

## 氧化物强化 PtRh 合金的研究进展

吴先月, 毕亚男, 陈松\*, 谢明, 胡洁琼, 王塞北, 王松  
(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)

**摘要:** 氧化物强化 PtRh 合金具有比纯铂更高的高温强度和高温持久强度, 广泛应用于玻纤漏板、光学玻璃生产用坩埚等领域, 并且是玻纤漏板材料发展的主要方向。简要介绍了测试铂基材料蠕变性能和润湿行为的主要设备, 主要介绍高温力学性能和焊接性能更优异的氧化物强化 PtRh 合金 Pt-10%Rh DPH-A, 并且总结了一些铂基材料研究中的第一性原理计算和器件模拟, 指出了铂基材料研究的新方向。

**关键词:** 金属材料; 漏板材料; 第一性原理计算; 进展

中图分类号: TG146.3<sup>+3</sup> 文献标识码 A 文章编号: 1004-0676(2018)S1-0085-07

### Progress in the Study of Oxide Strengthened PtRh Alloys

WU Xianyue, BI Yanan, CHEN Song\*, XIE Ming, HU Jieqiong, WANG Saibei, WANG Song  
(State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization,  
Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106)

**Abstract:** Oxide strengthened PtRh alloys have higher elevated temperature rupture strength than pure platinum. It is widely used in glass fiber bushing, the crucible for optical glass production other fields. And it is the main development direction of bushing material. The main equipment for testing creep properties and wetting behavior of platinum-based materials is briefly introduced. The new oxide strengthened PtRh alloy-Pt-10%Rh DPH-A, with better mechanical behavior under high temperature and welding properties is mainly introduced. The first principle calculation and device simulation in the research of platinum-based materials are summarized, and the new direction of the research of platinum-based materials is pointed out.

**Key words:** metallic materials; bushing material; the first principle calculation; progress

铂具有较高的熔点, 以及优良的化学稳定性, 对多种强酸、强碱、熔融氧化物、玻璃及硅酸盐熔体有良好的耐腐蚀性, 是理想的高温结构材料。由于在高温下、长时间使用条件下, 纯铂和铂合金的晶粒会出现严重的长大现象形成竹节状晶粒, 从而影响其高温强度和力学性能稳定性。为了克服这一缺点, 多年来许多学者进行了不懈的努力, 根据强

化机理的不同, 研制出了固溶强化型铂基材料、沉淀强化型铂基材料和弥散强化型铂基材料等多种系列材料。尤其是近年来 Heraeus 公司研制出的氧化物弥散强化型铂基材料在性能上得到了很大的提高。本文简要介绍铂基材料的发展及近年来研究的新成果, 以及计算模拟技术在研究中的应用和取得成果。

收稿日期: 2018-10-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0305700); 国家自然科学基金(51461023, 51767011, 51267007, U1602275, U1602271); 云南省重大科技项目(2018ZE020); 云南省自然科学基金(2015FA042, 2010CD126, 2012FB195); 新金属材料国家重点实验室开放基金(2016-Z08); 云南省技术创新人才项目(2015HB024); 云南省创新团队项目(2012HC027)。

第一作者: 吴先月, 女, 硕士研究生, 研究方向: 铂基高温材料。E-mail: wuxianyue12@163.com

\*通讯作者: 陈松, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 计算材料学。E-mail: cs@ipm.com.cn

## 1 铂基材料的发展

铂基材料由最初的纯铂发展到现在的氧化物弥散强化型铂基材料, 其中经历了数十年的研究和发 展。1966 年 Johnson Matthey 公司发明了以碳化物 TiC 作为弥散相弥散强化纯铂以及铂铑合金<sup>[1]</sup>, 到 20 世纪 70 年代至 80 年代, Johnson Matthey 公司陆 续推出了 ZGS Pt<sup>[3]</sup>(Zirconia Grain Stabilized Platinum, ZGS)、ZGSpt-10%Rh<sup>[5]</sup>、ZGSpt-5%Rh<sup>[6]</sup> 等强化铂材料。几乎同一时期美国 Engelhard 用粉

