● 试验研究 Experimental Research ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4234

激光选区熔化 GH4169 合金富氧燃烧行为研究

周家轩[1,2],司宏丽[1],杨文超[3],张少华[1],卢玉章[1,3]

(1. 中科院金属研究所,辽宁 沈阳 110016; 2. 东北大学 材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110819;3. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072)

摘 要:GH4169 合金作为航空航天发动机重要的热端部件材料,在高温富氧环境下服役时易发生金属燃烧,导致灾难性事故。基于自主研制的金属材料富氧燃烧实验设备,研究了激光选区熔化制备 GH4169 合金的阻燃性能和燃烧行为,对其在高温下的使用具有重要意义。激光选区熔化成型 GH4169 合金沉积态显微组织呈现典型的鱼鳞状形貌,晶粒取向以 <001> 方向为主并生成跨越多个熔池生长的柱状晶,在晶界和枝晶间析出了大量岛链状 Laves 相。燃烧结果表明,激光选区熔化成型制备的 GH4169 合金在 99.5%纯 O_2 室温点燃条件下,燃烧阈值约为 3.7 MPa,与锻造 GH4169 合金的阻燃性能相当。燃烧区形貌分析表明,Al、Ti、Nb 等元素是易燃烧元素,大量参与燃烧形成氧化物。Ni、Fe 是不易燃烧元素,其中 Ni 富集在熔化区。热影响区存在大量的 Laves 熔化孔洞。由于 Laves 相富含 Nb、Ti 等高燃烧热值元素且熔点较低,在燃烧时会优先基体熔化参与燃烧,对合金的阻燃性能十分不利。因此,为了改善合金阻燃性能,需改善激光选区熔化成型工艺和制定合理的热处理制度消除 Laves 相。

关键词:金属燃烧;GH4169;Laves 相;激光选区熔化;阻燃性能

中图分类号:TG132.3 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2025)02-0136-08

Study on the Oxygen-enriched Combustion Behavior of Selective Laser Melting GH4169 Alloy

ZHOU Jiaxuan[1,2], SI Hongli[1], YANG Wenchao[3], ZHANG Shaohua[1], LU Yuzhang[1,3]

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: GH4169 alloys are important end component materials for aerospace engines. When serving in a high-temperature and oxygen-rich environment, metal combustion is prone to occur, resulting in catastrophic accidents. On the basis of the self-developed experimental equipment for the oxygen-enriched combustion of metal materials, the flame retardancy and combustion behavior of the GH4169 alloy prepared by selective laser melting were studied, which is highly important for its use at high temperatures. The microstructure of the as-built GH4169 alloy shows a typical fish-scale morphology. The grain texture is oriented mainly in the <001> direction and generates columnar crystals that grow across multiple molten pools. The precipitated phase is mainly the island-chain Laves phase, which precipitates at the grain boundaries and interdendrites. The combustion results show that the burning pressure threshold of SLM-GH4169 is approximately 3.7 MPa under 99.5% pure O_2 ignition at room temperature, which is equivalent to the flame retardancy of the forged GH4169 alloy. The analysis of the morphology of the combustion zone revealed that Al, Ti, Nb and other elements are flammable, and many of these elements participate in combustion to form oxides. Ni does not burn easily and is enriched in the melting zone. Many holes are observed in the heat-affected zone, which are caused by the melting of the Laves phase. Because the Laves phase is rich in high-combustion calorific value elements such as Nb and Ti and has a low melting point, it will preferentially melt compared with the matrix and participate in burning during combustion, which is very

收稿日期:2024-11-20

基金项目:西北工业大学凝固技术国家重点实验室开放课题(SKLSP202402);国家自然科学基金(52150233);中国科学院重点部署项目(ZDRW-CN-2021-2-1)

作者简介:周家轩,2000 年生,硕士生.研究方向为激光选区熔化 GH4169 富氧燃烧. Email: zjx120019@163.com

通信作者:张少华,1984 年生,研究员.研究方向为高温合金. Email: zhangshaohua@imr.ac.cn

引用格式:周家轩,司宏丽,杨文超,张少华,卢玉章.激光选区熔化 GH4169 合金富氧燃烧行为研究[J].铸造技术,2025,46(2):136-143.

ZHOU J X, SI H L, YANG W C, ZHANG S H, LU Y Z. Study on the oxygen-enriched combustion behavior of selective laser melting GH4169 alloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(2): 136-143.

中国知网 https://www.cnki.net

unfavourable to the flame retardancy of the alloy. Therefore, to improve the flame retardant properties of the alloy, it is necessary to improve the laser selective melting process and formulate a reasonable heat treatment system to eliminate the Laves phase.

Key words: metal combustion; GH4169; Laves phase; selective laser melting; flame retardant property

GH4169 合金是一种典型的沉淀强化型镍基高温合金，主要强化相是 γ′-Ni_3(Al，Ti)和 γ″-Ni_3Nb，设计使用温度为 -253~650 ℃，瞬时应用温度(火箭发动机)可以达到 800 ℃[1]。GH4169 合金是航空航天发动机和工业燃气轮机重要热端部件使用材料，但由于一些航天发动机部件用量少且具有复杂的内腔结构，采用铸造或锻造制备时存在工艺复杂、周期长、材料利用率低等问题[2]。而选区激光熔化技术(selective laser melting, SLM)利用激光逐点熔化粉末床并逐层沉积，特别适于制造具有复杂内腔结构高温合金、钛合金等零件，其中选区激光熔化制备的 GH4169 合金也成为近年来的研究热点[3-5]。然而，火箭发动机热端部件服役工况极为苛刻，GH4169 合金需在高温、高压、富氧的极端环境中运行，期间可能由于异常的热传递、摩擦热或颗粒撞击引发金属燃烧，从而导致发动机爆炸的灾难性事故[6]。

