

玻璃工业用铂合金与复合材料

张晓辉¹, 宁远涛²

(1. 北京鑫瑞新材料有限公司, 北京 101300; 2. 昆明贵金属研究所, 昆明 650106)

摘 要: 评述了各种铂材在玻璃工业中的应用和它们的主要特性。基于铂的高温化学性能和力学性能稳定性以及高的抗熔融玻璃浸润性, 铂合金、铂复合材料和涂层材料成为制造高级玻璃和玻璃纤维的最佳高温结构材料。介绍和评述了玻璃工业用各种铂材, 包括Pt、Pt固溶体合金(Pt-Rh、Pt-Rh-Au、Pt-Pd-Rh)、铂复合材料(颗粒弥散复合材料、层状复合材料和包覆复合材料)和先进铂涂层材料的特性和在玻璃工业中的具体应用。

关键词: 金属材料; 铂; 铂固溶体合金; 铂复合材料; 铂涂层材料; 熔融玻璃润湿性

中图分类号: TG146.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2013)03-0088-07

Platinum Alloys and Composites Used in Glass Manufacturing Industry

ZHANG Xiaohui¹, NING Yuantao²

(1. Beijing Sunrising Advanced Materials Co. Ltd., Beijing 101300, China;

2. Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: Applications and main features of various platinum materials applied in glass industry were reviewed. Based on the high stability of chemical and mechanical properties as well as the high anti-wettability of molten glass on platinum at high temperature, various platinum alloys, platinum composites and platinum coatings have become the optimum high temperature structural materials for glass manufacture. The characteristics and specific applications of various platinum materials, including pure platinum, platinum solid solution alloys (Pt-Rh, Pt-Rh-Au, Pt-Pd-Rh), dispersion strengthened platinum and platinum alloys as well other platinum composites, and platinum coatings, were evaluated and discussed, respectively.

Key words: metal materials; Pt; platinum solid solution alloys; platinum composites; platinum coatings; wettability

1 铂材料在玻璃工业中的应用

各种铂材可用于制造光学玻璃、液晶显示平板玻璃(LCD玻璃)、晶体玻璃和各种玻璃纤维, 这些玻璃产品在工业中有广泛应用^[1-2]。在20世纪70至90年代, 世界建筑与制造业的发展推动了玻璃纤维生产大发展和对铂材的需求; 新世纪以来, 随着通信和电视平板显示技术的发展, 对LCD玻璃的需求日益增长也推动了对铂材的需求。

各种铂材主要用于制作熔化玻璃的坩埚和拉制连续玻璃纤维的漏板。此外, 铂材料还用于制作搅拌器、加热电极、炉子内衬、过滤器、工具和测温热电偶等。图1^[3-5]显示了用铂材制造的坩埚、搅拌器、漏板和各种工具。表1^[6-7]列出了近5年玻璃工业用铂量及其所占工业总用铂量的比例。受世界范围内金融和经济危机的影响, 2008~2009年铂在玻璃工业中的应用量急剧降低。近3年来, 随着世界经济缓慢的复苏, 特别是通信和电视平板显示技术的发

展,推动LCD玻璃生产增长和铂的应用量增高,其中,中国的贡献功不可没。

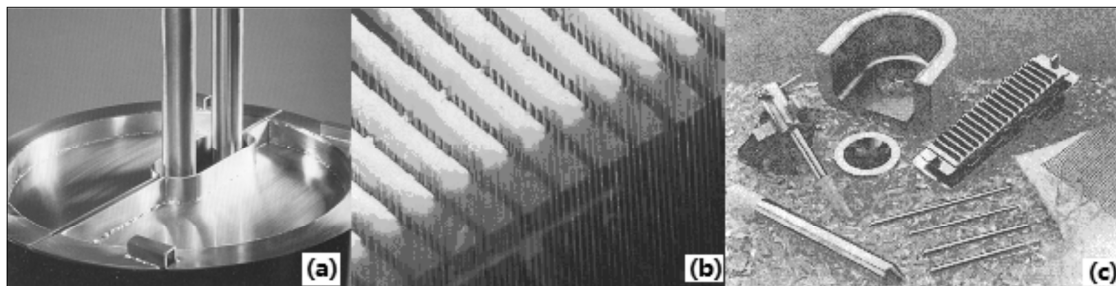


图1 铂材在玻璃工业中的应用

[(a)熔化玻璃坩埚和搅拌器; (b)生产玻璃纤维漏板; (c)各种铂制工具]

