

高温抗氧化铱涂层改性技术研究进展

杜广报 白书欣 朱利安 张虹 叶益聪

(国防科技大学 长沙 410073)

文 摘 针对 Ir 涂层的应用背景,分析了目前 Ir 涂层存在的问题及其对涂层服役性能的影响,在此基础上综述了 Ir 涂层的三类主要改性技术,并对 Ir 涂层改性技术的发展进行了展望。

关键词 Ir 涂层,改性,高温,抗氧化性

中图分类号:TB35

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.02.002

Recent Progress in Modification Technology of High Temperature Oxidation Resistant Iridium Coating

DU Guangbao BAI Shuxin ZHU Li'an ZHANG Hong YE Yicong

(National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract In this paper, the problems of iridium coating in application and their impact on the current performance of the coating service were analyzed, three main types of modified iridium coating technology and iridium coating modification technology development in the future were discussed.

Key words Iridium coating, Modification, High-temperature, Oxidation-resistant

0 引言

姿态及轨道控制发动机是运载火箭末级、导弹弹头和各类航天器的重要组成部分。目前广泛应用的液体双组元火箭发动机,常用推进剂为 N_2O_4 和肼类燃料,具有比冲高、寿命长、脉冲重复性能好等优点^[1]。难熔金属凭借其优异的高温力学性能广泛应用于该类发动机推力室,然而单纯的难熔金属难以满足发动机推力室的使用要求,因为发动机推力室内燃料燃烧温度高达 2 700℃,即使在内壁采用了液膜冷却,其工作温度仍高于 1 000℃,考虑到推进剂燃烧后产生的氧化氛围,难熔金属在此环境下极易发生氧化^[2]。在难熔金属表面涂覆高温抗氧化涂层是解决上述问题的有效方法^[3-4]。

图 1 为部分材料的氧渗透率随温度变化的情况, Ir 具有极低的氧渗透率,且随温度升高基本保持不变。据估算,在 1 800℃时,1 μm 的 Ir 抗氧渗透性相当于 1 mm 的 SiO_2 ;因此 Ir 被认为是目前 1 800℃以上最理想的高温抗氧化涂层材料之一。以 Ir 为抗氧

化涂层,Re 为基体的 Ir/Re 推力室是目前使用温度最高、比冲性能最好的液体双组元发动机推力室,其最高工作温度和比冲分别为 2 200℃和 325 s,已成功用于美国休斯公司的 601HP 卫星推进系统上。

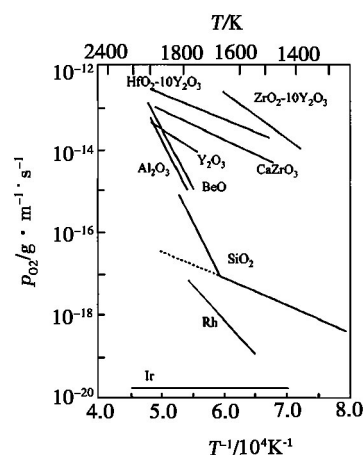


图 1 部分材料氧渗透率随温度变化的情况^[5]

Fig. 1 Change of oxygen permeability of some materials with temperature

收稿日期:2016-10-10

基金项目:国家自然科学基金(51371196/E0104,51501224/E011002);湖南省高校科技创新团队支持计划

第一作者简介:杜广报,1992 年出生,硕士,主要从事难熔金属方面的研究。E-mail:duguangzai@126.com

虽然 Ir 涂层因为极低的氧渗透率而被应用于高温抗氧化涂层,然而纯 Ir 在使用时仍然存在一些问题,对其使用寿命产生较大影响。

(1) 高温氧化挥发问题。研究表明,当温度高于 1 100℃ 时,纯 Ir 无法形成稳定的保护性氧化膜,而是直接氧化形成气态的 IrO_2 和 IrO_3 ^[6],导致涂层持续挥发减薄,1 965℃ 时 Ir 在空气中的氧化挥发速率约为 35 $\mu\text{m}/\text{h}$ ^[7],因此,在高温氧化性环境中使用时,Ir 涂层的氧化挥发是影响其使用寿命的重要因素。

