Y S, Wang J, Chen Q B, et al. Research status of defects and defect treatment technology for laser additive manufactured products [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(10): 100004.
姚燕生, 汪俊, 陈庆波, 等. 激光增材制造产品缺陷及其处理技术研究现状 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(10): 100004.
- [12] Yan Z Y, Li Z, Zhou Q J, et al. Microstructure evolution of TA15-Ti₂AlNb double alloy by laser solid forming[J]. *Applied Laser*, 2019, 39(5): 785-791.
严振宇, 李祚, 周庆军, 等. 激光立体成形 TA15-Ti₂AlNb 双合金组织演化 [J]. *应用激光*, 2019, 39 (5): 785-791.
- [13] Lin X, Yue T M, Yang H O, et al. Solidification behavior and the evolution of phase in laser rapid forming of graded Ti6Al4V-Rene88DT alloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, 38(1): 127-137.
- [14] Carroll B E, Otis R A, Borgonia J P, et al. Functionally graded material of 304L stainless steel and inconel 625 fabricated by directed energy deposition: characterization and thermodynamic modeling[J]. *Acta Materialia*, 2016, 108: 46-54.
- [15] Hu Y B, Cong W L. A review on laser deposition-additive manufacturing of ceramics and ceramic reinforced metal matrix composites [J]. *Ceramics International*, 2018, 44(17): 20599-20612.
- [16] Qin L Y, Xu L L, Yang G, et al. Effect of annealing method on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloys by laser deposition manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0302004.
钦兰云, 徐丽丽, 杨光, 等. 退火方式对激光沉积 TA15 钛合金组织及力学性能的影响 [J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0302004.
- [17] Liang Y J, Liu D, Wang H M. Microstructure and mechanical behavior of commercial purity Ti/Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V structurally graded material fabricated by laser additive manufacturing [J]. *Scripta Materialia*, 2014, 74: 80-83.
- [18] Liang Y J, Tian X J, Zhu Y Y, et al. Compositional variation and microstructural evolution in laser additive manufactured Ti/Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V graded structural material [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2014, 599: 242-246.
- [19] Zhan Z X. Experiments and numerical simulations for the fatigue behavior of a novel TA2-TA15 titanium alloy fabricated by laser melting deposition [J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 121: 20-29.
- [20] Roumina R, Bruhis M, Masse J P, et al. Bending properties of functionally graded 300M steels [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2016, 653: 63-70.
- [21] Seifoori S, Mirzaei M, Afjoland H. Experimental and FE analysis for accurate measurement of

- deflection in CFRP and GFRP laminates under bending[J]. *Measurement*, 2020, 153: 107445.
- [22] Li F F, Fang G. Modeling of 3D plastic anisotropy and asymmetry of extruded magnesium alloy and its applications in three-point bending[J]. *International Journal of Plasticity*, 2020, 130: 102704.
- [23] Farabi E, Hodgson P D, Rohrer G S, et al. Five-parameter intervariant boundary characterization of martensite in commercially pure titanium [J]. *Acta Materialia*, 2018, 154: 147-160.
- [24] Xin S W. Inductions and discussions of solid state phase transformation of titanium alloy (V)-talking about phase and phase-transformation[J]. *Titanium Industry Progress*, 2013, 30(3): 12-15.
辛社伟. 钛合金固态相变的归纳与讨论(V): 相与相变谈[J]. *钛工业进展*, 2013, 30(3): 12-15.
- [25] Collins P C, Banerjee R, Banerjee S, et al. Laser deposition of compositionally graded titanium-vanadium and titanium-molybdenum alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 352(1/2): 118-128.
- [26] Sarrazin-Baudoux C. Abnormal near-threshold fatigue crack propagation of Ti alloys: role of the microstructure[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(7): 773-782.
- [27] Wang Y F, Chen R, Cheng X, et al. Effects of microstructure on fatigue crack propagation behavior in a bi-modal TC11 titanium alloy fabricated via laser additive manufacturing [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(2): 403-408.
- [28] Yang G, Liu J P, Qin L Y, et al. Study on microstructure and high cycle fatigue property of laser deposited TA15 titanium alloy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1106003.
杨光, 刘佳蓬, 钦兰云, 等. 激光沉积 TA15 钛合金显微组织及高周疲劳性能研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1106003.