

高温强化铂合金研究进展

贾志华, 郑 晶, 王 轶, 操齐高
(西北有色金属研究院, 西安 710016)

摘 要: 高温强化铂合金是一种先进的高温结构贵金属材料, 论述了固溶强化、弥散强化和沉淀强化等铂合金强化方法及特点, 力学性能和强化机理, 介绍了高温强化铂合金的研究进展和主要应用情况, 最后展望了高温强化铂合金的研究方向。

关键词: 铂合金; 固溶强化; 弥散强化; 沉淀强化

中图分类号: TG146.3⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2017)S1-0038-07

Pt-based Alloys for High Temperature Application

JIA Zhihua, ZHANG Jing, WANG Yi, CAO Qigao
(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Strengthened Pt-based materials are advanced type of structural and high-temperature precious metal materials. Platinum material strengthening methods e.g. solid solution strengthening, dispersion strengthening, precipitation strengthening and the main features of high temperature alloys are reviewed, and mechanical properties and strengthening mechanism of strengthened Pt-based materials are introduced. The research progress and usages of the major typical strengthened Pt-based super alloys are described. Finally the research directions of Pt-based superalloys are prospected.

Key words: Pt-based alloys; solid solution strengthening; dispersion strengthening; precipitation strengthening

铂为面心立方结构, 具有优越的延展性和高的抗腐蚀, 抗氧化性, 可以经受高温和剧烈复杂环境的考验。然而纯铂在高温下晶粒严重长大, 高温强度和抗蠕变性能下降, 不能在高温应力条件下长期使用, 因此必须对纯铂进行强化^[1-3]。

多年来, 国内外研究人员对铂的强化理论和强化机制进行了长期研究, 并开发出多种系列的铂基高温合金, 使其性能得到大幅度提升^[4-6]。成为特殊应用环境中不可缺少的高温结构材料。如玻璃行业使用的坩埚与器皿材料, 航空发动机喷管与涂层材料, 核燃料包封材料, 以及电阻加热材料等。铂合金材料品种繁多, 按合金结构类型来分, 可以分为固溶强化型, 沉淀强化型, 弥散强化型和金属间化合物等^[7-9]。本文分类讨论了不同强化类型的 Pt 基

高温合金发展和应用情况, 并总结分析了铂基高温合金的发展方向。

1 固溶强化型高温铂合金

固溶强化, 或称合金强化, 就是以铂为基体, 掺入其它金属, 以提高铂的性能。影响铂基固溶体合金强度性质的主要因素很多, 包括合金元素的性质(如熔点、弹性模量与弹性系数, 与基体元素的原子半径等)及其化学均匀性和化学稳定性、杂质含量及其分布、结构状态及微观缺陷的特征(如位错分布和密度、堆垛层错能)等。在铂的合金元素中, Ir、Ru、Re、Ni 等属于高固溶强化元素, Rh、Pd 的固溶强化效应相对较低, 表 1 给出了 Pt 的主要固溶强

化元素的相关性能^[7]。

表 1 Pt 的主要固溶强化元素的相关性能^[7]

Tab.1 Main solid solution strengthening elements and their characteristics for platinum

元素	熔点/℃	密度/(g/cm ³)	评价
Ir	2447	22.5	高熔点、高密度、高强度化效应；>1196℃形成挥发性氧化物，但抗氧化性优于 Ru。
Ni	1455	8.9	类似与 Pt 的电子结构，高固溶强化效应；在氧化气氛中形成 NiO 膜，并于高温挥发。
Pd	1555	12.0	低熔点、低密度、低固溶强化效应；高蒸发速率，并形成挥发性氧化物。
Re	3190	21.0	高熔点、高密度；1000℃以上形成挥发性氧化物；能改善 Ni 基高温合金热腐蚀性能。
Rh	1966	12.4	高温氧化物与挥发特性与 Pt 相近，高 Rh 合金出现晶间氧化，但可通过合金化控制。
Ru	2250	12.2	六方晶格，高固溶强化效应；1100℃以上形成挥发性氧化物导致晶界脆化。

