

高温合金 GH4169 与 GH4202 在富氧气氛中的燃烧行为

王宏亮¹⁾, 黄进峰¹⁾✉, 连勇²⁾, 张程¹⁾, 周启明¹⁾, 李书开¹⁾, 宣统³⁾

1) 北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083 2) 北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083
3) 西安航天动力研究所, 西安 710100
✉ 通信作者, E-mail: ustbhuanjif@163.com

摘要 采用富氧燃烧实验方法, 通过光学显微镜、扫描电子显微镜和能谱仪等手段对 GH4169 和 GH4202 高温合金燃烧试样进行分析, 建立合金燃烧质量、热量和氧传输模型, 探究两种合金的富氧燃烧机理并提出提高新型高温合金抗燃烧性能的措施。结果表明: GH4202 与 GH4169 合金在富氧条件下均发生燃烧, GH4202 抗燃烧性能优于 GH4169; 两种合金以液相进行燃烧, 在合金燃烧前沿存在由未完全燃烧的金属颗粒和氧化物组成“燃烧层”, 燃烧层中合金元素的燃烧行为是决定合金整体燃烧的关键性因素; 合金元素在燃烧前沿呈现“选择性燃烧”规律, Nb、Ti、Al、Cr 等元素易于与氧发生燃烧, Ni 滞后燃烧且燃烧热低, 起到良好的抗燃烧作用。

关键词 高温合金; 燃烧; 氧; 机理
分类号 TG132.3

Combustion behavior of GH4169 and GH4202 superalloys in oxygen-enriched atmosphere

WANG Hong-liang¹⁾, HUANG Jin-feng¹⁾✉, LIAN Yong²⁾, ZHANG Cheng¹⁾, ZHOU Qi-ming¹⁾, LI Shu-kai¹⁾, XUAN Tong³⁾

1) State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2) Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
3) Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China
✉ Corresponding author, E-mail: ustbhuanjif@163.com

ABSTRACT Ignition-combustion test was carried out and the combustion samples of GH4169 and GH4202 superalloys were analyzed by using optical microscopy, scanning electron microscopy and energy dispersive spectrometry. A model of mass transfer, heat transfer and oxygen transfer was built to analyze the combustion mechanism of the alloys. Some methods to improve the ability of combustion resistance for new superalloys were proposed. The results show that both the alloys burn in the test condition, but GH4202 performs better than GH4169. Both the alloys burn in liquid phase, there is a combustion section composed of oxides and metal particles in front of the reaction zone, and the burning behavior of elements in the combustion section decides the combustion ability of the whole alloys. A selective combustion rule of elements is present in the combustion section, the elements such as Nb, Ti, Al and Cr will burn with oxygen easily, while Ni is of delayed combust with low heat and can protect the alloy from combustion.

KEY WORDS superalloys; combustion; oxygen; mechanisms

在富氧条件下, 绝大多数金属材料都会发生一种既不同于氧化, 也不同于熔化, 而是类似于木材、尼龙等材料的燃烧现象, 即金属富氧燃烧^[1]。其特征表现

为: 温度的急剧升高, 产生火焰, 并伴随有热量的剧烈释放^[2]。在富氧环境中使用的金属材料存在燃烧的风险, 许多材料在空气中难以燃烧, 但是在富氧气氛中却

会剧烈燃烧甚至达到爆炸极限,一旦发生火灾,就会产生严重的后果^[1,3-6]。为此,发达国家在金属富氧燃烧领域进行了多年系统地研究,投入了巨大的人力、物力和财力,取得丰硕的成果,为其航天事业的发展起到了重要的推动作用^[7-10]。我国在 1999 年底逐步认识到这一关系火箭发动机安全的问题,开始着手这方面的研究^[11-14]。

我国新型 120 t 大推力液氧-煤油高压补燃循环火箭发动机工作环境为大流量、高温、高压和高富氧燃气,在此条件下高温合金主要失效方式是合金燃烧^[15]。GH4169 和 GH4202 镍基高温合金力学性能稳定,广泛应用于制作先进液体火箭发动机关键件^[16],其中 GH4169 合金在液体火箭发动机中用于制造涡轮盘等部件。GH4202 合金是一种可锻、可铸和可焊接的高温合金,可制备火箭发动机涡轮转子以及精铸件等,在 120 t 液氧-煤油火箭发动机中由 GH4202 合金制备的部件超过 30 种,占整个发动机总质量的 40% 以上^[15]。国外对于 Inconel718 合金以及其他牌号合金在高温富氧、超音速高速颗粒冲击及摩擦环境下的点燃/燃烧性能进行了几十年的研究^[1-3],其工作主要集中于合金富氧燃烧实验方法的完善和对合金燃烧规律的探索;国内对合金富氧燃

烧进行了十几年的研究,近年来研究方向主要包括典型航天用合金如 GH4202、GH4169 和 GH4586 在高温富氧条件下的氧化规律及机理、合金部件燃烧事故分析以及对合金燃烧特征和燃烧规律的初步探索^[11-13],目前对于 GH4169 与 GH4202 两种合金富氧燃烧行为及机理的深入研究还较少。有鉴于此,本文基于已有的成果和科研平台,对两种典型的航天用合金的燃烧现象和特征进行观察,并对燃烧产物与燃烧机理进行分析,以期待为未来进一步研究金属材料富氧燃烧机理和本质问题起到一定的参考作用。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验所用 GH4169 和 GH4202 高温合金均采用真空冶炼,经过锻造开坯、轧制和热处理,其中 GH4169 合金热处理制度为 980 °C,1 h,空冷+720 °C,8 h,以 50 °C·h⁻¹ 炉冷至 620 °C,8 h,空冷;GH4202 合金热处理制度为 1150 °C,5 h,空冷+800 °C,10 h,空冷。然后线切割加工成符合要求的试样,并用砂纸打磨去除表面氧化物,最终试样尺寸为 $\phi 1.6 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,实验材料化学成分见表 1。