近几年，对金属的燃烧进行了大量研究[7-10]，金属的燃烧受诸多条件影响，如合金元素、析出相、燃烧过程中的相变以及氧化物等因素[11-13]。王宏亮等[14]在低氧压下对 GH4202、GH4169 和纯 Ni 进行了富氧燃烧实验，发现 Ni 含量高的合金阻燃性能更好。Shao 等[15-17]在富氧气氛下系统研究了钛及其合金的阻燃性能和燃烧机制，例如在 Ti-25V-15Cr 和Ti-6Al-4V 合金的研究中指出点火温度主要取决于合金元素，燃烧速度受相结构的影响[16]。曹姝婷等[18]通过 GH4061 合金高压富氧燃烧实验，揭示了燃烧过程中氧化物的产生及演化。

尽管已经进行了许多研究来揭示金属燃烧的基本特性，但主要集中在传统铸造和锻造合金的研究，关于激光选区熔化成形合金的阻燃性能和燃烧行为的研究报道甚少。本文通过促进点火燃烧设备测试了 SLM 制备的 GH4169 合金阻燃性能，并探究其燃烧行为，为 SLM 制备 GH4169 合金的燃烧机理研究提供了依据。

1　实验材料与方法

实验用 GH4169 粉末化学成分如表 1 所示，采用 EOS M290 型选区激光熔化设备进行打印。工艺参数为：激光功率 285 W，激光扫描速度 960 mm/s，扫描间距 0.11 mm，相邻层间旋转角度为 67°，铺粉层厚为 30 μm，打印前基板预热到 80 ℃，打印过程中采用氩气保护。将打印完的合金在平行于构建方向上取 ϕ16 mm 的圆柱，通过线切割等机械加工方法，按照实验标准加工成直径为 3.17 mm、长 120 mm 的细棒作为燃烧试棒。

促燃法(promoted ignition-combustion, PIC)试验在自主研制的专用设备上进行，如图 1a 所示，实验流

表1 GH4169粉末主要成分和金属元素的燃烧热

Tab.1 Chemical composition of the processed GH4169 powder and heat of combustion of metal elements

Element	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	C	Fe
Mass fraction/%	53.00	19.50	5.10	3.05	0.90	0.50	0.05	Bal.
Heat of combustion/(g·cal^{-1})	980	2 600	2 480	1 870	4 550	7 460	-	1 560

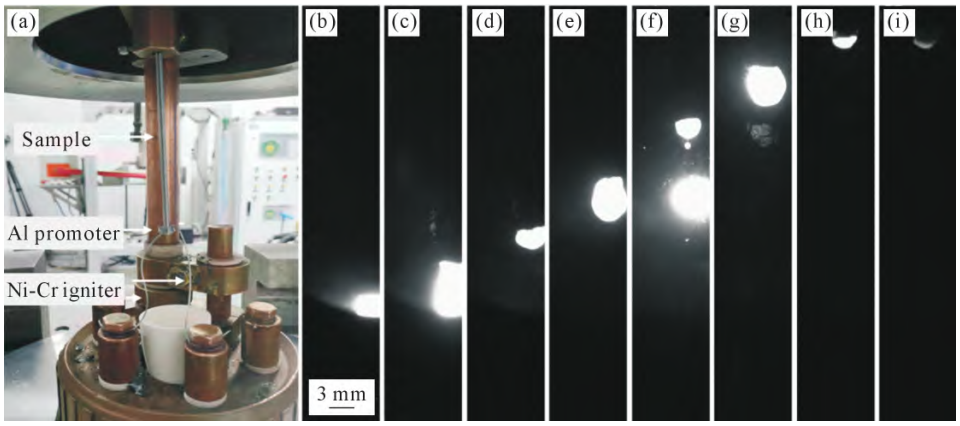

图 1　金属燃烧设备和燃烧过程：(a) 金属燃烧设备；(b~i) SLM-GH4169 合金在实验压强为 5 MPa 时的燃烧过程

Fig.1　Experimental setup in the PIC test chamber and combustion process: (a) experimental setup in the PIC test chamber; (b~i) high-speed camera images of the combustion process of SLM-GH4169 alloy in the 5 MPa PIC test

中国知网　https://www.cnki.net

程参照美国材料试验协会标准 ASTM G124-18[18]。样品燃烧过程采用 MEMRECAM Q2m 高速相机拍摄记录，并通过拍摄的画面计算燃烧速度，如图1b~i。本实验的 O_2 浓度均大于 99.5%，实验温度为室温，实验压强为 3.5~6.0 MPa，为了保证实验数据的可靠性，在相同氧压下的 PIC 试验至少重复3次。

由于不同压力下燃烧后的组织相近，本文选取 5 MPa 氧气压力下燃烧后的样品作为研究对象。采用线切割将试验后样品沿燃烧区域纵截面切开，进行镶样、砂纸打磨、机械抛光和化学腐蚀(50 mL CH_3CH_2OH+50 mL HCl+5 g $CuCl_2$)处理，并采用带有能谱分析仪(EDS)的 JSM-6301F 扫描电子显微镜(SEM)观察燃烧区域组织形貌。在远离燃烧区的位置沿燃烧试棒的纵截面切取金相样品(ϕ3.17 mm×10 mm)，利用 SEM 观察样品的显微组织。