目前研究最多的铂基固溶体合金有 Pt-Rh、Pt-Ir、Pt-Ru、Pt-Ni、Pt-W 等二元合金，以及 Pt-Pd-Rh、Pt-Rh-Ru 等三元合金^[10]。虽然 Rh 对 Pt 的常温固溶强化效应不是很高，但 Rh 的高温强化作用是最稳定的，仍是高温结构材料的首选。工业上，如 Pt-7Rh、Pt-10Rh、Pt-20-Rh、Pt-30Rh、Pt-40Rh 合金多应用于 1500℃以下高温氧化环境中，表 2 给出了 Pt 与 Pt-Rh 合金的性能对比。

表 2 Pt 与常用 Pt-Rh 合金的高温力学性能对比^[7]

Tab. 2 The mechanical properties of Pt and Pt-Rh alloys at high temperature

性质		Pt	Pt-7Rh	Pt-10Rh	Pt-20Rh	Pt-30Rh	Pt-40Rh
硬度/Hv	20℃	50	75	90	110	125	130
	20℃	147	270	310	480	540	565
抗拉强度/ (MPa)	1200℃	34	43	59	99	110	130
	1400℃	<4	-	36	54	-	78
	1300℃/100 h	-	-	5.8	7.5	8.2	8.5
持久强度/ (MPa)	1400℃/100 h	1.5	3.0	3.6	6.5	-	7.0
	1400℃/10 h	2.0	5.0	6.0	12	-	-
	1600℃/10 h	~1	~2	~3	~5	~6	-
蠕变速率/ 真应变%/h	(1400℃/5 MPa)	-	0.6	0.40	0.10	-	0.006
	(1600℃/5 MPa)	-	-	-	0.83	0.23	0.10
蠕变寿命/h	(1400℃/5 MPa)	-	50	100	280	-	400
	(1600℃/5 MPa)	-	-	-	36	41	53

为了进一步改善 Pt-Rh 合金的高温性能，可添加微量 Zr、Hf、Ir、Ru、Au 或稀土等元素对其进一步强化，如在 Pt 合金中添加微量 Zr、Hf 可细化合金晶粒，升高再结晶温度；加入 Au、Ir、Ru、Mo 可以提高合金的高温持久强度；加入部分含量的 Pd 取代 Pt 降低成本，例如 Pt-3.5Rh-4Pd、Pt-3.5Rh-(2~15)Pd、Pt-3.5Rh-4Pd、Pt-25Pd-10Rh-Ir(Ru)、Pt-35Pd-13Rh-Ir(Ru)、Pt-3.5Rh-15Pd-0.1Ce 等^[11]。Pt-Ir 合金的高温稳定性虽不及 Pt-Rh 合金，但其高温持久强度、蠕变寿命和蠕变速率均优于 Pt-Rh 合金，可以在中性和还原性气氛中采用。

2 弥散强化型高温铂合金

铂铑合金虽然高温性质优良，但在光学玻璃行业中，铑易使玻璃染上黄色，因此，铂-铑合金已不能满足光学玻璃和玻璃纤维生产的要求。对于这些应用，最好选择使用弥散强化铂，弥散强化铂基于间接强化，这种强化起源于在氧化物颗粒参与下形成的亚结构和晶粒结构^[12]。可用添加氧化物的数量来控制强化的程度。根据弥散强化合金理论，弥散强化合金中的第二相至少必须具备两个条件：其一

是第二相粒子应细小(如粒径 $< 1\ \mu\text{m}$)并均匀分布(如粒子间距 $r < 10\ \mu\text{m}$); 其二是第二相应具有高的稳定性, 既要求具有高的分解温度, 同时要求元素在基体中的溶解度和扩散速率要低。自上世纪 70 年代以来, 国外一些研究机构和相关企业通过在 Pt、Pt-Rh、Pt-Au、Pt-Ir 等合金基体中添加 Zr、Y、Al、Ti、Ca、Hf 等元素的氧化物, 开发了一系列弥散强化铂材料^[13-15]。这些铂材料不含 Rh 或 Rh 含量很低, 但其高温力学性能普遍高于同成分的铂基合金。多年来弥散强化铂基合金得到不断的研究和发展。弥散强化相可以是碳化物、氧化物和金属间化合物。制备弥散强化铂和铂基合金的主要方法有喷射内氧化法、共沉淀法、热机械法和粉末冶金法等。