表 1 实验用材料化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of the tested alloys

合金	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	Ni	Fe
GH4169	0.05	19.0	0.5		3.0	0.5	0.90	4.9	52.5	18.6
GH4202	0.05	18.5		4.5	4.5	1.25	2.50		65.2	3.5
Ni									99.9	

1.2 实验过程

采用金属材料富氧燃烧实验中应用最广的 PIC 实验(promoted ignition-combustion test),实验过程参考 ASTM G124-10 (standard test method for determining the combustion behavior of metallic materials in oxygen-enriched atmospheres) 标准^[17]。试样尺寸为 $\phi 1.6 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,金属镁为引燃物,用量 0.2 g,电阻丝加热引燃,实验所用氧气纯度为 99%;实验富氧气氛所用氧压(氧气压力)分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 MPa,在不同氧压条件下进行 PIC 实验,实验结束后测量试样剩余长度,剩余长度越长(即燃烧量越少)表明其抗燃烧性能越好;实验前试样长 30 mm,空气气氛实验作为富氧气氛对照实验。

将待测金属试样垂直固定于燃烧反应器内,试样底端缠引燃物,引燃物长度为 4 mm,如图 1(a) 所示,电阻丝与引燃物相连接;抽真空排出燃烧反应器内空气,充入所需压力氧气,然后关闭所有阀门,通电加热电阻

丝将引燃物引燃,待金属试样充分燃烧冷却后,取出试样,测量剩余长度;燃烧后的试样经镶样,砂纸打磨,机械抛光后用光学显微镜和扫描电子显微镜进行观察分析。实验过程如图 1(a) 所示,试样燃烧前后对比如图 1(b) 所示。

2 结果与讨论

2.1 燃烧实验结果

实验所用金属材料分别为 GH4169、GH4202 和金属镍,每种材料分别在不同氧压下重复三次实验,燃烧实验结果汇总如图 2 所示。

由燃烧结果可以得到以下结果:三种金属材料在氧压 $\geq 0.2 \text{ MPa}$ 条件下均发生燃烧,而在空气中均未发生燃烧,说明富氧气氛是合金发生燃烧的必要条件。随着氧压的升高,合金的剩余长度变短,即在富氧气氛中氧压越高材料越易燃烧。从整体上看,三种材料抗燃烧性能由强到弱依次为镍、GH4202 和 GH4169,其

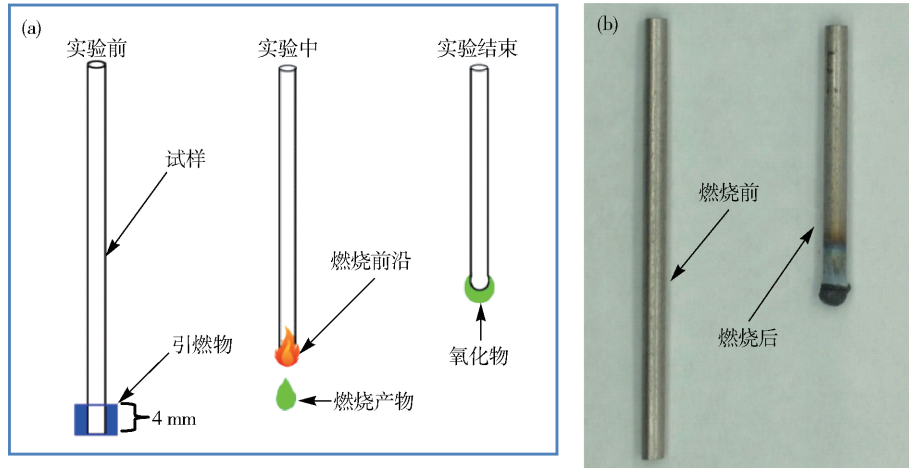


图 1 燃烧实验过程示意图 (a) 及 GH4202 试样燃烧前后对比图 (b)

Fig. 1 Schematic diagram of ignition-combustion test (a) and comparison of GH4202 samples before and after combustion (b)

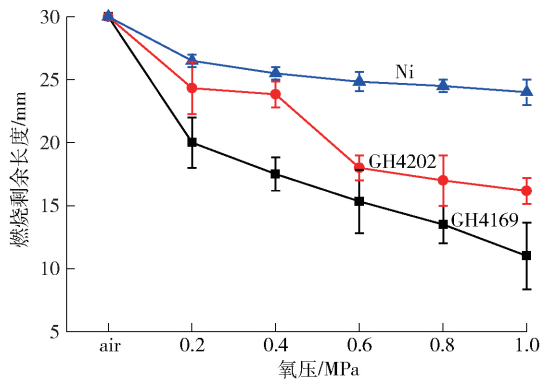


图 2 合金富氧燃烧实验结果

Fig. 2 Test results of alloy combustion in oxygen-enriched atmosphere

中镍的抗燃烧性能明显优于另两种合金,三种材料中 Ni 质量分数由高到低依次为镍 (>99.9%)、GH4202 (~65%)、GH4169 (52.5%)。McIlroy 等^[18]认为作为主要合金元素,Ni 含量高会提高合金的抗燃烧能力,实验结果与其相一致。

