

不同预热温度下电子束粉末床熔融K447A组织演变及力学性能研究

宋林彪, 罗 振, 武文迪, 李春杰, 张智胜, 郭 顺*

南京理工大学材料科学与工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年7月15日; 录用日期: 2026年8月13日; 发布日期: 2026年8月24日

摘 要

为阐明预热温度对电子束粉末床熔融(Electron Beam Powder Bed Fusion, EB-PBF)成形K447A镍基高温合金热历史、组织演化与力学响应的耦合作用, 采用850℃和1000℃两种预热温度制备K447A合金试样。利用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)和室温拉伸试验, 对试样成形完整性、 γ/γ' 组织、晶体学特征、残余应变及断裂行为进行了系统研究。结果表明, 两种预热条件下试样均形成沿构建方向定向生长的柱状晶和典型 γ/γ' 双相组织; 当预热温度由850℃提高至1000℃时, 熔池冷却过程和层间热累积状态得到改善, 枝晶间元素偏析和碳化物连续偏聚减弱, γ' 相析出更加充分且分布更加均匀。EBSD结果表明, 较高预热温度促进了组织回复和取向连续化, 小角度晶界比例增加, 局部取向差(KAM)降低, 并增强了<001>择优织构。室温拉伸结果显示, 1000℃预热试样的抗拉强度达到 1028.8 ± 26 MPa, 断后延伸率达到 $10.8 \pm 1\%$, 均优于850℃预热试样。断口分析表明, 随着预热温度升高, 断裂模式由以解理断裂为主逐渐转变为准解理与微孔聚合韧性断裂共同作用的混合断裂。研究表明, 提高预热温度能够通过“降低热应力 - 减弱偏析与晶界缺陷 - 促进 γ' 析出与回复 - 改善协调变形能力”的连续机制降低K447A合金裂纹敏感性, 并实现强度与塑性的协同提升。

关键词

电子束粉末床熔融, K447A镍基高温合金, 预热温度, 组织演变, 力学性能

Microstructural Evolution and Mechanical Properties of K447A Alloy Fabricated by Electron Beam Powder Bed Fusion at Different Preheating Temperatures

Linbiao Song, Zhen Luo, Wendi Wu, Chunjie Li, Zhisheng Zhang, Shun Guo*

*通讯作者。

文章引用: 宋林彪, 罗振, 武文迪, 李春杰, 张智胜, 郭顺. 不同预热温度下电子束粉末床熔融 K447A 组织演变及力学性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(8): 62-72. DOI: 10.12677/ms.2026.168175

Abstract

To clarify the coupling effect of preheating temperature on thermal history, microstructural evolution and mechanical response of K447A nickel-based superalloy fabricated via Electron Beam Powder Bed Fusion (EB-PBF), K447A alloy specimens were produced at two preheating temperatures of 850°C and 1000°C. Optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), electron backscatter diffraction (EBSD), and room-temperature tensile tests were employed to systematically investigate the forming integrity, γ/γ' microstructure, crystallographic characteristics, residual strain, and fracture behavior of the specimens. The results reveal that columnar grains epitaxially grown along the building direction and typical γ/γ' dual-phase microstructure are formed in specimens under both preheating conditions. When the preheating temperature rises from 850°C to 1000°C, the molten pool cooling procedure and interlayer thermal accumulation state are optimized. Interdendritic elemental segregation and continuous carbide segregation are alleviated, while the precipitation of γ' phase becomes more sufficient with a more uniform distribution. EBSD measurements demonstrate that a higher preheating temperature facilitates microstructural recovery and orientation homogenization, accompanied by an increased fraction of low-angle grain boundaries, reduced kernel average misorientation (KAM), and intensified $\langle 001 \rangle$ preferred texture. Room-temperature tensile testing indicates that the specimen preheated at 1000°C achieves an ultimate tensile strength of 1028.8 MPa and an elongation after fracture of 10.8%, both superior to those of the 850°C preheated counterpart. Fractographic analysis suggests that the fracture mode transforms gradually from cleavage-dominated fracture to a mixed fracture consisting of quasi-cleavage and microvoid coalescence ductile fracture as preheating temperature increases. This study demonstrates that elevating preheating temperature reduces the cracking susceptibility of K447A superalloy through a sequential mechanism: alleviating thermal stress - weakening segregation and grain boundary defects - promoting γ' precipitation and microstructural recovery - enhancing coordinated deformability, thereby achieving simultaneous improvement in strength and ductility.

Keywords

Electron Beam Powder Bed Fusion, K447A Nickel-Based Superalloy, Preheating Temperature, Microstructural Evolution, Mechanical Properties

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

K447A 是一种镍基沉淀强化高温合金。它在高温下强度高, 抗氧化和抗蠕变性能好, 因此常被用来制造航空发动机的涡轮叶片等关键部件[1][2]。这种合金之所以具备出色的高温性能, 一个重要原因是它内部含有大量(体积分数约 60%~70%)的强化相。这些强化相均匀分布在基体中, 能够有效阻挡位错运动, 从而起到强化作用[3]。Lu [3]等人的研究进一步指出, K447A 合金的力学性能很大程度上取决于 γ' 相的尺寸、形态和分布, 以及晶界碳化物的类型和形貌, 通过调控这些微观特征可以实现强度与塑性的协同优

化。此外，合金中加入了钨、钼、钴等元素来增强基体强度，加入碳、钎、钽等元素来形成碳化物，Pan [4]等人的研究表明，这些碳化物在铸态下主要呈骨架状或块状分布在枝晶间区域，对晶界强化起重要作用。但是，K447A 合金中铝和钛的总含量很高(超过 6 wt%)，这使它在高温下对裂纹非常敏感，焊接时极易开裂。Enrique [5]等人在综述中系统总结了高 γ' 镍基高温合金在增材制造中面临的挑战，指出这类合金因含有大量强化相形成元素，在快速凝固条件下极易产生凝固裂纹、液化裂纹和应变时效裂纹，属于典型的难打印材料。这一特性给它的铸造成形和后期修复都带来了不小的挑战[5] [6]。