(2) 推进剂的冷端腐蚀问题。在以 N_2O_4 和一甲基肼为推进剂的双组元液体火箭发动机中,推力室内壁靠近喷注器的低温部位(即冷端)易发生腐蚀,可能和推进剂中肼类和 Ir 的催化反应有关^[8],目前的解决方法是采用惰性较好的贵金属 Pt 进行冷端隔离,但这种方案成本高,且存在 Pt 熔化导致 Ir 熔蚀的风险,因此,需要研究更加可靠和廉价的解决方案。

(3) 微孔的扩散和晶界偏聚问题。大量研究发现,Ir 涂层在高温下易发生微孔扩散和沿晶界聚集的现象,导致晶界快速扩散通路的形成^[9],使氧元素和基体元素通过晶界快速扩散,最终导致涂层提前失效。MUMTAZ^[10]、YANG^[11]、ZHU 等^[12] 分别在对溅射法、金属有机物化学气相沉积法和熔盐电沉积法制备的 Ir 涂层进行高温处理或热循环考核时发现,Ir 涂层在热处理或热循环考核后出现微孔聚集现象,且随热循环次数增加,涂层中微孔密度逐渐变大,并沿晶界聚集、向外移动。鉴于目前各主要制备方法制备的 Ir 涂层均为柱状晶,其晶界大致垂直于基体表面,这些偏聚了大量微孔的晶界为氧扩散提供了几乎最短的扩散通道,因此,在目前无法抑制 Ir 涂层中微孔扩散和晶界偏聚趋势的前提下,Ir 涂层的晶粒结构对涂层的抗氧渗透性和使用寿命的影响便显得尤为重要。

(4) 热辐射率偏低问题。纯 Ir 的室温热辐射率约为 0.25 ~ 0.3,因此其高温工作时辐射散热量小,冷却效果差,对于发动机推力室来说,为了降低其壁面温度,需要额外采用液膜冷却,加大了燃料损耗,降低了发动机的比冲及飞行器的使用寿命。

由于上述原因,纯 Ir 涂层难以满足长时间高温抗氧化要求,为此,很多研究者开展了对 Ir 涂层的改性研究,期望进一步增加 Ir 涂层的高温抗氧化性及服役寿命。本文从 Ir 涂层自身组织结构的优化、表面外覆陶瓷涂层、表面合金化三个方面对 Ir 涂层的主要改性技术及其研究进展进行综述,在此基础上,展望了 Ir 涂层改性技术的发展和今后可能的研究重点。

1 Ir 涂层的改性方法

目前已开展的 Ir 涂层的改性方法主要有三种:Ir 涂层自身组织结构的优化、Ir 涂层表面外覆陶瓷涂层和 Ir 涂层表面合金化。

1.1 Ir 涂层自身组织结构的优化

目前 Ir 涂层的主要制备方法包括磁控溅射、化学气相沉积、金属有机物化学气相沉积、熔盐电沉积和双辉等离子法等,这些方法制备的 Ir 涂层具有不同的晶粒尺寸、表面粗糙度和择优取向等,但其共同点在于涂层晶粒结构均为柱状晶组织^[13-18]。柱状晶组织的 Ir 涂层晶界基本垂直于基体表面,为氧元素和基体元素提供了几乎最短的扩散路径,导致涂层实际使用寿命远低于理论预测值。为克服柱状晶组织的缺点,许多研究者通过工艺调整尝试制备了非柱状晶组织的 Ir 涂层。MAURY 等^[19] 指出多层结构 Ir 涂层具备更加优良的高温抗氧化性能。西北工业大学的杨文彬等^[20] 采用 MOCVD 法,通过变温多次沉积在 SiO_2 表面制备了 8 层结构的 Ir 涂层,各亚层涂层由纳米球形颗粒紧密堆积而成,外层对内层的涂层缺陷具有一定的封填作用,能有效阻止氧的扩散进入,提高涂层的抗氧化性。国防科技大学的 ZHU 等^[21] 采用低频脉冲电沉积技术在氯化物熔盐体系中制备了表面光滑、致密、具有 $\langle 111 \rangle$ 方向强择优取向的层状 Ir 涂层,各亚层厚度约为 1 μm ,亚层间界面清晰、结合良好。层状结构的 Ir 涂层晶界结构复杂,可以增加裂纹扩展时的偏转路径和氧原子的扩散距离,其断裂韧性和抗氧化性均优于柱状结构的 Ir 涂层。通过调整脉冲电沉积工艺,国防科技大学的黄永乐等于近期获得细等轴晶组织 Ir 涂层,并对比研究 2 000℃ 下细等轴晶和柱状晶组织 Ir 涂层在空气中的静态氧化寿命,结果发现,与传统的柱状晶组织 Ir 涂层相比,细等轴晶组织 Ir 涂层的抗氧化寿命显著提高,提高幅度超过 100%。

