

超瞬态凝固增材制造梯度整体涡轮叶盘用高温合金粉末特性研究 II：叶片用合金粉末

郑亮¹, 刘朝阳², 朱强², 宋立军³, 李周¹, 张国庆¹

(1. 北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095)

(2. 南方科技大学 机械与能源工程系, 广东 深圳 518055)

(3. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 对超瞬态凝固增材制造梯度整体涡轮叶盘高温合金叶片用合金粉末特性开展研究。根据合金的承温能力和 JMatPro 相平衡计算结果, 选用 DZ4125 作为叶片材料, K418 作为叶盘轮缘部位材料。采用真空感应熔炼氩气雾化制粉 (VIGA) 制备 DZ4125 高温合金粉末, 筛分至 53~105 μm 粒度范围, 采用差示扫描量热分析 (DSC)、场发射扫描电镜 (FESEM) 和能谱 (EDS)、激光粒度仪、动态图像粒度粒形分析仪以及综合粉体性能测试仪对 DZ4125 高温合金粉末的相变温度、显微组织、析出相成分、元素偏析行为、粒度、粒形、松装密度、振实密度和流动性进行系统表征。结果表明: DZ4125 比 K418 合金的固液凝固温度范围宽, 过渡区 DZ4125+K418 混合成分合金其液相线温度和 MC 碳化物开始析出温度介于 2 种合金之间, γ' 开始析出温度与 2 种合金相当。DZ4125 合金粉末形貌主要为球形和近球形, 表面和截面显微组织主要呈树枝晶结构。所含元素中偏析倾向较强的元素有 Hf、Ta、Ti、Mo 和 W, 而偏析倾向弱的元素包括 Ni、Co、Cr 和 Al。粉末内部枝晶间区分布有细小的 MC 碳化物, 尺寸约为 200 nm。激光衍射和动态图像分析法测得的 DZ4125 粉末粒度值接近, 中位径 D_{50} 分别为 70.2 和 72.8 μm 。动态图像法测得 DZ4125 合金粉末具有较好的球形度, SPHT(球形度)和 b/l (长径比)均值分别为 0.91 和 0.86。所选 DZ4125 高温合金粉末具有较好的松装密度、振实密度和流动性, 其松装和振实密度分别达到合金理论密度的 52% 和 63%, 压缩度为 17.7%, 且粉末具有较好的流动性 (20.79 s (50 g^{-1}))。

关键词: 高温合金整体涡轮叶盘; DZ4125 粉末; JMatPro; 增材制造; 梯度功能材料

中图分类号: TG146.1⁺5; TF122

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)11-3979-08

镍基高温合金已广泛应用于先进航空发动机和地面燃气涡轮^[1-3], 同时也应用于化工、核电、深海油气开采以及等温锻造模具等多个领域^[4-6]。涡轮叶盘是航空发动机最重要的核心热端部件, 它的冶金质量和性能水平对于发动机和飞机的可靠性、安全寿命和性能的提高具有决定作用。以涡轮叶盘的服役环境为例, 盘心需要高断裂强度和低周疲劳性能, 盘缘及叶片需要高的高温蠕变强度, 其工作温度和受力情况随径向位置改变。当前的主流制备成形工艺中, 高温合金涡轮盘和涡轮叶片通常采用分体制造, 如采用粉末冶金和定向凝固技术分别制备涡轮盘件和定向/单晶涡轮叶片, 再将二者组合成叶盘组件。随着工艺技术的不断进步, 开始出现了通过分区热处理工艺控制在同种合金制备涡轮盘件的轮毂轮缘部位分别获得细晶和粗晶组织的双组织/双性能涡轮盘件和采用热等静压工艺将粉末高温合金盘件

部位和不同成分的铸造高温合金叶片部位通过扩散连接制备的双合金整体涡轮叶盘^[7]。

近年来, 涡轮整体叶盘的梯度功能化成为实现航空发动机推重比和性能提高的途径之一, 制备盘心、盘缘和叶片多材料、多组织呈梯度变化 (多质异构) 的整体涡轮叶盘, 并通过增材制造工艺进行制备尝试和技术演示^[8]。以往文献报导了有关激光增材制造多质异构金属功能梯度材料的相关研究^[9-14], 然而由于异种材料在熔池高温作用下经历原位冶金过程和合金化作用, 多质异构材料的激光增材制造面临材料热物性、工艺选择、微观组织精确控制等诸多困扰。为了实现增材制造凝固组织微观上精准调控和宏观上定制化分布, 获得性能可控的功能梯度材料, 南方科技大学和湖南大学团队^[15]提出了一种超瞬态凝固激光增材制造方法, 实现激光增材制造熔池凝固条件在毫秒

收稿日期: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金 (重大研究计划培育项目 91860131; 面上项目 52071310); 国家科技重大专项 (Y2019-VII-0011-0151); 装备预研重点实验室基金 (6142903200303)