粉末床熔融技术是一项重要的金属增材制造技术。它为突破传统工艺的限制，一次性成形复杂结构的零件提供了新的可能。目前，在镍基高温合金领域，研究较多的是激光粉末床熔融，像 IN718、IN625 这类合金的打印技术已经比较成熟。然而，对于 K447A 这种强化相含量高且难焊的合金，激光粉末床熔融就遇到了很大的困难。这是因为激光打印的冷却速度极快，且加热底板的温度通常不高。在成形 K447A 时，零件内部会产生很大的热应力，导致严重的凝固裂纹和液化裂纹，很难得到完全致密的零件[7] [3]。虽然可以通过调整打印参数、改变激光扫描方式或者微调材料成分来减少裂纹，但往往还是难以彻底消除[8]。

相比于激光粉末床熔融工艺，电子束粉末床熔融技术能够在真空环境下实现高温预热成形，有效降低成形过程中熔池与周围材料之间的温度梯度，并增强层间热累积效应[9]。对于高 γ' 含量镍基高温合金而言，预热温度不仅影响凝固过程中的热历史和元素扩散行为，同时还会影响 γ' 强化相析出、晶粒生长及织构形成等组织演化过程，最终决定材料的力学性能。Song [10]等研究指出，把预热温度提高到材料的韧脆转变温度或者强化相的溶解温度以上，是打印出无裂纹、高致密难焊镍基高温合金的关键方法。因此，预热温度已成为电子束粉末床熔融工艺中影响组织调控和性能优化的重要工艺参数。

目前关于 EB-PBF 制备 K447A 合金的研究仍较少，尤其缺乏围绕预热温度建立“热历史 - 组织演变 - 力学性能”关联机制的系统分析。基于此，本文采用 850℃ 和 1000℃ 两种预热温度制备 K447A 合金，并通过 OM、SEM/EDS、EBSD 及室温拉伸试验依次分析成形完整性、枝晶/碳化物与 γ' 析出、晶体取向与残余应变、拉伸性能及断裂行为。本文重点讨论预热温度如何改变 EB-PBF 过程中的冷却速率、元素扩散和原位热处理效应，并进一步影响 K447A 高 γ' 含量合金的裂纹敏感性和强塑性匹配，目的为难焊镍基高温合金的 EB-PBF 工艺窗口优化提供依据。

2. 实验材料与方法

2.1. 实验材料

在本研究中，试验材料为由中航迈特增材科技(北京)有限公司提供的 K447A 合金的球形粉末，粉末质量分数占比前十的元素如表 1 所示。

Table 1. Chemical composition of K447A alloy powder (wt%)

表 1. K447A 合金粉末化学成分(wt%)

Co	Cr	W	Al	Ta	Mo	Ti	Hf	C	Ni
10.15	8.29	10.49	5.62	3.12	0.72	1.07	1.35	0.14	Bal.

2.2. EB-PBF 工艺及试样制备

试样的打印采用中国航空工业制造技术研究院自主开发的 EB-PBF 设备完成，设备示意图如图 1(a) 所示。试样成形打印时采用尺寸为 $100 \times 100 \times 10 \text{ mm}^3$ 的 304 不锈钢板作为基板，将预热温度分别设定为 850℃ 和 1000℃。电子束工艺参数如表 2 所示，其中电子束电流为 10 mA，加速电压为 60 kV，粉末层厚

度为 0.09 mm，舱口距离为 0.09 mm 以及扫描速度为 750 mm/s，电子束扫描策略如图所示层间 90°。此外，整个成形仓使用 Fluke RSE 60 H 红外相机进行红外热监测。处理过程中腔室压力保持在 2×10^{-2} Pa。

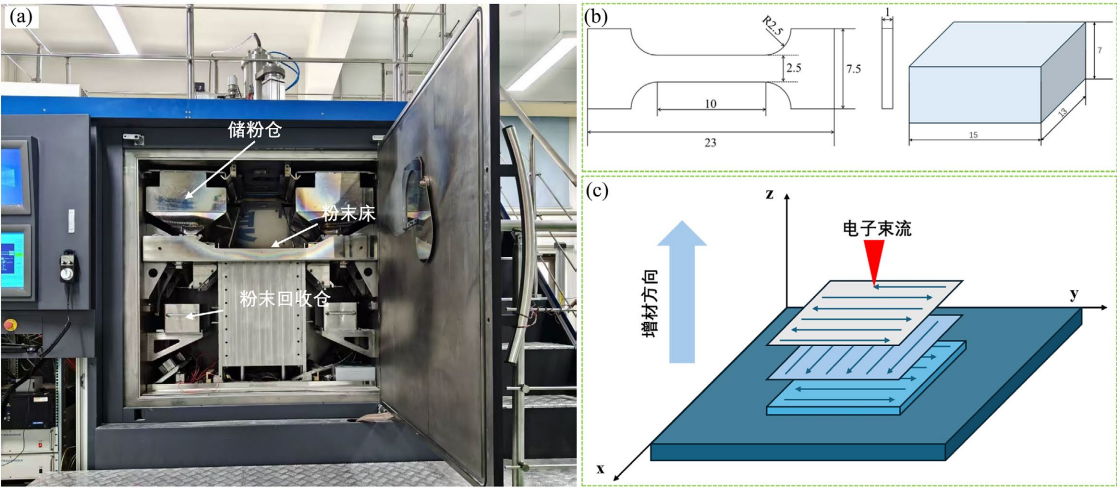


Figure 1. (a) EB-PBF equipment, (b) schematic diagram of tensile specimen dimensions and metallographic specimen, (c) 90° interlayer scanning strategy
图 1. (a) EB-PBF 设备, (b) 拉伸试样尺寸及金相试样示意图, (c) 90° 层间扫描策略