1) 碳化物弥散强化铂基材料

英国 Johnson Matthey 公司于 20 世纪 60 年代采用粉末冶金技术, 通过添加含量为 0.04%~0.08% 的细小的 TiC 粒子, 研制出了以 TiC 为弥散强化相增强的 Pt 和 Pt-Rh 合金材料^[16]。该合金材料不仅具有稳定的高温组织和很高的高温强度, 而且同时还保持了 Pt 和 Pt-Rh 合金良好的延展性、加工性能及电学性能。

2) 氧化物弥散强化铂与铂合金

氧化物弥散强化合金的历史可追溯到 1918 年发明的 ThO₂ 弥散强化钨丝。20 世纪 40 年代以后, 氧化物弥散强化技术逐渐引入到 Pt 和 Pt 合金中, 至今已获得很大的发展。目前, 获得广泛应用的弥散强化铂和铂基合金主要有三类, 即 ZGS-Pt(Pt-Rh)、ODS-Pt(Pt-Rh)和 DPH-Pt(Pt-Rh)。

70 年代, 英国 Johnson Matthey 公司开发了以 0.06%~0.3% (质量分数) ZrO₂ 颗粒稳定化的 Pt, 简称 ZGS-Pt^[17]; 随后又发展了一系列的 ZGS-Pt-Rh 合金(如 ZGS-Pt-5Rh、ZGS-Pt-10Rh 等)、ZGS-Pt-Au 合金和 ZGS-Pt-Rh-Au 合金(如 ZGS-Pt-7Rh-3Au、ZGS-Pt-10Rh-5Au 等)。昆明贵金属研究所也在这一时期研制成功以 ZrO₂ 颗粒稳定化的 Pt 和 Pt-Rh 合金, 取名 ZMQ-Pt 合金^[18]。80 年代, 美国恩格哈德公司开发了以 Y₂O₃ 颗粒弥散强化的 Pt 合金, 简称 ODS-Pt^[19]。90 年代, 德国的海勒依斯公司开发了含有适量 Zr、Y 和微量 Ca、Al、Mg 元素的合金, 经氧化处理后发展为以多种氧化物颗粒弥散硬化的 Pt 合金, 简称 DPH-Pt 或 DPH-Pt 合金(如 DPH-Pt-10Rh、DPH-Pt-5Au 等)^[20]。

此外, 国内外对 Pt-RE 和 Pt-Rh-RE(RE 为稀土元素)合金也进行了研究。RE 与 Pt、Rh、O 形成多种形式的金属间化合物及氧化物, 这些金属间化合物和氧化物颗粒弥散分布于 Pt 基体的晶内和晶界, 对 Pt 或 Pt-Rh 基提具有明显的组织细化及强化作用。稀土元素可以单独添加或两种稀土元素复合添加, 添加量一般控制在 0.1%~0.5% (质量分数) 范围内。在所添加的 10 种稀土元素中, 以添加 La 和 Ce 的综合效果最好^[22]。

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的铂或铂合金。表 3、表 4 和图 1 给出了 ZGS、ODS、DPH 强化铂材料与传统的铂及铂合金材料在常温 and 高温下的力学性能对比。

表 3 TiC 和氧化物弥散强化 Pt 和 Pt-10Rh 合金的室温常规性能^[23]

Tab.3 Conventional properties of TiC and dispersion strengthened Pt and Pt-10Rh alloys at room temperature