末冶金法制备出了 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 强化的 ODS Pt<sup>[7]</sup>(Oxide Dispersion Strengthening, ODS)ODSPt-10%Rh, ODS Pt-5%Au 等产品。昆明贵金属研究所也在 20 世纪 80 年代以后成功研制出了 ZrO<sub>2</sub> 强化铂和铂铑合金<sup>[8]</sup>。由于上述弥散强化铂材料在生产过程中存在一 些问题, 尤其是延展性不好, 导致焊接性能差, 2001 年德国 Heraeus 研制出了改善这些问题的钨钌复合 氧化物强化的 Pt-Rh DPH<sup>[9]</sup>(Dispersion Hardened Platinum or Platinum Alloys, DPH), 最近几年更是 推出了性能更好的 Pt-10%RhDPHs、Pt-10%Rh DPH-A。几种强化铂基材料的主要特征列于表 1。

表 1 氧化物强化铂基材料的商业牌号总结

Tab.1 Brief summary of the Commercially grades of platinum-based materials

Commercially Grade	Named company	Strengthening phase	Preparation method	Representative product
ZGS	Johnson Matthey	ZrO <sub>2</sub>	Spray forming	ZGS Pt, ZGS Pt-10%Rh
ODS	Engelhard	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Powder metallurgy	ODS Pt-10%Rh, ODS Pt-5%Au
DPH	Heraeus	ZrO <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Internal oxidation	Pt-10%Rh DPHs, Pt-10%Rh DPH-A

20 世纪 70 年代以后, 弥散强化铂基材料得到 了很大的发展, 包括英国的 Johnson Matthey 公司, 德国的 Heraeus、Schott Glass, 日本田中贵金属公 司, 美国 Owens-Corning Fiberglass Corporation、 Engelhard, 俄罗斯 Supermetals 等公司都对弥散强 化铂基材料的研究做了大量贡献。

目前, 国内从事氧化物强化 PtRh 材料这方面 研究的单位主要是: 昆明贵金属研究所<sup>[13]</sup>、武汉理 工大学<sup>[14]</sup>、西北有色金属研究院<sup>[15-16]</sup>、重庆国际复 合材料公司<sup>[17-18]</sup>、南京玻纤院<sup>[19]</sup>、无锡英特派公司<sup>[20]</sup>、重庆大学<sup>[21]</sup>等。上述单位用不同的制备方法得 到了性能不一的氧化物强化 PtRh 合金, 并从微观 组织、力学拉伸实验、焊接性能等方面对 PtRh 合 金进行了研究。

## 2 氧化物强化铂基材料的制备方法

对于同种氧化物强化的铂基材料, 不同公司采 用不同方法制备出来的材料的性能有很大的差别, 目前主要有如下几种制备方法。

### 2.1 内氧化法

内氧化法<sup>[9]</sup>是将含有少量活性合金组元(如 Zr、 Y、 Al 等)的粉状、丝装或片状的铂或铂合金材料在 600~1400℃氧化环境下进行 100~180 h 的氧化处 理。这样铂合金中的活性组元就会在原位被氧化形

成氧化物粒子均匀的分布在铂合金中, 从而达到强 化铂合金的作用。昆明贵金属研究所就采用该方法 配合大塑性变形复合叠轧法制备出了 ODSPt-5%Rh<sup>[13]</sup>和 ODSPt-10%Rh。国内内江至诚铂 业<sup>[22]</sup>也采用类似的制造工艺。国外主要是德国 Heraeus 公司<sup>[23]</sup>采用这种方法, 从文献数据分析来 看, 他们通过不同的内氧化元素含量和内氧化时间 来控制和优化材料的性能, 但具体工艺未详细报道。 目前该方法除了传统用于制备玻纤漏板制备用的板 材, 近年来也用于长寿命铂基热电偶的制造中。