Table 2. Electron beam process parameters
表 2. 电子束工艺参数

粉末厚度	0.09	mm
扫描速度	750	mm/s
电子束电压	60	kV
电子束流	10	mA
扫描策略	层间 90°	-

2.3. 微观结构表征

微观结构的表征研究统一选取平行于构建方向的 YZ 平面作为分析截面，对于光镜和 SEM 分析，先将试样尺寸为 $15 \times 13 \times 7 \text{ mm}^3$ 的样品用碳化硅砂纸研磨，随后使用 $2.5 \text{ }\mu\text{m}$ 金刚石抛光剂进行机械抛光，再通过王水溶液($\text{HNO}_3\text{:HCl}$ 体积比 1:3)腐蚀 15~20 秒以显露组织。随即用光学显微镜观察整体显微组织，再由 FEI Quanta 250F 型扫描电子显微镜在 15 kV 加速电压下采集微观形貌，并同步借助能谱仪(EDS)获取元素分布信息。

EBSD 测试则需在机械抛光后追加一道终抛工序，即利用氧化物抛光液(OPS)持续抛光 2 小时，以去除表面残余应变层。EBSD 数据在配备 Oxford Instruments EBSD 探测器的 Zeiss Auriga 场发射扫描电镜上收集，加速电压设为 20 kV，扫描步长取 $2 \text{ }\mu\text{m}$ ，为保证数据的统计代表性，每个试样的面扫描区域均设定为 $500 \times 500 \text{ }\mu\text{m}^2$ ，覆盖不少于 100 个晶粒。采集过程中，各试样的衍射花样标定率均需要保持在 95% 以上。

2.4. 力学性能测试

为确保拉伸试验的结果具有可靠性，每种条件下均至少进行三次独立测试。拉伸加载在 Walter+bai

LFM 20 kN 试验机上完成, 加载速率设定为 0.5 mm/min。所测试样取自电子束粉末床熔融增材块体, 采用电火花线切割工艺切割, 其几何尺寸如图 1(b)所示。切割后的试样表面及边缘使用 600#碳化硅砂纸进行打磨处理, 以消除加工引起的不平整。后续观察断口形貌时需要使用超声振动清洗机清洗表面氧化层以及油污。

3. 结果与讨论

3.1. 预热温度对成形完整性与宏观组织特征的影响

EB-PBF 成形 K447A 合金的宏观组织首先反映了预热温度对熔池凝固稳定性和裂纹敏感性的影响。由图 2 可见, 两种预热条件下试样均形成沿构建方向延伸的柱状晶组织, 这是由于后续熔道在已凝固层上发生外延生长, 晶粒沿主要热流方向竞争生长所致。当预热温度为 850℃时, 图 2(a)中可观察到清晰的胞状/枝晶轮廓, 枝晶排列较为致密, 晶界和枝晶间区域存在连续或半连续的碳化物条带; 虽然大部分区域未出现贯穿裂纹, 但图 2(b)显示局部仍存在沿晶界扩展并相互连通的裂纹。这说明 850℃预热能够在一定程度上降低 EB-PBF 过程中的热应力, 但对于 Al、Ti 含量较高、裂纹敏感性较强的 K447A 合金而言, 局部枝晶间偏析和晶界弱化仍可能诱发热裂纹。

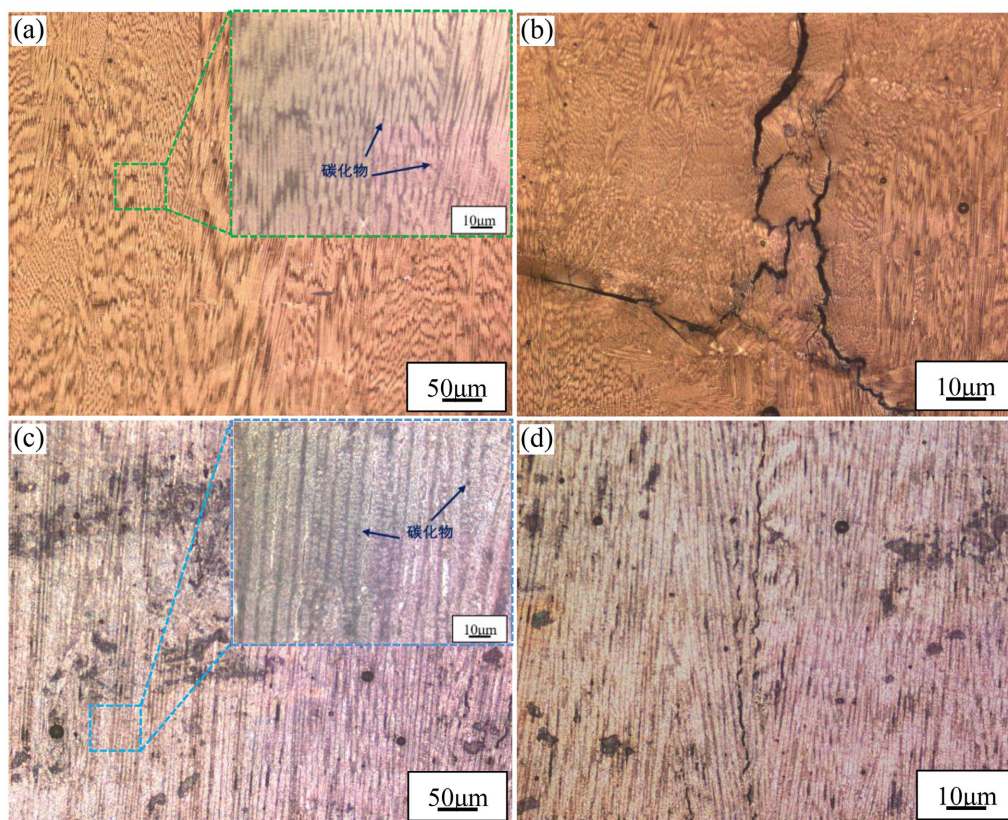


Figure 2. Optical microscope images of K447A alloy at different preheating temperatures, (a) (b) preheating temperature 850℃, (c) (d) preheating temperature 1000℃