Ir 的工作温度远高于其再结晶温度,导致 Ir 涂层在使用时晶粒快速长大,其复杂的晶界结构无法长时间保持稳定,且这种方法无法减缓其氧化挥发速率,故单纯改变组织结构对 Ir 涂层抗氧化寿命的提高幅度有限。

1.2 Ir 涂层表面外覆陶瓷涂层

表面制备保护层是改性涂层的常用方法,这种方法一方面可阻挡涂层与外界环境的直接接触,减少环境对涂层的直接破坏作用,如推进剂腐蚀、高温氧化等;另一方面,可改变 Ir 涂层表面特性,如高温发射率,提高涂层的整体防护性。考虑到 Ir 涂层的高温使用环境,其保护层需符合以下四点要求^[22]:(1) 不与 Ir 涂层发生强烈的固相反应;(2) 与 Ir 涂层热物理相容性良好;(3) 保护层本身具有优良的高温抗氧化

性和较低的氧渗透率;(4)具有较高的辐射率。针对以上指标进行筛选,ZrO₂、HfO₂、Al₂O₃等难熔金属氧

化物满足以上要求(其部分性质如表1所示),可作为超高温下Ir涂层的外覆保护层。

表1 难熔金属氧化物的部分性质

Tab.1 Some properties of refractory metal oxides

材料	固相相变温度	线胀系数/ 10^{-6}K^{-1}	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	辐射率
ZrO ₂	低温:单斜晶系 1100 $^{\circ}\text{C}$:四方晶型(体积收缩7.4%)	10.3	2680	0.4-0.45
	1900 $^{\circ}\text{C}$:立方晶型(体积收缩2.7%)			
HfO ₂	低温:单斜晶系 1720 $^{\circ}\text{C}$:四方晶型(体积膨胀2.0%)	5.6	2810	0.38-0.58
	2700 $^{\circ}\text{C}$:立方晶型(体积收缩3.2%)			
Al ₂ O ₃	1300 $^{\circ}\text{C}$ 以上; α -Al ₂ O ₃	6.5-8.0	2050	0.25-0.3

研究发现,外覆的陶瓷层一方面阻挡了Ir涂层和氧的直接接触,降低了其氧化挥发速率;另一方面又密封了烧蚀等过程中出现在表面的微孔、裂纹等缺陷。MUMTAZ等^[23-25]通过射频磁控溅射方法在Ir涂层上制备了Al₂O₃保护层,并在空气中1700 $^{\circ}\text{C}$ 退火2h处理后,Ir涂层的厚度基本不变,Al₂O₃保护层依然保持连续,未出现裂缝且与Ir涂层结合良好。此外,外覆的陶瓷层还具有较低的热导率和较高的热辐射率,可有效降低涂层表面温度。BRAIN^[26]和FORTINI^[27]在Ir涂层表面分别制备了约250 μm 厚的ZrO₂和HfO₂涂层,显著提高了涂层对环境的耐受能力和整体使用温度。为了提高陶瓷涂层与Ir涂层的热物理兼容性和结合力,美国PPI公司采用真空等离子喷涂法在Ir涂层表面制备了成分渐变的HfO₂梯度涂层,有望应用于Ir/Re推力室中。