Fig.1 Applications of platinum materials in glass industry

[(a)crucible and stirrer for molten glass; (b)bushings manufacturing glass fibre; (c)various equipments made of platinum alloys]

表1 近5年玻璃工业用铂量及其在铂的工业应用中的比例

Tab.1 Platinum demand in glass industry and its ratio to the total platinum demand by industrial application in recent 5 years

年份	2007	2008	2009	2010	2011
玻璃制造业用铂量/t	14.62	9.80	0.31	11.98	13.53
工业总用铂量/t	57.39	53.50	35.46	54.59	60.96
比例/%	25.47	18.31	0.88	21.94	22.19

2 对玻璃工业用铂材料的基本要求

玻璃是非晶态无机材料,其熔体具有高粘度并对容器具有强的腐蚀性。熔化玻璃和制造玻璃纤维的温度一般在1200℃以上,这就要求熔融玻璃的容器和装置应具有高耐蚀性与高抗氧化性,高的高温强度、持久强度和抗蠕变能力,高的抗玻璃浸润性,好的加工性能和成型性等。另外,光学玻璃、LCD玻璃、晶体玻璃或其它高级玻璃必须具备高的成分均匀性和好的透光度,这就需要使用对玻璃无污染的材料制作坩埚与漏板。

铂、铂合金和铂复合材料具有高化学稳定性,它们耐腐蚀和抗氧化,不与玻璃熔体和蒸汽反应;铂和铂合金对熔融玻璃有高的抗润湿性,可以实现漏板漏嘴多孔密排、减少漏板尺寸和节约铂资源;铂合金和铂复合材料在直至1600℃高温都具有高的高温强度、持久强度和抗蠕变能力;铂和铂合金具有良好的加工性能,可以采用热加工、冷加工、冲压、旋压、拉拔等各种手段进行加工,制造各种形状和尺寸的坩埚、漏板和工具。虽然铂资源稀缺和价格昂贵,但铂及其合金可重复使用。铂与铂合金

材料的上述性能是任何贱金属和陶瓷材料不可比拟的。在20世纪60~80年代,国内外许多研究机构和生产工厂都曾试图以陶瓷、不锈钢、Ni基耐热合金等材料全部或部分取代Pt合金用于生产玻璃纤维,均未获得成功,凸显铂材的优越性,它们是制造熔融玻璃坩埚和漏板的最佳高温结构材料。

3 玻璃工业用 Pt 合金

3.1 Pt与Pt-Rh合金

基于纯铂在高温大气和熔融玻璃中高的化学稳定性,铂不与熔融玻璃反应,铂在熔融玻璃中的溶解度很小,不会使玻璃失去透明性或产生脱玻效应,不会使玻璃着色和使玻璃绝缘性能减退^[8-9],这是制造光学玻璃及其纤维不可缺少的特性。因此,纯铂主要用作熔化光学玻璃的坩埚或坩埚的包覆材料、熔化炉的内衬材料或涂层材料。

纯Pt的高温强度性质远不能满足要求,因而需要强化,固溶强化是其主要强化途径之一。在Pt的合金化元素中,只有Rh的高温稳定性与Pt相近。Rh是Pt唯一稳定的高温固溶强化元素,Pt-Rh合金也是最稳定的高温合金^[10-11]。Pt-Rh合金的强度性质随Rh含量增加而增大,但Rh含量增高到质量分数30%以上时,合金加工变得困难。因此,在1300℃以下温度工作时宜选择质量分数低于20%Rh的Pt-Rh合金,而在1400℃以上温度工作时宜选用含高Rh(质量分数≥25%Rh)的Pt-Rh合金^[2]。在Pt-Rh合金中添加少量Zr、Hf等元素可进一步提高合金的高温强度性质;在高Rh合金中添加微量Mo、Ir、Ru等元素,借助其优先挥发可以达到保护Pt-Rh基体和提高强度的目