2 实验结果

2.1 燃烧前的原始组织

图 2 为 SLM-GH4169 合金沉积态显微组织，沉积态呈现典型的熔池凝固形成的鱼鳞形貌，晶粒取向以 <100> 方向为主并生成跨越多个熔池生长的柱状晶形貌[19-20]，如图 2a 和 b 所示。这是由于在 SLM 成形过程中，粉末逐层熔化凝固，平行于构建方向具有最大的冷却梯度，柱状晶粒倾向于沿着构建方向择优生长。由于激光选区熔化过程中极快的冷却速度(10^4~10^7 ℃/s)[21]，强化相 γ′ 和 γ″ 的析出被抑制，相较于锻造和铸造合金，更多的强化元素 Nb 固溶在基体中，形成过饱和奥氏体 γ 相，在枝晶间和晶界析出了岛链状 Laves 相[22-24]，如图 2d 所示。

2.2 阻燃性能

图 3 为 SLM-GH4169 合金在不同压强下的平均

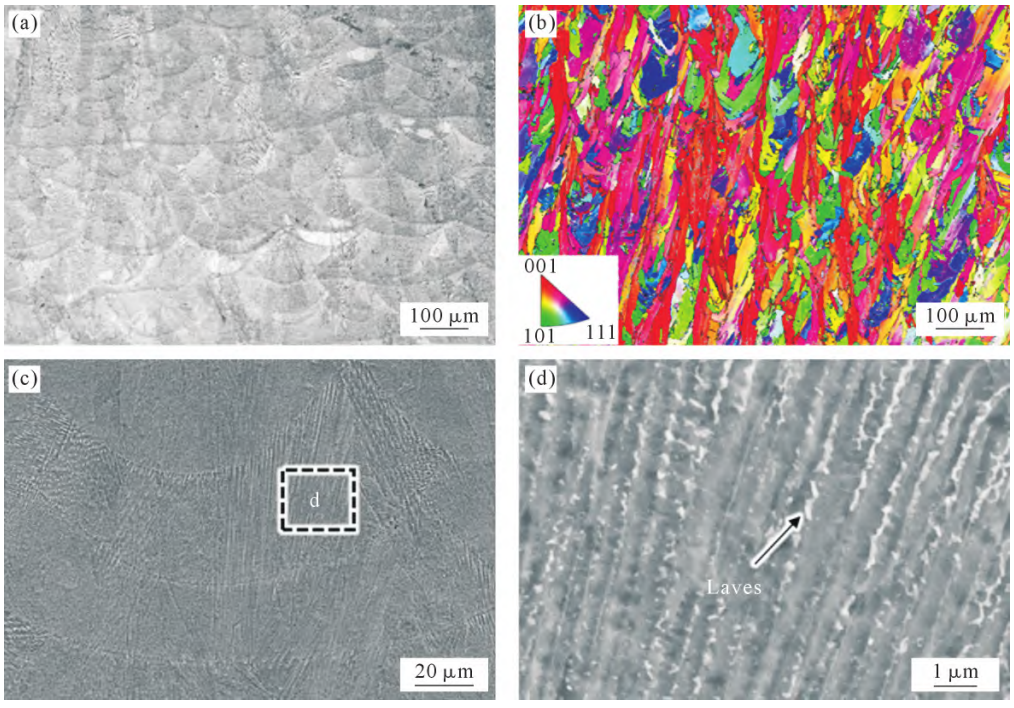

图 2 SLM-GH4169 合金沉积态显微组织：(a) 金相组织；(b) 晶粒取向；(c, d) 枝晶形貌和析出相

Fig.2 Microstructures of SLM-GH4169 alloys: (a) metallurgical morphology; (b) grain orientation; (c, d) dendrite morphology and Laves phase

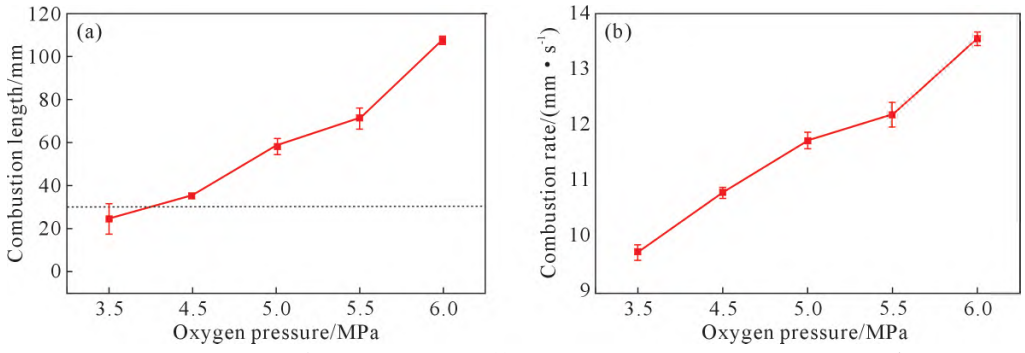

图 3 SLM-GH4169 在各个压强下的燃烧结果：(a) 平均燃烧长度；(b) 平均燃烧速率

Fig.3 The combustion results of SLM-GH4169 at various pressures: (a) average burning length; (b) average burning rate

中国知网 https://www.cnki.net

燃烧长度和平均燃烧速率。随着氧气压强增加，燃烧剩余样品的长度越短，与其他学者观察到的规律一致[14-18]。根据 ASTM G124-18 标准，燃烧长度低于 3 cm 可判断为不燃烧。因此可知 SLM-GH4169 合金在 99.5%纯 O_2 室温点燃条件下，燃烧阈值在 3.7 MPa 左右。据报道传统锻造 GH4169 合金燃烧压力阈值为 3.5 MPa[25]。因此 SLM-GH4169 沉积态阻燃性能与传统锻态 GH4169 合金的阻燃性能相当。