作者简介: 郑亮, 男, 1979 年生, 博士, 北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095, 电话: 010-62498268, E-mail: liang.zheng@biam.ac.cn

和毫米时空尺度上的精准调控和凝固组织宏观上的定制化分布, 消除微观组织空间交替复杂的层带结构特征, 并尝试利用超瞬态凝固增材制造制备多质异构组织梯度镍基合金整体涡轮叶盘模拟样件。研究拟选用 3 种高温合金粉末材料, 分别为 650 °C 以下使用的 GH4169 合金、900 °C 以下使用的 K418 合金和 1050 °C 以下使用的 DZ4125 合金, 以实现盘心到盘缘再到叶片成分和组织的梯度变化。高温合金粉末是先进航空发动机增材制造高性能金属构件和粉末冶金涡轮盘研制生产的基础和保障, 原始粉末的特性如形貌、偏析行为、粒度分布、流动性、松装密度和振实密度等会影响部件的成形以及成品性能^[16-19]。对于功能梯度材料所用的异种成分合金粉末, 针对不同部位所用成分的高温合金粉末特性开展研究工作具有重要的意义。

DZ4125 是 γ' 强化型定向凝固柱晶镍基高温合金, 使用温度在 1050 °C 以下, 是我国同类合金中性能水平最高的合金之一^[20]。合金具有良好的中高温综合性能以及优异的抗疲劳性能, 同时还具备良好的可铸性和抗热裂性, 适用于制备燃气涡轮转子叶片和导向叶片等高温热端部件。本课题组已对盘体和盘缘用高温合金粉末材料 GH4169 和 K418 的粉末特性开展了相关研究^[15], 本实验主要针对叶片用高温合金粉末材料 DZ4125 的粉末特性开展进一步的研究工作, 为超瞬态凝固增材制造梯度整体涡轮叶盘制备提供理论和技术支持。

1 实验

采用 Sente software 的 JMatPro 软件对合金成分进行相计算, 计算合金的固、液相线温度, 主要强化相的析出温度和理论密度, 为合金的选择提供依据。本研究所用的试验材料为通过真空感应熔炼氩气雾化制粉

(VIGA) 制备的 DZ4125 镍基高温合金粉末, 其主要成分如表 1 所示。合金粉末经过机械筛分, 粒度范围为 53~105 μm 。采用 FEI Nova NanoSEM 450 型场发射扫描电镜对粉末表面形貌进行观察, 并对粉末截面显微组织、枝晶间析出相和枝晶干和枝晶间的成分偏析进行分析。采用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪对筛分后高温合金粉末的粒度分布进行分析, 采用 Camsizer X2 型动态图像粒度粒形分析仪对粉末的粒度、粒形同时进行表征, 并与激光粒度仪的粒度测试结果进行对比分析。按照航空行业标准 HB5441.4, HB5441.5 和 HB5441.6, 在 BT-1000 型综合粉体测试仪上分别测试粉末的松装密度(漏斗法)、振实密度和流动性(霍尔流动计法, 取 50 g 粉末), 分别测量 3 次取平均值。

2 结果与讨论

2.1 叶盘用高温合金的成分选择和相计算结果

根据整体涡轮叶盘的服役环境和特点, 盘体合金适合中温和中高温等级承温能力的等轴晶高温合金, 而叶片区材料适合采用承温能力较高的定向凝固高温合金, 合金的选择结果如表 2 所示。

2.1.1 叶盘盘体用合金 GH4169 和盘缘用合金 K418 的相计算结果

叶盘盘心用合金 GH4169、盘缘用合金 K418 以及盘心-盘缘中间的过渡区 GH4169+K418 混合合金的相计算结果详见此前研究报道^[15]。

2.1.2 叶片用 DZ4125 合金的相计算结果

所制备成分的 DZ4125 合金经 JMatPro 计算, 其平衡相图如图 1 所示。可以看出该成分的 DZ4125 合金中主要平衡态析出相包括 γ (Gamma)、 γ' -Ni₃Al (Gamma Prime)、少量的 MC、M₂₃C₆ 碳化物、 μ (Mu)、 σ (Sigma) 以及 Ni₇Hf₂(Ni7M2) 和 Ni₅Hf(Ni5M) 相。

表 1 试验用高温合金粉末化学成分

Table 1 Chemical composition of the tested superalloy powders (wt%)

Alloy	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	C	Co	Hf	Ta	W	Ni
DZ4125	9.2	2.0	-	1.0	5.1	0.11	10.0	1.5	3.7	7.2	Bal.
K418	12.5	4.3	2.1	0.7	6.0	0.11	-	-	-	-	Bal.
DZ4125+K418	10.85	3.15	1.05	0.85	5.55	0.11	5	0.75	1.85	3.6	Bal.

