

贵金属高温材料的研究及应用进展

魏 燕^{1,2}, 陈家林¹, 胡昌义¹, 蔡宏中¹, 郑 旭¹, 祈小红¹, 陈 力^{1,2*}

(1. 昆明贵金属研究所 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106; 2. 昆明理工大学 材料学院, 昆明 650093)

摘 要: 现代工业和高技术领域, 部分高熔点的贵金属材料(Pt、Rh、Ir)及其合金、复合材料等作为耐高温耐腐蚀型材料具有重要应用。因其具有高熔点、高温抗氧化性、高的抗腐蚀性性能及高温强度等一系列优点, 近年来在高温材料领域的研究及应用有了突飞猛进的发展。综述了贵金属材料在高温结构材料及高温抗氧化功能涂层方面的研究与应用进展, 探索贵金属金属材料在高温领域的发展方向。

关键词: 金属材料; 高温材料; 贵金属; 结构材料; 抗氧化涂层材料

中图分类号: TG146.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2013)S1-0122-05

Research Development of Precious Metals for Ultra-high Temperature Applications

WEI Yan^{1,2}, CHEN Jialin¹, HU Changyi¹, CAI Hongzhong¹, ZHENG Xu¹, QI Xiaohong¹, CHEN Li^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals,

Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China;

2. Faculty of Materials and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: In modern industry and high technology fields, some precious metals, such as Pt, Rh, Ir and their alloys and composites have important application as a kind of high temperature and corrosion resistant material. Because they have a series of advantages, such as high melting point, high temperature oxidation resistance to corrosion, and high temperature strength, in recent years remarkable progress has been made in the research and application of precious metals used for high temperature materials. Precious metals used as structural materials and oxidation resistance coatings in the field of ultra-high temperature are reviewed in this article; finally the future development direction of precious metals used in ultra-high temperature is presented.

Key words: metal materials; ultra-high temperature materials; precious metals; structural materials; oxidation resistance coatings

贵金属包括金(Au)、银(Ag)、铂(Pt)、钯(Pd)、铱(Ir)、铑(Rh)、锇(Os)、钌(Ru)8个元素, 除 Au、Ag 外, 其它 6 种元素统称为铂族金属^[1]。最初, 贵金属主要用于装饰和货币, 自 19 世纪中叶以后, 随着贵金属基础研究的深入, 其在玻纤工业漏板、化学工业催化剂、工业热电偶、高温炉用发热体材料、精密仪器零部件以及航空航天用电接触材料等领域

的应用不断扩展, 有“工业维他命”之称。近年来, 随着现代工业和高技术领域的发展, 对材料耐高温、抗氧化等性能提出了更高的要求, 贵金属材料, 尤其是铂族金属材料因其高熔点, 高温抗氧化、热稳定性、高的抗腐蚀性, 在高温材料领域的应用越来越受到重视, 现在已被许多国家列为战略物资。

收稿日期: 2013-08-29

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51201076)、云南省应用基础研究计划(2011FZ220、2012FB194)和云南省技术创新人才项目。

第一作者: 魏 燕, 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 稀贵金属材料制备。E-mail: weiyanyan@ipm.com.cn

*通讯作者: 陈 力, 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 高温材料。E-mail: chenli@ipm.com.cn

本文将从高温结构材料及高温抗氧化涂层材料两个方面, 综合论述贵金属高温材料的研究进展及未来的发展方向。

1 贵金属高温结构材料

虽然 Fe 基、Ni 基、Ti 基、Co 基、Mo 基合金及其金属间化合物等金属结构型材料得到了很大的发展, 并在工业中有广泛应用, 但在高温氧化和腐蚀环境中, 没有任何一种贱金属材料能像贵金属一样能经受剧烈和复杂的环境考验, 尤其是贵金属材料中的铂(Pt)、铑(Rh)和铱(Ir)——熔点高、化学稳定性优良、可抵抗熔融氧化物的侵蚀, 因而在优质玻璃和玻璃纤维的制备、航空航天等领域是不可缺少的高温结构材料。在现代工业中实际使用的贵金属金属材料品种繁多, 涉及的高温材料的主要有以下几类, 即固溶强化型合金、弥散强化型复合材料以及新兴的沉淀强化型合金及铂族金属化合物材料。