2.3 燃烧后的组织形貌

图 4 为 SLM-GH4169 合金在 5 MPa 燃烧后各个区域的组织形貌和燃烧前沿的 EDS 元素分布。燃烧冷却后，可以将燃烧区域划分为燃烧前沿(combustion front)、熔化区(fusion zone)、过渡区(transition zone)以及热影响区(heat affected zone, HAZ)，如图 4a 所示。靠近过渡区附近的热影响区存在大量圆形孔洞，经过 EDS 元素分析发现孔洞中心白色的析出相为 Laves 相，如图 4b 中箭头所示。过渡区呈现树枝晶形貌，中心区域还存在大量树枝晶状孔洞形貌，如图 4c 中圆圈所示。熔化区处于燃烧前沿和过渡区之间，含有大量的球型氧化物，其尺寸大小不一，如图 4d 中圆形标识所示。燃烧前沿的氧化物疏松基本脱落，仅残余少量氧化物附着在熔化区边缘，如图 4d 中方形标识所示。

图 5 为 SLM-GH4169 样品熔化区中典型的球形氧化物及其 EDS 元素分布。经观察可知，球形氧化物中黑灰色氧化物和灰色氧化物含有较多的 Al、Ti、Cr 元素，两种氧化物主要分布在枝晶干位置，而富 Nb、Ti、Cr 的氧化物则为灰白色，大部分分布在枝晶间，这与文献报道的相似[18]。此外，球形氧化物中几乎不含 Ni、Fe 和 Mo 元素。Mo 由于会形成挥发

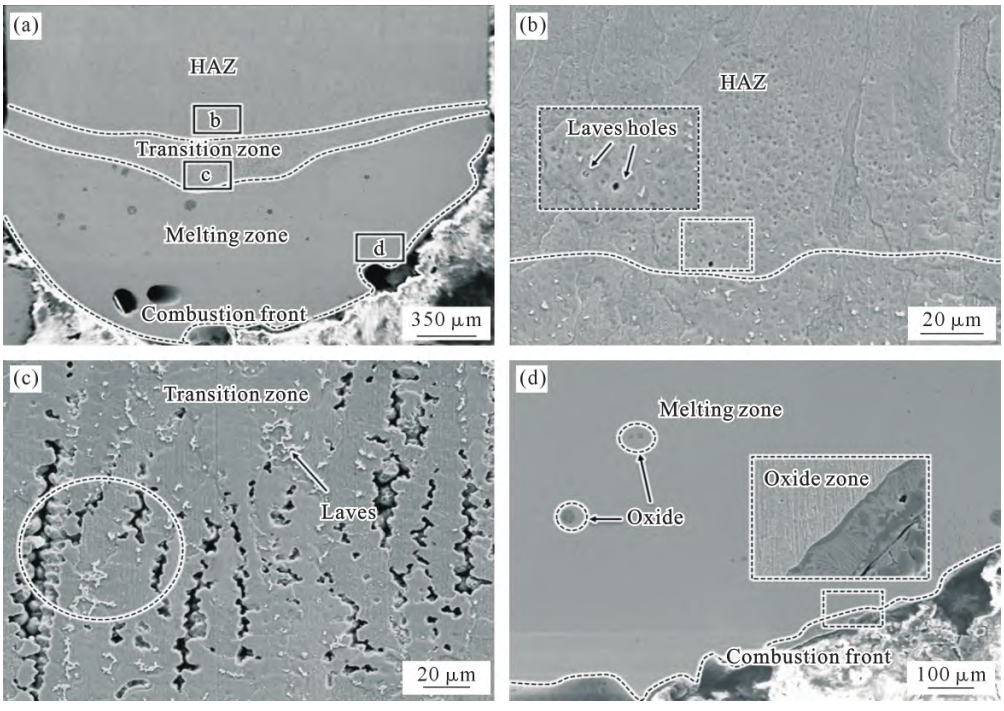

图 4 SLM-GH4169 在氧压 5 MPa 下燃烧后不同区域的组织形貌：(a) 燃烧后形貌；(b) 热影响区；(c) 过渡区；(d) 熔化区和燃烧前沿

Fig.4 Cross-sectional microstructures of the combustion zone in SLM-GH4169 alloy after combustion at 5 MPa: (a) macroscopic morphology after combustion; (b) heat affected zone; (c) transition region; (d) fusion zone and combustion front