图 2. 不同预热温度下的 K447A 合金光学显微镜图, (a) (b)预热温度 850℃, (c) (d)预热温度 1000℃

当预热温度提高至 1000℃时, 图 2(c), 图 2(d)显示试样仍保持柱状晶定向生长特征, 但枝晶轮廓相对模糊, 枝晶间第二相由连续偏聚逐渐转变为细小、离散分布, 组织完整性明显改善。该变化表明, 较

高预热温度降低了熔池与周围已凝固区域之间的温度梯度和热收缩应力，同时延长了材料在高温区的停留时间，有利于枝晶间元素再扩散和碳化物分布均匀化。因此，1000℃预热不仅改善了宏观成形质量，也为后续 γ' 相充分析出、残余应变降低和力学性能提升提供了更稳定的初始组织基础。

3.2. 预热温度对显微组织演变及裂纹形成的影响

在宏观组织差异的基础上，SEM 进一步揭示了预热温度对 γ/γ' 组织、枝晶间第二相以及微缺陷形态的影响。K447A 合金中 Al、Ti、Ta 等元素主要参与 γ' 相形成，C、Hf、Ta 等元素易在枝晶间形成 MC 型碳化物，而 W、Mo、Co 等元素则对 γ 基体起固溶强化作用。因此，EB-PBF 过程中的冷却速率和层间热循环将同时控制元素偏析、 γ' 析出和碳化物分布，进而决定晶界稳定性和裂纹敏感性。由图 3 可见，两种预热条件下试样均由 γ 基体、 γ' 强化相及少量枝晶间析出相组成，但 1000℃ 预热样品的析出相分布更加均匀，组织连续性更好。

图 3(a)，图 3(b) 显示，850℃ 预热试样整体较为致密，未观察到大面积粗大缺陷，但基体中仍存在少量微米级孔洞和局部不连续区域。高倍图中 γ' 相主要呈细小弥散颗粒状分布，说明快速凝固后形成的过饱和 γ 基体在随后的层间热循环中发生了一定程度的析出。然而，850℃ 条件下冷却速率仍较高，Al、Ti 等 γ' 形成元素的短程扩散和均匀化过程受限，使 γ' 相析出不够充分，枝晶间区域仍容易保留较强的成分起伏。与此同时，晶界或枝晶间连续分布的碳化物会削弱局部协调变形能力，在外加或残余拉应力作用下成为裂纹萌生和扩展的优先通道。

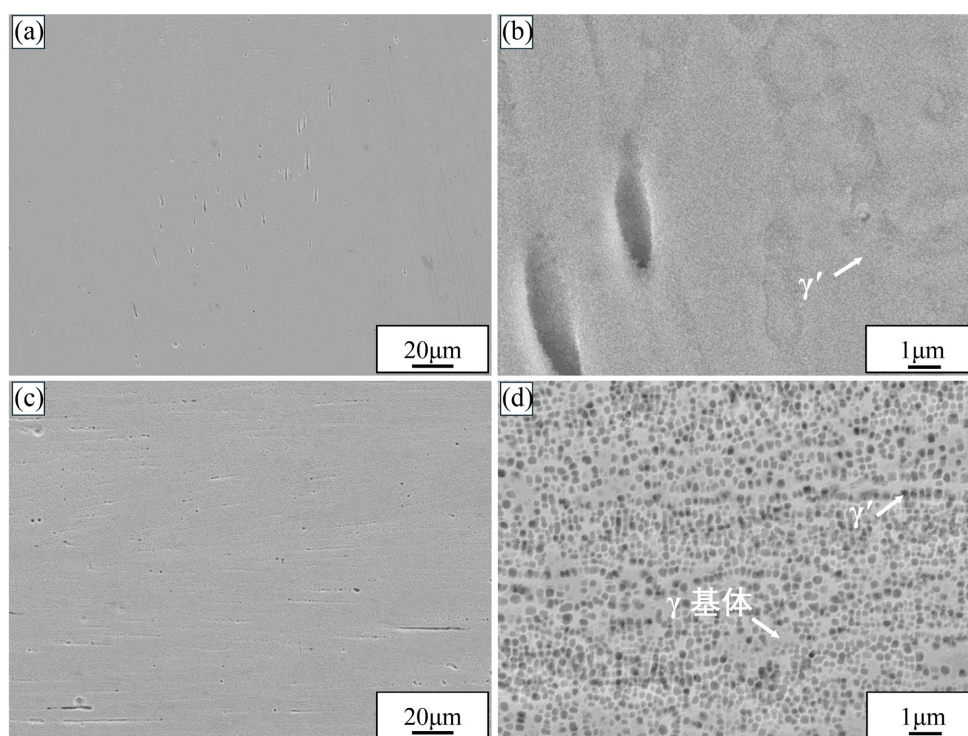


Figure 3. YZ plane SEM images of K447A alloy prepared at different preheating temperatures. (a) (b) 850℃ preheating, (c) (d) 1000℃ preheating

图 3. K447A 合金在不同预热温度下制备的 YZ 平面 SEM 图像。(a) (b) 850℃ 预热，(c) (d) 1000℃ 预热

相比之下，1000℃ 预热试样在图 3(c)，图 3(d) 中表现出更加连续、均匀的 γ/γ' 两相组织。大量 γ' 相在 γ 基体中均匀析出，尺寸较 850℃ 试样有所增大，形貌也更加规则。这主要源于较高预热温度引起的两方

面作用：一是熔池冷却速率降低，枝晶间与枝晶内部的元素再分配更加充分，从而减弱 Al、Ti 等元素的局部偏析；二是层间热累积增强，使已凝固材料在成形过程中经历类似原位时效的高温停留，为 γ' 相形核、长大和分布均匀化提供了条件。因此，1000℃ 预热样品的 γ' 强化相更接近均匀弥散状态，晶界第二相连续性降低，组织稳定性和变形协调性均得到改善。