的^[12]。表2^[2]列出了玻璃工业常用的Pt与主要Pt-Rh合金的室温和高温力学性能。各种Pt-Rh合金广泛地用于制作大型坩埚、搅拌器和漏板等结构型装置，可以在1200~1600℃高温大气和熔融玻璃环境中长

期工作，主要用于生产各种玻璃及中碱、无碱和特种连续玻璃纤维，但它们不能用于生产光学玻璃与光学玻璃纤维，因为Rh离子渗入玻璃可使玻璃呈玫瑰红色。

表2 玻璃工业用Pt与Pt-Rh合金的力学性能(质量分数%)

Tab.2 Mechanical properties of Pt and Pt-Rh alloys applied in the glass industry

性能指标及测试条件		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
	1400℃/100 h	1.5	3.0	3.6	6.5	—	7.0
持久强度 ^① /MPa	1400℃/10 h	2.0	5.0	6.0	12	—	—
	1600℃/10 h	~1	~2	~3	~5	~6	—
蠕变性能 ^②	蠕变速率/(10 ⁻² /h)	—	0.6	0.4	0.1	—	0.006
	致断时间/h	—	50	100	280	—	400

注：①施加应力5 MPa应力；②施加负荷5 MPa，温度1400℃。

3.2 Pt-Rh-Au合金

连续玻璃纤维生产用Pt-Rh-Au合金的成分一般含7%~15%Rh和1%~5%Au。表3^[2]列出了某些商用Pt-Rh-Au合金性能。

表3 玻璃纤维生产用某些Pt-Rh-Au合金性能(质量分数%)

Tab.3 Properties of some commercial Pt-Rh-Au alloys used to produce various glass fibers

性能指标及测试条件	Pt-7Rh	Pt-12Rh	Pt-10Rh
	-3Au	-3Au	-5Au
密度(20℃)/(g/cm ³)	20.42	19.68	19.8
电阻率(20℃)/(μΩ·cm)	21	24	23.8
(0~1200℃)电阻温度系数 /(10 ⁻³ /℃)	1.11	1.26	1.25
硬度(20℃)/Hv	116	140	130
抗拉强度/MPa	20℃	330	400
	1200℃	55	65
1200℃时与熔融玻璃接触角	70°	75°	80°

在生产连续玻璃纤维时，熔融玻璃对漏嘴材料的抗润湿性是最重要的性质之一。润湿性可以用熔融玻璃对Pt的接触角度量，接触角越大，抗润湿性越大。若接触角太小，可导致熔融玻璃漫流、并丝，甚至使拉制连续玻璃纤维无法正常进行。虽然熔融玻璃对纯Pt接触角较小(≤20°)，但向Pt或Pt合

金中添加Au、Rh和Pd等元素可提高接触角，其中以添加Au对接触角的增值最大。向Pt中添加质量分数为7%~10%的Rh，可提高接触角至40°左右，而再添加3%的Au，可将接触角提高到80°。此外，添加Au还可以提高Pt和Pt-Rh合金的室温与高温强度性质及抗蠕变能力^[13-19]。

Pt-Rh-Au合金高的接触角和抗熔融玻璃润湿性，可以克服熔融玻璃漫流现象，实现漏嘴多孔密排，节约铂合金用量。根据在200孔漏板上的工业实验^[16]，采用Pt-Rh-Au合金漏嘴，可以提高漏嘴密度44%，减少Pt合金漏板面积约18%，节约Pt合金用量约20%，降低电耗约30%，增大熔融玻璃流量，从而增加玻璃纤维生产率约达7%。

3.3 Pt-Pd-Rh合金

玻璃工业中为了降低Pt-Rh合金成本，常使用以部分Pd替代Pt或Rh的Pt-Pd-Rh合金。表4^[8]列出了Pt-10Rh合金和某些Pt-Pd-Rh合金在1400℃和5 MPa应力条件下在熔融玻璃中的蠕变速率和溶解速率。随着Pt-Pd-Rh合金中Pd含量增高，在大气和熔融玻璃两种情况下Pt-Pd-Rh合金蠕变速率较Pt-10Rh合金明显增大，而随着合金中Rh含量增加，蠕变速率减小。同样，随着Pt-Pd-Rh合金中Pd含量增高，Pt-Pd-Rh合金在熔融玻璃中的溶解速率也增大。向Pt-Pd-Rh合金中添加少量Ru或Ir不仅有助于减小Pt-Pd-Rh合金的蠕变速率，也有利于降低合金在熔

