

GH4169/K418B 复合及功能梯度材料性能研究

王振忠 肖宇航 高凯 黄雪鹏
(厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 基于激光同轴送粉 LENS 方式对 GH4169/K418B 两种材料分别进行了复合材料及功能梯度材料的制备, 并通过对其试验样件进行微观组织分析及力学性能测试, 研究了不同比例成分复合材料及功能梯度材料的各项性能参数, 结果表明: 与纯 GH4169 材料相比, 当 GH4169/K418B 比例为 80%/20% 时, 其弹性模量提高了 64.1%, 屈服强度提高了 22.8%, 抗拉强度提高了 23.5%, 而当比例 K418B 比例过高时, 其力学性能会显著下降; 功能梯度材料由于其成分上的梯度特性, 在性能上表现出了“取长补短”的选择特性, 其弹性模量为 80.1 GPa、屈服强度为 567.67 MPa、抗拉强度为 790 MPa, 各项性能均处于各复合材料的优秀水平, 可以适用于航空航天领域中对各项性能均有一定要求的复杂场景。

关键词: 激光近净成型; 金属增材制造; 功能梯度材料; 复合材料; 力学性能测试

中图分类号: TG141, TG13, TH161+.1 **文献标识码:** B

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.08.014

Research on GH4169/K418B composite and functionally gradient materials

WANG Zhenzhong, XIAO Yuhang, GAO Kai, HUANG Xuepeng

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, CHN)

Abstract: Based on the laser coaxial powder feeding LENS method, the composite materials and functional gradient materials of GH4169/K418B were prepared. The elastic modulus of GH4169/K418B was increased by 64.1% when the ratio of GH4169/K418B was 80%/20% compared with the pure GH4169. The yield strength was increased by 22.8%, the tensile strength was increased by 23.5%. When the proportion of K418B exceeded the threshold, the mechanical properties of functional gradient materials was significantly reduced. Due to the gradient characteristics of its composition, the performance of GH4169/K418B functionally gradient materials showed the “learning from each other”. Its elastic modulus of 80.1 GPa, yield strength of 567.67 MPa, tensile strength of 790 MPa, the performance is at the excellent level of each composite material, can be applied to the aerospace field has certain requirements for various performance of the complex scene.

Keywords: laser near-net molding; metal additive manufacturing; functional gradient materials; composites; mechanical properties testing

近几十年来, 随着航空航天技术的不断发展, 单一的材料已经逐渐难以满足飞行器、航空发动机综合性能的要求, 20 世纪 80 年代, 具有组织和结构沿某一方向连续获准连续变化的新型功能性复合材料——功能梯度材料 (functionally gradient material, FGM) 的概念由日本学者提出并迅速得到发展^[1-2]。功能梯度材料是一种非均质的新型工程材料, 最早被应用于航天飞机的外蒙皮及发动机^[3-4]。功能梯度材料的制备方法主要有化学气相沉积、等离子喷涂、

放电等离子体烧结、粉末冶金和激光熔化沉积^[5-6]。

金属增材制造技术是由传统增材制造工艺发展而来的, 是制备功能梯度材料的一种有效方法, 能用于制备功能梯度材料的金属增材制造技术包括立体光固化、材料挤出、粉末床熔融和定向能量沉积^[7-8]。光固化成型技术 (SLA) 于 1983 年被美国的查尔斯·胡尔 (Charles Hull) 提出, 全球首个 3D 打印的零件也应运而生^[9-10], Larsen E 等基于 SLA 技术, 使用不同颜色光交替照射混杂光敏树脂, 制

备了强度可调的功能梯度材料^[11]。激光熔融沉积技术(FDM)是制备功能梯度材料最常用的技术之一,属于融化材料挤出的增材制造工艺, Srivastava M等通过调整FDM参数,制备了各区域属性不同的ABS功能梯度材料^[12-13]。Maskery I等基于选择性激光烧结技术(SLS),制备了多孔的功能梯度材料,并对其孔隙梯度与机械性能的关系进行了研究^[14]。Durejko T等通过激光近净成形技术制备了圆管状的Fe-Al功能梯度材料,并研究了打印参数对工件精度和材料属性的影响^[15]。

激光熔融沉积制备功能梯度材料原理如图1所示,图中为材料A逐渐过渡到材料B的过程,材料A的比例不断降低,材料B的比例不断上升,直到最后完全变成材料B,实现功能梯度材料的制备。

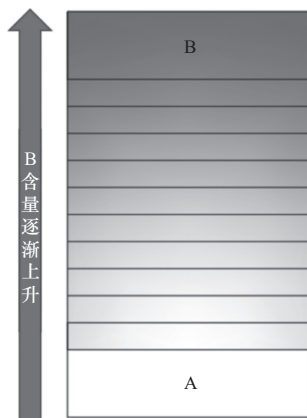


图1 功能梯度材料原理示意图

GH4169是一种Ni基变形高温合金,其基体为Ni-Gr固溶体,强化相为 Ni_3Nb 和 $Ni_3(Al,Ti,Nb)$,由于其微观组织稳定性好、有害相少且激活能大,所以其具有高强度、较好的塑性、韧性、抗氧化性抗高温性以及抗腐蚀性等优点,可以适应在高温、高压等恶劣的工作环境,故GH4169已经在航空、航天等领域具有不可或缺的地位^[16-17]。K418B是K418改型的镍基铸造高温合金,与K418合金相比,其组成成分中碳和钛的含量较低,具有组织稳定性更好,室温塑性和冲击韧性较高的优点,此外,该合金成分较简单,不含钴,成本较低,一般用于在900℃以下工作的燃气涡轮导向叶片和转子叶片以及整铸涡轮,也可做截面较大的其他高温下用的大型铸件,是一种常用的航空材料^[18-19]。