表 2 所选用高温合金的最高使用温度和应用部位

Table 2 Max service temperatures of selected superalloys and applied position^[15]

Alloy	Max service temperature/°C	Suitable applied position in the integral blisk
GH4169	650	Disk hub
GH4169+ K418	-	Transition zone between disk hub and rim
K418	900	Disk rim
K418+DZ4125	-	Transition zone between disk rim and blade
DZ4125	1050	Blade

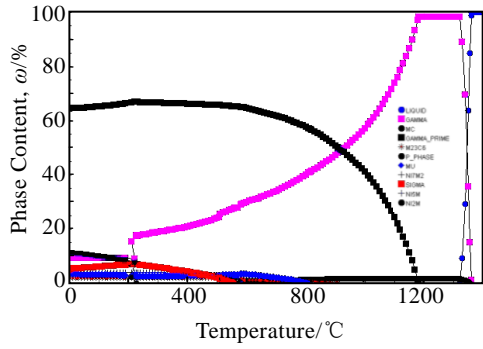


图 1 试验用 DZ4125 合金的平衡相图

Fig.1 Phase equilibrium diagram of DZ4125 alloy

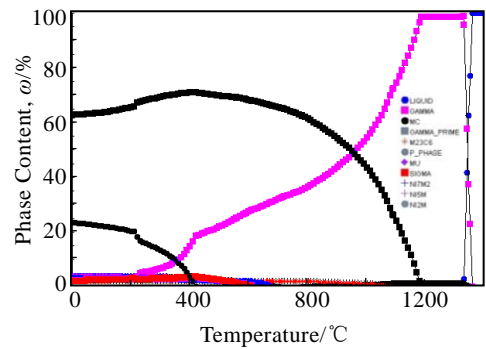


图 2 DZ4125+K418 混合成分合金的平衡相图

Fig.2 Phase equilibrium diagram of DZ4125+K418 hybrid alloy

2.1.3 叶片-盘缘过渡区 (DZ4125+K418)混合成分合金的相计算结果

叶片-盘缘过渡区采用 DZ4125 和 K418 的混合成分合金，对混合成分合金通过 JMatPro 软件计算获得其相平衡图（图 2）。可以看出，DZ4125+K418 混合合金中主要析出相类型与 DZ4125 相似，主要包括 γ 、 γ' -Ni₃Al、以及少量的 MC、M₂₃C₆ 碳化物、 μ 、 σ 以及 Ni₇Hf₂ 和 Ni₅Hf 相。

叶片用合金 DZ4125、盘缘合金 K418 和叶片-盘缘过渡区 DZ4125+K418 混合合金中液相和主要强化相含量随温度变化的析出平衡相图示于图 3，特征相析出温度列于表 3。从图 3 可以看出，DZ4125+K418 混合合金中液相和主要强化相在不同温度范围的含量大部分介于 2 种合金之间，其中 γ 和 γ' 相的析出曲线与 2 种合金相近（图 3b, 3c）。

从表 3 数据可知，DZ4125 和 K418 合金的液相线温度分别为 1360 和 1354 °C，DZ4125 略高。2 种合金的固相线温度和 γ' 开始析出温度相同，分别 1322 和 1183 °C。固液凝固温度范围 DZ4125 最宽。DZ4125 的 MC 碳化物的开始析出温度为 1354 °C，比 K418 高 27 °C。而对于过渡区 DZ4125+K418 混合成分合金，其液相线温度和 MC 碳化物开始析出温度介于两种合金之间，固相线温度略高于 2 种合金， γ' 开始析出温度与 2 种合金相当。

采用 DSC 对 DZ4125 的相变温度进行测量，结果列于表 3。可以看出，样品实测的固、液相线温度的绝对值与相平衡态计算结果存在一定的偏差，但固液温度范围值的相对趋势一致，计算和实测结果均表明 DZ4125 比 K418 合金的固液凝固温度范围更宽。