外覆陶瓷层能在一定程度上保护Ir涂层,延长Ir涂层的使用寿命,但这种改性Ir涂层的方法也同样

存在缺陷:一是有些陶瓷层(如HfO₂和ZrO₂)在升温过程中发生固态相变,产生体积变化和内应力,导致陶瓷层与Ir涂层结合变差,最终剥落;二是陶瓷层在服役期间,产生的微孔、裂纹缺陷无法愈合,缺陷增大至一定尺寸时,失去对下方Ir涂层的保护作用,导致Ir涂层表面形成局部“热点”而失效。

1.3 Ir涂层表面合金化

Ir涂层表面合金化是改性Ir涂层的另一种有效方法,合金元素一般选用Hf、Zr、Ta、Al等。在高温氧化性环境中,这些合金元素不断被氧化生成致密的难熔氧化物外层,起到保护Ir涂层的作用。合金化改性Ir涂层方式最大的优势在于其能够原位形成难熔氧化物,即使涂层表面出现微孔、裂纹和剥落等缺陷,也能迅速被新形成的氧化物填补和覆盖,实现涂层的“自愈合”。

很多学者对Ir合金涂层的氧化行为进行了研究,相关研究结果见表2。

表2 Ir合金涂层研究结果总结

Tab.2 Summary of research results of Ir alloy coating

文献	合金	基体	制备方法	研究结果	不足
[28]	Ir-Hf-Al	镍基合金 TMS-82	渗铝后+电子束 物理气相沉积	热循环考核后,涂层表面生成氧化物层HfO ₂ 和Al ₂ O ₃ ,提高了涂层的使用寿命	抗氧化性不及Pt-Al涂层
[29]	Ir-Ta	镍基合金 TMS-75	直流磁控溅射	Ir-24 at% Ta合金涂层的抗氧化性及力学性能都较纯Ir涂层有所提高	1000 $^{\circ}\text{C}$ 时与基体出现互扩散现象,涂层热稳定性较差
[30]	Ir-Pt	镍基合金 TMS-82	磁控溅射	Pt-30at% Ir和Pt-50at.%涂层失重更小,说明Pt-Ir合金涂层的抗氧化性更好	Pt合金化会显著降低其使用温度
[31]	Ir-Zr	金属钼	双辉等离子法	Ir-Zr合金涂层具有双层结构,比纯Ir涂层具有更好的抗氧化性	1000 $^{\circ}\text{C}$ 时与基体结合变差,高温使用受限

研究表明,合金化涂层虽然在一定程度上改善了纯Ir涂层的抗氧化性,但也存在一些不足和问题:Ir-Ta合金涂层在高温时与基体发生互扩散,而Ir-Zr合金涂层高温时与基体结合变差,这使得Ir-Ta和Ir-Zr合金涂层不能在超过1000 $^{\circ}\text{C}$ 下长时间服役;Ir-Pt合金涂层由于合金化降低了涂层熔点,使得涂层使用温度下降;Ir-Hf-Al合金涂层经热循环考核发现其

抗氧化性不及Pt-Al涂层。有研究显示,与Ir-Pt、Ir-Zr、Ir-Ta等合金涂层相比,Ir-Al合金涂层表现出更为优异的抗氧化性^[32]。

对Ir-Al合金的高温抗氧化性研究中,早期的研究者多采用电弧熔炼技术制备的块体Ir-Al合金材料进行实验研究。LEE等^[33]研究发现,Ir-Al合金形成连续Al₂O₃层所需的Al含量须高于55at%,表明富