1.1 固溶强化型铂族金属材料

在高温条件下, Ru、Ir、Rh 具有比 Pt、Pd 更高的抗拉强度, 尤其是 Ir, 它在 2200℃的持久强度和蠕变断裂强度远高于 Pt-Rh 合金^[2]。但是和 Pt、Rh 相比, Ir、Ru 的室温延性差、抗高温氧化能力低; 而 Rh 由于一度价格极其昂贵, 这些因素限制了 Ru、Ir、Rh 金属及其固溶合金的发展和运用, 目前应用最广泛的仍是铂基固溶体合金^[3]。固溶强化型铂基合金主要包括 Pt-Rh、Pt-Ir、Pt-Ru、Pt-Ni、Pt-W 等二元合金, Pt-Pd-Rh、Pt-Rh-Ru 等三元合金。

以铂基高温合金为例, Ru、Ir、Rh、Pd 等铂族金属是主要固溶强化元素, Ru、Ir 的固溶强化作用最大、Rh 次之、Pd 的作用最小。其次, 原子半径与溶剂 Pt 相差越大的元素如 Zr、Hf 等, 或溶质熔点越高的元素如 Re、W、Mo 等, 对 Pt 也有很高的固溶强化作用, 均有细化合金晶粒、升高再晶界温度、提高合金的持久强度, 降低蠕变速率的作用。这一方面归因于 Zr、Hf 和稀土组元高的固溶强化效应, 另一方面也归因于在高温氧化气氛中 Zr、Hf、Y 等组元的内氧化, 在应力作用下, 氧化物沿着交滑移系和晶界析出, 阻碍位错攀移。上述铂基合金的高温固溶强化机制也适于铱基和铑基固溶体合金。总之, 铂族金属高温合金最重要的性能就是高温蠕变特性, 从机理而言, 金属的蠕变过程由刃型位错攀移控制, 位错攀移所克服的势垒就是激活能, 凡能降低合金堆垛层错能的合金元素均可减小铂族

高温合金的高温蠕变速率^[4]。实际工业应用中, 作为高温合金, 它不仅要求基体元素应具有好的高温力学和热学稳定性, 也要求溶质元素具有良好的高温稳定性。Pt-Rh 合金的性能最稳定、应用最广泛, Pt-Ir 合金的高温稳定性次于 Pt-Rh 合金。现已研发最为成熟的商业合金就是 Pt-Rh 合金, 如 Pt-5Rh、Pt-7Rh、Pt-10Rh、Pt-20Rh、Pt-25Rh、Pt-30Rh、Pt-40Rh, 综合考量各种牌号合金的性能, 工业应用 1500℃以下高温氧化环境中, Pt-Rh 基合金仍是高温结构材料的首选, 并可添加微量 Zr、Hf、RE 等元素进一步强化。考虑到 Pt-Ir 合金在高温持久强度、蠕变寿命和蠕变速率等方面优于 Pt-Rh 合金, 在中性或还原性气氛中或在更高温度的短时应用中, 也可以作为备选材料。但是为了满足高温、长时间及极端恶劣环境的使用, 现有固溶强化铂族金属材料的性能还有待提升。

1.2 弥散强化型铂族金属材料

高温工程结构中使用的贵金属高温合金材料, 由于长期在高温环境中工作发生再结晶及晶粒长大而软化, 强度降低并发生蠕变, 在固溶强化不理想的情况下, 20 世纪 40 年代, 研究者开始了弥散强化铂的研究, 最初的研究目的是为了满足不同玻璃和玻纤工业的需要, 并节约昂贵的贵金属材料, 如今随着弥散强化铂材料的出现, 使铂族金属材料在高温领域的应用得到了扩展, 如空间站推进器材料等^[5]。