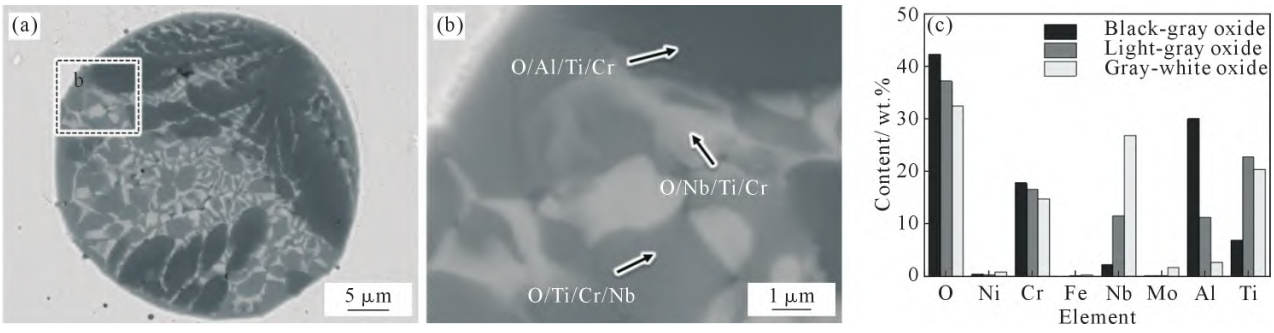

图 5 SLM-GH4169 合金在 5 MPa 燃烧后熔化区典型的球形氧化物和 EDS 元素分布：(a, b) 球形氧化物；(c) EDS 元素分布

Fig.5 Typical spherical oxide and EDS element distribution in the melting zone of SLM-GH4169 alloy after 5 MPa combustion: (a, b) spherical oxide; (c) EDS element distribution

中国知网　https://www.cnki.net

性氧化物[26]，主要分布在燃烧前沿，难以在球形氧化物中检测到。图 6 为热影响区到熔化区元素成分线扫描。燃烧热值较高的 Al、Ti、Cr、Nb 等元素通过过渡区后，在熔化区大量反应形成球形氧化物(图 6c)，而烧热值较低的 Ni、Fe 几乎不参与燃烧，其中 Ni 在熔化区大量富集，如图 6b 所示。

图 7 为 SLM-GH4169 合金在 5 MPa 压强下燃烧后，燃烧区域前端氧化物区形貌及 EDS 元素分布。燃烧前沿经 EDS 元素分析可知，靠近熔化区位置主要为富 Cr、Al、Ti 的氧化物，最外层则是富 Nb、Mo 的氧化物，而大量的 Ni 富集在熔化区。

3 分析和讨论

3.1 燃烧形貌分析

图 8 为 SLM-GH4169 合金燃烧示意图。合金燃烧后会释放大量的热，根据文献[18]报道，GH4169 合金在高压富氧条件下发生燃烧时，燃烧前端火焰最高温度可达 2 773 K，即图 8a 中 T_1 温度。在如此高的温度下，金属氧化物均处于熔融状态。过渡区温度接近 GH4169 合金的液相线温度 1 623 K(图 8a

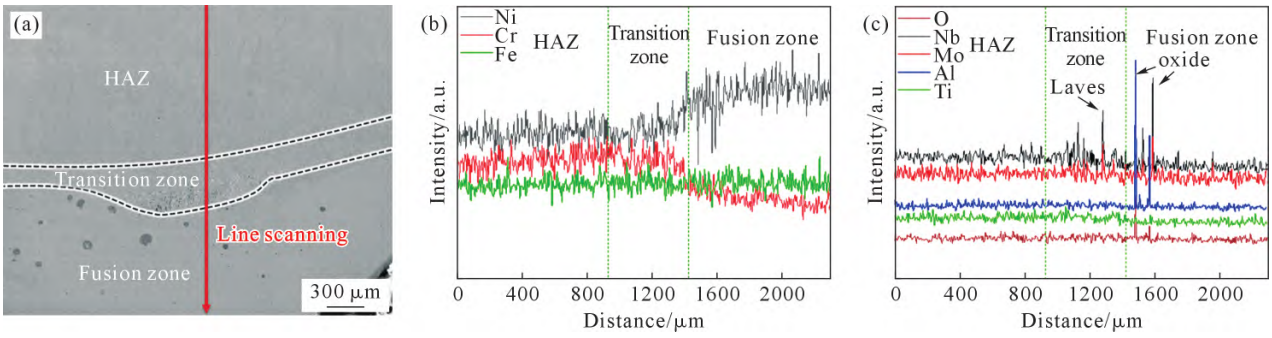

图 6 SLM-GH4169 合金在 5 MPa 压强下燃烧后热影响区到过渡区合金元素的线性分布：(a) 燃烧区域；(b, c) 合金元素的线性分布

Fig.6 Linear distribution of elements from the heat affected zone to the melting zone of the SLM-GH4169 alloy after combustion at 5 MPa: (a) combustion zone; (b, c) linear distribution of alloying elements

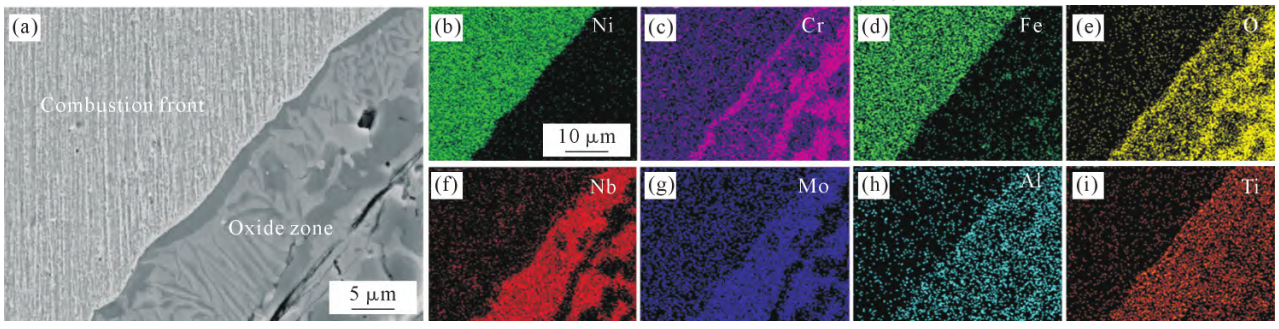

图 7 SLM-GH4169 合金在 5 MPa 压强下燃烧后燃烧区域前端氧化物区形貌及 EDS 元素分布：(a) 燃烧前沿氧化物；(b~i) EDS 元素分布

Fig.7 Morphology and EDS element distribution in the oxide zone of the combustion front for the SLM-GH4169 alloy after combustion at 5 MPa: (a) combustion front oxide; (b~i) EDS element distribution