2.2 合金燃烧过程及机理分析

2.2.1 合金燃烧试样金相组织

在 PIC 燃烧实验中观察到,当金属试样被引燃时,在试样底端燃烧前沿形成一个液态的高温熔融液滴,随着试样燃烧的持续,熔融液滴连续形成并在重力作用下滴落,以此循环直至燃烧结束,最后熔融液滴会在试样燃烧端凝固。将 GH4169 与 GH4202 燃烧后试样经抛光后,用 100 mL CH₃CH₂OH + 100 mL HCl + 5 g CuCl₂ 的腐蚀剂腐蚀,试样燃烧部分(凝固的熔融液滴)横截面金相组织如图 3 所示。

由图 3 (a) 和 (e) 可见整个燃烧部分由上到下依次为未燃烧区、熔化区(仅熔化未形成氧化物)和氧化物。未燃烧区受到一定程度的燃烧热影响,未发生熔化,仍保持原有的等轴晶组织,而熔化区为铸态组织,

在燃烧过程中发生熔化,为燃烧前沿提供液态金属,如图 3 (d) 和 (h) 所示。未燃烧区与熔化区之间存在明显的弧形固-液界面,是熔化的前沿,呈树枝晶或柱状晶结构,如图 3 (c) 和 (g) 所示。氧化物区位于最外层,是合金在燃烧过程中形成并附着在液态金属上,随温度降低冷却而形成的区域,是合金多种元素燃烧形成的混合氧化物。熔化区与氧化物区交界是燃烧界面,燃烧过程中氧穿过熔融态氧化物与液态金属在燃烧界面发生燃烧,燃烧热经熔化区传递到未燃烧区,使合金基体发生熔化,熔化的液态金属进入到熔化区,进而传输到燃烧界面与氧发生燃烧。在熔化区内存在小的圆形氧化物,如图 3 (d) 和 (h) 所示,是在凝固过程中溶入到液态合金中的氧,由于溶解度降低溢出与合金氧化而形成。Sparks 等^[19]认为大多数金属材料在富氧环境中是以液相进行燃烧,根据对燃烧部分金相组织的分析可以判断 GH4169 与 GH4202 合金试样同样是液相燃烧。

2.2.2 合金燃烧区域形貌与成分分析

用扫描电镜观察合金 GH4169 与 GH4202 燃烧区域,由图 4 中可以看出,氧化物区结构疏松,存在大量的空洞,在液态金属与氧发生燃烧反应的燃烧界面处,靠近熔化区边缘存在一层很窄的弧形区域,其组成为氧化物中包含许多细小的圆形颗粒,经能谱检测这些圆形颗粒为高 Ni 含量的金属颗粒,是液态合金未完全燃烧的产物,将该层区域称为“燃烧层”,在该区域内液态金属与氧发生燃烧反应。

GH4169 燃烧层中包括未完全燃烧的金属颗粒和两种不同的氧化物,如图 4 (c) 所示,其中浅灰色氧化物主要由 Cr、Nb、Ti 和 O 组成,深灰色氧化物主要由 Cr 和 O 组成;相似地, GH4202 燃烧层中同样包含未完全燃烧的金属颗粒和两种不同的氧化物,白色氧化物主要由 Cr、W、Ti 和 O 组成,深灰色氧化物主要由 Cr