融玻璃中的溶解速率。在1400℃和5 MPa应力条件下，Pt-25Pd-10Rh-1.5Ru合金的高温强度性质大约与Pt-7Rh合金相当。这表明Pt-25Pd-10Rh-(Ru或Ir)或Pt-35Pd-13Rh-(Ru或Ir)等高Pd合金可在1300℃以下温度安全使用，用于熔化和生产中碱或无碱玻璃和玻璃纤维。

表4 Pt-Rh和Pt-Pd-Rh合金在1400℃大气和熔融玻璃中的蠕变速率和溶解速率(5 MPa应力)

Tab.4 The creep rate and the dissoluble rate of Pt-Rh and Pt-Pd-Rh alloys in 1400℃ air and melting glass($\sigma=5$ MPa)

合金W _B /%		Pt-10Rh	Pt-25Pd -10Rh	Pt-35Pd -13Rh	Pt-10Pd -20Rh	Pt-25Pd -10Rh-1.5Ru	Pt-35Pd -13Rh-1.0Ir
蠕变速率/(%/h)	大气中	0.2	0.8	0.5	0.23	0.2	0.4
	熔融玻璃中	0.3	0.6	0.5	—	0.2	0.4
溶解速率/(10 ⁻⁷ g/m ² ·s)	熔融玻璃中	0.32	7.8	13.6	—	0.4	—

4 玻璃工业用 Pt 合金复合材料

4.1 弥散强化Pt与Pt-Rh合金

玻璃工业用弥散强化Pt合金通常采用氧化物作为弥散强化相，包括：以ZrO₂(Zr质量分数0.06%~0.3%)颗粒稳定化的Pt、Pt-Rh、Pt-Rh-Au合金，如ZGSPt、ZGSPt-Rh、ZGSPt-Au和ZGSPt-Rh-Au等^[20-27]；以Y₂O₃颗粒稳定化的Pt(或Pt-Rh)合金，如ODSPt或ODSPt-Rh合金^[28]和以Zr、Y、Ca、Al等微量元素的复杂氧化物弥散强化的Pt或Pt合金，如DPHPt、DPHPt-Rh和DPHPt-Au等^[5]。这些弥散强化Pt或Pt-Rh合金可用于生LCD平面玻璃、晶体玻璃、光学玻璃和光学玻璃纤维、无碱玻璃连续纤维和其它特殊玻璃。

弥散强化Pt与Pt合金用作熔化玻璃的坩埚、漏板和搅拌器等至少具有如下优点：①与普通Pt和Pt-Rh合金相比较，ZGS-、ODS-、DPH-Pt和Pt-Rh合金有更高的高温强度和抗蠕变能力，因而可以提高坩埚和漏板的使用温度和延长使用寿命，减少维修次数；②可以使用不含Rh或含低Rh的弥散强化Pt或Pt-Rh合金代替含高Rh的普通Pt-Rh合金，并可减小坩埚和漏板的厚度，从而减少了Pt-Rh合金用量和节约铂族金属资源；③弥散强化铂合金不仅能提高再结晶温度(提高200~300℃)及细化晶界和晶体尺寸(晶粒尺寸<100 nm)，而且还可以减轻杂质污染和应力腐蚀；④弥散强化Pt既具有高的Pt纯度，也具有高的高温强度，还不会使玻璃着色，是熔化和制备光学和高级玻璃的理想材料；⑤ZGSPt-Au或ZGSPt-Rh-Au合金兼有高的高温强度性质和抗熔融玻璃浸润性能(即有高的熔融玻璃接触角)，这有利于制备小孔径漏板漏嘴和生产细连续玻璃纤维。采用传统Pt-Rh合金制作漏板和漏嘴一般只能生产直径10~25