铂族金属弥散强化是借助第二相微粒弥散分布在基体合金中而实现的, 强化作用相可以是碳化物、金属间化合物和氧化物等^[6]。国际贵金属企业巨头, 如英国江森-马塞(Johnson Matthey)、美国欧文斯玻璃纤维公司(Owens Fiberglass Corporation)、恩格哈德(Engelhard)、德国的德固赛(Degussa)、贺利氏(Heraeus)以及日本的田中贵金属公司等通过在 Pt、Pt-Rh 合金、Pt-Au 合金、Pt-Ir 合金等基体中添加如 Zr、Y、Al、Ca、Ti、Th、Hf 等, 开发了一系列弥散强化铂材料^[7]。这些铂材料主要以氧化物为弥散强化相, 不含 Rh 或低 Rh 含量, 其高温力学性能普遍高于同成分的铂基合金。目前获得广泛应用的弥散强化铂和铂合金主要有三类: ① 氧化物弥散强化(Oxide Dispersion Strengthening, ODS), 是一种将超细氧化物粒子非常均匀地弥散分布在金属或合金中使其强化的方法^[8]。② 0.06%~0.3% ZrO₂ 颗粒稳定化 Pt 或 Pt 合金(Zirconia Grain Stabilized Platinum or Platinum Alloys, ZGSPt)^[9]; ③ 含有适量 Zr、Y 和微量 Ca、Al、Mg 元素的合金, 经氧化处理后发

展为以几种氧化物颗粒弥散硬化的 Pt 或 Pt 合金 (Dispersion Hardened Platinum or Platinum Alloys, DPHPt), 如 DPHPt-10Rh、DPHPt-5Au 等^[10]。虽然各个公司赋予了弥散强化铂合金不同名称, 但它们实质上都是以氧化物弥散强化铂或铂合金。80 年代以后, 昆明贵金属研究所等单位也紧跟国际发展动向, 相继研制成以 ZrO_2 颗粒稳定化的 Pt 和 Pt-Rh 合金, 采用内氧化—热机械加工方法制备出含 Zr 分别为 0.1%、0.2%、0.3% 的弥散强化 Pt 材料^[6, 11-12]。

1.3 沉淀强化型铂族金属材料及铂族金属间化合物

基于 γ/γ' 型沉淀强化镍基超合金的成功经验, 近年人们致力于寻求具有类似结构特征但具有更高熔点的新一代合金。铂族金属(如 Pt、Ir、Rh)能与 Al 及过渡金属(如 Zr、Hf、Nb、Ta 等)形成 fcc 结构的固溶体和 L_{12} 型有序金属间化合物 Pt_3X (X 为 Al 或过渡金属)。fcc 与 γ' 相形成理想的高温强化共格结构, 这与 Ni 基高温合金的组织特征基本一致。在铂族金属合金中存在大量 γ' 型 L_{12} 沉淀相, 这为发展 γ/γ' 型沉淀强化铂族金属“超合金材料”奠定了基础^[13]。具有 L_{10} 、 L_{12} 和 B2 结构的铂族金属金属间化合物熔点可达到 2000°C 左右, 很可能成为下一代高温合金的候选者, 这些合金比一些难熔金属, 如 Nb、Mo、Ta、W 等的抗氧化能力和抗腐蚀能力更佳, 具有发展高性能热强材料的潜力^[3]。

对于这种与 Ni 基高温合金组织特征基本一致的“铂族金属基高温合金”的研究仅有十余年的历史, 国际上仅有日本、南非、德国和英国等少数国家开展了该类合金的研究。1997 年起, 日本国立材料科学研究所先后对 Ir-M 及 Rh-M 二元系、Ir-Hf-Zr 三元系和 Ir-Nb-Ni-Al 四元系进行了研究^[14-16]。Ir 基合金在 1200°C 的高温强度是 Ni 基高温合金的 16 倍, 共格结构起到了明显的强化效果; Pt-Al、Pt-Hf 及 Pt-Zr 合金中发现 Pt 固溶体均能与 L_{12} 结构有序相平衡存在^[17]; 2005 年以后, 研究重点集中到以 Pt_3Al (γ' 相) 为主要强化相的 Pt 基高温合金上, 该合金体系已从 Pt-Al-Cr 等三元系扩展到 Pt-Al-Cr-Ni 等四元系^[18-23]。在 Pt-Al 系中添加过渡金属元素的合金具有更高的高温强度和热稳定性, 多元合金化可提高 γ' 析出相的强化效果、热稳定性及基体的固溶强化作用和合金的综合性能。国内方面, 北京航空航天大学等^[24-25]对 Ir-Hf-Nb 和 Ir-Nb-Si 等三元合金系中 L_{12} 型结构的 γ' 高温强化相的组成、形貌及强化机理进行了探索; 昆明贵金属所对 Pt-Al、Ir-Al 体系开展了研究^[26]。总之, 国外对该类铂基高温超合金的研究尚处于初期