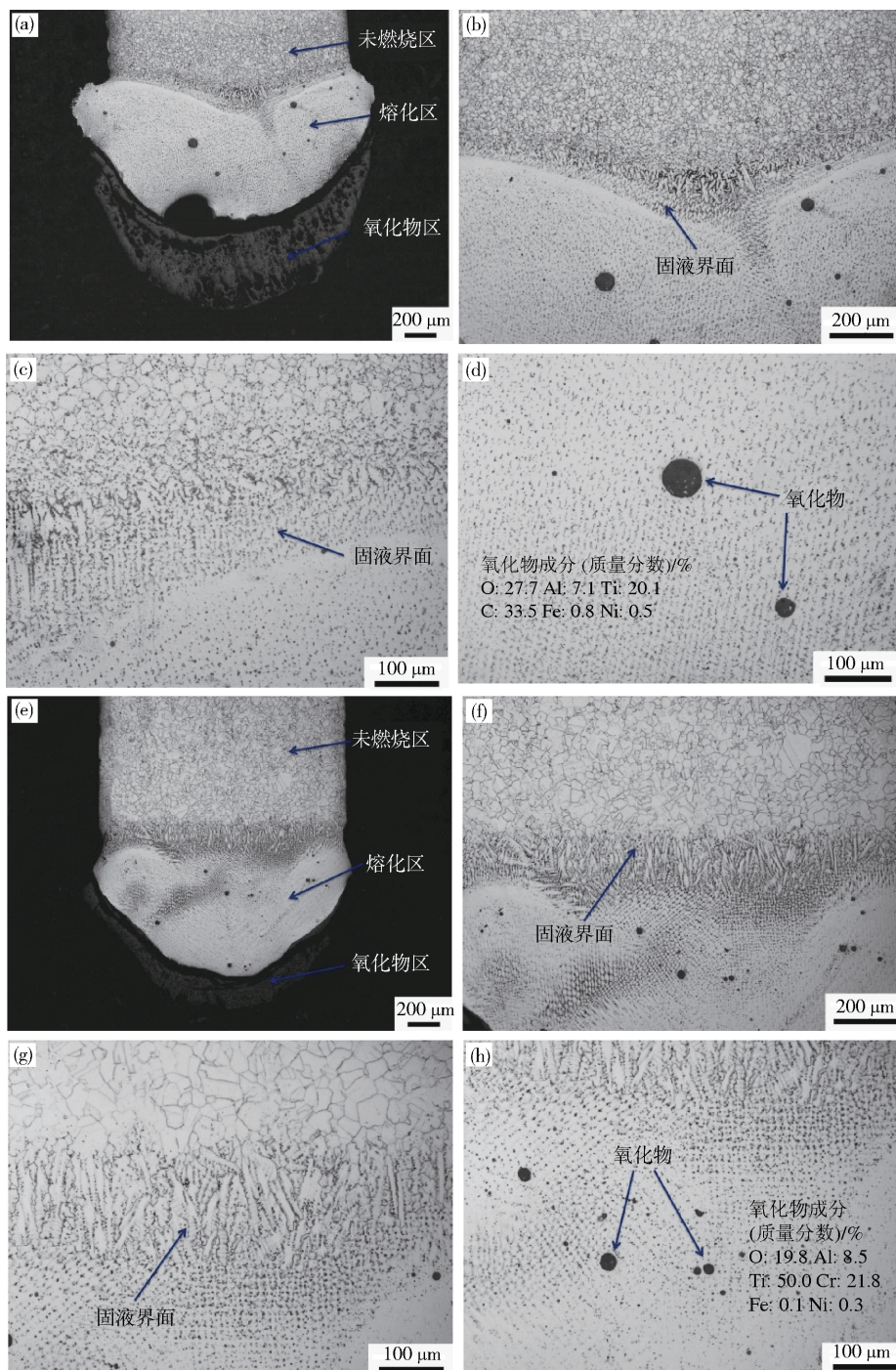


图3 合金试样燃烧区域横截面金相组织。(a)~(d) GH4169 合金; (e)~(h) GH4202 合金

Fig.3 Metallographic structures of the cross sections for alloy samples after combustion: (a)~(d) GH4169 superalloy; (e)~(h) GH4202 superalloy

和 O 组成,如图 4 (g) 和 (h) 所示,可见在燃烧层中合金元素并非同时燃烧,可能是按照某种先后顺序依次燃烧形成氧化物。经能谱检测,合金 GH4169 与 GH4202 熔化区与氧化物区(包含燃烧层)元素含量见表 2 所示。可以看出:两种合金熔化区 Ni 含量都高于基体材料,氧化物区 Ni 含量较低;而 Cr 和 Fe 经燃烧后大量进入氧化物区,其他元素如 Nb、Ti 和 Al 在熔化层中含量很低,几乎全部经燃烧形成氧化物,Mo 少量

进入氧化物区。

由扫描电镜形貌与能谱成分分析可知,燃烧层中合金元素并非按照其化学成分均匀燃烧,如 Ni 作为合金基体元素在氧化物区含量很低,而 Cr、Fe、Nb、Ti 和 Al 等则大量参与燃烧反应,形成氧化物,各合金元素在燃烧前沿燃烧优先性决定其燃烧放热,同时也是决定合金整体燃烧的关键性因素,高燃烧热元素优先燃烧会促进燃烧的进行。