在航空航天领域,不同零件的工作环境复杂且具有极端性,功能梯度材料的应用虽然能够有效地解决传统制造业难以满足的需求,但是现阶段对于

功能梯度材料的制备、成形及其性能还需深入探索^[20]。本文基于激光近净成型技术,通过控制送粉速度调整送粉比例,制备了GH4169/K418B复合及功能梯度材料,并就GH4169/K418B复合及功能梯度材料的性能进行了研究,探索了该材料的应用环境及前景,以满足航空航天领域某些特定场合应用需要。

1 试验方法

试验采用厦门大学航空航天学院研制开发的LV650C型增减材复合五轴加工中心,该机床具有快速原型制造、高精度、高刚性的特点,不仅具有在单位时间内实现高速成形、高速切削的性能,而且被加工零件获得高精度和低表面粗糙度,能够满足航空航天行业零件加工要求。试验过程使用氩气进行保护,试验前用金相砂纸打磨基板表面使其平整,然后用无水乙醇擦拭基体表面。

GH4169合金和K418B合金两种材料均产自江苏威拉里新材料科技,两种金属粉末均为球状粉末,其粒度均在75~150 μm,粉末组成化学成分见表1、表2。

表1 GH4169合金粉末化学成分 (质量分数,%)

成分	Cr	Ni	Mo	Nb	Co	Fe
质量分数	17.0~21.0	50.0~55.0	2.8~3.3	4.75~5.5	≤1.0	余量

表2 K418B合金粉末化学成分 (质量分数,%)

成分	Al	Nb	Ti	Cr	Mo	Ni
质量分数	5.5~6.4	1.8~2.5	0.5~1.0	11.5~13.5	3.8~4.8	余量

(1) 金相组织观察

利用线切割将激光熔化沉积得到的试样沿垂直于沉积方向切开,将切开的试样利用树脂镶嵌,首先用120目和240目的金相砂纸对试样表面进行粗磨,然后分别用600目、1500目、2000目、3000目的砂纸进行细磨,当试样表面没有明显划痕之后,利用金刚石抛光剂在金相抛光机上将试样表面进行抛光,直至试样表面呈现镜面。将抛光好的试样进行腐蚀,然后用无水乙醇将清水冲洗干净,并迅速吹干。采用型号为VHX-5000的超景深金相显微镜观察激光熔化沉积试样的宏观形貌。

(2) XRD物相分析

利用日本岛津的XRD-7000型X射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)对试验样件的物相进行

分析, 该设备采用铜靶, X射线波长 $\lambda=0.154\ 059\ 8\ \text{nm}$, 电流为 $30\ \text{mA}$, 电压为 $40\ \text{kV}$, 扫描速度为 $10\ \text{deg/min}$, 扫描角度为 $-12^\circ\sim 164^\circ$ 。

(3) 力学性能测试

使用济南天华 WDW-100E 万能拉伸机对试验样件进行拉伸试验, 通过线切割将薄壁件试样沿平行于扫描方向切割为尺寸如图 2 所示的拉伸试样, 拉伸试验之前分别用 800 目、1 000 目的砂纸对试样的平行部分进行打磨, 使其表面没有明显划痕, 然后进行拉伸试验。

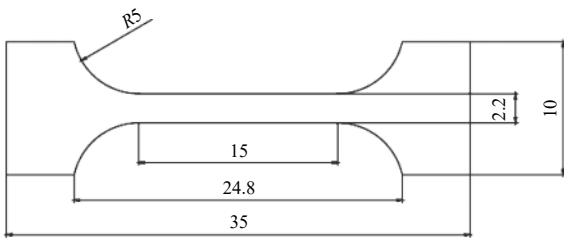


图 2 拉伸试样尺寸 (单位: mm)

2 复合材料实验

2.1 复合材料制备

复合材料的制备主要是通过控制送粉器双筒送粉速度来调整复合材料比例, 试验前在送粉器双筒中分别放入 GH4169 粉末和 K418B 粉末, 通过送粉器外控模块使双筒送粉速度在保证整体送粉量不变的情况下, 调整送粉比例, 以达到输送粉末为设计好的复合材料粉末的目的。