探索阶段, 而国内的研究也刚刚起步, 但是极具吸引力和实用价值。

1.4 铂族金属高温材料应用进展

过去几十年中, 铂族金属合金材料, 尤其是铂基合金在高温结构材料领域的应用主要集中于制造器皿材料、玻纤工业中的漏板材料, 展现了优异的高温力学、耐腐蚀及抗氧化性能, 其工作温度范围为 $1000\sim 1500^\circ\text{C}$, 应力 $1\sim 40\text{ MPa}$, 能在大气中工作几个月至一年, 随着弥散强化铂和铂合金材料的开发, 高温强度进一步提升, 基本满足玻纤工业的使用需求。

近年来, 国际上航天工业发达国家或地区开始将铂基高温合金应用于比上述工况更为恶劣的航天空间推进发动机领域, 如欧洲航空防务与空间公司 (EADS), 德国 MMB 公司等。在 20 世纪 80 年中期, 为满足更高性能及更高寿命卫星的性能要求, 开展了铂/铑合金材料的研制, 成功制备出了 10 N 的铂/铑合金发动机, 将铂基合金材料喷管大量应用于无毒推进、单组元及双组元发动机, 取得了良好的效果, 该型发动机已被选为 CLUSTER 科学计划卫星、ARTEMIS 实验通讯卫星及 SB30 卫星等的推进系统姿控发动机。将 Pt 基高温材料作为主要结构部件应用在航天领域逐渐受到各国的重视。昆明贵金属研究所目前正在开展新型铂基高温新材料的研究, 研究的材料将具有工作温度在 1500°C , 高温强度 $\geq 40\text{ MPa}$, 蠕变寿命长等一系列优异性能。该种新型 Pt 基高温材料有望成为高温结构应用领域的重要的候选材料, 除在航天领域外, 未来在民用和高技术领域都将有广泛应用。

2 贵金属高温抗氧化薄膜与涂层

贵金属薄膜与涂层的研究开始于 Au、Ag, 进而 Pt、Pd 和 Rh, 现发展到 Ir、Ru 和 Os 以及它们的合金。贵金属薄膜涂层材料的制备方法有多种, 如电镀法、溶胶-凝胶 (Sol-gel) 法、分子束外延、物理气相沉积 (PVD) 法、化学气相沉积 (CVD) 法, 但最常用的是电镀法、CVD 法及 PVD 法, 其中电镀法适宜制备致密的 Pt、Pd、Rh 薄膜, CVD 及 PVD 法适宜制备较厚的涂层, 尤其是 Ir 及 Ir 合金涂层。

一般来讲, 薄膜的厚度比涂层更小, 功能上更多地是利用其光、电、磁及催化等物理化学特性; 涂层的厚度相对较厚, 主要功能是作为表面保护材料。铂族金属薄膜与涂层, 不仅可以更好的利用贵

金属的优良性能,可以节约昂贵而稀少的贵金属材料,更可以使被保护的金属、合金或其他材料在更苛刻的条件下使用。在高温合金、难熔金属(W、Mo、Ta、Nb、Re)、C/SiC 复合材料等高温结构材料上使用铂族金属涂层以抵御恶劣的工况环境,是未来铂族金属高性能功能涂层的发展方向之一。目前,铱(1800℃以上使用)及铱合金(1100~1400℃使用)涂层作为高温抗氧化涂层在航天和航空领域的应用成为了新的研究热点。

近几年,欧美及日本等国家纷纷将铱及铱合金材料列为研究重点,特别是为满足空间环境等对超高温材料的需求。国外对铱涂层的研究起步较早,其中美国、俄罗斯、日本已处于领先水平^[27-28]。国内对铱及其合金的研究开发起步较晚,在开展新型铱合金的成分设计、铱合金的加工与组织控制等方面才刚刚起步,特别在铱涂层的制备方面,我国只有少数几个单位如昆明贵金属所、北京航空材料研究所、上海硅酸盐研究所、西北工业大学等开展了研究工作。昆明贵金属研究所主要开展了以下方面的研究:一方面是采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)制备贵金属(Ir、Pt、Pd)涂层,其中 Ir 涂层,可应用于第三代航天发动机喷管的保护涂层,工作温度高达 1800℃^[29-30];另一方面研究铂族金属化合物涂层,如 PtAl 涂层材料及其结构改性, IrAl、RuAl 等,开发 Pt-Al, Ir-Al 涂层保护各种航空和地面发动机的涡轮,包括涡轮叶片及其它耐高温器件,该类铂族金属化合物材料表现出了非常优良的抗氧化、抗腐蚀性能和良好的抗疲劳等机械性能,工作温度可达 1100~1400℃^[26]。