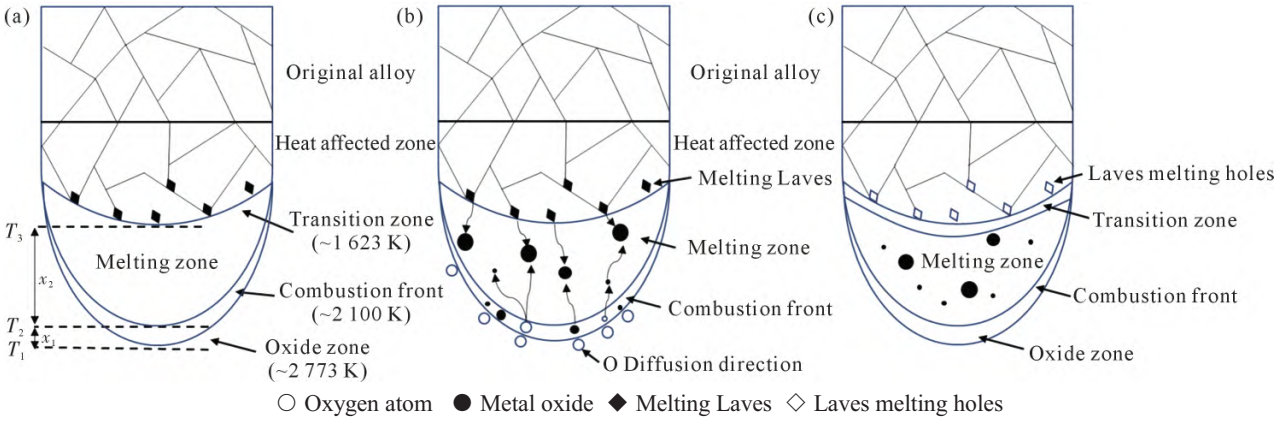

图 8 SLM-GH4169 合金燃烧过程示意图(x_1—熔化区厚度，x_2—燃烧前沿氧化物区厚度，T_1—火焰温度，T_2—燃烧前沿温度，T_3—过渡区温度)：(a) 燃烧开始；(b) 氧化物的生成和运动；(c) 燃烧终止

Fig.8 Schematics of the combustion process of SLM-GH4169 alloy (x_1-thickness of the melting zone, x_2-thickness of the oxide zone, T_1- flame temperature, T_2-combustion front temperature, T_3-transition zone temperature): (a) combustion start; (b) generation and movement of oxides; (c) combustion stop

中国知网 https://www.cnki.net

中 T_3 温度),在燃烧时作为元素扩散的过渡界面。根据 Fourier 定律:

$$q=-\lambda(\mathrm{d}T'/\mathrm{d}x) \tag{1}$$

式中,q 为热流密度;λ 为热导率;T' 为温度;x 为厚度。燃烧后样品熔化区厚度 x_2 约为 1.1 mm,氧化物区厚度 x_1 在 0.5~1.0 mm 之间,λ_1 与 λ_2 分别为燃烧前沿氧化物区和熔化区的热导率。根据式(1)可得:

$$\lambda_1(T'_2-T'_1)/x_1=\lambda_2(T'_3-T'_2)/x_2 \tag{2}$$

计算出燃烧前沿温度 T_2 为 2 147~2 347 K,如图 8a 所示。此处熔融氧化物会凝固并上浮,如图 8b 所示,从而形成图 4d 中观察到的大量球形氧化物,这与文献报道一致[18]。

Laves 相熔点约为 1 476 K[1],远低于合金的液相线温度(图 8a 中 T_3 温度)。燃烧时靠近熔化区的热影响区内 Laves 相会优先基体熔化(图 8b),因此燃烧后在热影响区产生大量的 Laves 相熔化孔洞(图 4b)。过渡区燃烧后由于快速冷却,从而形成树枝晶形貌(图 4c)。由于试棒外侧冷却速度较快,而试棒中心冷却速度较慢,导致最后凝固区域的体积收缩得不到补充,因此过渡区中心位置形成树枝晶状的孔洞形貌,如图 4c 圆形标识。

燃烧前沿附着的氧化物和熔化区中的球形氧化物与燃烧过程密切相关,如图 8b 所示。文献报道燃烧过程中会连续发生 3 个过程[27]:①O_2 在氧化物边界处发生物理、化学吸附,并进入到熔融氧化物;②O_2 通过熔融氧化物层向内扩散;③在氧化物–金属边界处(燃烧前沿)发生燃烧反应。燃烧前沿的熔融氧化物则冷却凝固附着在试棒前端,形成一层疏松的氧化薄壳,如图 7 所示。燃烧前沿的氧化物层分布和合金的元素的燃烧顺序相关[14],如图 6b 和 c 所示。高燃烧热值的 Cr、Al、Ti 优先燃烧,燃烧后形成致密的氧化层会附着在燃烧前沿,而燃烧热较低的 Nb、Mo 等元素随后大量燃烧形成氧化物。其中 Mo 会形成挥发性氧化物破坏燃烧前沿的氧化层,对材料的阻燃性能不利。Ni 和 Fe 燃烧热最低,几乎不参与燃烧,其中 Ni 在熔化区大量富集(图 6b)。