Al 的 Ir-Al 金属间化合物更适合作为抗氧化外层。Hill 等^[34]总结了不同 Al 含量的 Ir 合金物相,并补充实验,系统研究了 Ir-Al 相图,如图 2 所示,可看出, IrAl 金属间化合物存在 48 mol% ~ 52 mol% 的成分区间。HOSODA 等^[35]分别制备了 Ir49Al 和 Ir51Al 合金 (Ir 的摩尔分数分别为 49% 和 51%),得到金属间化合物 IrAl,发现其氧化后可以在 Al₂O₃ 外层下形成连续纯 Ir 层作为氧扩散阻挡层,同时发现 Ir49Al 的寿命更长,同样证明富 Al 的金属间化合物抗氧化性更好。但 CHOU 等^[36]在早前的研究中指出,金属间化合物 IrAl 氧化产物的结构形式与其氧化反应动力学密切相关,1 300℃ 氧化时, IrAl 的氧化产物中可出现连续 Ir 层,而 1 600℃ 氧化时,其氧化产物的结构转变为岛状 Ir 颗粒与 Al₂O₃ 的混杂层。可见,单一的 Ir-Al 金属间化合物 IrAl 只能在较低温度下 (< 1 600℃) 获得较好的抗氧化性,尚未解决涂层在超高温 (> 1 800℃) 环境中整体抗氧化性偏低的问题。

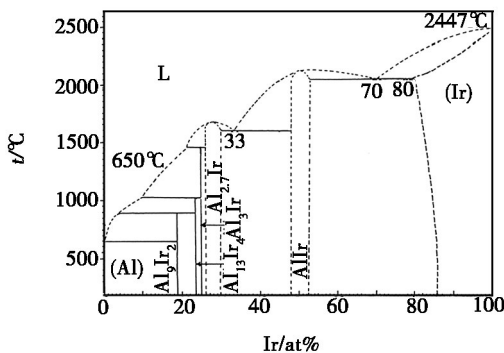


图 2 Ir-Al 相图^[34]

Fig. 2 Ir-Al phase diagram

鉴于 Ir-Al 合金良好的高温抗氧化性和相对偏高的材料成本,研究人员将研究重点放在了 Ir-Al 合金涂层的制备上。CLIFT 等^[37]采用分离靶材(两个 Al 靶和一个 Ir 靶)同时溅射沉积 Ir 和 Al。ANDERSON 等^[38-40]通过先后交替溅射 Al 层和 Ir 层并热处理的方法获得了 Ir-Al 涂层。但由于 Ir 和 Al 的熔点差别很大,二者的沉积条件相差也较大,因此,上述两种沉积方式控制难度较大,涂层的制备速度也较慢,难以获得较厚的涂层。闻明等^[41]提出先 CVD 制备 Ir 涂层然后整体渗铝制备 Ir-Al 合金涂层的方法,但其获得的涂层由贫铝的单相 IrAl 构成,牺牲了 Ir 涂层氧渗透率极低的优势。ZHU 等^[42]通过熔盐电镀制备 Ir 涂层,然后表层渗铝,在 Ir 涂层表面获得 IrAl_{2.7(3)}/IrAl 双层金属间化合物涂层,图 3 为涂层截面图,其中 Al 含量较高的 IrAl_{2.7(3)} 作为抗氧化外层,纯 Ir 作为氧扩散阻挡层, IrAl 作为 IrAl_{2.7(3)} 与纯 Ir 间的过渡层,该多层结构中,各亚层协调配合,性能优势得以充分发挥,兼顾了涂层整体的抗氧化性和抗氧渗

透性,实现了协同增效,1 850 ~ 1 900℃ 的高温氧化实验表明其整体抗氧化性较纯 Ir 涂层大幅提高。

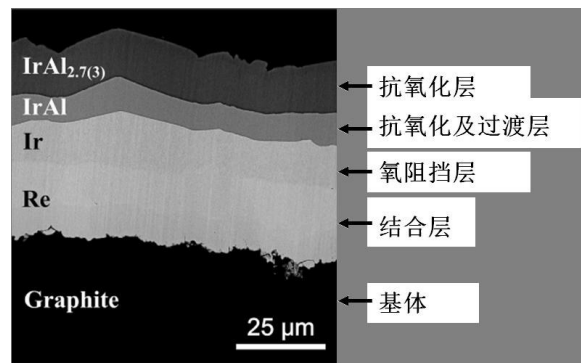


图 3 IrAl_{2.7(3)}/IrAl/Ir 多层涂层截面^[42]