铱涂层由于其优异的抗高温抗腐蚀性能,广泛应用于高温领域,成为国内外对高温新型保护涂层研究的重点和热点,具有重要的应用前景和学术研究价值。随着国内研究的进一步深入,最终将得到综合性能更为良好的铱及铱合金涂层。

3 铂族金属高温材料展望

铂族金属材料的研究和开发正向着新合金、新复合材料、新涂层镀层材料的方向发展。基于镍基超高温合金结构的启发,结合铂族金属自身的结构特点,未来铂族金属材料的发展方向将是通过成分设计和合金化元素优化组合构成多相共存,多种强化机制共同作用的新型高温材料。

在中国,贵金属虽然种类齐全,但资源有限,

将它们科学地结合起来,经过相关攻关研究,研发出强度高、耐热、耐蚀突出的高性能新材料,供航空、航天、国防、军工、高科技产品使用,不仅可以打破国外技术垄断,开发出新的高性能产品,提高贵金属产品的附加值,满足我国工业日益增长的现实需求;更可实现贵金属产业健康、平衡、可持续发展,具有深远的战略意义。

参考文献:

- [1] 谭庆麟, 阙震寰. 铂族金属[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- [2] Fischer B, Behrends A, Freund D, et al. High temperature mechanical properties of the platinum group metals [J]. Platinum Metal Rev, 1999, 43(1): 18-28.
- [3] 宁远涛, 杨正芬, 文飞. 铂[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [4] 宁远涛. 铂族金属高温固溶强化型合金[J]. 贵金属, 2009, 30(2): 51-56.
Ning Yuantao. High temperature solid solution strengthening alloys based on platinum group metals[J]. Precious Metals, 2009, 30(2): 51-56.
- [5] 熊易芬. 弥散强化铂的材料特性和应用研究[J]. 贵金属, 1993, 14(4): 63-69.
Xiong Yifen. Material properties of dispersion-strengthened platinum and its application[J]. Precious Metals, 1993, 14(4): 63-69.
- [6] 黎鼎鑫, 张永俐, 袁弘鸣. 贵金属材料学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991.
- [7] 宁远涛. 弥散强化型铂基高温合金[J]. 贵金属, 2010, 31(2): 60-66.
Ning Yuantao. A review on dispersion strengthened platinum and platinum alloys[J]. Precious Metals, 2010, 31(2): 60-66.
- [8] Desforges C D, Stanley R S, Wilson F G. The strengthening of platinum - the role of yttrium oxide[C]. Proceed Proceedings on the Production and Applications of Less Common Metals, Book 2, Hangzhou: The Metals Society and the Chinese Society of Metals, 1982: 45.
- [9] McGrath R B, Badcock G C. New dispersion strengthened platinum alloy[J]. Platinum Metal Rev, 1987, 31(1): 8-11.
- [10] Fischer B, Freund D, Behrends A, et al. Dispersion hardened platinum and platinum alloys for very high temperature applications[M]. Precious Metals, 1998: 333-346.