性能	密度/ (g/cm ³)	电阻率/ ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	电阻温度系数 (0~100℃)/(℃ ⁻¹)	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	硬度	延伸率/%
熔炼 Pt	21.45	10.6	0.0039	155	125	40	40
TiC 弥散强化 Pt	21.29	12.0	0.0036	-	215	-	35
ZGS-Pt(Pt+ZrO ₂)	21.38	11.12	0.0031	160	185	60	42
ODS-Pt(Pt+Y ₂ O ₃)	21.28	10.8	0.0039	-	200	55	40
熔炼 Pt-10Rh	20.00	18.4	0.0017	189	330	75	35
TiC 强化 Pt-10Rh	19.86	21.22	0.0016	-	350	-	30
ZGS-Pt-5Rh	20.60	-	-	-	290	95	30
ZGS-Pt-10Rh	19.80	21.2	0.0016	196	355	100	30

表 4 弥散强化 Pt 与 Pt 合金的高温力学性能^[23]

Tab.4 High temperature properties of the dispersion strengthened Pt and Pt-based alloys

性质		Pt	ZGS-Pt	Pt-10Rh	ZGS-Pt-10Rh
抗拉强度/MPa	1200℃	34	38	59	-
	1400℃	<4	29	36	-
持久强度 1400℃/MPa	$t=10$ h	2.2	20	8	30
	$t=100$ h	1.5	9	3.6	14
蠕变速率真应变% (应力 17.23 MPa)/h	1200℃	-	2.7×10^{-5}	-	-
	1300℃	-	5.7×10^{-4}	-	-
	1400℃	-	2.7×10^{-2}	0.4(1400℃/5 MPa)	-

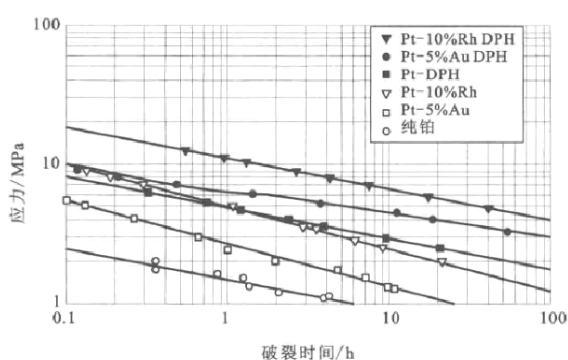


图 1 DPH 强化 Pt 合金和传统 Pt 合金的高温力学性能(1600℃)

Fig.1 Comparison of high temperature properties of the DPH-Pt and normal Pt-based alloys(at 1600℃)^[24]

可以看出弥散强化铂的优越性并不在于改善 Pt 和 Pt 合金的室温和高温瞬时强度性质,而在于改善 Pt 和 Pt 合金的高温持久强度性能和抗蠕变能力,在相同的温度和应力负载条件下,弥散强化 Pt 或 Pt-Rh 合金比传统纯 Pt 或 Pt-Rh 合金有更长的蠕变寿命,而在相同致断时间(或温度)条件下,弥散强化 Pt 或 Pt-Rh 合金有更高的持久强度;弥散强化 Pt 或 Pt-Rh 合金的应力—断裂曲线不仅远高于相应纯 Pt 和 Pt-Rh 合金,而且高于 Pt-40Rh 合金;在相同的应力负载条件下,弥散强化 Pt 或 Pt-Rh 合金比传统纯 Pt 或 Pt-Rh 合金有更低的蠕变速率,或在相同蠕变速率时弥散强化 Pt 或 Pt-Rh 合金能承受更高的应力负载。因此,弥散强化 Pt 和 Pt 合金是比传统 Pt 和 Pt 合金具有更高的高温结构稳定性和高温力学性能稳定性的材料。