### 2.2 粉末冶金法

粉末冶金法是将铂或铂合金与能形成氧化物的 合金元素(如 Zr、Y 等, 质量分数通常为 0.05%~0.5%) 熔炼成合金, 通过研磨或者雾化喷粉制备成细小的 颗粒或粉末。再将颗粒或粉末在氧化气氛下进行氧 化热处理, 使合金粉末或颗粒内的合金元素充分氧 化, 从而得到含有氧化物的铂或铂合金。最后压制、 烧结、锻造紧实合金, 得到氧化物弥散强化的铂基 材料。重庆国际复合材料有限公司的杨宗伦<sup>[17]</sup>利用 特种粉末冶金法制备 Pt-Rh-Zr 三元合金粉末, 并对 制备的 Pt-Rh-Zr 三元合金粉末进行烧结-内氧化处 理, 再通过压制和热锻工艺制成弥散强化材料。据 国外报道, 日本田中贵金属和俄罗斯超级金属公司 主要采用这种方法制备氧化物强化铂基材料。该类 方法的主要优点是便于大规模加工生产。

### 2.3 化学共沉淀法

化学共沉淀法简单来说就是让锆和铂同时沉淀, 从而使锆在铂基体上均匀分布。具体是将粒度为  $0.05\sim 10\ \mu\text{m}$  的铂粉倒入水中, 加入硝酸锆和尿素调制悬浮溶液, 通过调节溶液的 PH 值, 使氢氧化锆附着在铂粉上同时沉淀。接着将沉淀物过滤、干燥、压制烧结成锭, 最后加工成片或丝。在这一过程中氢氧化锆会受热分解产生  $\text{ZrO}_2$  均匀分散在铂基体中, 从而起到弥散强化的作用。

化学共沉淀法在制备合金锭的工序与粉末冶金法是一样的, 整个过程中唯一与粉末冶金法不同的地方就在于化学共沉淀法制备混合粉末是通过化学反应来实现的, 而粉末冶金法是通过机械混合的方法来实现的。这也是化学共沉淀法优于粉末冶金法的地方。因为化学共沉淀法可以是活性合金组元(如 Zr、Y 等)非常均匀的分布在铂粉表面, 这是机械混合无法做到的。目前该方法在国内主要是西北有色金属研究院和日本田中贵金属公司<sup>[24]</sup>在研究。目前研制出来的产品有 ZGS Pt、ZGS Pt-5%Rh、ZGS Pt-10%Rh、ZGS Pt-5%Au、ZGS Pt-10%Rh-5%Au 等。该类方法主要存在的问题是由于制备过程中加入了大量的盐溶液和有机溶剂, 所以制备出的材料中有一定的残余, 这会影响材料的制备过程和高温使用性能。

### 2.4 喷射成形法

喷射成形法结合了内氧化法和粉末冶金法这两种方法。首先将含有活性合金元素(如 Zr、Y 等)的铂合金熔融, 在氧化环境下雾化喷粉, 在这一过程中每一滴熔体里的合金元素都会被充分氧化。最后可以直接喷射成锭或者将粉末收集起来通过粉末冶金烧结成锭。该方法最早是由 Johnson Matthey 公司提出的<sup>[25]</sup>。该方法用于制备涂层比较好, 但由于制备过程中存在铂合金的蒸发和飞溅, 所以材料的损耗较大, 一般必须在密闭空间中进行, 所以目前该方法主要用于涂层制备方面。

## 3 铂基材料性能的主要测试方法和特殊设备

### 3.1 蠕变性能测试设备

铂族金属及其合金是长期在高温、强腐蚀、氧化环境和高的机械载荷等工作条件下必不可少的结构材料, 所以该类材料的高温力学性能, 如拉伸性能、应力断裂强度、蠕变性能、应力松弛等是主要

的性能指标。目前, 对于铂基材料的高温力学性能(蠕变、应力松弛等)没有相应的国家标准, 这主要是由于铂基材料的密度大于普通金属, 且价格比一般金属贵一千到十万倍不等, 所以从制备和加工成本看一般的材料实验标准中规定的尺寸是基本不可能实现的。基于现实情况和大量实验, 对于铂族金属一般均采用直径或厚度  $1\ \text{mm}$  以下的丝材或薄片材进行测试, 而且高温测试中对于铂基材料一般不需要保护气氛。针对铂基材料的这些特点, 国内外研究者研发了一些专门的测试设备或装置。