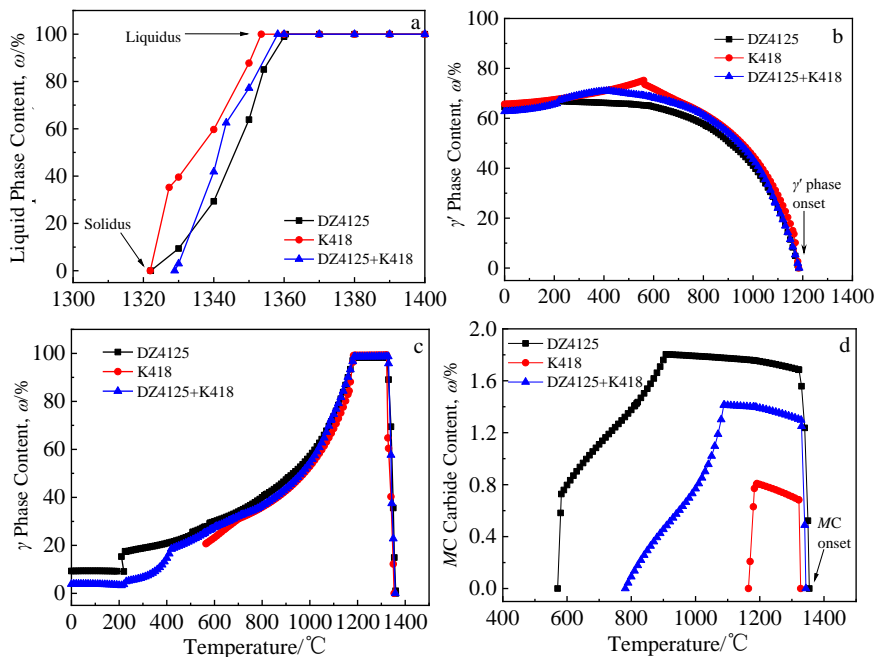


图 3 试验用高温合金的特征相析出平衡相图

Fig.3 Phase equilibrium diagram of specific phases for the selected superalloys: (a) liquid phase, (b) γ' phase, (c) γ phase, and (d) MC carbide

表 3 选用高温合金的特征相变温度

Table 3 Specific phase change temperatures of the selected superalloys (°C)

Alloy	Method	Liquidus	Solidus	Liquidus and solidus range, ΔT	MC carbides onset temperature	γ' onset temperature
DZ4125		1360	1322	38	1354	1183
K418	JMatPro	1354	1322	32	1327	1183
DZ4125 +K418		1358	1329	29	1344	1186
DZ4125	DSC	1343	1260	83	1312	/
K418 ^[15]		1341	1290	51	/	/

2.2 试验用 DZ4125 高温合金粉末的显微组织

采用氩气雾化制粉，将制备的 DZ4125 高温合金粉末机械筛分至 53~105 μm 的粒度范围，粉末的表面和截面组织形貌如图 4 所示。可以看到 DZ4125 合金粉末形貌主要为球形和近球形（图 4a, 4b），仔细观察可以看出粉末表面和截面均主要呈现树枝晶结构。此外还存在卫星粉（图 4c），其形成主要是由于氩气雾化过程中高速气流的作用下小尺寸颗粒和大尺寸粉末发生碰撞在结合处“焊合”而成，大小粉末之间存在冶金连接。此外，还偶然可见空心粉（图 4d）和粘附粉（图 4e）。空心粉是粉末在凝固过程中熔融液滴裹入了雾化用惰性气体，在粉末心部形成了空腔所致，空腔部分内表面仔细观察仍可观察到树枝晶形貌。粘

附粉是在静电作用下细小的粉末粘附着在较大尺寸的粉末表面所形成（图 4e），与卫星粉的最大区别是二者并无冶金连接。与表面组织不同的是，尽管粉末截面显微组织照片无法直接判断粉末的尺寸，但从图 4e 中可以看出，截面尺寸小的粉末枝晶间距明显小于旁边截面尺寸大的粉末，因此可以判断其原始粉末直径也远小于其它粉末，为小尺寸粘附粉。图 4f 中粉末呈现了多种状态，在一颗粉末中同时存在包覆粉、卫星粉和空心粉，也说明了氩气雾化制粉过程的复杂性。

DZ4125 粉末截面形貌中枝晶间存在白色的颗粒状析出物，尺寸约 200 nm，该相在深腐蚀后部分区域呈骨架状。对该相进行成分分析（未考虑碳元素），结果示于图 5。可以看出白色析出相富含 Ta、Hf 和 Ti