3 γ/γ' 型沉淀型高温铂合金

γ/γ' 型沉淀强化的 Ni 基高温合金具有良好的高

温性能,这对开发出具有类似结构的新一代高温合金提供了借鉴意义。Pt 具有比 Ni 更高的熔点、更强的高温抗氧化及耐腐蚀性能, Pt 能与 Al 及过渡金属(如 Zr、Hf、Ti、Cr、Nb、Ta 等)形成 fcc(稳定结晶相)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, L_{12} 相又称 γ' 相)^[25-26]。在 Pt 基合金中存在大量 γ' 型 L_{12} 沉淀相,这为发展 γ/γ' 型沉淀强化的铂基高温合金奠定了基础。但对于该类型的 Pt 基高温合金的研究时间不长,其中日本、南非、德国和英国等开展研究相对较早。

在 Pt 合金系中 Pt 能与一些合金组元形成高温 L_{12} 相,而与另一些组元形成低温度稳定的 L_{12} 相,如 Pt_3Co 、 Pt_3Cr 、 Pt_3Ca 、 Pt_3In 、 Pt_3Mn 、 Pt_3Sn 、 Pt_3Zn 等^[27-28]。虽然在某些 Pt-X 合金系中 Pt_3X (X=Nb、Ta 等)不是 L_{12} 相,但它们也是沉淀强化相,具有稳定 L_{12} 相的作用,表 5 给出了 Pt-X 合金系中 Pt_3X 和其它沉淀相的某些特征。

从目前的研究结果来看, Pt 的铝化物既是沉淀强化相,又具有粘附性的抗氧化抗热腐蚀保护作用,因此 Pt-Al 系合金是最有发展前景的高温材料。 Pt_3Al 相虽具有高的压缩强度,但由于 Pt 固溶体的临界分解切应力不高而限制了合金强度增高。在 Pt-Al 合金中添加合适的第 3 或多个合金组元,旨在协调两相之间的晶格失配,并稳定沉淀相的温度范围、增大沉淀相的体积分数和固溶强化效应,则可进一步提高合金强度。这些添加元素应当具有高的固溶强化效应,如 Co、Ni、Ru、Re、Ta 等。因此,相继发展了一系列将 Pt_3Al 沉淀强化和 M 组元固溶强化相结合的 Pt-Al-M 三元和多元合金。如 Pt-Al-Ru、Pt-Al-Cr、Pt-Al-Ti、Pt-Al-Ta、Pt-Al-Ir、Pt-Al-Re 等三元合金, Pt-Al-Ru-Cr 四元合金,和 Pt-Al-Ru-Cr-M(M=Ni、Co 等)五元合金等。

表 5 Pt-X 合金系中 Pt_3X 和其它沉淀相的某些特征^[9]Tab.5 Some characteristics of Pt_3X and other precipitates in Pt-X systems

元素 (X)	密度/ (g/cm^3)	Pt- Pt_3X 合金 熔化温度/ $^{\circ}C$	Pt_3X 和其它 沉淀相结构	评价
Al	2.7	1500~1769	低温: 四方; 高温: $L1_2$	高沉淀强化效应, 高抗氧化性, 低密度。
Ti	4.5	1769~1800	化学计量: 六方(DO_{24}) 富 Pt 化合物: $L1_2$	密度较低, 沉淀相 $L1_2$ 结构, 沉淀强化效应好, 提高固溶温度, 降低抗氧化性。
V	5.8	1769~1805	$L1_2$ (1015 $^{\circ}C$ 以下稳定)	沉淀强化效应好, V 降低合金抗氧化性。
Cr	7.19	1769~1785	$L1_2$ (1130 $^{\circ}C$ 以下稳定)	沉淀强化效应好, Cr 提高合金抗氧化性。
Y	4.5	1615~1769	Pt_3Y ($SmPt_5$)	沉淀相 Pt_3Y , Y 高活性, 易氧化。
Zr	6.4	1769~1963	化学计量: 六方(DO_{24}) 富 Pt 化合物: $L1_2$	沉淀相为 $L1_2$ 结构, 具有高沉淀强化效应, 呈脆性, Zr 易氧化形成 ZrO_2 。
Hf	13.1	1769~2000	Pt_3Hf 结构似 Pt_3Zr	沉淀相为 $L1_2$ 结构, 高强度效应, 呈脆性, 易氧化。
Nb	8.55	1769~2000	<1100 $^{\circ}C$: 斜方; >1100 $^{\circ}C$: 六方(DO_{24})	Nb 提高固相线温度, 500 $^{\circ}C$ 以上易氧化; 可能出现形成部分共格 Pt_3Nb 沉淀相。
Ta	16.6	1769~1920	单斜($L6_0$)	Ta 提高固相线温度和力学性能, 500 $^{\circ}C$ 以上易氧化。
Ca	5.91	1373~1769	$L1_2$	$L1_2$ 低熔点。对合金的高温强化作用不确定。
Sn	7.29	1365~1769	$L1_2$	$L1_2$ 相有低温沉淀强化作用, 但不宜作高温强化相。
Pb	11.3	915~1769	$L1_2$	$L1_2$ 低熔点, Pt_3Pb 相不适于高温沉淀强化。