国外比较有代表性的是耶拿应用科技大学研制的高温力学性质测试设备(图 1)。此设备通过直流电加热样品升温, 采用光学红外测温仪测温, 通过计算机自动控温, 可在大气或保护性气体气氛下工作, 且该设备的工作温度可达  $3000\ ^\circ\text{C}$ 。数据测量通过高分辨率相机和软件 SuperCreep 来测定蠕变曲线。样品的尺寸为  $120\times 4\times 0.8\ \text{mm}$  的薄片。

国内的昆明贵金属研究所采用自主研发的高温蠕变测量仪器。该高温蠕变测量仪器由硅钼棒加热装置、自动温控系统、位移数据采集和记录装置组成, 实验数据需要采用专门软件处理才能得到蠕变速率曲线。样品为直径  $1\ \text{mm}$  以下的丝材。

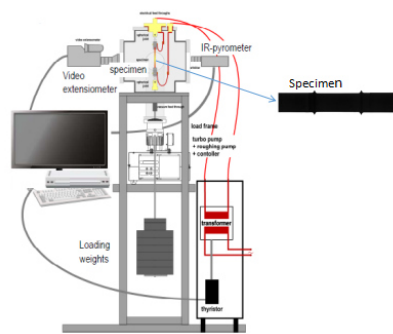


图 1 蠕变性能测试设备<sup>[27]</sup>

Fig.1 Equipment for creep tests<sup>[27]</sup>

### 3.2 玻璃熔体对漏板材料的润湿行为测试

由于 PtRh 合金在光学玻璃和玻璃纤维的生产过程中大量使用。特别是玻纤生产必须的漏板基本整体都用 PtRh 合金制造。研究表明玻璃熔体对漏板材料的润湿行为将影响玻纤制造工艺和漏板上漏嘴的密度。因此需要测试不同玻璃熔体在漏板的工作温度下对漏板的润湿行为, 即测量润湿角。图 2 为 Scheckenbach 等<sup>[28]</sup>制造的润湿角测量设备, 通过该设备研究了铂铑合金中铑含量和氧化物含量对玻

璃熔体润湿行为的影响。该设备具有一个高温炉，工作温度可达 1700℃。图 3 为用此设备拍摄的图像，每个样品在一个温度下测得的值至少得由 5 幅图像得到。他们的研究表明，接触角随着材料中铑含量的增加而增加，而氧化物对接触角没有影响。



图 2 接触角测量设备<sup>[28]</sup>

Fig.2 Contact angle measurement device with high temperature furnace<sup>[28]</sup>

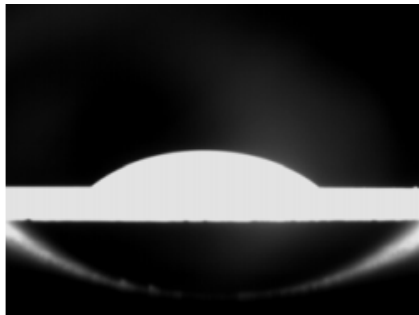


图 3 1250℃时滴落在 Pt-10%Rh DPH 上的 HT 玻璃熔体<sup>[28]</sup>  
Fig.3 Drop of HT-glass melt on Pt-10%Rh DPH at 1250℃<sup>[28]</sup>