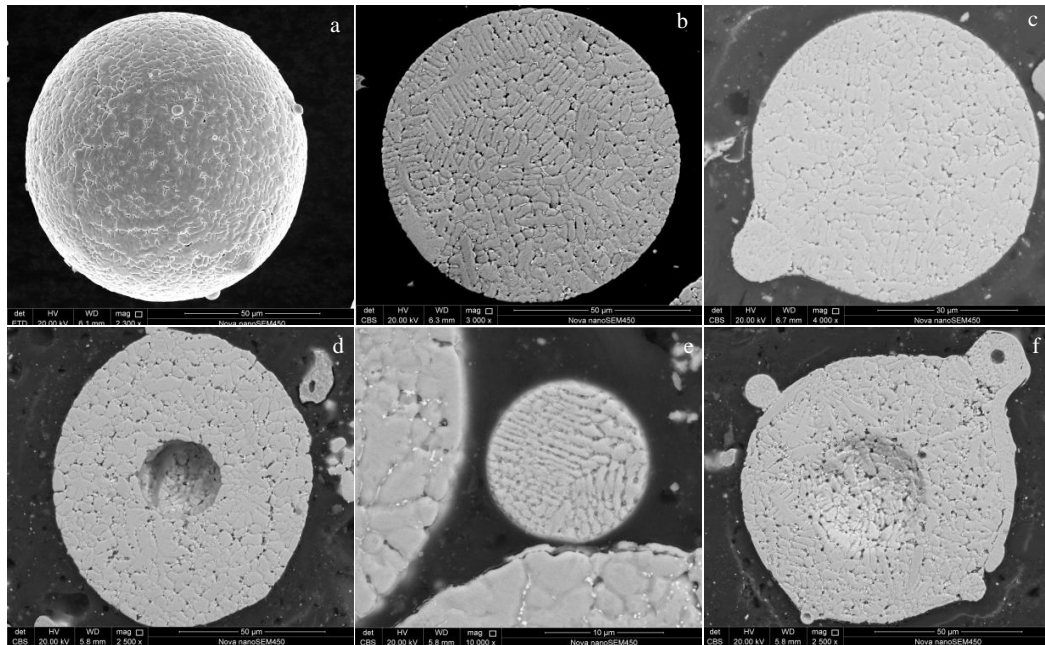


图 4 试验用 DZ4125 高温合金粉末的表面和截面组织形貌

Fig.4 Surface morphology (a) and cross section microstructures (b~f) of the tested superalloy DZ4125 powders: (a, b) spherical powder, (c) satellite powder, (d) hollow powder, (e) adherent fine powder, and (f) wrapped-satellite-hollow irregular powder

元素，为 MC 碳化物相，其成分和形貌特征与铸造 DZ4125 合金相近^[20]，但尺寸更小。由于该相尺寸小，能谱计数时将基体元素也带入结果，因此能谱数据中 Ni 含量相对较高。

2.3 试验用 DZ4125 高温合金粉末的元素偏析行为

DZ4125 合金粉末截面显微组织均呈现典型的树枝晶结构，在扫描电镜背散射 (BSEI) 模式下枝晶间的区域较枝晶干更亮 (图 5)。采用能谱对 DZ4125 粉末截面显微组织中枝晶干和枝晶间区域 (非析出相区) 分别进行定量分析，每个区域分别测量 3 次，结果列于表 4。将枝晶干和枝晶间的元素质量分数的 3 次测量结果分别取平均值，然后按照公式

$$k = C_{\text{dendrite}} / C_{\text{interdendritic zone}} \quad (1)$$

式中， C_{dendrite} 为元素在枝晶干的质量分数， $C_{\text{interdendritic zone}}$ 为元素在枝晶间的质量分数。计算 DZ4125 高温合金粉末中各元素的偏析系数 k ，结果示于图 6。偏析于枝晶干的元素 $k > 1$ ，偏析于枝晶间的元素 $k < 1$ ， k 值偏离 1 越大说明偏析越严重。DZ4125 合金粉末中微弱偏析于枝晶干的元素有 Co、Ni 元素 ($k > 1$)，最高值仅为 1.06 (Co 元素)；W 元素强烈偏析于枝晶干 ($k = 1.16$)。Cr 元素为不偏析元素 ($k = 1$)。弱偏析于枝晶间的元素有 Al ($k = 0.97$)，而强烈偏析于枝晶间的元素有 Hf、Ta、Ti 和 Mo ($k < 1$)， k 最低值仅为 0.1 (Hf 元素)。偏析倾向较强的元素有 Hf、

Ta、Ti 和 W，而偏析倾向弱的元素包括 Ni、Co、Cr 和 Al。DZ4125 合金粉末中的元素偏析行为与以往报导的定向凝固高温合金 DZ125 和单晶高温合金 DD6 相似^[21,22]。但 DZ4125 合金粉末的枝晶间距仅为几微米，相比定向凝固 DZ125 合金^[23] (约 200 μm) 更加细小。

2.4 试验用 DZ4125 高温合金粉末的粒度和粒形

采用激光粒度仪测得的 DZ4125 高温合金粉末的粒度分布如图 7 所示，可以看出合金粉末的粒度为近单峰正态分布。DZ4125 合金粉末的 D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} 分别为 40.5、70.2 和 114.4 μm 。采用动态图像粒度粒形仪对 DZ4125 粉末的粒度和粒形同时进行测量，并对比激光粒度仪的测量结果，示于表 5。从表 5 数据可知，动态图像法测得的 DZ4125 合金粉末的 D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} 分别为 45.5、72.8 和 104.9 μm ，与激光粒度仪的测量结果非常接近。动态图像分析法还可以用来同时表征粉末的颗粒形貌。SPHT 值被用来表征颗粒球形度，SPHT 数值越接近 1 表示球形度越好。从表 5 数据可知，试验用 DZ4125 粉末的 SPHT 值为 0.91 (为 3 次测量的平均值)，表明粉末具有较好的球形度。除去 SPHT 以外，长径比 (b/l)，颗粒投影宽度和投影长度的比值) 也经常用来表征粉末的形貌，该参数对卫星粉和长条状异形粉表现敏感，DZ4125 合金粉末的 b/l 均值为 0.86。