μm的玻璃纤维；而采用ZGSPt-Au或ZGSPt-Rh-Au合金漏板漏嘴，可生产直径6 μm的玻璃纤维，生产效率达90%以上。

4.2 Pt与Pt合金包覆复合材料

4.2.1 Pt/氧化物阻挡层/Mo(Mo合金)复合材料

熔融玻璃搅拌器(包括叶片)需要高的高温强度，特别是高的抗剪切强度，常用Mo和Mo合金制作。为避免Mo合金氧化和污染玻璃熔体，在Mo或Mo合金外需包复Pt或弥散强化Pt，中间喷涂氧化物阻挡层以避免界面氧扩散和界面反应。芯层可以采用Mo或Mo合金，以Mo-Zr合金为优。氧化物阻挡层可以采用氧化锆等氧化物，以稳定化的ZrO₂更好。表面包覆层可以采用Pt或弥散强化Pt。

文献[29]的试验证明：以0.5 mm厚Pt包覆Mo和Mo合金芯，在1400℃大气中测定其使用寿命，Mo芯无阻挡层复合棒的寿命仅460 h；Mo-0.1%Zr和Mo-0.5%Zr合金芯无阻挡层复合棒的寿命分别增加到1200和2000 h；而以Mo-Zr合金为芯并喷射0.75 mm厚稳定化ZrO₂为阻挡层再包复Pt的复合材料的寿命高于2300 h，比Pt/Mo复合材料的寿命高约5倍。Pt/氧化物阻挡层/Mo(Mo合金)复合材料搅拌器在玻璃工业中已经使用了20年以上，随着包覆复合材料制备技术的进步，这类复合材料搅拌器的使用寿命可达到5年以上。

4.2.2 Pt合金/Pt合金“扩散阀”层/ODS-Fe(或Ni)合金复合材料

2003年，江森-马塞公司(Johnson Matthey)发明了一种带有“扩散调节阀”(Diffusion Choke)的新型搅拌器的设计思想和革新技术^[30]。搅拌器以ODS-Fe或ODS-Ni合金为芯，在其上套一个由Pt-10%Rh合金细丝制备的起“扩散阀”作用的针织网，外层包覆Pt-20%Rh合金片材。这里，ODS-Fe或ODS-Ni

合金是以氧化钼弥散强化的Fe-Cr-Al-M(M为微量元素)合金或Ni合金。这种结构的优点有:“扩散阀”将Fe合金或Ni合金芯与Pt包覆层分开,可避免芯与包覆层在高温接触所产生的相关问题;“扩散阀”可保持气体通道有足够的氧达到ODS-Fe或Ni表面,保证ODS-Fe或Ni在高温长期工作期间的固有氧化特性和弥散强化特性;“扩散阀”抑制氧流向Pt合金表面和Pt合金的过分氧化;“扩散阀”中的Pt与芯合金接触可以增加氧化物的稳定性。这种带有“扩散阀”的Pt合金包覆材料可以用于制作各种类型的搅拌器,作为熔融玻璃的搅拌器,它的寿命预期可达5~10年,超过Pt/氧化物阻挡层/Mo(Mo合金)复合材料搅拌器的最高寿命。

4.3 Pt与Pt合金层状复合材料

在玻璃工业中也使用弥散强化Pt(或Pt-Rh)/Pd或Pd合金/弥散强化Pt(或Pt-Rh)“三明治”复合材料,中间层可以是Pd或含有较高Pd和Rh的Pt合金,如表4所列Pt-Pd-Rh-Ru(Ir)等合金,其结构通常按15%~25%:70%~50%:15%~25%的比例组成^[31]。这类“三明治”复合材料既保持了弥散强化Pt(或Pt-Rh)的高的高温强度和耐腐蚀性质,又降低了密度,可节约50%~70%弥散强化Pt(或Pt-Rh),是一类经济效益理想的高温结构材料,可用于制作熔化玻璃的坩埚与漏板,也可用于制作熔化铁氧体、铌酸锂等熔点较低晶体材料的坩埚以及实验器皿等。鉴于Pd和Pt合金具有较低的熔点,这种“三明治”复合材料只能在1300℃以下温度工作。

5 先进 Pt 与 Pt 合金涂层材料

Pt与Pt合金复合材料在高温熔融玻璃中的应用依靠包覆层材料和基体材料各自发挥独立的作用,其缺点是在2种材料之间缺乏整体结合性,而材料的损坏往往是由扩散控制的界面反应造成的。自20世纪80年代以后,随着涂层技术的进步,各种类型的Pt或Pt合金涂层复合材料也广泛用于玻璃工业。