Hill 等^[29-30]重点研究了以 Pt_3Al 为主要强化相的 Pt 基高温合金, 合金体系从 Pt-Al-Cr 合金等三元系扩展到 Pt-Al-Cr-Ni 合金等四元系。研究发现, 在 Pt-Al 合金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, 即提高热稳定性及基体的固溶强化作用和合金的综合性能。M.Wenderoth 等研究了在平衡态组成为 Pt-12Al-6Cr-5Ni 合金中加入 2% 的 Mo、Re、Ru 和 W 后 γ' 相的变化情况, Mo、Re 和 W 的加入可增大 γ' 相所占体积分数, 其中 W 的加入使 γ' 相沉淀强化效果最明显^[31]。

图 2 显示了 Pt-Al-Cr-M(M=Nb、Ta、Ti)合金的高温压缩屈服强度并与传统的 Ni 基高温合金进行了对比^[32]。

由图 2 可以看出, Pt-Al-Cr-M 基合金具有更好的抗氧化性能, γ/γ' 强化的 Pt-Al-Cr-Nb 和 Pt-Al-Cr-Ta 在 1200 $^{\circ}C$ 以上时的压缩屈服强度甚至高于 Ni 基高温合金。虽然国内外对该类铂基高温合金的研究起步较晚, 但 Pt-Al-M(M 为过渡族金属元素)体系的 Pt 基高温合金已成为发展该类合金的主要方向, 有很强的吸引力和使用价值。

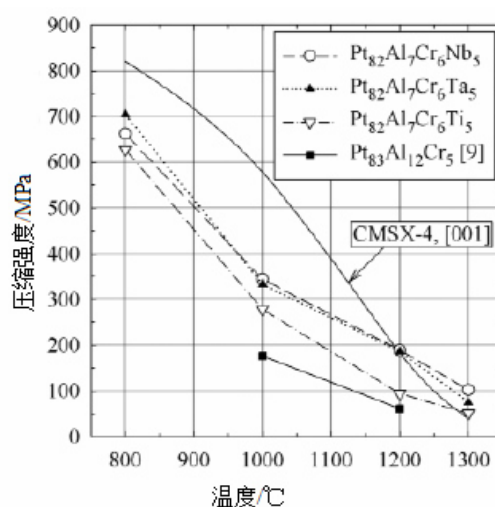
图 2 Pt-Al-Cr-M 合金的高温压缩强度(CMSX-4 为镍基高温合金)^[31]

Fig.2 High temperature compression strength of the polycrystalline Pt-Al-Cr-X alloys and single crystal Ni-based superalloy CMSX-4