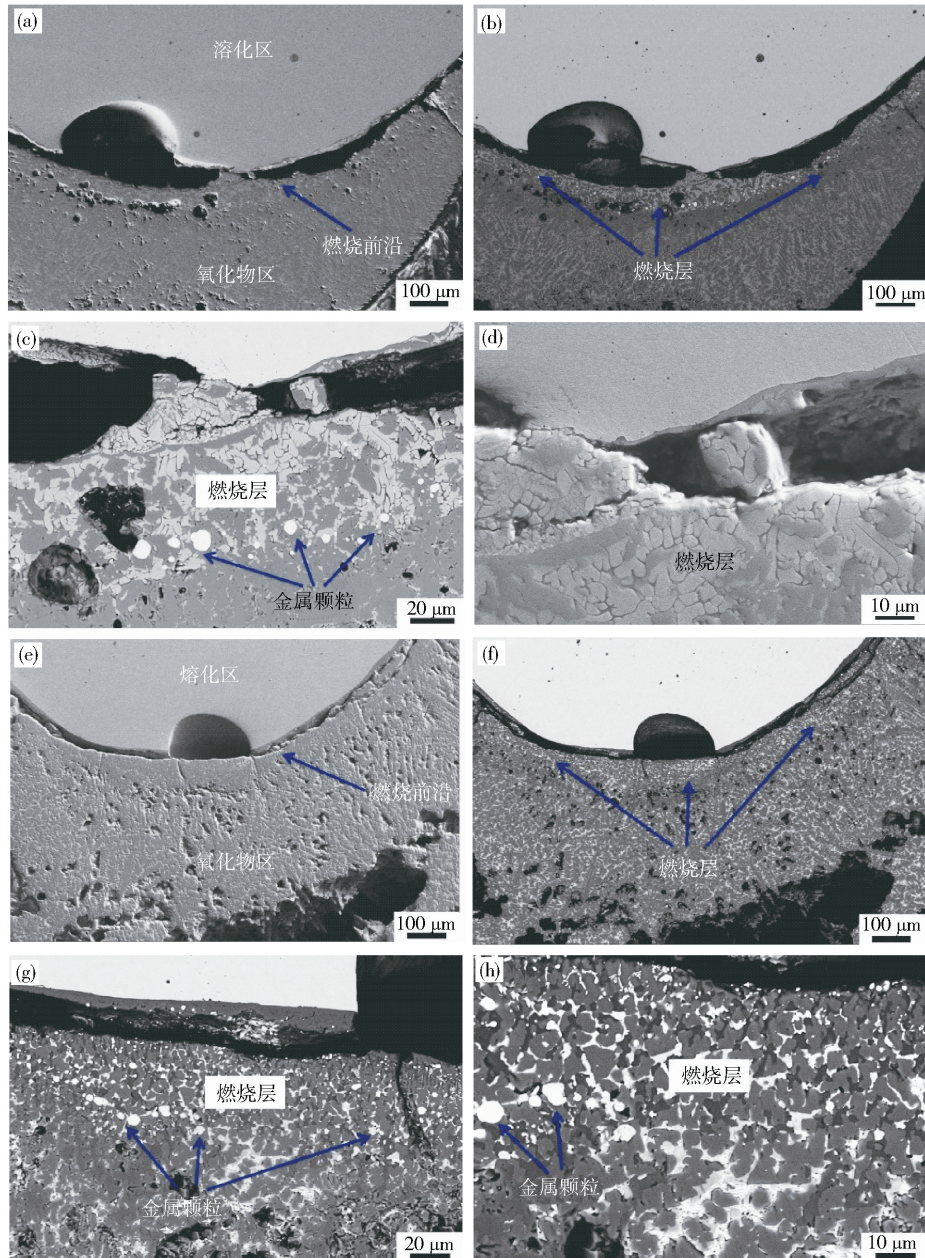


图 4 合金试样燃烧界面扫描电镜图像。(a d) GH4169 合金二次电子像; (b c) GH4169 合金背散射电子像; (e) GH4202 合金二次电子像; (f) - (h) GH4202 合金背散射电子像

Fig. 4 SEM images of the interface structure of the combustion section: (a d) secondary electron images of GH4169 alloy; (b c) backscattered electron images of GH4169 alloy; (e) secondary electron image GH4202 alloy; (f) - (h) backscattered electron images of GH4202 alloy

表 2 两种合金各燃烧区域元素含量(质量分数)

Table 2 Element content of each combustion section %

元素	GH4169 合金		GH4202 合金	
	熔化区	氧化物区	熔化区	氧化物区
Ni	66.76	4.38	85.16	11.59
Cr	7.56	37.34	6.57	52.83
Fe	20.79	14.25	0.30	0.61
Mo	3.23	0.65	3.39	1.51
W			4.30	5.77
Nb	1.30	10.80		
Ti	0.11	2.90	0.11	7.98
Al	0.20	1.48	0.14	0.14
O	0.05	28.20	0.02	17.41

由在合金熔化层中的圆形氧化区和氧化物区的大量空洞可知, 整个燃烧区域存在“过量氧(excess oxygen)”现象, 过量的氧在冷却过程中由于溶解度降低, 溢出在氧化物区形成大量空洞(如图 4(a)和(e)所示), 在熔化区形成圆形氧化物(如图 3(d)和(h)所示). Ward 和 Wilson 等^[20-21]提出, 在合金燃烧反应区域存在“过量氧”现象(氧含量超过完全燃烧所需量), 在冷却过程中由于溶解度降低释放 O₂, 并指出氧传输并非燃烧主要限制机制.

图 5 是燃烧反应热量、质量与氧的传输模型示意

图. 燃烧热传输、液态金属传输和氧传输是合金燃烧可能的主要限制因素, 概括起来是燃烧反应物与燃烧热的限制因素. 在实验观察与分析中可以证实燃烧过程中氧的传输并非主要限制环节. 这是因为在合金燃烧前沿熔融液滴的燃烧过程中, 由于表面张力、对流的存在, 能够提供足够的氧与液态金属发生燃烧反应, 另外由熔化区可以判断在燃烧过程中液态金属的供应是充足的, 所以在燃烧过程中液态金属的传输也非主要限制环节. 在燃烧层中液态金属与氧发生燃烧反应, 是整个燃烧反应区的热源, 合金基体吸收热量熔化, 为燃烧层提供充足的液态金属, 同时燃烧热传递给氧化物区, 使氧化物维持液态并且保障氧的传输, 一旦燃烧热降低使熔化区与氧化物区冷却凝固, 燃烧就会终止. 由于单位时间内燃烧层燃烧释放热量大小直接影响到合金整体热量、质量和氧的传输, 而燃烧热由燃烧层中合金元素的含量、各元素燃烧热等因素决定, 将与燃烧层中元素燃烧相关的因素统称为合金元素在燃烧层中的燃烧行为, 因此燃烧层中合金元素的燃烧行为是决定合金整体燃烧的关键性因素, 是整个燃烧反应的主要限制环节.