功能梯度材料采用来回往复运动, 逐层增材的增材方式制备, 增材试验工艺参数确定为: 激光功率 $1\ 400\ \text{W}$ 、送粉盘转速 $1.6\ \text{r/min}$ (约合实际送粉量 $12.5\ \text{g/min}$)、扫描速度 $400\ \text{mm/min}$ 。共进行 6 组 GH4169/K418B 复合材料试验, 其中 0~5 号材料成分组成依次为 100%GH4169、80%GH4169/20%K418B、60%GH4169/40%K418B、40%GH4169/60%K418B、20%GH4169/80%K418B、100%K418B, 6 号为 FGM 材料薄壁件, 后文内容均按照该编号。试验样件成分比例如表 3 所示。

实际试验过程中, 当 K418B 材料超过 50% 时, 复合材料的成形高度随着 K418B 合金所占比例的上升而急剧下降, 由图 3 可以直观地看到, 3 号之后的复合材料零部件的实际成形高度与设计高度相差较大, 即在该种增材策略下, 很难实现高 K418B 含量的 GH4169/K418B 合金复合材料的增材制造。

表 3 GH4169/K418B 复合材料样件成分比例

样件编号	材料组成比例
0号	100%GH4169
1号	80%GH4169/20%K418B
2号	60%GH4169/40%K418B
3号	40%GH4169/60%K418B
4号	20%GH4169/80%K418B
5号	0%GH4169/100%K418B

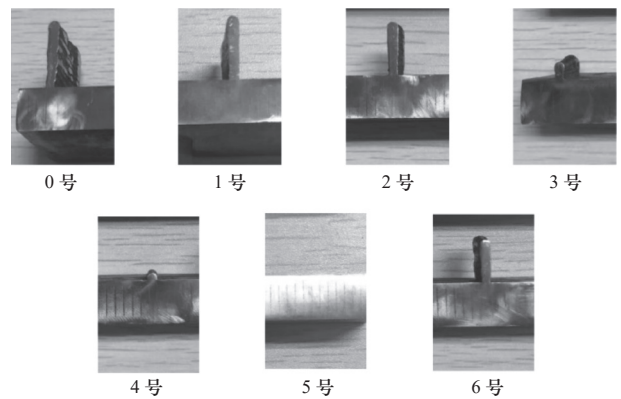


图 3 GH4169/K418B 功能梯度及复合材料样件横截面

2.2 GH4169/K418B 复合材料微观组织分析

GH4169/K418B 复合材料的金相分析过程与上文相似, 使用型号为 VHX-5000 的超景深金相显微镜观察激光熔化沉积试样的宏观形貌, 得到如图 4 所示的 500 倍 GH4169/K418B 复合材料金相组织图。

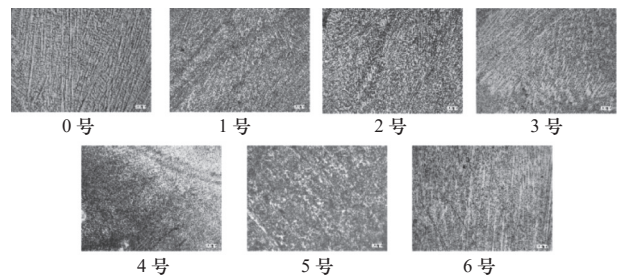


图 4 复合材料金相组织图

可以看到 0~2 号样件中主要为密集排列的树枝晶, 生长方向大都与增材方向一致, 且外缘部位较中心部位组织相更加细化, 图 5 为显微镜 2 000 倍下的金相组织图, 其中图 5a 为顶部边缘处细化组织, 图 5b 为中部区域枝晶, 图 5c 为中部靠近边缘处晶体生长方向。

由于 3~5 号样件中 K418B 含量较高, 增材成形效果较差, 样件截面在显微镜下也暴露出很多的缺陷组织, 出现较大的裂痕、孔隙等缺陷, 如图 6a

为3号样件顶部由于高K418B含量材料无法堆叠产生的多层材料坍塌产生的裂缝,图6b为4号样件层与层之间熔融不良造成的孔隙,图6c出现在4号样件内部,这是由于K418B中有易氧化元素存在,且在试验中层高无法完全堆叠时产生了样件内部的层与层之间熔融不良以及材料坍塌造成在该位置出现较大的孔洞,图6d为5号样件底部与基体接触位置,由于材料本身难以堆叠,在熔覆头离开基体表面时就已经出现材料坍塌的现象,在该位置材料一直没有堆叠起来,产生了这个从基体开始延伸到中部位置的裂缝。当K418B含量超过40%时,增材生成的样件效果均较差,难以满足使用要求,因此后续主要集中在分析K418B含量低于40%的成形效果较好的试验样件。