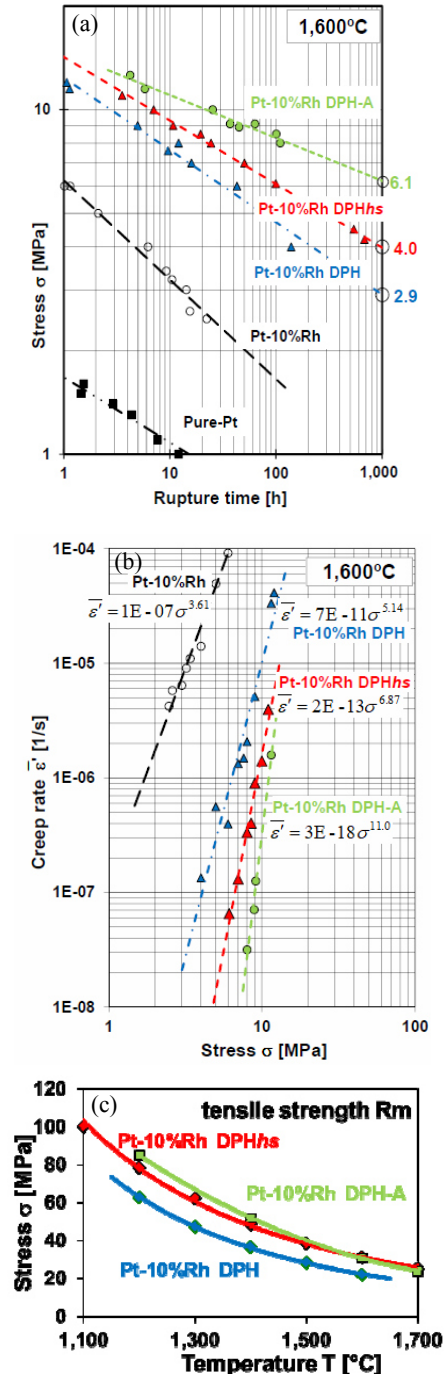
#### 4 铂基材料近年来的新发展

铂基材料的发展趋势是在保证材料性能的前提下，通过各种强化方法不断提高材料的高温力学(如抗蠕变、持久强度等)性能。近年来材料的新发展是实验与计算相结合，计算为实验节省时间与成本，再用实验验证计算结果。

##### 4.1 新型铂基材料

Heraeus<sup>[27]</sup>公司于 2012 年研制出来的 Pt-10%Rh DPH-A，在高达 1700℃ 的温度下仍具有很高的蠕变强度并且具有很好的焊接性能，是目前最新、综合性能最好的 Pt-Rh 合金。Heraeus 公司对 Pt-10%Rh DPH-A 合金的高温蠕变性能和焊接性能做了研究。1600℃ 下对比 5 种材料(纯铂、Pt-10%Rh、Pt-10%Rh DPH、Pt-10%Rh DPHhs 和 Pt-10%Rh DPH-A)的应

力断裂强度，如图 4 所示。图 4(a)表明 Pt-10%Rh DPH-A 具有更高的持久强度；图 4(b)表明 Pt-10%Rh DPH-A 的蠕变速率最小；图 4(c)表明高温下 Pt-10%Rh DPH-A 的抗拉强度最好。



(a). 应力-断裂时间曲线; (b). Norton 曲线图; (c). 高温拉伸曲线

图 4 PtRh 合金的高温力学性能<sup>[27]</sup>

Fig.4 High temperature mechanical properties of PtRh alloys<sup>[27]</sup>

图 5 为焊接前后的强度对比。由图 5 可见 Pt-10%Rh DPH-A 焊接后的强度不仅优于焊接后的 Pt-10%Rh DPH, 而且优于未焊接的 Pt-10%Rh DPH。由此可以得出, Pt-10%Rh DPH-A 在一定的温度范围内具有更加优越的高温力学性能和焊接性能。

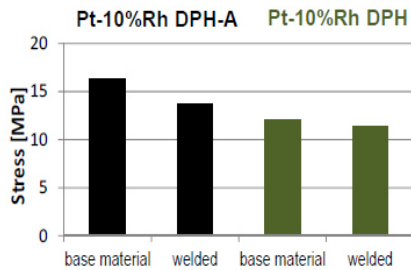


图 5 焊接前后的强度对比<sup>[27]</sup>

Fig.5 The strength of the two materials before and after welding<sup>[27]</sup>

不同部件需要不同性质的材料, 德国 Heraeus 公司生产的 Pt-10%Rh DPH-A 不仅具有很好的强度还具备很好的延展性和焊接性能, 并且具有较高的扭转刚度, 所以常被用于玻璃生产中玻璃熔体的供料系统里, 同时也用于可以调节的玻璃熔体的搅拌器和调节剂量的柱塞上。

#### 4.2 铂基材料的计算与模拟

1950 年代开始, 随着计算机技术的硬件和软件条件的快速发展, 出现了计算材料学这一交叉学科。相较于贱金属, 贵金属储量少价格昂贵, 导致实验成本高。而计算材料学的出现解决了这一问题, 计算材料学能有效地对材料进行优化和设计。国内外近 20 年来, 已经将计算材料学方法在贵金属研究中大量使用起来, 特别在铂基材料的研发中也进行了一定的研究。对于铂基材料, 国内外研究者采用计算材料学中的第一性原理方法、分子动力学、有限元分析等方法, 全面研究了铂基材料和器件的相结构、相界面、力学、热学、服役性能和特征。