图 4 所示 EDS 线扫进一步说明了 850℃ 预热条件下裂纹形成与枝晶间偏析之间的关系。裂纹附近 Al 和 Ti 信号明显升高，表明 γ' 形成元素在枝晶间和晶界区域发生富集。对于高 γ' 含量 K447A 合金而言，凝固末期枝晶间富集的低熔点残余液膜或 γ/γ' 共晶组织在热收缩应力作用下难以及时补缩和协调变形，易形成沿晶界扩展的热裂纹；同时，连续碳化物和局部孔洞会进一步提高应力集中程度。提高预热温度后，温度梯度降低、残余应力减小，元素扩散和组织回复增强，因而能够削弱这种“偏析 - 晶界弱化 - 裂纹扩展”的链式过程。

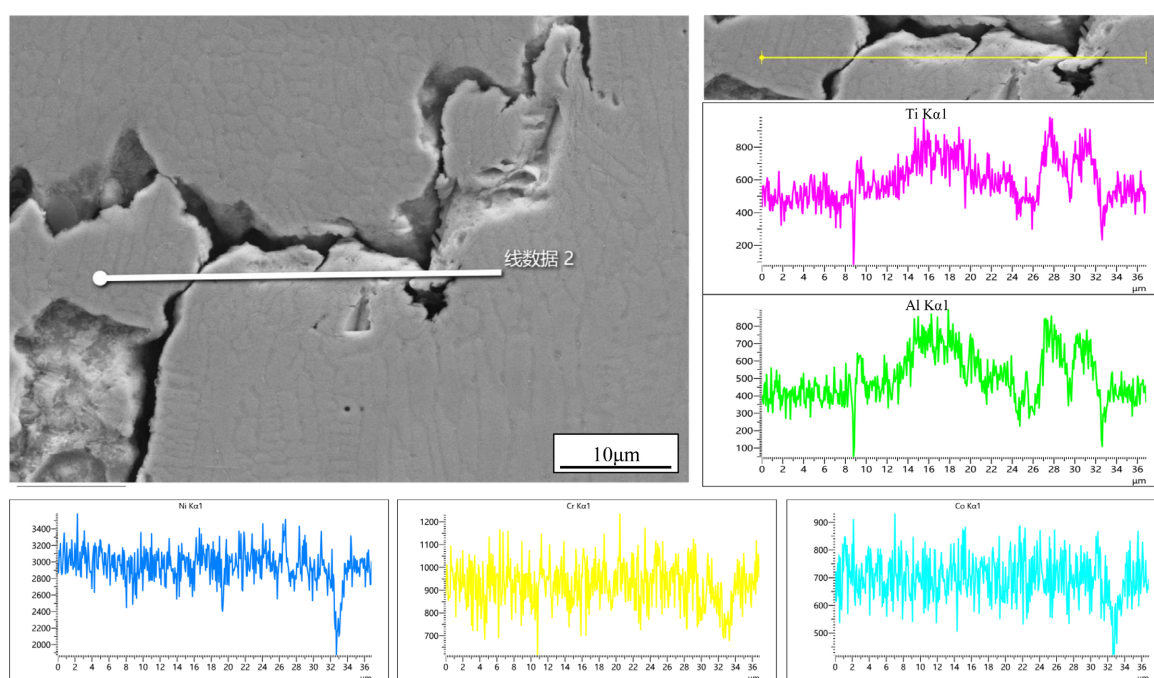


Figure 4. EDS line scan results at the crack of the sample at 850℃ preheating temperature

图 4. 预热温度 850℃ 试样裂纹处 EDS 线扫结果

3.3. 预热温度对晶体学特征和残余应变的影响

为了将显微组织差异与变形行为进一步联系起来，对 850℃ 和 1000℃ 预热试样 YZ 平面的 EBSD 结果进行了比较，如图 5 所示。IPF 图(图 5(a), 图 5(e))表明，850℃ 预热样品中的柱状晶虽然总体沿构建方向延伸，但晶粒内部存在明显偏转、分叉和局部破碎，取向连续性较差；晶界统计显示其大角度晶界(HAGBs)比例达到 75.3%。这种组织特征与较高温度梯度和较强热应力有关：快速冷却和多次热循环容易造成局部应变积累、枝晶生长方向扰动以及晶粒取向差增大。1000℃ 预热样品则呈现更连续的柱状晶形貌，晶界较平直，晶粒尺寸和取向分布更稳定，小角度晶界(LAGBs)比例提高至 41.7%，说明较高预热温度促进了位错重排和亚晶界形成，使晶粒内部取向梯度以较低能量形式得到释放。

KAM 图(图 5(b), 图 5(f))进一步反映了残余应变和位错密度的差异。850℃ 预热样品中高 KAM 值主要集中在晶界、晶粒分叉区域以及部分线状缺陷附近，表明热应力释放不足并导致局部位错堆积和应变

集中。1000℃预热样品整体 KAM 值明显降低, 仅在少数缺陷附近出现离散高值区。需要指出的是, 小角度晶界比例增加与 KAM 降低并不矛盾: 较高预热温度使部分随机分布的位错通过回复作用重新排列为较稳定的亚晶界, 降低了晶内局部取向差和长程残余应变。因此, 1000℃预热能够在保持柱状晶外延生长特征的同时, 提高组织取向连续性并降低潜在裂纹驱动力。