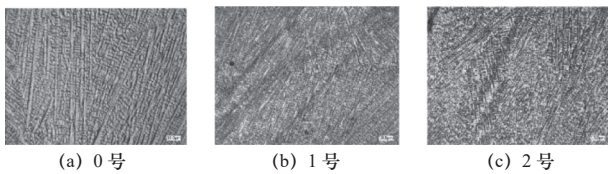


图5 复合材料局部放大金相组织

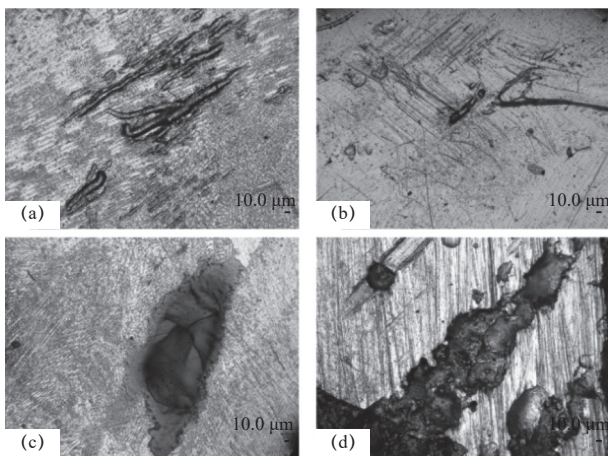


图6 复合材料内部缺陷

对GH4169/K418B复合材料可能存在的各物相进行检测、分析,进行了针对GH4169/K418B复合材料的X射线衍射试验,由于5号GH4169/K418B复合材料的堆积高度过低,无法完成XRD检测,因此本节对于GH4169/K418B复合材料的XRD分析仅针对0~4号样件,如图7所示为0~4号GH4169/K418B复合材料X射线衍射图。在GH4169/K418B复合材料中XRD检测中,面心立方晶格(face center cubic/face-centered cubic)为最明显的峰,根据本章所使用的金属合金材料化学成分分析,FCC

结构晶体主要为 γ -Fe和Ni,其中随着K418B含量逐渐提升,Cr元素也在XRD检测的峰中出现,由于激光熔融沉积熔池冷却速率较快,因此并没有 α -Fe的存在,Ni、Mo、Mn等元素在样件中主要以固溶体的形式存在,在GH4169/K418B复合材料激光熔融增材过程中,熔池中首先会生成 γ -Fe树枝晶,部分Cr会在 γ -Fe中固溶,但当K418B含量逐渐提升时,Cr会以单质的形式凝固在枝晶间隙,在冷却过程中也并未出现 α -Fe,当熔池以较快速率冷却时,并不会出现 γ -Fe向 α -Fe的转变。

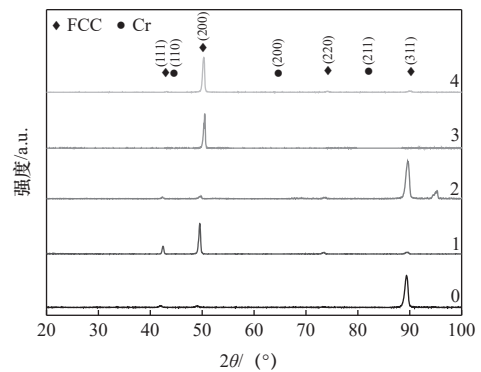


图7 0~4号GH4169/K418B复合材料X射线衍射图

2.3 GH4169/K418B复合材料力学性能分析

由于GH4169/K418B复合材料增材制造过程中,当K418B含量超过50%时,复合材料的成形高度与实际设计高度相差较大,其成形高度无法进行力学性能试验,故本节力学性能试验仅针对0~2号复合材料样件,图8为GH4169/K418B复合材料拉伸试验样件。



图8 GH4169/K418B复合材料拉伸试验样件

图9为GH4169/K418B复合材料应力-应变曲线,可以看出GH4169/K418B复合材料的抗拉强度区间在700~800 MPa,0号样件的抗拉强度在600~700 MPa,远小于其他样件,说明加入K418B使得复合材料强度得到了显著增强。最大应变区间为5%~20%,其中GH4169合金的最大应变量为10.27%。观察各样件最大应变,其中1号复合材料及功能

梯度材料的应变变量小于 GH4169 合金的最大应变，而 2 号复合材料的最大应变大于 GH4169 合金，且是复合材料样件中的最大值，故 2 号 GH4169/K418B 复合材料所能承受的最大应力和产生的最大应变在 0~2 号样件中最为优秀。

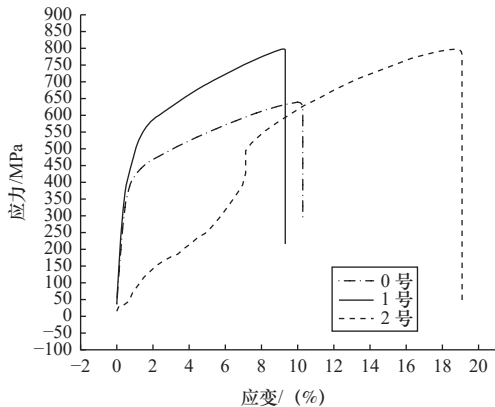


图 9 GH4169/K418B 复合材料应力-应变曲线

为探究 GH4169/K418B 复合材料中各成分含量对增材零部件力学性能的影响，对其各项数据展开进一步的分析。

图 10 为 GH4169/K418B 复合材料弹性模量、屈服强度、抗拉强度曲线，由上图可得，随着 K418B 含量的增加，复合材料的弹性模量和屈服强度呈现先增大后减小的趋势，而抗拉强度呈现持续增大的趋势，其中 1 号样件与 0 号样件相比，其弹性模量提高了 64.1%，屈服强度提高了 22.8%，抗拉强度提高了 23.5%，而 2 号样件的抗拉强度最高，较 0 号样件提高了 25.1%，但其弹性模量和屈服强度比 0 号样件更低，说明适量的加入 K418B 粉末可以显著提高该复合材料强度和刚度，而当 K418B 含量达到 40% 以上时，材料刚性降低，更容易发生形变。