国内从事铂基材料相关的计算与模拟的单位主要是昆明贵金属研究所。昆明贵金属研究所基于密度泛函理论的第一性原理计算, 对铂基材料进行了深入的研究。其中潘勇等人<sup>[29]</sup>采用密度泛函理论的平面波赝势法, 分别研究在  $ZrO_2(100)$  面上以氧为键桥和以铂为键桥的  $Pt(100)/ZrO_2(100)$  界面模型的结合能、电子结构以及等电荷差分密度分布图, 理清了弥散强化铂材料内氧化的基本过程和机理。陈松等人<sup>[30]</sup>采用密度泛函理论和虚晶近似方法对铂铑

合金系的结构和力学性能进行了计算, 算出了铂铑系列合金的晶格常数、弹性系数、体积模量、剪切模量和泊松比等, 综合分析计算结果得到铑含量低于 40% 的铂铑合金可以进行大变形量冷加工, 与实际应用一致。王塞北等人<sup>[31]</sup>计算了 Pt-Ir-M(Y, Zr, Mo) 合金中可能存在的各种合金相, 讨论了合金相的稳定性。胡洁琼等人<sup>[32]</sup>研究了 Pt-M(M=Fe, Co, Ni) 各金属间化合物和  $Au_{1-x}Pt_xSn_2(x=0, 0.125, 0.25, 0.05, 0.75, 0.875, 1)$  体系的相结构、能量、电子结构和弹性性质, 根据计算结果得到了稳定的合金相。

昆明贵金属研究所从微观到宏观应用, 对氧化物弥散强化铂铑合金进行了研究。Pt-Rh 材料常被用于玻纤工业中的漏板制造。由于漏板材料在高温下的机械载荷的特定类型和缺乏适当的力学性能数据, 有关于这类材料的有限元模拟的研究很少。昆明贵金属研究所的陈松等人<sup>[34]</sup>首次利用有限元软件模拟了铂铑合金制备而成的玻纤漏板(如图 6 所示)的实际使用性能和设计优化问题。陈松等人对漏板上的电场、温度场等多物理场进行了计算, 在综合分析计算结果的基础上, 了解影响漏板使用寿命的主要因素的变化特点并通过调整漏板设计、加工过程和材料, 对漏板的设计进行可优化, 为漏板设计与制造提供了理论指导。

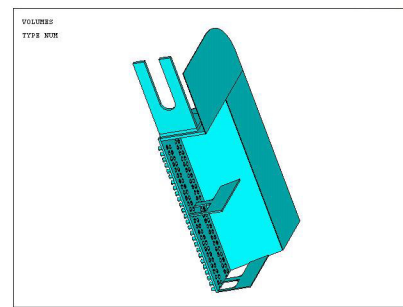


图 6 漏板的 3D 模型<sup>[34]</sup>

Fig.6 The three-dimensional bushing model for calculation

国内多所高校对铂基材料的第一性原理计算做了研究。昆明理工大学夏璐<sup>[35]</sup>利用密度泛函理论、虚晶近似方法和陈氏晶格反演方法构建了铂铑合金系中 16 种材料的反演对势, 并利用构建的势函数分别以这 16 种材料为基体, 进行了  $ZrO_2$  颗粒与基体界面原子作用的分子动力学模拟研究。清华大学白雪等人<sup>[36]</sup>计算了 118 种不同结构的 Pt-Zr 中间化合物的相关物理性能, 并发现生成焓和体模量与原子体积呈现线性关系, 为未来的热力学计算和原子

尺度模拟提供基础数据。燕山大学赵研<sup>[37]</sup>基于密度泛函理论的第一性原理计算,详细研究了 Pt 和 Pt-M (M=Al, Si, Ge, Sn)的力学性质和电子结构性质。

Ahmed 等<sup>[38]</sup>利用从头算密度泛函理论计算了 Pt, Pd, Rh, Ir, Os 和 PtPdX(X= Ir, Os, Rh)合金的结构、电子和热力学性能。为研究合金化过程中电子的行为,他们计算了这些材料的电子能带结构和态密度,并且利用第一性原理密度泛函微扰理论计算了这些材料的德拜温度、振动能、熵和定容比热。