Fig. 3 Section of IrAl_{2.7(3)}/IrAl/Ir multilayer coating

2 结语

为加速 Ir/Re 推力室的研制及应用,进一步提高空间飞行器姿/轨控发动机推力室的比冲性能, Ir 涂层的抗氧化性和服役寿命还有待进一步提高,在未来一段时间, Ir 涂层的改性方法仍将是 Ir 涂层研究领域的一个重点。目前, Ir 涂层自身组织结构的优化、 Ir 涂层表面外覆陶瓷涂层和 Ir 涂层表面合金化的方法都在一定程度上有效的改善了 Ir 涂层的抗氧化性,但每种方法都有其局限性,综合不同方法的优点,设计多层复合涂层是目前最有希望实现 Ir 涂层改性的思路。在现有多层涂层结构设计的基础上,发展梯度功能涂层,在基体表面形成成分渐变的涂层,能够更好的实现涂层间的可靠结合,是一种更优的 Ir 涂层改性方法,将是今后 Ir 涂层改性研究的重点方向之一。

参考文献

- [1] 萨顿. 火箭发动机基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 143.
- [2] 张绪虎, 等. 难熔金属表面高温抗氧化涂层技术现状 [J]. 中国材料进展, 2013, 4(32): 203-210.
- [3] 美国国家材料咨询委员会所属涂层委员会. 高温抗氧化涂层 [Z]. 北京: 科学出版社, 1980: 16.
- [4] 徐方涛, 等. 姿/轨控液体火箭发动机推力室高温抗氧化涂层 [J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(1): 25-29.
- [5] CRISCIONE J M, et al. High temperature protective coating for graphite [R]. Parma: Union Carbide Corporation, 1964.
- [6] MUMTAZ K, et al. Thermal cycling of iridium coatings on isotropic graphite [J]. Journal of Materials Science, 1995 (30): 465-472.
- [7] WIMBER R T, et al. Kinetics of evaporation/oxidation of iridium [J]. Metallurgical Transactions A, 1977, 1(8): 193-199.
- [8] 张雄伟. 贵金属铱催化剂的制备、表征及其性能研究 [D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [9] WANG J M, et al. Oxidation of double glow plasma dis-

charge coatings of iridium on molybdenum for liquid fuelled rocket motor casings[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2011, 46(6): 732-736.

[10] MUMTAZ J, et al. Thermal cycling of iridium coatings on isotropic graphite[J]. Journal of Materials Science, 1995, 30: 465-472.

[11] YANG W B, et al. Thermal stability of iridium coating prepared by MOCVD[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2009, 27: 33-36.

[12] ZHU L A, et al. Iridium coating prepared on rhenium substrate by electrodeposition in molten salt in the air atmosphere [J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 206: 1351-1354.

[13] 杨文彬, 等. 金属有机物化学气相沉积法制备铱涂层的形貌与结构分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(3): 488-491.

[14] 吴王平, 等. 难熔金属高温抗氧化铱涂层的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(2): 435-440.

[15] 白书欣, 等. 熔盐电沉积法制备铱及铱合金涂层的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(7): 1815-1820.

[16] I GUMENOV I K, et al. Corrosion testing of platinum metals cvd coated titanium anodes in seawater-simulated solutions [J]. Desalination, 2001(136): 273-280.

[17] MAURY F, et al. Iridium coatings grown by metal - organic chemical vapor deposition in a hot-wall CVD reactor[J]. Surface & Coatings Technology, 2003(163/164): 208-213.

[18] ETENKO A, et al. Oxidation-protective iridium and iridium-rhodium coating produced by electrodeposition from molten salts[J]. Ecs Transactions, 2007, 14(3): 151-157.

[19] MAURY F. Recent trends in the selection of metal-organic precursors for mocvd process [J]. Le Journal de Physique IV, 1995, 5(C5): 449-463.