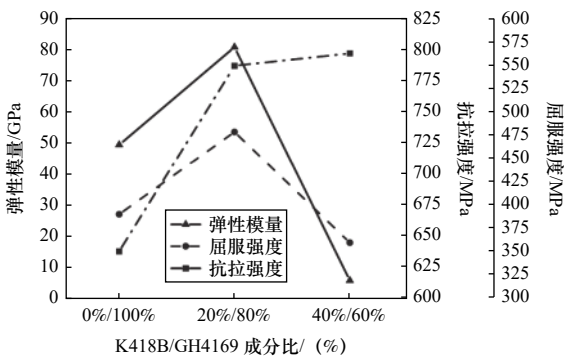


图 10 GH4169/K418B 复合材料各项力学性能曲线

在复合材料中，弹性模量最大的为 1 号样件，达到了 80.375 GPa，且其抗拉强度和屈服强度也较

好，拥有较好的强度和塑性。2 号样件的抗拉强度最大，为 796 MPa，但其弹性模量和屈服强度均较差，故其抵抗变形的能力较差，但不易发生脆断。综合来看，1 号样件的各项性能均比单独的 GH4169 材料优秀，其各项性能较为均衡，强度、刚度和塑性都较为优秀。可见复合材料在某些性能上较单一材料性能优秀，在不同的使用场景下，可以选择不同成分组成的复合材料来满足不同的工况要求。

3 功能梯度材料实验

3.1 GH4169/K418B 功能梯度材料制备

功能梯度材料制备原理为利用送粉器双筒，分别将不同粉末按照一定比例送入激光熔覆增材制造熔池中从而形成复合材料的熔覆层，当每一层或每几层的材料成分按照一定梯度比例变换，最终成形的零部件即为具备功能梯度材料性质的增材零部件。通过改变送粉器各筒独立转速即可实现送粉比例梯度变换。

送粉器左筒中盛放 GH4169 粉末，右筒中盛放 K418B 粉末，左侧送粉筒初始转速设置为 2 r/min，右侧送粉筒初始转速设置为 0 r/min，试验中设置功能梯度材料薄壁件总层数为 22 层，每两层改变一次材料组成成分比例，每次改变梯度为 10%，试验制备参数如表 4 所示，工艺路径及加工参数与前文相似，实际 GH4169/K418B 功能梯度材料增材零部件如图 11 所示。

表 4 GH4169/K418B 功能梯度材料制备参数

层数	GH4169 含量 / (%)	K418B 含量 / (%)	GH4169送粉 转速/(r/min)	K418B送粉 转速/ (r/min)
1	100	0	2.0	0
2	100	0	2.0	0
3	90	10	1.8	0.2
4	90	10	1.8	0.2
...
20	10	90	0.2	1.8
21	0	100	0	2.0
22	0	100	0	2.0

3.2 GH4169/K418B 功能梯度材料微观组织分析

图 12 为 GH4169/K418B 功能梯度材料沿截面在 VHX-5000 的超景深金相显微镜下观察到的 500

倍图像。其中图 12a 为该样件沿基体到顶部的形貌，整体以密集排列的枝晶为主，随着 K418B 含量逐渐上升，材料堆叠的效果逐渐变差，在样件上部位置出现多层材料交叉堆叠的现象，这是由于多层材料均无法堆叠到应有的高度范围，造成多处位置各层材料互相侵入，导致组织杂乱无章，且顶部高度较理论高度低了很多。图 12b 为截面中部由最左端到最右端形貌，主要为柱状晶与树枝状晶相间排列，在样件中部位置主要为较大的柱状晶和分布密集的树枝状晶，在样件边缘处出现大范围的胞状晶。