2.2.3 合金元素对合金燃烧性能的影响

为探究在燃烧前沿各合金元素的燃烧行为, 用能谱对燃烧区(熔化区-氧化物区)元素成分线扫描, 如图6所示. 结果表明两种合金中 Ni 在界面处含量急

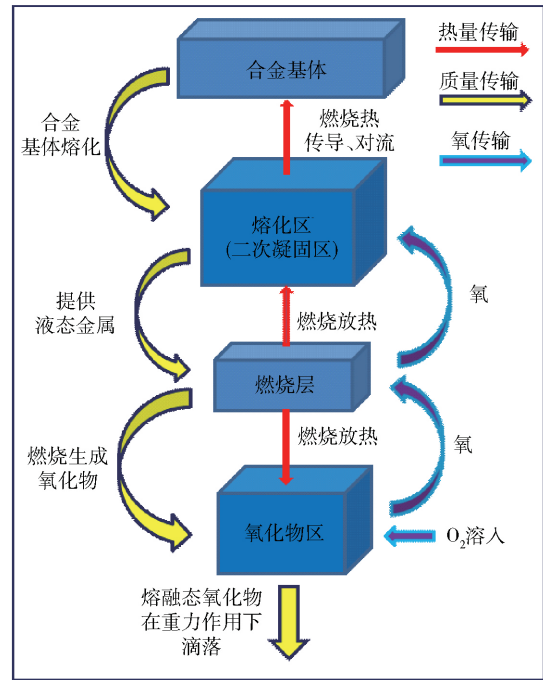


图5 合金燃烧传输过程

Fig.5 Transport process of heat, mass and oxygen during alloy combustion

剧下降, 氧化物中 Ni 含量很低; 在 GH4169 合金中元素 Cr 和 Fe 经燃烧大量进入氧化物区, 元素 Nb、Mo、Ti 和 Al 在燃烧层中富集; 在 GH4202 合金中元素 Cr、Ti 和 Al 经燃烧大量进入氧化物区. 可见合金燃烧过程

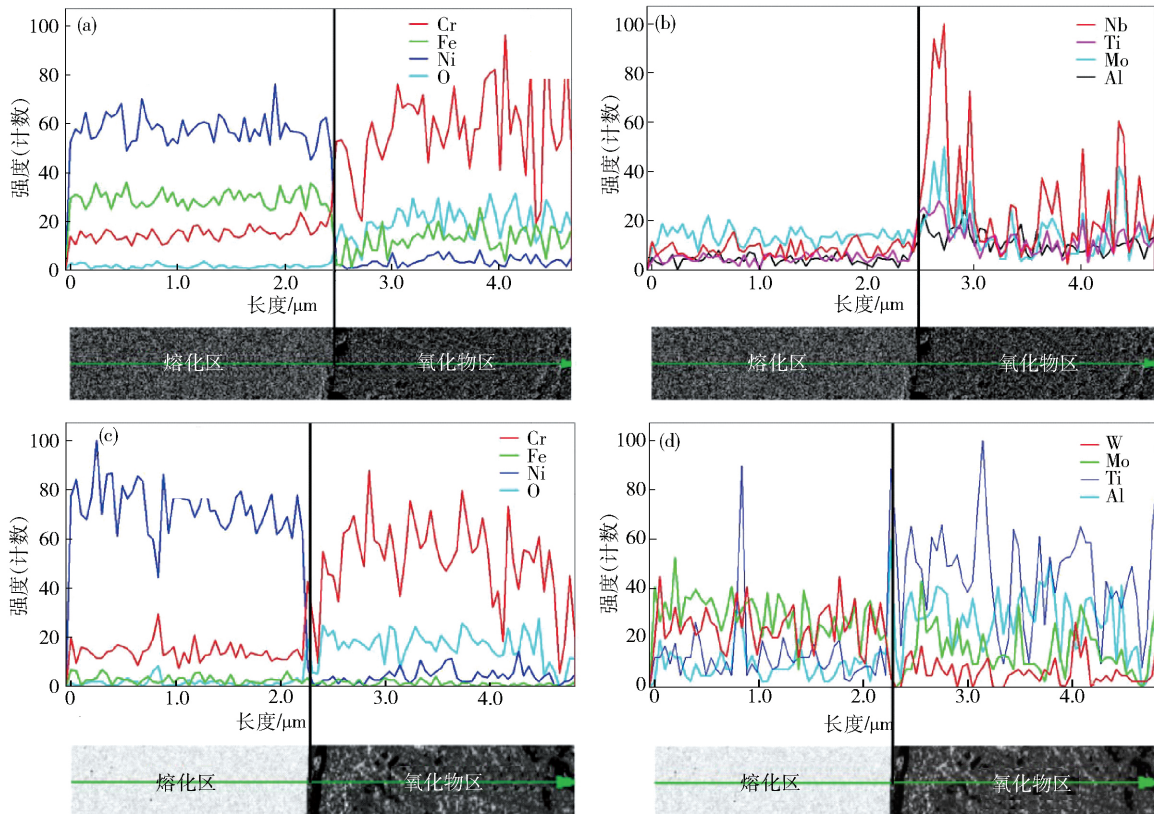


图6 合金元素在燃烧界面含量线性分布. (a b) GH4169 合金; (c d) GH4202 合金

Fig.6 Elemental line profiles of the combustion interfaces: (a b) GH4169 alloy; (c d) GH4202 alloy