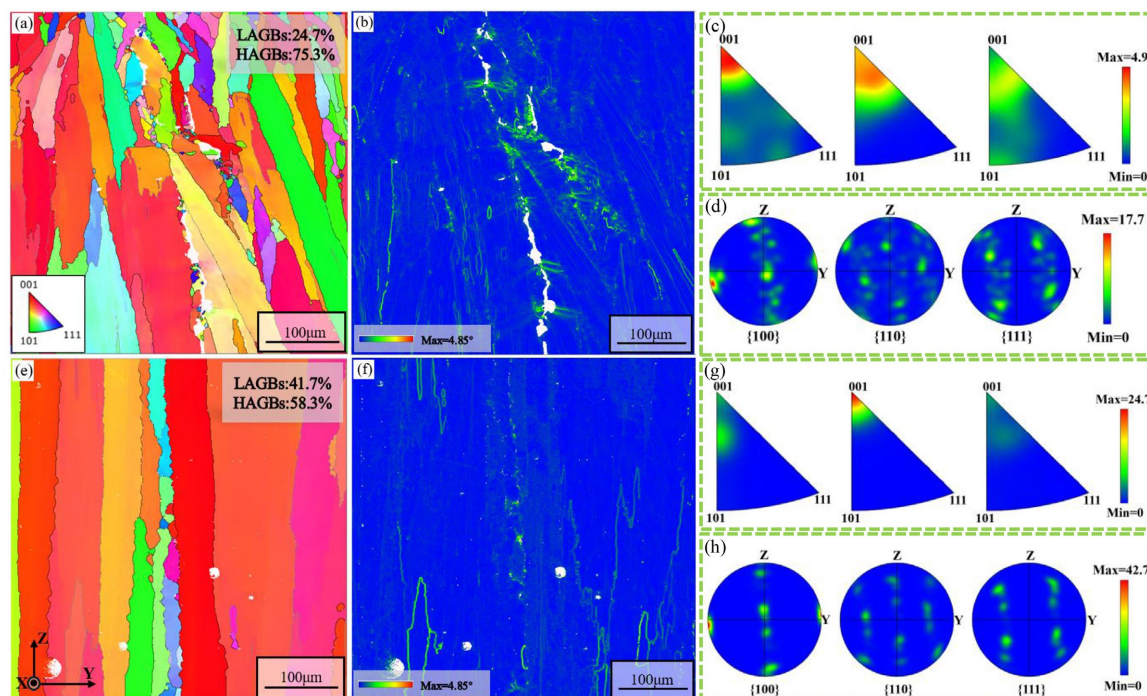


Figure 5. K447A samples prepared at different preheating temperatures ((a)~(d) 850℃; (e)~(h) 1000℃) on the YZ plane. (a) (e) inverse pole figure (IPF) color figure, (b) (f) KAM figure, (c) (g) IPF figure, (d) (h) PF figure

图 5. 不同预热温度下制备的 K447A 样品((a)~(d) 850℃; (e)~(h) 1000℃)在 YZ 平面上的 EBSD 结果。(a) (e)逆极图 (IPF)颜色图, (b) (f) KAM 图, (c) (g) IPF 图, (d) (h) PF 图

极图和反极图结果表明, 预热温度还会改变 K447A 合金的择优取向。850℃预热样品的晶粒取向分散, 织构强度较弱, 这与晶粒分叉、局部裂纹和应变集中导致的取向扰动有关。1000℃预热样品中<001>方向的取向集中程度明显提高, PF 图中的高强度区域更加对称, 说明晶粒在更稳定的热流条件下沿 FCC 合金典型的<001>枝晶优先生长方向持续外延生长。较强的<001>柱状晶织构有利于降低晶界取向突变, 提高载荷传递连续性, 从而为后续拉伸过程中的协调变形提供晶体学基础。

综上, 预热温度升高不仅改变了 γ' 相和碳化物等显微组织特征, 也通过降低热应力、促进回复和强化择优生长改善了 EBSD 尺度上的组织稳定性。1000℃预热样品具有更低 KAM 值、更高 LAGB 比例和更明显<001>织构, 这些特征共同表明其残余应变水平较低、晶粒取向连续性更好, 因而更有利于抑制裂纹萌生并提高塑性变形能力。

3.4. 预热温度对拉伸性能及变形机制的影响

图 6 给出了不同预热温度下 EB-PBF 成形 K447A 合金的室温拉伸性能。850℃预热试样的屈服强度约为 788.5 ± 17 MPa, 抗拉强度为 961.4 ± 24 MPa, 断后延伸率为 $4.4 \pm 0.4\%$; 1000℃预热试样的屈服强度约为 782.3 ± 4.4 MPa, 抗拉强度提高至 1028.8 ± 26 MPa, 断后延伸率提高至 $10.8 \pm 1\%$ 。可以看出, 提高预热温度后屈服强度略有降低, 但抗拉强度和塑性显著提高。这一结果说明, 1000℃预热并非单纯通