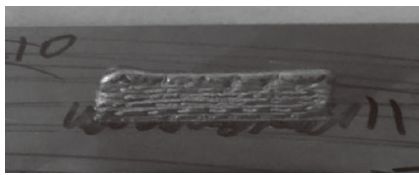


图 11 GH4169/K418B 功能梯度材料增材零部件

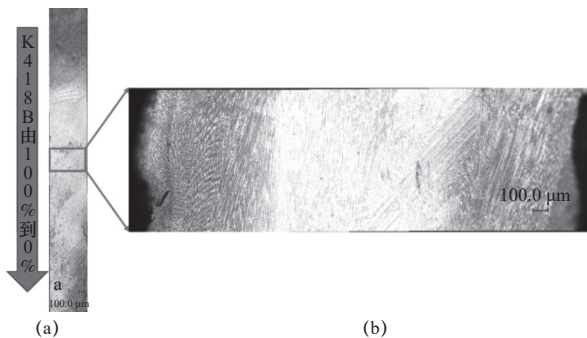


图 12 GH4169/K418B 功能梯度材料截面放大图

图 13 为 GH4169/K418B 功能梯度材料金相组织图，其中图 13a 为 FGM 材料顶部位置金相组织图，图 13b 为 FGM 材料底部位置金相组织图，图 13c 为 FGM 材料中部位置金相组织图，放大倍数为 500，图 13d 放大倍数为 1 000，图 13e 放大倍数为 2 000，图 13f 放大倍数为 3 000，可以看到密集分布的树枝晶，且随着增材高度的上升，晶粒大小逐渐变小，这一方面是因为随着热积累，激光熔覆过程中的熔池温度冷却速度降低，使得熔池温度梯度变化减弱，造成熔池凝固速度降低；同时也是因为随着 K418B 合金含量逐步上升，合金元素数量增多导致熔池中液相溶质浓度增高，使得熔池凝固过程中的形核速度变大，最终导致枝晶变得更加细小，由于增材制造的特性，随着热积累，激光熔覆过程中的熔池温度冷却速度降低，使得熔池温度梯度变化减弱，热量持续累积，热积累现象更加明显，最

终使得枝晶更加细小，材料顶部位置晶体排布出现明显的杂乱无章的现象，这是由于 K418B 含量逐步提升后，料堆叠效果较差，造成顶部位置多层材料在某一相同位置多次重熔、凝结，同时熔覆头也出现正离焦的现象，材料堆叠效果越来越差，最终导致了这一现象，功能梯度材料中部和底部位置成形效果明显更好。

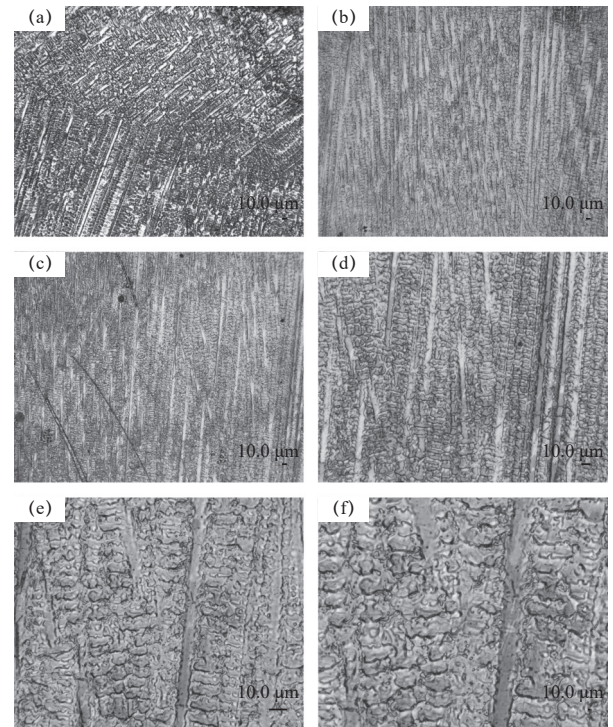


图 13 功能梯度材料金相组织图

GH4169/K418B 功能梯度材料随着 K418B 含量逐渐提高，顶部位置出现明显的缺陷，如图 14 所示，在顶部位置，出现同一位置多层相互侵入的现象，这使得在该位置零件尺寸远不及预期尺寸，由于材料无法堆叠，多层材料在同一位置不断地重熔、再凝固，不仅在增材方向上出现层间混合，在垂直于增材方向上也发生了多层杂糅的现象。

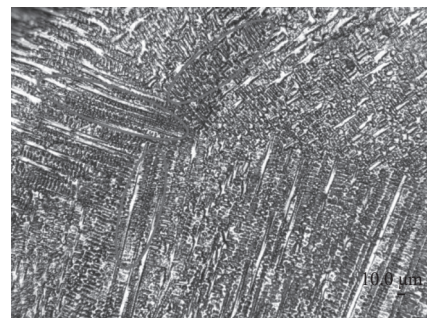


图 14 GH4169/K418B 功能梯度材料顶部组织

在 GH4169/K418B 功能梯度材料横截面上分别选取两点进行 XRD 检测, 如图 15 所示, 分别在样点 1 和样点 2 处进行 XRD 测量, 其中样点 1 处材料组成为 40%GH4169/60%K418B, 样点 2 处材料组成为 60%GH4169/40%K418B。