由于贵金属价格昂贵,实验成本和使用成本高。利用软件计算模拟,能够减少实验用料,提高材料使用寿命,有效降低实验成本和使用成本。

## 5 总结和展望

铂基高温材料从最初的纯铂,发展到 Pt-Rh、Pt-Ir 等铂合金,到 20 世纪 70 年代出现单相 ZrO<sub>2</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等氧化物强化铂材料 ZGS PtRh、ODS PtRh 等,再到 2001 年推出钨钼复合强化 DPH Pt、DPH PtRh,最近又研发最新产品 Pt-10%Rh DPH-A。纵观整个发展过程,可以看出铂基高温材料发展的主要思想是通过不同的复合材料的强化机制或设计优化手段,不断提高该类材料的高温强度和高温使用性能。

随着美国于 2011 年 6 月发布“材料基因组计划”,引起各国对材料高通量计算和高通量实验技术的进一步重视,该技术可以有效的弥补金属材料稀少、实验成本较高、研究效率低等缺点,相信随着材料基因组计划科技的在贵金属领域中的应用,必将推动铂基高温材料领域的研发和应用。

### 参考文献:

- [1] BOURNE A A, CHASTON J C, DARLING A S. Treatment of metals or alloys: US, 3547712[P].1970-12-15.
- [2] DARLING A S, SELMAN G L, BOURNE A A. Dispersion strengthened platinum-improved high temperature creep properties[J]. Platinum metals review, 1968, 12(1): 7-13.
- [3] JOHNSON, MATTHEY CO., LIMITED. Dispersion strengthening of platinum group metals and alloys: US,3709667[P]. 1973-01-09.
- [4] SELMAN G L, DAY J G, BOURNE A A. Dispersion strengthened platinum: properties and characteristics of a new high temperature material[J]. Platinum metals review, 1974, 18(2): 46-57.
- [5] SELMAN G L, BOURNE AA. Dispersion-strengthened rhodium-platinum[J]. Platinum metals review, 1976.
- [6] MCGRATH R B, BADCOCK G C. New dispersion strengthened platinum alloy[J]. Platinum metals review, 1987, 31(1):8-11.
- [7] STANLEY R G, WILSEN F G. ODS platinum a unique high temperature material for the most demanding application[J]. Metal powder report, 1982, 37 (4): 175-178.
- [8] 熊易芬, 谢自能, 钱琳. 弥散强化铂材料的研究[J]. 贵金属, 1984(2): 14-20.
- [9] FISCHER B, FREUND D, BRÖMEL T, et al. Practical experience with new oxide dispersion hardened platinum materials[C]. 25th international precious metals conference, Tucson, Arizona, USA: IPMI, 2001.
- [10] FISCHER B, VORBERG S, LUPTON D F. Pt-5%Rh DPH-an ODS platinum material with excellent properties for high temperature application[C]. 31st international precious metals conference, Miami: IPMI, 2007.
- [11] CORNISH L A, FISCHER B, VÖLKL R. Development of platinum-group-metal superalloys for high-temperature use[J]. Mrs bulletin, 2003, 28(9): 632-638.
- [12] TEICHMANN K, LIEBSCHER C H, VÖLKL R, et al. High temperature strengthening mechanisms in the alloy platinum-5% rhodium DPH[J]. Platinum metals review, 2011, 55(4): 217-224.
- [13] ZHANG JIMING, GENG YONGHONG, CHEN SONG, et al. The high temperature creep behavior of dispersion strengthened Pt<sub>3</sub>Rh composite[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(10): 1713-1717.
- [14] ZHANG QIAOXIN, ZHANG DONGMING, JIA SHICHONG. Microstructure and properties of some dispersion strengthened platinum alloys-The influence of yttrium and zirconium additions[J]. Platinum metals review, 1995, 39(4): 167-171.
- [15] 徐颖, 蒋丽娟, 李贺军. 纳米氧化锆对铂性能的影响[J]. 贵金属, 2003, 24(3): 7-11.
- [16] 徐颖, 杜桂英, 李明利,等. 纳米氧化锆/铂复合材料的微观组织和力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(10): 1080-1083.
- [17] 杨宗伦, 刘伟廷, 孙建林. 弥散强化 Pt-3Rh 合金的微观组织结构研究[J]. 贵金属, 2010, 31(2): 32-36.
- [18] 杨宗伦, 刘伟廷, 孙建林. 氧化物弥散强化 Pt/Pt-Rh 合金机理研究[J]. 玻璃纤维, 2009, 5: 1-4.
- [19] 李小甫. 铂材料的强化及其应用[J]. 有色金属, 2004,