过提高初始位错密度或细晶强化提升强度,而是通过改善组织完整性、 γ' 析出和后期加工硬化能力,延缓裂纹失稳扩展,从而提升极限承载能力和断裂延性。

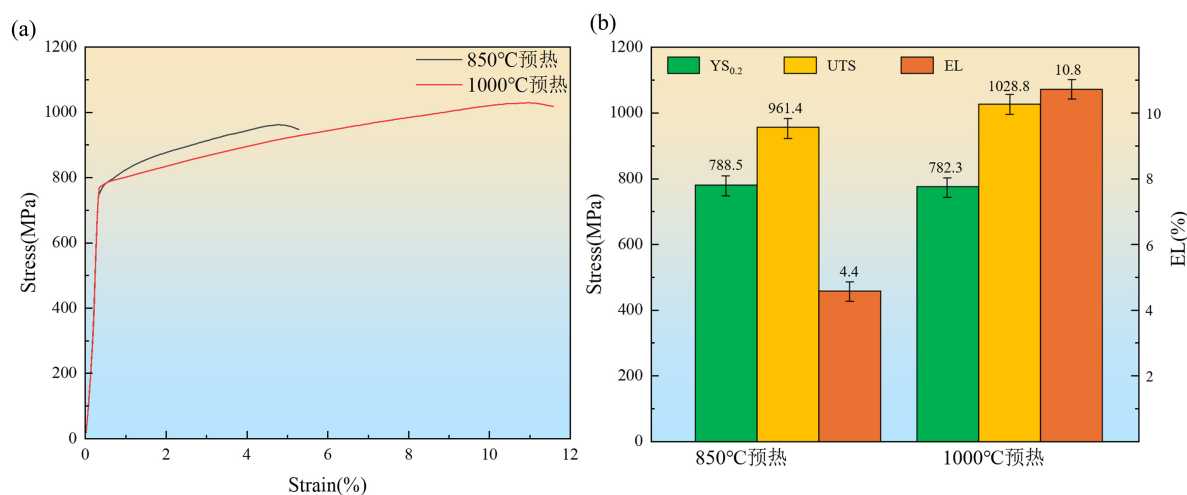


Figure 6. Tensile properties at different preheating temperatures

图 6. 不同预热温度下的拉伸性能

结合前述组织和 EBSD 结果,力学性能差异可归因于三类协同机制。第一,850°C 预热试样中局部晶界裂纹、连续碳化物和枝晶间偏析构成了弱连接区域,拉伸时易发生应力集中和裂纹快速连通,导致材料在较小塑性变形阶段即提前失效;1000°C 预热试样中贯穿性裂纹基本消除,碳化物分布更离散,晶界结合和组织连续性提高。第二,1000°C 预热促进 Al、Ti 等元素参与 γ' 相析出,使 γ' 相更加均匀弥散。均匀 γ' 相在变形过程中能够持续阻碍位错运动,增强加工硬化能力,使材料在屈服后仍能保持较高承载能力。第三,EBSD 结果显示 1000°C 预热试样的 KAM 值较低、回复更充分且 $\langle 001 \rangle$ 织构更稳定,说明残余应变和局部取向突变减少,载荷传递更加均匀。虽然回复作用会降低一部分由高位错密度贡献的屈服强度,但缺陷敏感性降低和加工硬化能力提高共同使抗拉强度与断后延伸率同步提升。

3.5. 预热温度对拉伸断裂行为的影响

断口形貌能够直接反映裂纹萌生、扩展和最终失效方式。图 7(a), 图 7(b) 显示,850°C 预热试样断口以大面积解理面和解理台阶为主,仅局部存在少量浅小韧窝,整体表现出明显的脆性或准解理断裂特征。结合图 2、图 4 和图 5 可知,该试样中局部晶界裂纹、Al/Ti 偏析和连续碳化物共同削弱了晶界结合强度;同时较高 KAM 值对应的残余应变和位错堆积加剧了局部应力集中。拉伸过程中,裂纹优先在晶界弱化区、碳化物富集区或原有微裂纹尖端形核,并在较小塑性变形下快速扩展,因此断口塑性变形痕迹不足,最终断后延伸率仅为 4.4% 左右。

1000°C 预热试样的断口形貌明显不同,如图 7(c), 图 7(d) 所示,断口表面除少量准解理特征外,分布有大量细小且较均匀的韧窝,断口起伏增大,表现为准解理断裂与微孔聚合韧性断裂并存的混合断裂模式。韧窝的形成通常与第二相颗粒或微孔周围的局部塑性变形、孔洞长大和聚合有关。由于 1000°C 预热降低了晶界裂纹和连续碳化物偏聚,裂纹不再沿单一弱化通道快速贯通,而是在变形过程中经历更多微孔形核、长大和聚合过程;同时均匀 γ' 相提供持续加工硬化,使材料能够吸收更多塑性变形能量。

因此,断裂行为的变化与拉伸性能提升具有一致的组织学基础。850°C 预热条件下,裂纹敏感性和残余应变较高,材料更容易发生沿晶界弱化区快速扩展的脆性断裂;1000°C 预热条件下,组织均匀化、 γ' 析

出优化、残余应力降低和<001>柱状晶织构稳定化共同提高了协调变形能力，使断裂机制向准解理/韧性混合模式转变。这种断裂模式转变正是 1000℃ 预热试样获得更高抗拉强度和更大延伸率的直接原因。

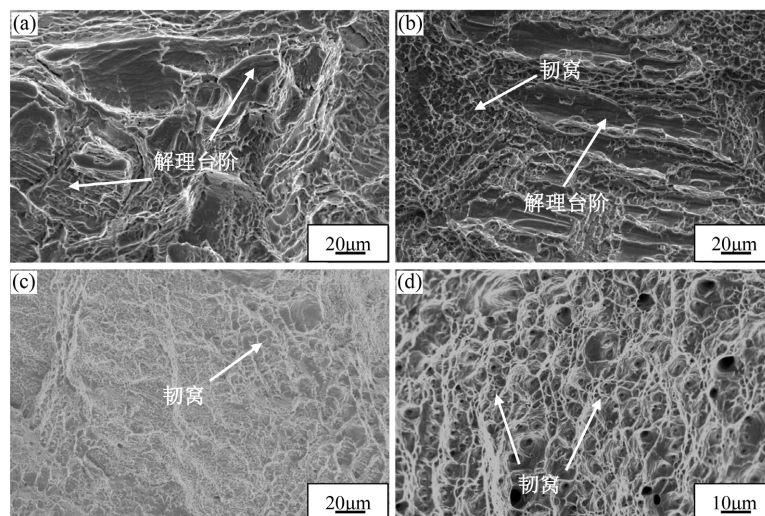


Figure 7. SEM diagram of tensile specimen fracture at different preheating temperatures. (a) (b) The preheating temperature is 850℃, (c) (d) The preheating temperature is 1000℃

图 7. 不同预热温度下拉伸断口 SEM 形貌: (a) (b) 850℃; (c) (d) 1000℃

4. 结论

本文采用 EB-PBF 技术，在 850℃ 和 1000℃ 两种预热温度条件下制备 K447A 镍基高温合金，围绕预热温度引起的热历史变化，系统分析了成形完整性、 γ/γ' 组织、晶体学特征、拉伸性能和断裂行为之间的内在关联，得到以下结论：

(1) 两种预热温度条件下制备的 K447A 合金均形成沿构建方向外延生长的柱状晶组织，并呈现典型 γ/γ' 双相结构。与 850℃ 相比，1000℃ 预热降低了凝固过程中的温度梯度和热应力，减弱枝晶间元素偏析和碳化物连续偏聚，使晶界裂纹数量、尺寸和连通性显著降低，组织完整性明显改善。