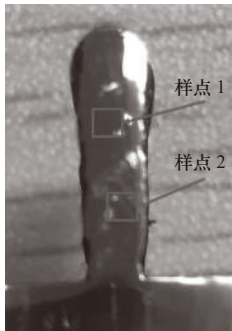


图 15 GH4169/K418B 功能梯度材料 XRD 测点示意

GH4169/K418B 功能梯度材料 XRD 测量图谱如图 16 所示。

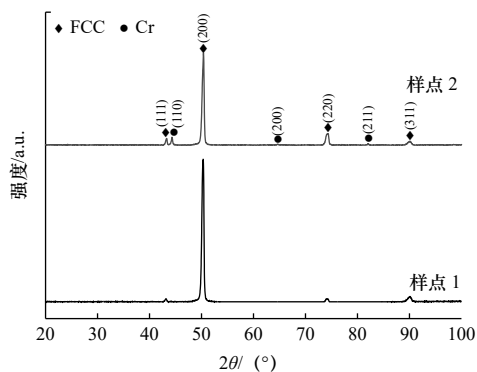


图 16 GH4169/K418B 功能梯度材料 XRD 测量图谱

从 GH4169/K418B 功能梯度材料 XRD 测量图谱可看出在 FGM 中存在的物相主要为 γ -Fe、Ni 组成的 FCC 结构, 由样点 1 和样点 2 对比, 大部分峰都是重合的, 只有能量高低的区别, 但样点 2 中 Cr 的峰显然更为明显, 这个结果也很符合上节中 GH4169/K418B 复合材料 XRD 检测结果。可知在 FGM 材料中, 主要的物相组成跟复合材料相似, Ni、Mo、Mn 等元素仍主要以固溶体存在于样品中, 并未检测到明确的金属间化合物和 Fe-Cr 合金存在, 这是由于熔池冷却速度过快使得 Cr 和 γ -Fe 固溶体不能发生同素异构转变出现 α -Fe 和 Fe-Cr 合金相。

3.3 GH4169/K418B 功能梯度材料力学性能分析

GH4169/K418B 功能梯度材料力学性能试验示意图见表 5, GH4169/K418B 功能梯度材料力学性能试验具体结果如图 17 所示, 图 18 为 GH4169/K418B 功能梯度材料应力-应变图像。

表 5 功能梯度材料力学性能试验结果

试验项目	试验结果
弹性模量/GPa	80.1
屈服强度/MPa	567.67
抗拉强度/MPa	790

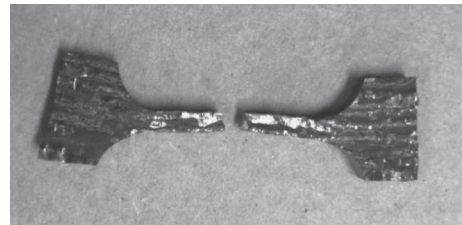


图 17 GH4169/K418B 功能梯度材料拉伸试验示意

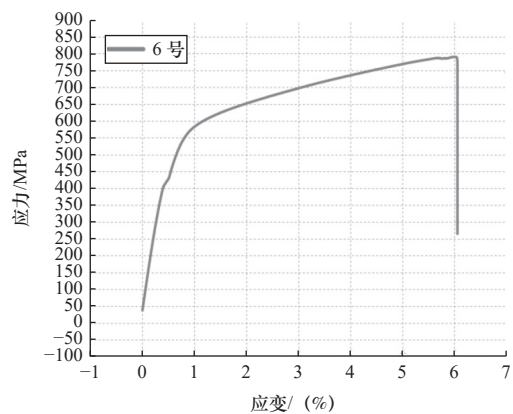


图 18 GH4169/K418B 功能梯度材料应力-应变图像

功能梯度材料弹性模量为 80.1 GPa、屈服强度为 567.67 MPa、抗拉强度为 790 MPa, 其各项性能指标均很优秀, 强度、刚度和塑性都较为优秀, 与前文中的复合材料及单一 GH4169 材料的数据对比, 并没有特别的短板, 分析其各项力学性能数据, 图 19 为 GH4169/K418B 复合材料及功能梯度材料各项力学性能曲线, 可以看到功能梯度材料的各项力学性能参数在试验样品均处于较优秀的水平, 因此可以认为 GH4169/K418B 功能梯度材料是一种各项性能较为均衡的材料。由于其内部材料组成呈梯度变化的特性, 各项性能均较为平均, 呈现出“取长补短”的趋势, 没有明显的短板, 因此在对于材料各项参数均有一定要求的工作环境下, FGM 材料不失为一种较好的选择。

4 结语

通过对 GH4169 材料和 K418B 材料的复合材料试验及功能梯度材料试验, 探究了 GH4169/K418B

材料的复合材料及功能梯度材料工艺及其各项性能,具体如下:

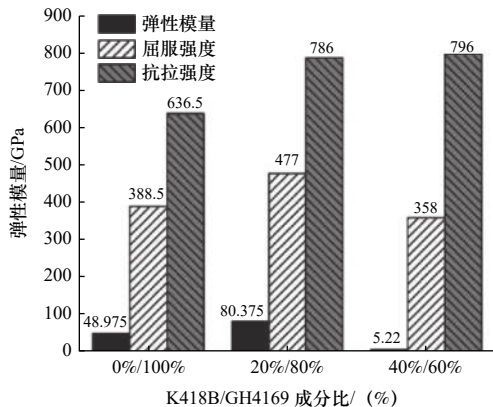


图 19 GH4169/K418B 复合材料及功能梯度材料各项力学性能曲线

(1) 通过控制送粉筒送粉速度调整送粉比例的基于同轴送粉的金属增材方式可实现各比例复合材料及功能梯度材料的制备。最优增材试验工艺参数确定为:激光功率 1400 W、送粉盘转速 1.6 r/min (约合实际送粉量 12.5 g/min)、扫描速度 400 mm/min。