[20] 杨文彬, 等. MOCVD 法制备多层 Ir 涂层的显微结构 [J]. 固体火箭技术, 2006, 29(1): 56-59.

[21] ZHU L A, et al. Laminar Iridium coating produced by pulse current electrodeposition in molten salt under the air atmosphere [J]. Applied Surface Science, 2013(282): 820-825.

[22] 华云峰, 等. 炭/炭复合材料抗氧化抗热震铱涂层的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(11).

[23] MUMTAZ K, et al. Annealing of aluminium oxide coatings on iridium-coated isotropic graphite at high temperature in argon atmosphere [J]. Journal of Alloys and Compounds, 1994, 209: 279-283.

[24] MUMTAZ K, et al. Annealing of aluminium oxide/iridium coatings in oxidizing atmosphere [J]. Journal of Materials Science Letters, 1994, 13: 1775-1777.

[25] MUMTAZ K, et al. RF magnetron sputtered aluminium oxide coatings on iridium [J]. Journal of Materials Science, 1996, 31: 5247-5256.

[26] BRAIN D R. Evaluation of oxide-coated iridium-rhenium chambers [C]. California, 1993.

[27] FORTINI A, et al. Advanced materials for chemical propulsion: oxide-iridium/rhenium combustion chambers [M]. Los Angeles, AIAA, 1999: 1-11.

[28] KAMIYA K, et al. Characterization of an Ir-Hf alloy coating as a bond coat material [J]. J. Japan Inst. Metals, 2005, 69(1): 73-79.

[29] KUPPUSAMI P, et al. Behaviour of Ir-24at% Ta films on Ni based single crystal super alloys [J]. Surface Engineering, 2005, 21(1): 53-59.

[30] SUZUKI A, et al. Oxidation behavior of Pt-Ir modified aluminized coatings on Ni-base single crystal superalloy TMS-82 [J]. Oxid Met, 2007, 68: 53-64.

[31] CHEN Z F, et al. Oxidation resistance coatings of Ir-Zr and Ir by double glow plasma [J]. J. Mater. Sci. Technol, 2014, 30(3): 268-274.

[32] KAPLAN R B, et al. Iridium aluminide coats for protection against oxidation [R]. 1996.

[33] LEE K N, et al. The oxidation of iridium-aluminum and iridium-hafnium intermetallics at temperatures above 1550 [J]. Oxidation of Metals, 1989, 32(5/6): 357-369.

[34] HILL P J, et al. Constitution and hardnesses of the Al-Ir system [J]. Journal of Alloys and Compounds, 1998, 280: 240-250.

[35] HOSODA H, et al. Potential of IrAl base alloys as ultrahigh-temperature smart coatings [J]. Intermetallics, 2000(8): 1081-1090.

[36] CHOU T C. The formation of discontinuous Al₂O₃ layers during high temperature oxidation of IrAl alloys [J]. Journal of Materials Research, 1990, 2(5): 378-384.

[37] CLIFT W M, et al. Deposition and analysis of Ir-Al coatings for oxidation protection of carbon materials at high temperatures [J]. Surface & Coatings Technology, 1990, 42(1): 29-40.

[38] ANDERSON D R, et al. Analysis of iridium-aluminum thin films by x-ray photoelectron spectroscopy and rutherford backscattering spectroscopy [J]. Science & Technology of Materials, Interfaces, and Processing, 1990, 8(3): 2251-2254.

[39] RICHARDS M R. Process development for iral coated SiC-C functionally graded composite for the oxidation protection graphite [D]. Washington: University of Washington, 1996.

[40] RICHARDS M R, et al. The development of an IrAl coated SiC-C functionally gradient composite for oxidation protection of graphite and carbon-carbon composites [R]. Washington: University of Washington, 1995.

[41] 闻明, 等. 铱铝高温抗氧化涂层的制备方法 [P]. 200910168837. 6, 2010

[42] ZHU L A, et al. Double-layer iridium-aluminum intermetallic coating on iridium/rhenium coated graphite prepared by pack cementation [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 258: 524-530.