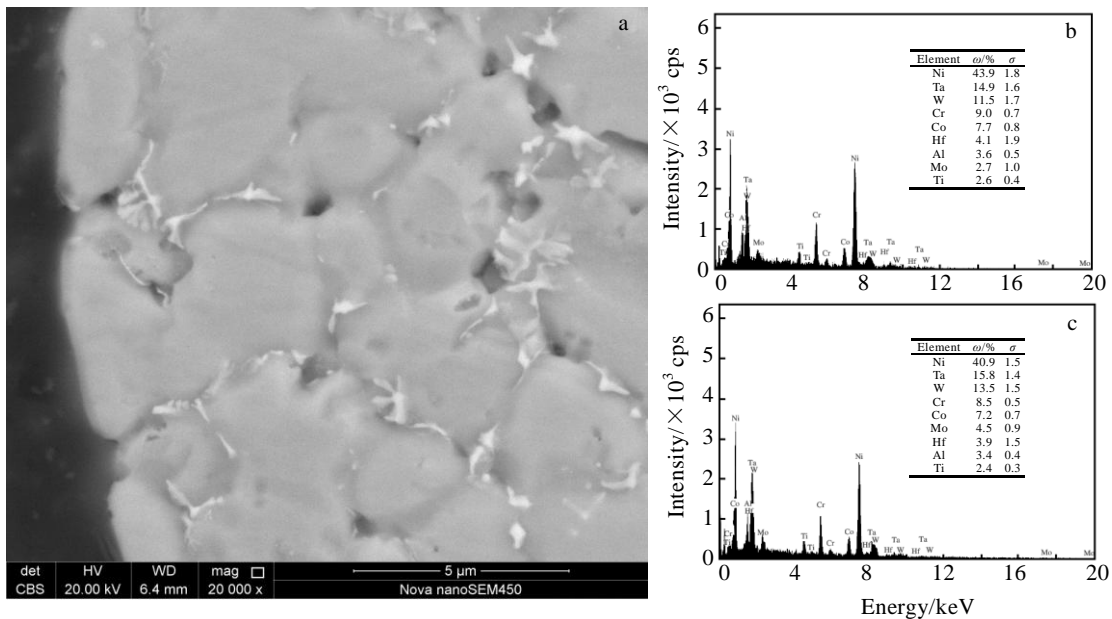


图 5 试验用 DZ4125 高温合金粉末截面形貌和枝晶间析出相的能谱分析结果

Fig.5 Cross-section morphology (a) and EDS analysis results of precipitates in the interdendritic region (b, c) for the tested superalloy DZ4125 powders

表 4 试验用 DZ4125 高温合金粉末枝晶干和枝晶间的成分分析结果

Table 4 Element concentration of dendritic core and interdendritic region of tested superalloy DZ4125 powders ($\omega/\%$)

Position	Al	Ti	Ta	Hf	Mo	W	Cr	Co	Ni
Dendritic core	4.6	0.7	2.1	0	1.8	9.2	9.0	10.9	61.6
	4.3	0.8	2.5	0	2.1	9.7	9.2	11.3	60.1
	5.0	1.0	3.2	0.8	1.8	7.9	9.3	10.7	60.2
Interdendritic region	4.9	1.0	3.8	4.8	2.5	8.1	8.8	10.3	55.8
	4.6	1.0	3.2	1.8	1.8	8.6	9.4	10.2	59.6
	4.8	0.9	3.9	1.7	2.0	6.4	9.4	10.5	60.4

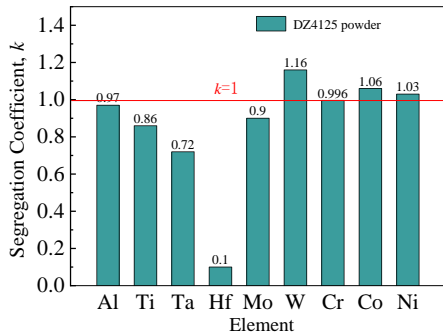


图 6 试验用 DZ4125 高温合金粉末的元素偏析系数

Fig.6 Elemental segregation coefficient (k) of tested superalloy DZ4125 powders

2.5 试验用 DZ4125 高温合金粉末的物理性能 (松装密度、振实密度、压缩度和流动性)

采用综合粉体测试仪测量 DZ4125 合金粉末的松装密度、振实密度和流动性, 根据松装密度和振实密度计算粉末压缩度, 采用 JMatPro 软件计算本试验用高温合金粉末成分的理论密度, 结果列于表 6。DZ4125 合金粉