(2) 预热温度升高强化了 EB-PBF 过程中的层间热累积和原位时效作用。1000℃ 预热条件下，Al、Ti 等 γ' 形成元素扩散和再分配更加充分， γ' 相析出更加完整、尺寸略有增大且分布更加均匀；同时晶界第二相由连续偏聚向离散分布转变，从而提高了 γ/γ' 组织稳定性和晶界协调变形能力。

(3) EBSD 分析表明，1000℃ 预热能够促进组织回复和取向连续化。与 850℃ 试样相比，1000℃ 试样小角度晶界比例提高至 41.7%，KAM 值明显降低，说明残余应变和局部位错堆积得到缓解；同时更稳定的热流条件增强了<001>择优织构，有利于柱状晶连续生长和载荷均匀传递。

(4) 预热温度对 K447A 合金室温拉伸性能具有显著影响。850℃ 预热试样的抗拉强度和断后延伸率分别为 $961.4 \pm 24\%$ 和 $4.4 \pm 0.4\%$ ，而 1000℃ 预热试样分别达到 $1028.8 \pm 26\text{ MPa}$ 和 $10.8 \pm 1\%$ 。尽管 1000℃ 预热试样屈服强度因回复作用略有降低，但其组织完整性、 γ' 弥散强化和加工硬化能力明显改善，最终实现抗拉强度与塑性的同步提升。

(5) 断口分析表明，随着预热温度由 850℃ 提高至 1000℃，断裂机制由以解理/准解理快速扩展为主逐渐转变为为准解理与微孔聚合韧性断裂共同作用的混合模式。该转变源于晶界弱化减轻、残余应变降低和裂纹敏感性下降，进一步证明提高预热温度是优化 EB-PBF 成形 K447A 合金组织 - 性能匹配的有效途径。

尽管本研究系统揭示了预热温度对 EB-PBF 成形 K447A 合金组织演化及力学性能的影响规律,但仍需正视若干局限,这些局限为后续深入研究指明了方向。首先,电子束功率、扫描速度及扫描间距等关键工艺参数均固定于单一水平,未系统考察其与预热温度的交互作用。不同预热条件下,熔池热力学行为和凝固动力学可能发生显著变化,最优工艺参数窗口亦可能相应偏移,固定参数设置或许在一定程度上限制了对预热温度调控效果的真实评估,也使得结论的外推需谨慎。其次,本研究聚焦于沉积态试样的微观组织与室温拉伸性能,未涉及固溶时效、热等静压等常规后处理工艺。实际工程应用中,后处理不仅显著影响 γ' 相的尺寸、形态与分布,还可改变晶界碳化物的连续性及消除残余应力,其与预热温度的耦合效应对最终服役性能的影响有待进一步量化。此外,本研究仅对比了 850℃ 和 1000℃ 两个预热水平,未评估更高预热温度可能带来的弊端。尽管进一步提升预热温度有助于降低热应力并促进元素扩散均匀化,但过高的预热温度亦可能诱发晶粒异常粗化、 γ' 相在沉积过程中发生过时效长大、晶界低熔点相重熔,甚至促使有害拓扑密排相析出,这些变化均可能劣化合金的高温持久性能和抗蠕变能力。因此,预热温度的选择需在裂纹抑制、组织稳定性与力学性能三者之间进行综合权衡,未来研究应结合多参数工艺协同优化、后处理制度调控及高温服役行为评价,以建立更具普适性和工程指导价值的工艺-组织-性能关联模型。

基金项目

本文的研究工作得到了国家重点研发计划(2023YFB4605000)资助。

参考文献

- [1] Chen, L., Yu, G., Zhang, X., Zhu, L., Li, Y. and Ren, X. (2024) Effect of Heat Treatment on the Microstructural Evolution and Mechanical Property of Nickel-Based Superalloy K447A Manufactured by Powder Bed Fusion Laser Beam (PBF-LB). *Materials Science and Engineering: A*, **910**, Article 146874. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146874>
- [2] 胡聘聘, 王越, 何金珊, 等. 微晶铸造对 K447A 合金 760℃ 持久性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2025, 37(8): 1077-1085.
- [3] Lu, G., Zhao, T., Zhang, C., Wen, Z. and Yue, Z. (2026) Effect of Solution Heat Treatment on Microstructures and Tensile Properties of K447A Ni-Based Superalloy. *Intermetallics*, **189**, Article 109093. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2025.109093>
- [4] Pan, C., Yao, Z., Ma, Y., Li, D., Yao, K., Chen, Y., et al. (2023) Solidification Microstructure Characteristics and Their Formation Mechanism of K447A Nickel-Based Superalloy for Dual-Performance Blisk. *Materials Characterization*, **203**, Article 113155. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.113155>
- [5] Enrique, P.D., Minasyan, T. and Toyserkani, E. (2025) Laser Powder Bed Fusion of Difficult-to-Print γ' Ni-Based Superalloys: A Review of Processing Approaches, Properties, and Remaining Challenges. *Additive Manufacturing*, **106**, Article 104811. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2025.104811>
- [6] 都贝宁, 杨金侠, 崔传勇, 等. 晶粒细化对 K417G 高温合金蠕变性能的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(11): 1384-1392.
- [7] 胡聘聘, 丁宁, 王越, 等. 晶粒细化对 K447A 合金持久性能的影响[J]. 航空材料学报, 2025, 45(5): 150-160.
- [8] 汤鑫, 刘发信, 韩梅. 高温合金细晶铸造技术研究[J]. 材料工程, 1997(9): 24-27.
- [9] Wei, Q., Du, S., Hu, Q., Nie, P., Yao, C. and Huang, J. (2025) Laser Remelting Driven Synergy of Ordered Precipitation Strengthening and Sub-Grain Structure for Enhanced Strength-Toughness in K447A Superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, **944**, Article 148889. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.148889>
- [10] 宋林彪, 罗振, 武文迪, 等. 不同预热温度下电子束粉末床熔融 GH3536 组织演变与力学性能研究[J]. 材料科学, 2025, 15(12): 2131-2138.