4 高温铂合金材料的主要应用

铂基高温合金已成为发展新型高温热强材料, 沉淀强化材料和保护涂层材料的基础, 在工业和高新技术中得到广泛应用。

4.1 航空航天材料

航空发动机的发展与高温合金的发展密不可分。航空发动机中的涡轮叶片, 推进器的加热器和喷管都处于高温、高应力的工作状态, 氧化问题严重, 再加上使用的推进剂燃料具有较强的腐蚀作用, 因此对材料提出了很高的要求, 贵金属高温合金在航天材料中起了很重要的作用。例如美国航空航天局刘易斯研究中心从 1970 年代开始采用 Pt-Y₂O₃、和 Pt-ZrO₂ 两种弥散强化铂材料用于空间站低推力系统的电阻加热式推进器材料, 它们与二氧化碳、氢、氮、水蒸气和甲烷在 1400℃ 具有良好的相容性, 可以满足使用要求^[33]。此外在航空发动机上, PtAl 弥散强化合金具有优良的高温抗氧化能力和耐腐蚀能力, 可用于镍基高温合金表面涂层, PtAl 涂层改善了传统 Al 涂层的扩散稳定性和氧化皮的粘附性, 增强了保护作用, 可用在各种航空和地面发动机的涡轮上, 包括涡轮叶片及其它耐高温器件。

4.2 光学玻璃工业

铂或铂合金及弥散强化铂或铂合金熔点较高, 有极好的高温抗化学腐蚀性, 能经受快速冷却和加热, 工艺性能良好, 是制作试验器皿、玻璃工业用坩埚、搅拌器和漏板等的主要材料。例如昆明贵金属研究所研制的弥散强化铂(ZMQ-Pt)并已制成柑料及搅拌器用于工业生产。该材料具有耐蚀性好, 比纯 Pt 高的耐高温性能和抗蠕变性能, 材料使用寿命是纯 Pt 的 2 倍以上, 并且可节约大量 Pt。ZGSPT-10Rh 和 ODSPT-10Rh 可用于池窑漏板的制造, ODSPT-5Au 等合金具有最好的抗熔融玻璃浸润性, 特别用于小孔径漏板的制造。

此外, 弥散强化铂制成铂丝可以取代纯铂丝用于铂电阻感温元件的引线, 取代铂铑合金用于温度测量或发热体材料, ODSPT-4W 合金可以取代 Pt-10%Ir 合金用于高负荷火花塞触头材料的制造等。

5 展望

随着航空航天技术的发展以及工业进步, 材料的应用温度也越来越高, 因此高温材料的研究显

得十分重要。铂基增强高温合金是未来发展的必然趋势。国内在此方面的研究起步较晚, 较国际先进水平还有很大差距。因此, 国内相关单位应加大研究投入, 加强研究力量, 积极开发新的合金体系。同时积极开展商业化的 Pt 基高温合金铸造技术, 粉末制备技术和涂层技术的研究, 使其在更多领域得到推广应用。铂属于贵金属, 资源稀缺, 限制了贵金属高温合金的广泛研究与开发、因此, 可考虑从以下几个方面来发展:

1) 根据已有的研究成果, 建立铂合金材料数据库, 确定不同元素对合金强化微观机理及反应机制, 利用计算机辅助设计, 指导新合金的设计开发, 从而节约人力物力, 达到事半功倍的效果。

2) 开展复合材料和涂层制备技术的研究, 降低贵金属合金的使用成本。同时研究添加不同合金元素, 制备出兼有高的沉淀强化、好的固溶强化特征的新型合金材料, 使其具有高的耐高温持久强度和优良的抗蠕变性能, 能满足大多数高温行业的普适合金材料。

参考文献:

- [1] 《贵金属材料加工手册》编写组. 贵金属材料加工手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1978.
- [2] 谭庆麟, 阙震寰. 铂族金属[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- [3] 黎鼎鑫, 张永利, 袁弘明. 贵金属材料学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991.
- [4] FISCHER B, BEHREND S A, FREUND D, et al. High temperature mechanical properties of the platinum group metals[J]. Platinum metal rev, 1999, 43(1): 18-28.
- [5] SAVITSKII E M, POLYAKOVA V, GORINA N, et al. Physical metallurgy of platinum metals[M]. Oxford, New York: Pergamon Press, 1978.
- [6] SAVITSKII E M. Handbook precious metals[M]. New York: Hemisphere, 1989.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 宁远涛. Pt 和 Pt-Rh 合金的高温强化[J]. 贵金属, 1984, 5(2): 39-45.
- [11] 宁远涛, 胡新. Pt-Rh-Pd 合金的高温力学性能[J]. 贵