- [11] 熊易芬, 谢自能, 钱琳. 弥散强化铂材料的研究[J]. 贵金属, 1984, 5(2): 12-18.
- [12] 张吉明, 耿永红, 陈松, 等. 弥散强化铂基材料的研究现状[J]. 材料导报, 2009, 23(3): 58-62.
Zhang Jiming, Geng Yonghong, Chen Song, et al. Current research status of dispersion-strengthened platinum-based materials[J]. Materials Review, 2009, 23(3): 58-62.
- [13] 宁远涛. γ/γ' 沉淀强化型铂族金属高温超合金[J]. 贵金属, 2010, 31(1): 57-62.
Ning Yuantao. γ/γ' Precipitation strengthening platinum group metals superalloys for ultra-high temperature applications[J]. Precious Metals, 2010, 31(1): 57-62.
- [14] Yamabe-Mitarai Y, Ro Y, Maruko T, et al. Microstructure dependence of strength of Ir-base refractory superalloys [J]. Intermetallics, 1999, 7(1): 49-58.
- [15] Yu X H, Yamabe-Mitarai Y, Ro Y, et al. Design of quaternary Ir-Nb-Ni-Al refractory superalloys[J]. Metall Mater Trans A, 2000, 31(1): 173-178.
- [16] Huang C, Yamabe-Mitarai Y, Yu X H, et al. Partial phase relationships in Ir-Nb-Ni-Al and Ir-Nb-Pt-Al quaternary systems and mechanical properties of their alloys[J]. Metall Mater Trans A, 2005, 36(3): 539-545.
- [17] Hill P J, Adams N, et al. Platinum alloys based on Pt-Pt3Al for ultra-high temperature use[C]. Vancouver, Canada: 5th Int Conf Structural and Function Intermetallics, 2000.
- [18] Cornish L A, Suss R, Douglas A, et al. The Platinum development initiative: Platinum-based alloys for high temperature and special applications: part I[J]. Platinum Metals Review, 2009, 53(1): 2-10.
- [19] Cornish L A, Suss R, Chown L H, et al. The platinum development initiative: Platinum-based alloys for high temperature and special applications: part III[J]. Platinum Metals Rev, 2009, 53(3): 155-163.
- [20] Wenderoth M, Volkl R, Yokokawa T, et al. High temperature strength of Pt-base superalloys with different γ' volume fractions[J]. Scr Mater, 2006, 54(2): 275-279.
- [21] Cornish L A, Suss R, Watson A, et al. Building a thermodynamic database for platinum-based superalloys [J]. Platinum Metals Rev, 2007, 51(3): 104-115.
- [22] Wenderoth M, Volkl R, Vorberg S, et al. Microstructure, oxidation resistance and high-temperature strength of γ' hardened Pt-base alloys[J]. Intermetallics, 2007, 15(4): 539-549.
- [23] Rudnik Y, Volkl R, Vorberg S, et al. The effects of Ta additions on the phase compositions and high temperature properties of Pt base alloys[J]. Materials Science and Eng A, 2008, 479(1): 306-312.
- [24] Sha J B, Yamabe-Mitarai Y. Saturated solid-solution hardening behavior of Ir-Hf-Nb refractory superalloys for ultra-high temperature applications[J]. Scripta Materialia, 2006, 54(1): 115-119.
- [25] Sha J B, Yamabe-Mitarai Y. Ir-Nb-Si ternary refractory superalloys with a three-phase fcc/L1₂ silicide structure for high-temperature applications[J]. Intermetallics, 2007, 15(12): 1638-1649.
- [26] 闻明, 姜东慧, 陈志全, 等. 铂铝高温抗氧化涂层的制备及性能研究[J]. 贵金属, 2010, 31(3): 16-22.
Wen Ming, Jiang Donghui, Chen Zhiquan, et al. Study on preparation and properties of Pt-Al high temperature oxidation-resistant coatings[J]. Precious Metals, 2010, 31(3): 16-22.
- [27] Goto T, Vargas R, Hirai T. Preparation of iridium and platinum films by MOCVD and their properties[J]. Le Journal de Physique IV, 1993, 3(C3): 297- 304.
- [28] Goto T, Vargas J R, Hirai T. Preparation of iridium clusters by MOCVD and their electrochemical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 217: 223-226.
- [29] 胡昌义, 李靖华, 王云, 等. Ir 薄膜的化学气相沉积制备及 SEM 研究[J]. 有色金属, 2002, 54(7): 33-36.
Hu Changyi, Li Jinghua, Wang Yun, et al. Preparation and SEM investigation of chemical vapor deposition iridium film[J]. Nonferrous Metals, 2002, 54(7): 33-36.
- [30] 胡昌义, 陈松, 杨家明, 等. CVD法制备的Ir/Re涂层复合材料界面扩散研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(10): 796-796.
Hu Changyi, Chen Song, Yang Jiaming et al. Diffusion study in interface of iridium/rhenium composite prepared by CVD[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(10): 796-796.