3.2　阻燃性能分析

根据前文讨论可知,材料的阻燃性能除了与合金化元素相关,还与合金的组织密切相关。如图 8b,SLM-GH4169 合金在燃烧过程中,靠近过渡区的 Laves 相会优先基体熔化,形成液态 Laves 相,更重要的是 Laves 相中富含 Nb、Ti 等燃烧热值较高的元素(表 1),也是优先燃烧的元素(图 7)。因此,在燃烧过程中,熔融的 Laves 相会持续地向燃烧前沿输送 Nb、Ti 等高燃烧热值元素,通过燃烧前沿向内扩散的氧与这些高燃烧热元素大量反应,同时形成熔融氧化物并释放大量的热促进燃烧的进行。此外,燃烧时 Laves 相一方面会形成熔融孔洞损害固液界面的黏着性,加速熔融液滴的滴落,另一方面也会作为氧向试样内部扩散的快速通道。因此,Laves 相对合金的阻燃性能十分不利。这也是 SLM 制备的 GH4169 合金虽细化了晶粒组织和析出相组织,但阻燃性能仍然与传统锻造 GH4169 合金相近的原因。

3.3　提升 SLM–GH4169 合金阻燃性能的措施

为改善 SLM-GH4169 合金的阻燃性能,可以从以下几点考虑:①合金成分优化。Ni 燃烧热值极低,具有优异的阻燃性能,应尽可能提高基体元素 Ni 的含量。而 Nb、Ti 和 Al 虽作沉淀强化元素但具有极高的燃烧热值,燃烧过程中会促进燃烧反应的进行,为此在保证力学性能的情况下尽可能降低其总含量。②优化 SLM 工艺参数。激光选区熔化技术涉及的工艺参数众多,其中铺粉层厚、激光功率、扫描间距、扫描速度决定了成形时激光的能量输入,这些参数的变化不仅会影响到成形缺陷的产生,同时也会改变成形时的温度梯度和冷却速率,进而影响合金的显微组织。这些缺陷的生成和显微组织的改变都会影响合金的阻燃性能。③设置合理热处理工艺。一方面设置较高的固溶温度来尽量消除 Laves 相,另一方面通过双时效制度保证纳米强化相 γ′/γ″相充分析出,使得合金中的元素分布更加弥散均匀,提高材料阻燃性能的同时保证良好的力学性能。

4　结论

(1)选区激光熔化成形制备的 GH4169 合金,其沉积态显微组织呈现典型的鱼鳞状形貌,晶粒取向以 <100> 方向为主并生成跨越多个熔池生长的柱状晶。析出相主要为在晶界和枝晶间析出的岛链状 Laves 相。

(2)根据 ASTM G124 标准,选区激光熔化成形制备的 GH4169 合金在 99.5%纯 O_2 室温点燃条件下,燃烧阈值约为 3.7 MPa,与传统锻造 GH4169 合金的阻燃性能相当。

(3)激光选区熔化制备的 GH4169 合金在富氧环境下燃烧后,燃烧区域分为燃烧前沿、熔化区、过渡区和热影响区。合金中 Al、Ti、Nb 等元素是易燃烧元素,在熔化区和燃烧前沿大量参与燃烧形成氧化物。Ni、Fe 是不易燃烧元素,其中 Ni 富集在熔化区。热影响区存在大量的 Laves 熔化孔洞。

(4)Laves 相富含 Nb、Ti 等高燃烧热值元素且熔点较低,在燃烧时会优先基体熔化参与燃烧,对合金

中国知网　https://www.cnki.net

的阻燃性能十分不利，应通过合理的热处理制度来消除 Laves 相以改善合金的阻燃性能。

参考文献：

[1] 黄文普. 激光选区熔化成形 GH4169 合金的组织与性能调控[D]. 武汉：华中科技大学，2021.
HUANG W P. Microstructure and mechanical property control of GH4169 superalloy produced by selective laser melting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[2] 贾炅昱，刘奋成，刘丰刚，李建萍. SLM 增材制造 Inconel718 合金的孔隙缺陷和拉伸性能[J]. 热加工工艺，2020, 49(18): 1-7.
JLA J Y, LIU F C, LIU F G, LI J B. Porosity defects and tensile property of Inconel 718 superalloy by selective laser melting additive manufacturing[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(18): 1-7.

[3] HOSSEINI E, POPOVICH V A. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718[J]. Additive Manufacturing, 2019, 30: 100877.

[4] NADAMMAL N, CABEZA S, MISHUROVA T, MISHUROVA T, THIEDE T, KROMM A, SEYFERT C, FARAHBOD L, HABERLAND C, SCHNEIDER J A, PORTELLA P D, BRUNO G. Effect of hatch length on the development of microstructure, texture and residual stresses in selective laser melted superalloy Inconel 718 [J]. Materials & Design, 2017, 134: 139-150.

[5] ZHANG D Y, NIU W, CAO X Y, LIU Z. Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melting manufactured Inconel 718 superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 644: 32-40.

[6] 黄进峰，赵光普，焦兰英，冯涤. 火箭发动机用合金 GH202 和 GH586 燃烧事故分析[J]. 钢铁研究学报，2005, 17(3): 68-72.
HUANG J F, ZHAO G P, JIAO L Y, FENG D. Combustion failure analysis of GH202 and GH586 superalloys for rocket engine[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2005, 17(3): 68-72.