- 56(3): 22-25.
- [20] 无锡英特派金属制品有限公司. 制作弥散强化铂铑合金板材的方法: 中国, CN201210385280[P]. 2014-03-19.
- [21] 胡发平. 氧化物颗粒增强 Pt-20Rh 合金焊接组织与力学性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [22] 内江至诚铂业科技有限公司. 一种铂铑合金漏板底板材料制备方法: 中国, CN105256167[P]. 2017-05-17.
- [23] HERAEUS GERMANY GMBH CO. KG. Method for processing a dispersion-hardened platinum composition: Germany, WO2015082630[P], 2015-06.
- [24] TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. Process for producing oxide-dispersion strengthened platinum material: US, US6841121[P], 2005-01-11.
- [25] JOHNSON, MATTHEY CO., LIMITED. Method of making a dispersion strengthened metal: US, 3696502[P]. 1972-10-10.
- [26] JOHNSON, MATTHEY CO., LIMITED. Dispersion strengthening of platinum group metals and alloys: US, 3709667[P]. 1973-01-09.
- [27] B. FISCHER, U. JANTSCH, M. KOCH. Oxide dispersion hardened platinum alloys with improved strength at high temperatures[C]. 36th international precious metals conference, Las Vegas, USA: IPMI, 2012.
- [28] MERKER J, SCHECKENBACH C, FISCHER B, et al. Influence of high melting glasses on selected properties of PtRh-alloys for application in glass fiber bushings[J]. Materials science forum, 2010, 638-642: 2097-2102.
- [29] 潘勇, 管伟明, 陈松, 等. Pt(100)/ZrO<sub>2</sub>(100)界面性质的第一性原理[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(1): 80-84.
- [30] 陈松, 陆建生, 谢明, 等. 铂铑合金系基本力学性能的第一性原理研究[J]. 稀有金属, 2015, 39(3): 276-282.
- [31] 王塞北, 谢明, 陈永泰, 等. Pt-Ir-M(Y,Zr,Mo)系相结构形成热力学的计算研究[J]. 贵金属, 2013(s1): 56-60.
- [32] 胡洁琼, 谢明, 陈永泰, 等. Pt-M(M=Fe, Co, Ni)金属间化合物电子结构和弹性性质的第一性原理研究[J]. 材料导报, 2018(14).
- [33] 胡洁琼, 谢明, 陈永泰, 等. Au<sub>(1-x)</sub>Pt<sub>x</sub>Sn<sub>2</sub> (x=0, 0.125, 0.25, 0.50, 0.75, 0.875, 1)体系相结构稳定性、电子结构与弹性性质的第一性原理研究[J]. 功能材料, 2018, 49(5).
- [34] 陈松, 陆建生, 管伟明, 等. 玻纤工业中铂基漏板的设计和优化方法的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(3): 55-59.
- [35] 夏璐. PtRh 合金系晶格反演势的构建及应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [36] BAI XUE, LI JIAHAO, DAI YE, et al. Linear correlations of formation enthalpies/bulk modules and atomic volumes observed in Pt-Zr compounds by ab initio calculation[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2013, 23(12): 3704-3713.
- [37] 赵研. Pt-M 化合物力学性质及电子结构的第一性原理研究[D]. 燕山大学, 2016.
- [38] SHABBIR AHMED, MUHAMMAD ZAFAR, M SHAKIL, et al. Density functional theory study of structural, electronic, and thermal properties of Pt, Pd, Rh, Ir, Os and PtPdX (X= Ir, Os, and Rh) alloys[J]. Chin phys B, 2016, 25(3): 036501.