- 属, 1998, 19(2): 1-7.
- [12] 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.
- [13] ZHANG Q X, ZHANG D M, JIA S C, et al. Microstructure and properties of some dispersion strengthened alloys[J]. *Platinum metals rev*, 1995, 39(4): 167-171.
- [14] FISHER B, FREUND D, BEHREND A, et al. Dispersion hardened platinum and platinum alloys for very high temperature applications[C]//MANZIEK L. In *Precious Metals 1998*. Toronto: International Precious Metals Institute, 1998: 333-346.
- [15] DARLING A S, SELMAN G L, BOURNE A A. Dispersion strengthened platinum[J]. *Platinum metals rev*, 1968, 12(1): 7-13.
- [16] DARLING A S, SELMAN G L, BOURNE A A. Dispersion strengthened platinum [J]. *Platinum metals rev*, 1968, 12(1): 7-13.
- [17] SELMAN G L, DAY J G, BOURNE A A. Dispersion strengthened platinum[J]. *Platinum metals rev*, 1974, 18(2): 46-57.
- [18] 熊易芬. 熔炼光学玻璃用的弥散强化铂[J]. 贵金属, 1982, 3(4): 47-53
- [19] Stanley, R.G., and Wilson, F.G. ODS platinum- a unique high temperature material for the most demanding application[J]. *MPR*, 1982: 175-178.
- [20] MERKER J, FISCHER B, VÖLKL R, et al. Investigations of new oxide dispersion hardened platinum materials in laboratory tests and industrial applications[C]//*Materials Science Forum*, 2003: 1979-1984.
- [21] FISCHER B, FREUND D, BRÖMEL T, et al. Practical experience with new oxide dispersion hardened platinum materials[C]//*Proc on CD-ROM 25th International Precious Metals Conference*, Tucson Arizona, 2001.
- [22] 赵昆瑜, 黎鼎鑫. 微量稀土提高铂的高温持久强度的机理[J]. 贵金属, 1993, 14(2): 9.
- [23] 侯树谦. 岁月流金 再创辉煌: 昆明贵金属研究所成立七十周年论文集[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2008.
- [24] 李小甫. 铂材料的强化及其应用[J]. 有色金属, 2004(3): 21.
- [25] 何纯孝, 周月华, 王文娜. 贵金属合金相图第一补编[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [26] HILL P J, BIGGS T, HOHLS J, et al. An assessment of ternary precipitation-strengthening Pt alloys for ultra-high temperature applications [J]. *Mater sci Eng*, 2001, A301: 167-179.
- [27] TERADA Y, OHKUBO K, MIURA S, et al. Thermo-physical properties of Rh_3X for ultra-high temperature applications[J]. *Platinum metals Rev*, 2006, 50(2): 69-76.
- [28] WOLFF I M, HILL P J. Platinum metals-based intermetallics for high temperature service[J]. *Platinum metal rev*, 2000, 44(4): 158-166.
- [29] HILL P J, COMISH L A, ELLIS P, et al. The effects of Ti and Cr additions on the phase equilibria and properties of (Pt)/Pt₃Al alloys[J]. *J alloys and compounds*, 2001, 317(1): 166-175.
- [30] HILL P J, YAMABE-MITARAI Y, WOLFF I M. High-temperature compression strengths of precipitation-strengthened ternary Pt-Al-X alloys[J]. *Scripta materialia*, 2001, 44(1): 43-48.
- [31] Wenderoth M, Völkl R, Vorberg S. Microstructure oxidation resistance and high temperature strength of γ' hardened Pt-base alloys[J]. *Intermetallics*, 2007, 15(4): 539-549.
- [32] CORNISH L A, SUSS R, VOLKL R, et al. Overview of the development of new Pt-based alloys for high temperature application in aggressive environments[J]. *J South Afr Inst Min Metall*, 2007, 107(11): 697-711.
- [33] 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.