末的松装密度为 4.43 g cm^{-3} , 达到约 52% 的同成分合金理论密度 (为 8.53 g cm^{-3}), 振实密度为 5.38 g cm^{-3} , 达到近 63% 的同成分理论密度, 该粉末的压缩度为 17.7%, 流动性为 $20.79 \text{ s (50 g)}^{-1}$, 与此前测试的盘心用 GH4169 和盘缘用 K418 合金粉末接近^[15]。

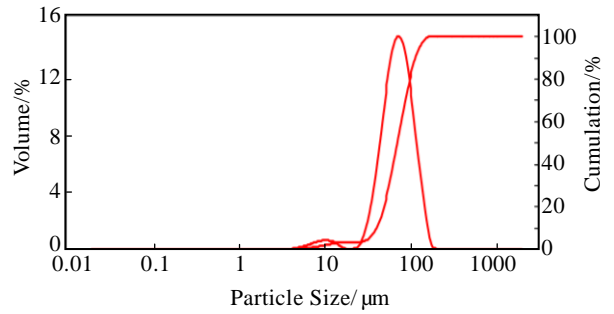


图 7 试验用 DZ4125 高温合金粉末的粒度分布

Fig.7 Particle size distribution of tested DZ4125 superalloy powders by laser diffraction analysis

表 5 采用不同方法测定的 DZ4125 高温合金粉末的粒度和粒形

Table 5 Particle size and shape of superalloy DZ4125 powders measured by different methods

Alloy	Method	Particle size/ μm			Particle shape	
		D_{10}	D_{50}	D_{90}	SPHT	b/l
DZ4125	Laser diffraction analysis	40.5	70.2	114.4	-	-
	Dynamic image analysis	45.5	72.8	104.9	0.91	0.86

表 6 试验用 DZ4125 高温合金粉末的物理性能

Table 6 Physical properties of tested superalloy DZ4125 powders

Alloy	Apparent density/ g cm^{-3}	Tap density/ g cm^{-3}	Theoretical density/ g cm^{-3}	Compressibility/%	Flowability/ s (50 g)^{-1}
DZ4125	4.43	5.38	8.53	17.7	20.79
	52% theoretical density	63% theoretical density			

3 结 论

1) 采用 JMatPro 计算了叶片用 DZ4125 合金以及叶片-盘缘过渡区 (DZ4125+K418) 混合成分合金的平衡相图, 并采用 DSC 试验验证, 结果表明 DZ4125 比 K418 合金的固液凝固温度范围宽, MC 碳化物的开始析出温度比 K418 高。过渡区 DZ4125+K418 混合成分合金其液相线温度和 MC 碳化物开始析出温度介于 2 种合金之间, γ' 开始析出温度与 2 种合金相当。

2) DZ4125 合金粉末形貌主要为球形和近球形, 此外还含有少量卫星粉、空心粉、粘附粉和卫星-空心-包覆多形单体异形粉。表面和截面显微组织表明粉末主要呈树枝晶结构, 所含元素中偏析倾向较强的元素有 Hf、Ta、Ti 和 W, 而偏析倾向弱的元素包括 Ni、Co、Cr 和 Al, 高温合金粉末的元素偏析类型与铸造镍基高温合金相似, 但粉末组织更为细小均匀。

3) 对比研究了激光衍射和动态图像分析 2 种方法用于测定粉末粒度值, DZ4125 的中位径 D_{50} 分别为 70.2 和 72.8 μm 。2 种方法测量的粒度值接近, 数值具有可比性。动态图像法测得合金粉末均具有较好的球形度, 球形度 SPHT 和长径比 b/l 均值分别为 0.91 和 0.86。

4) 本研究所选 DZ4125 高温合金粉末具有较好的松装密度、振实密度和流动性, 其松装和振实密度分别约为合金理论密度的 52% 和 63%, 压缩度为 17.7%, 且具有较好的流动性 ($20.79 \text{ s } (50 \text{ g})^{-1}$)。