(2) 在复合材料中,1号样件与0号样件相比,其弹性模量提高了 64.1%,屈服强度提高了 22.8%,抗拉强度提高了 23.5%,而2号样件的抗拉强度最高,较0号样件提高了 25.1%,但其弹性模量和屈服强度比0号样件更低,说明在 K418B 含量较少时,复合材料强度和刚度较单一材料得到强化,而当 K418B 含量较高时,材料刚性会显著降低,更容易发生形变但抵抗脆性断裂的能力会更强。因此对于使用场合和领域有着一定的要求,在特定的需求下 GH4169/K418B 复合材料会表现出优秀的性能。

(3) 功能梯度材料由于其梯度特性,呈现出“取长补短”的选择趋势,其弹性模量为 80.1 GPa、屈服强度为 567.67 MPa、抗拉强度为 790 MPa,各项性能与复合材料和单一材料相比均比较优秀,没有表现出明显的短板,但也没有某一项性能具有十分突出的优势,因此可以在一些对材料各项性能均有一定要求的应用场景使用 GH4169/K418B 功能梯度材料。

参 考 文 献

- [1] Masayuki N, Toshio H, Ryuzo W. Functionally gradient materials. In pursuit of super heat resisting materials for spacecraft[J]. *Journal of the Japan Society for Composite Materials*, 1987, 13(6): 257-264.
- [2] 陈伦, 杨晓亮, 陈龙庆, 等. W/Fe 功能梯度材料的制备与性能[J]. *材料热处理学报*, 2019, 40(11): 102-107.
- [3] 高晓菊, 王伯芊, 贾平斌, 等. 功能梯度材料的制备技术及其研发现状[J].

材料导报, 2014, 28(1): 31-36.

- [4] 刘亚飞, 李亚楠, 刘奎, 等. 金属/高分子梯度材料的研究现状与展望[J]. *化工新型材料*, 2020, 48(2): 15-19.
- [5] 杨圣钊, 尹瀛月, 高建, 等. 功能梯度增材制造技术的研究现状及展望[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(21): 1-6.
- [6] 马文静. 功能梯度材料的制备及应用发展[J]. *中国新技术新产品*, 2015(7): 95.
- [7] 崔雪, 张松, 张春华, 等. 高性能梯度功能材料激光增材制造研究现状及展望[J]. *材料工程*, 2020, 48(9): 13-23.
- [8] 张李超, 胡祺, 王森林, 等. 金属增材制造数据处理与工艺规划研究综述[J]. *航空制造技术*, 2021, 64(3): 22-31.
- [9] 邓兴泓. 多材料光固化 3D 打印装置及工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [10] 宗学文, 王丹, 肖涵, 等. 面成型光固化快速成形技术发展的关键要素的研究现状[J]. *制造技术与机床*, 2017(10): 31-38.
- [11] Larsen E, Larsen N B, Almdal K, et al. Multimaterial hydrogel with widely tunable elasticity by selective photopolymerization of PEG diacrylate and epoxy monomers[J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2016, 54(13): 1195-1201.
- [12] 夏晓光, 段国林. 功能梯度材料增材制造技术的研究进展及展望[J]. *材料导报*, 2022(10): 1-11.
- [13] Srivastava M, Maheshwari S, Kundra T K. Virtual modelling and simulation of functionally graded material component using FDM technique[J]. *Materials Today Proceedings*, 2015, 2(4-5): 3471-3480.
- [14] Maskery I, Hussey A, Panesar A, et al. An investigation into reinforced and functionally graded lattice structures[J]. *Journal of Cellular Plastics*, 2016, 53(2). <https://doi.org/10.1177/0021955X16639035>.
- [15] Durejko T, Zietala M, Polkowski W, et al. Thin wall tubes with Fe3Al/SS316L graded structure obtained by using laser engineered net shaping technology[J]. *Materials & Design*, 2014, 63: 766-774.
- [16] 周俊. 镍基高温合金 GH4169 高速切削相关技术与机理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [17] 张国会, 郭绍庆, 黄帅, 等. 激光选区熔化制备 GH4169 合金高温疲劳行为研究[J]. *应用激光*, 2020, 40(6): 984-990.
- [18] 廖宗博, 国为民, 赵明汉, 等. K418B 和 FGH91 双合金热等静压扩散连接的动力学模拟研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(20): 170-175.
- [19] 李飞, 侯正乾, 赵彦杰, 等. 熔模铸造工艺对 K418B 涡轮导向器充型性能与晶粒组织的影响[J]. *铸造技术*, 2019, 40(3): 260-262, 275.
- [20] 李信, 刘海昌, 滕元成, 等. 功能梯度材料的研究现状及展望[J]. *材料导报*, 2012, 26(S1): 370-373.

第一作者/通信作者: 王振忠, 男, 1981 年, 工学博士, 教授, 研究方向为先进光学元件超精密加工与检测、激光增减材加工相关技术研究, 以第一或通讯作者发表 SCI/EI 收录论文 40 余篇, 获授权发明专利及软件著作权 20 余项。E-mail: wangzhenzhong@xmu.edu.cn

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2023-02-12)

文章编号: 20230815

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。