[7] 施立发，黄进峰，赵光普，焦兰英. 高压富氧下几种高温合金的燃烧特征和性能研究[J]. 热加工工艺，2007, 36(4): 26-29.
SHI L F, HUANG J F, ZHAO G P, JIAO L Y. Research on combustion characteristics and properties of superalloy in high-pressure and oxygen-enriched atmosphere[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(4): 26-29.

[8] BENZ F, STEINBERG T A, JANOFF D. Combustion of 316 stainless steel in high-pressure gaseous oxygen[A]. International symposium on flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmo spheres[C]. Las Cruces: ASTM, 1989: 195-211.

[9] GUNAJI M V, SIRCAR S, BEESON H D. Ignition and combustion of titanium and titanium alloys[M]//JANOFF D D, ROYALS W T, GUNAJI M V. Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres: Seventh volume. West Conshohocken: ASTM International, 1995: 81-85.

[10] SHAO L, XIE G L, LIU X H, WU Y, YU J B, HAO Z F. LU W R, LIU X. Combustion behaviour and mechanism of TC4 and TC11 alloys[J]. Corrosion Science, 2020, 168: 108564.

[11] SHAO L, XIE G L, LIU X H, WU Y, YU J B, WANG Y Y. Combustion behaviour and mechanism of a Cu-Ni-Mn alloy in an oxygen enriched atmosphere[J]. Corrosion Science, 2020, 163: 108253.

[12] LI Z F, YU H Y, BI Z N, WANG X M, LIU G H, SUN G B, WANG R, ZHANG S Z. Oxygen-rich combustion behaviors and mechanisms of a new Ni-Cr-based superalloy fabricated by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 914: 147133.

[13] YU J B, WANG H, LIU X J, JIA S H, ZHANG X B, XIE G L, HE D, SHAO L, ZHANG P, ZHANG Y J, HUANG J F, WU Y, LU Z P. Flame retardancy of face-centred-cubic structured NiCo-based medium-entropy alloys in high-pressure oxygen atmospheres[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 944: 169231.

[14] 王宏亮，黄进峰，连勇，张程，周启明，李书开，宣统. 高温合金 GH4169 与 GH4202 在富氧气氛中的燃烧行为[J]. 工程科学学报，2016, 38(9): 1288-1295.
WANG H L, HUANG J F, LIAN Y, ZHANG C, ZHOU Q M, LI S K, XUAN T. Combustion behavior of GH4169 and GH4202 superalloys in oxygen-enriched atmosphere[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(9): 1288-1295.

[15] SHAO L, LI W S, LI D Y, XIE G L, ZHANG C Z, ZHANG C, HUANG J F. A review on combustion behavior and mechanism of Ti alloys for advanced aero-engine[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 960: 170584.

[16] SHAO L, XIE G L, LIU X H, WU Y, TAN Q, XIE L, XIN S W, HAO F, YU J B, XUE W L, FENG K. Combustion behavior and mechanism of Ti-25V-15Cr compared to Ti-6Al-4V alloy [J]. Corrosion Science, 2022, 194: 109957.

[17] SHAO L, LI Z B, YU J B, YANG G, ZHANG C, ZOU Y, HUANG J F. Combustion behavior and mechanisms of Ti_2AlNb compared to an α+β Ti alloy[J]. Corrosion Science, 2021, 192: 109868.

[18] 曹姝婷，张少华，张健. GH4061 合金在高压富氧环境下的燃烧行为[J]. 金属学报，2023, 59(4): 547-555.
CAO S T, ZHANG S H, ZHANG J. Combustion behavior of GH4061 alloy in high pressure and oxygen-enriched atmosphere [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(4): 547-555.

[19] LI J, ZHAO Z Y, BAI P K, QU H Q, LIU B, LI L, WU L Y, GUAN R G, LIU H, GUO Z H. Microstructural evolution and mechanical properties of IN718 alloy fabricated by selective laser melting following different heat treatments[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 772: 861-870.

[20] DENG D Y, PENG R L, BRODIN H, MOVERARE J. Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by selective laser melting: Sample orientation dependence and effects of post heat treatments[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 713: 294-306.

[21] ZHANG D Y, NIU W, CAO X Y, LIU Z. Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melting manufactured Inconel 718 superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 644: 32-40.

[22] SCHNEIDER J, LUND B, FULLEN M. Effect of heat treatment variations on the mechanical properties of Inconel 718 selective laser melted specimens[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 248-254.

[23] ZHANG S Y, WANG L L, LIN X, YANG H O, HUANG W D. The

中国知网 https://www.cnki.net

formation and dissolution mechanisms of Laves phase in Inconel 718 fabricated by selective laser melting compared to directed energy deposition and cast[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 239: 109994.

[24] HUANG W P, YANG J J, YANG H H, JING G Y, WANG Z M, ZENG X Y. Heat treatment of Inconel 718 produced by selective laser melting: Microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 750: 98-107.

[25] STOLTZFUS J M, HOMA J M, WILLIAMS R E, BENZ F J. ASTM committee G-4 metals flammability test program: Data and discussion[M]//SCHROLL D W. Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres: Third volume. West Conshohocken: ASTM International, 1988: 28-53.

[26] ZAWIERUCHA R, MILLION J F. Promoted ignition-combustion behavior of engineering alloys at elevated temperatures and pressures in oxygen gas mixtures[M]//STEINBERG T A, NEWTON B E, BEESON H D. Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres: Ninth volume. West Conshohocken: ASTM International, 2000: 145-147.

[27] HIRANO T, SATO K, SATO Y, SATO J. Prediction of metal fire spread in high-pressure oxygen[J]. Combustion Science and Technology, 1983, 32(1-4): 137-159.

中国知网　https://www.cnki.net