中存在“选择性燃烧”现象: Cr、Fe、Nb、Mo、Ti、Al 等元素燃烧放热量高,在燃烧前沿优先与氧发生燃烧,称为“易燃烧元素”;Ni 和 Co 不易与氧发生燃烧,称为“抗燃烧元素”。通常易燃烧元素含量越高,其优先与氧发生反应,释放大量的热量,促进燃烧的持续进行,降低合金整体的抗燃烧性能;相反“抗燃烧元素”则会滞后燃烧,放热量低,阻碍燃烧的进行。合金元素燃烧热如表 3 所示。由于合金在燃烧前沿存在“选择性燃烧”现象,燃烧层中合金元素的燃烧行为包括元素含量、燃烧优先性与燃烧放热量,成为决定合金整体燃烧的关键性因素。下面根据合金中各元素含量、燃烧热和燃烧优先性对各元素的燃烧行为进行分析。

表 3 金属元素燃烧热^[22]

Table 3 Combustion heat of metals^[22]

元素	燃烧形成氧化物	燃烧热/(J·g ⁻¹)
Ni	NiO	4102.3
Co	CoO	4060.4
Fe	Fe ₂ O ₃	7388.3
Cr	Cr ₂ O ₃	10883.6
W	WO ₃	4575.3
Mo		6103.2
Ti	TiO ₂	19716.1
Al	Al ₂ O ₃	31081.1

作为高温合金基体元素,Ni 燃烧形成单一氧化物 NiO,Ni 在熔化层中含量很高,而在氧化物区含量急剧降低,并且燃烧放热量低,存在“滞后燃烧”现象,属于典型的“抗燃烧元素”;Ni 具有优异的抗燃烧性能,其含量的高低对合金抗燃烧性能起重要作用,在实验结果中证实镍含量高的合金具有更好的抗燃烧性能。

Cr 作为高温合金重要合金元素,在高温合金中起到提高抗氧化性、抗腐蚀性和固溶强化作用;Cr 属于高燃烧热元素,易燃烧,在燃烧层中优先燃烧,大量形成氧化物。Cr 在燃烧过程中起到双重作用:一方面 Cr 燃烧热高,促进燃烧的进行;另一方面形成致密、高熔点氧化物阻碍燃烧。

沉淀强化镍基合金 GH4169 中加入有质量分数 18% 左右的 Fe 进行固溶强化,降低生产成本;由于 Fe 的大量加入降低了 Ni 含量,图 6(a) 中 Fe 大量进入燃烧层,参与燃烧放热,同时在富氧条件下与氧形成高价氧化物,有利于氧的传输,促进燃烧的进行;GH4202 中由于 Fe 的含量低(质量分数 3.5%),对整体燃烧影响不大。

Nb、Al 和 Ti 作为沉淀强化元素,形成的 γ' 和 γ'' 是高温合金的主要强化相,其数量是高温合金室温和高温强度的决定性因素;同时 Nb、Al 和 Ti 属于“易燃烧”

元素,在燃烧反应过程中在燃烧层中富集,并且优先与氧发生燃烧,释放大量的热量,促进燃烧的进行,降低了材料的抗燃烧性能。

Mo 在高温合金中主要起到固溶强化作用,W 起到固溶强化、降低层错能和提高抗蠕变性作用;W 和 Mo 在燃烧区域未见明显优先燃烧放热趋势,并且其燃烧热低于 Ti、Al 等,但 W 和 Mo 在燃烧过程中形成挥发性氧化物会影响其抗燃烧性能^[5],同时高的 W 和 Mo 含量会降低整体 Ni 的含量。

2.3 提高新型高温合金抗燃烧性能措施

(1) Ni 具有优异的抗燃烧性能,其含量的高低对合金抗燃烧性能起重要作用,在设计新型高温合金时,尽可能提高基体元素 Ni 含量,降低其他合金元素含量。在实验中,Ni 质量分数 65% 的 GH4202 合金抗燃烧性能明显优于 Ni 52.5% 的 GH4169 合金。

(2) 适当降低合金中 Fe 含量。GH4169 中加入有质量分数 18% 左右的 Fe 进行固溶强化,同时降低生产成本,但是其燃烧放热高,并且降低了基体元素 Ni 的含量,是 GH4169 合金抗燃烧性能低于 GH4202 合金的主要原因。

(3) 合理分配 Nb、Ti 和 Al 的含量。Nb、Ti 和 Al 作为沉淀强化元素,一方面其形成的 γ' 和 γ'' 是高温合金主要强化相,另一方面其燃烧热很高,在燃烧层中优先燃烧放热,促进燃烧反应的进行,降低了合金抗燃烧性能,因此在设计新型抗燃烧合金时应合理分配比例,尽可能降低其总含量。

(4) W 和 Mo 并未像 Ti、Al 等优先燃烧放热,促进燃烧的进行,但在燃烧时形成挥发性氧化物影响其抗燃烧性能,因此应控制其总的含量,提高合金基体 Ni 含量。

3 结论

(1) 在富氧条件下 GH4169、GH4202 和 Ni 均发生不同程度的燃烧,其抗燃烧性能由高到低依次为 Ni、GH4202 和 GH4169;合金 GH4169 与 GH4202 都是液相燃烧,燃烧区域分为未燃烧区、熔化区和氧化物区,在整个燃烧区内存在“过量氧”现象。