参考文献 References

- [1] Sims C T, Stoloff N S, Hagel W C. *Superalloys II*[M]. New-York: Wiley-Interscience, 1987
- [2] Reed R C. *The Superalloys: Fundamentals and Applications* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 122
- [3] Pollock T M, Tin S. *Journal of Propulsion & Power*[J], 2006, 22: 361
- [4] Craig B. *Advanced Materials & Processes*[J], 2008, 5: 33
- [5] Zheng L, Zhang G, Lee T L *et al. Mater Des*[J], 2014, 61: 61
- [6] Zhou T, Ding H, Ma X *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2018, 725: 299
- [7] Zhang Guoqing(张国庆), Zhang Yiwen(张义文), Zheng Liang (郑 亮) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2019, 55(9): 1133
- [8] Zhang Yongzhong(张永忠), Liu Yantao(刘彦涛), Cao Ye(曹 晔) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术) [J], 2015, 479(10): 44
- [9] Xu Z J, Zhang Y Z, Liu M K *et al. Rare Metals*[J], 2016, 35: 456
- [10] Jin Jutao(金具涛), Zhang Yongzhong(张永忠), Huang Can (黄 灿) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2010, 369(9): 94
- [11] Liang Y J, Liu D, Wang H M. *Scripta Mater*[J], 2014, 74: 80
- [12] Ren H S, Liu D, Tang H B *et al. Mat Sci Eng A*[J], 2014, 611: 362
- [13] Lin X, Yue T M, Yang H O *et al. Acta Mater*[J], 2006, 54: 1901
- [14] Shah K, Haq I, Khan A *et al. Mater Des*[J], 2014, 54: 531
- [15] Zheng Liang(郑 亮), Liu Zhaoyang(刘朝阳), Zhu Qiang(朱强) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(10): 3648
- [16] Li Yuanyuan(李元元), Zhang Datong(张大童), Xia Wei(夏伟) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 1998, 34(1): 95
- [17] Liu Wensheng(刘文胜), Peng Fen(彭 芬), Ma Yunzhu(马运柱) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2009, 19(6): 1074
- [18] Yu Weiyong(余伟泳), Xiao Zhiyu(肖志瑜), Chen Yingying (陈莹莹) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(3): 973
- [19] Zhang Shaochi(张少驰), Sun Zhonggang(孙中刚), Liang Zulei(梁祖磊) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(10): 3234
- [20] High Temperature Materials Branch of Chinese Society of Metals(中国金属学会高温材料分会). *China Superalloys Handbook*(中国高温合金手册, 下卷)[M]. Beijing: China Standard Press, 2012: 474
- [21] Min Zhixian(闵志先), Shen Jun(沈 军), Feng Zhourong(冯周荣) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2010, 46(12): 1543
- [22] Zhang Xiaoyue(张晓越), Liu Lin(刘 林), Huang Taiwen(黄太文) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(12): 2547
- [23] Ge Bingming(葛丙明), Liu Lin(刘 林), Zhang Jun(张 军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(5): 840

Characteristics of Ni-Based Superalloy Powders Used for the Gradient Integral Turbine Blisk by the Ultra-transient Solidified Additive Manufacturing II : Blade Alloy Powders

Zheng Liang¹, Liu Zhaoyang², Zhu Qiang², Song Lijun³, Li Zhou¹, Zhang Guoqing¹

(1. Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(2. Department of Mechanical and Energy Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

(3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The characteristics of superalloy powders used for the gradient integral turbine blisk by the ultra-transient solidified additive manufacturing were investigated. According to the temperature capacity of the alloy and the phase equilibrium diagram calculated by JMatPro, DZ4125 was selected as the blade material, whereas K418 alloys were selected as the disk rim material for integral turbine blisk. The superalloy powder were prepared by vacuum induction melting and argon gas atomization (VIGA) and sieved to the particle size range of 53~105 μm . The differential scanning calorimeter (DSC), field emission scanning electron microscopy (FESEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), laser diffraction particle size analyzer, dynamic image analysis system and comprehensive powder property analyzer were used to systematically characterize the phase transformation temperatures, microstructure, precipitated phase composition, element segregation, particle size and shape, apparent density, tap density and flowability of the selected superalloy powders. The results show that DZ4125 possesses wider solid-liquid temperature range than K418 alloy. The liquidus temperature and *MC* carbide initial precipitation temperature of the transition zone DZ4125+K418 hybrid composition alloy are between that of the two alloys, and the γ' onset precipitation temperature is equivalent to the two alloys. The morphology of DZ4125 alloy powders is mainly spherical and nearly spherical. The surface and cross-section microstructures are mainly dendritic structure. For the selected alloy powders, the elements Hf, Ta, Ti, Mo and W exhibit strong segregation tendency, while the elements with weak segregation tendency include Ni, Cr, Co and Al. There are fine *MC* carbides distributed in the interdendritic zone of the powder, and the size is about 200 nm. The particle size distribution of powders measured by laser diffraction and dynamic image analysis methods is similar. The D_{50} values of DZ4125 powder are 70.2 and 72.8 μm . The dynamic image analysis result shows that the DZ4125 alloy powders possess good sphericity, and the SPHT and *b/l* values are 0.91 and 0.86, respectively. The DZ4125 superalloy powders have good apparent density, tap density and flowability. The apparent density and tap density of the alloy powders can reach 52% and 63% of the theoretical density of the DZ4125 alloy, respectively. In addition, the DZ4125 superalloy powders possess compressibility of 17.7% and flowability of 20.79 s (50 g)⁻¹.

Key words: superalloy integral turbine blisk; DZ4125 powders; JMatPro; additive manufacturing; functionally graded materials

Corresponding author: Zheng Liang, Ph. D., Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, P. R. China, Tel: 0086-10-62498268, E-mail: liang.zheng@biam.ac.cn