(2) 合金在燃烧前沿存在“燃烧层”,由未完全燃烧的金属颗粒和氧化物组成,液态金属与氧在燃烧层中发生燃烧;燃烧层中合金元素的燃烧行为,包括元素含量、燃烧热和燃烧选择性等因素,是决定合金整体燃烧的主要限制环节。

(3) 合金元素在燃烧前沿存在“选择性燃烧”现象,通常高燃烧热的 Nb、Ti、Al、Fe 等元素优先燃烧,抗燃烧元素如 Ni 滞后燃烧;合理控制 W、Mo、Fe、Nb、Ti、Al 等元素含量是提高高温合金抗燃烧性能的有效途径。

参 考 文 献

- [1] Monroe R W , Bates C E , Pears C D , et al. Metal combustion in high pressure flowing oxygen // *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-enriched Atmosphere*. Phoenix , 1983: 126
- [2] Benz F J , Stoltzfus J M. Ignition of metals and alloys in gaseous oxygen by fractional heating // *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-enriched Atmosphere*. Washington D C , 1986: 38
- [3] Joseph W. Keynote—materials selection for oxidizer service—successes and challenges // *The Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-enriched Atmosphere*. Berlin , 2009: 1
- [4] Davis S E. An elementary overview of the selection of materials for service in oxygen-enriched environment // *The Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-enriched Atmosphere*. Montreal , 2012: 1
- [5] McLroy K , Zawierucha R , Drnevich R F , et al. Promoted ignition behavior of engineering alloys in high-pressure oxygen // *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-enriched Atmosphere*. Cambridge , 1988: 85
- [6] Stradling J S , Pippen D L , Frye G M , Techniques employed by the NASA white sands test facility to ensure oxygen system component safety // *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-enriched Atmosphere*. Phoenix , 1983: 97
- [7] Neary R M. ASTM G 63: a milestone in a 60-year safety effort // *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-enriched Atmosphere*. Phoenix , 1983: 3
- [8] Forsyth E T , Linley N , Chiffolleau G , et al. Development of burn curve to assist with metals selection in oxygen // *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-enriched Atmosphere*. Montreal , 2012: 274
- [9] Million J F , Samant A V , Zawierucha R , et al. Promoted ignition-combustion behavior of cobalt and nickel alloys in oxygen-enriched atmospheres. *J ASTM Int* , 2009 , 6(10) : 10
- [10] Lynn D , Steinberg Y , Sparks K , et al. Defining the flammability of cylindrical metal rods through characterization of the thermal effects of the ignition promoter. *J ASTM Int* , 2009 , 6(7) : 21
- [11] Shi L F , Huang J F. Research on combustion characteristics and properties of superalloy in high-pressure and oxygen-enriched atmosphere. *Hot Work Technol* , 2007 , 36 (4) : 26
(施立发, 黄进峰. 高压富氧下几种高温合金燃烧特征和性能研究. *热加工工艺* , 2007 , 36(4) : 26)
- [12] Huang J F , Zhao G P. Combustion failure analysis of GH202 and GH586 superalloys for rocket engine. *J Iron Steel Res* , 2005 , 17 (3) : 68
(黄进峰, 赵光普. 火箭发动机用合金 GH202 和 GH586 燃烧事故分析. *钢铁研究学报* , 2005 , 17(3) : 68)
- [13] Huang J F , Zhao G P. Oxidation characteristic and mechanism of superalloys in oxygen-enriched atmosphere. *J Iron Steel Res* , 2009 , 21(3) : 51
(黄进峰, 赵光普. 富氧气氛下高温合金氧化特征及机理. *钢铁研究学报* , 2009 , 21(3) : 51)
- [14] Huang J F. *Research on Novel Ignition/Combustion Testing Technique and Behavior of Steel and Superalloys in Oxygen-enriched Atmosphere* [Dissertation]. Beijing: Central Iron and Steel Research Institute , 2001
- [15] Shi C X , Zhong Z Y. *Fifty Year's Development of Superalloys in China*. Beijing: Metallurgical Industry Press , 2006
(师昌绪, 仲增墉. 中国高温合金五十年. 北京: 冶金工业出版社, 2006)
- [16] Guo J T. *Materials Science and Engineering for Superalloys*. Beijing: Science Press , 2008
(郭建亭. 高温合金材料学. 北京: 科学出版社, 2008)
- [17] American Society for Testing Material , G-04 Committee. *ASTM G124-10 Standard Test Method for Determining the Burning Behavior of Metallic Materials in Oxygen-enriched Atmospheres*. West Conshohocken: ASTM International , 2010
- [18] McLroy K , Zawierucha R , Million J F. Promoted ignition-combustion behavior of alternative high performance engineering alloys in oxygen-enriched atmosphere // *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-enriched Atmosphere*. Denver , 1997: 157
- [19] Sparks K M , Stoltzfus J M , Steinberg T A , et al. Determination of burn criterion for promoted combustion testing. *J ASTM Int* , 2009 , 6(10) : 21
- [20] Ward N R , Steinberg T A. The rate-limiting mechanism for the heterogeneous burning of cylindrical iron rods. *J ASTM Int* , 2009 , 6(6)
- [21] Wilson D B , Steinberg T A , De Wit J R , The presence of excess oxygen in burning metallic materials // *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-enriched Atmosphere*. Paris , 2000: 145
- [22] American Society for Testing Material , G-04 Committee. *ASTM G94-05 Standard Guide for Evaluating Metals for Oxygen Service*. West Conshohocken: ASTM International , 2014