5.1 Pt(Pt合金)基体上涂覆陶瓷

在高温熔体或腐蚀介质中使用的Pt(Pt合金)容器一般需要较厚的壁以抗御高温蠕变,这需要使用大量的Pt。为了节约Pt并改善高温强度,可使用涂层技术制备陶瓷涂层的Pt或Pt合金坩埚或容器。该制备技术大体如下^[32]:首先以粒径约300 μm的Al₂O₃喷砂处理Pt坩埚表面,在Pt表面形成凹凸深度约30 μm的粗糙度;再采用等离子蒸发技术在坩埚

表面沉积厚度约几毫米(典型值约3 mm)的Al₂O₃或其它陶瓷涂层;最后对所得到的具有陶瓷涂层的Pt坩埚进行1250℃/2 h稳定化退火处理,其界面层具有弥散强化Pt的结构和性质,并使得Al₂O₃涂层的Pt坩埚具有很高的结合强度和抗热机械应力的能力。这类坩埚用于熔化和生长PbWO₄单晶体7000 h以后,坩埚界面仍然结合牢靠,涂层不会从Pt基体上分离,即使Al₂O₃涂层出现裂纹也不脱离基体。

5.2 陶瓷基体上涂覆Pt和Pt合金

在20世纪80年代,江森-马塞公司发明了一种先进的涂层技术(Advanced Coating Technology, ACTTM)^[33],它利用现有的扩散数据和标准方程,通过计算机模型设计选择铂涂层和基体材料以及最佳的涂层工艺,以达到涂层与基体的整体结合和实现2种材料的协同作用。ACTTM涂层可以是Pt、弥散强化Pt和Pt-Rh合金,涂层可施加于任何基体,如各种耐热合金和耐火陶瓷基体,包括氧化铝、氧化硅、莫来石、锆石-莫来石、氧化铝-硅酸盐等等。

ACTTM-Pt和Pt合金涂层在玻璃工业中有广泛应用,它们可以用作热电偶陶瓷套管涂层、坩埚内衬、炉衬和流通的管道涂层、搅拌器涂层、加热电极涂层、加热元件涂层以及在玻璃和玻璃纤维制造过程中所使用的各种器具的保护涂层。第一个商业应用是以Pt和Pt-10%Rh合金涂层于3级Pt/Pt-10%Rh热电偶的莫来石套管或氧化铝套管,用于监测熔炉内不同深度熔融玻璃的温度梯度,代替原先以Pt-10Rh合金或弥散强化Pt-10Rh合金包覆保护氧化铝套管。现在许多国家的玻璃工厂都安装和使用ACTTM涂层套管的热电偶监测前炉玻璃温度。Pt与Pt合金的ACTTM涂层也应用于玻璃熔炉的炉衬、搅拌器、熔融玻璃流通管道以及玻璃成型的各种器具,特别是高质量的光学玻璃和Pb晶体玻璃工业已经采用Pt-ACTTM涂层作为标准生产路线以保证产品纯度和质量。Pt与Pt合金的ACTTM涂层也用作熔融玻璃体系的加热元件涂层,在这里,Pt-ACTTM涂层既是熔融玻璃体系的炉衬以保护玻璃不被炉体污染,它又是直接加热元件,它从熔室内部直接加热熔化玻璃,并通过靠近的Pt-ACTTM涂层的Pt/Pt-10%Rh热电偶精确控制熔融玻璃温度,监控误差为±0.5℃^[34-35]。

Pt与Pt合金的ACTTM涂层具有许多优点,如最佳的涂层工艺、涂层牢靠和使用寿命长等。最重要的是ACTTM涂层的厚度一般控制在200~300 μm,远低于包覆铂层的厚度,因而可以明显节约铂合金。

如在熔融Pb晶体玻璃体系中,采用Pt-Rh合金包覆材料需用6~7 kg,而采用Pt-ACTTM涂层仅需用2.5~3 kg;又如熔融LCD平面玻璃的搅拌器,若用Pt-Rh合金制作需用84 kg,而采用Pt-ACTTM涂层的搅拌器仅需用8 kg^[35]。

参考文献:

- [1] Benner L S, Susuki T, Meguro K, et al. Precious Metals Science and Technology[M]. Austin in USA: The International Precious Metals Institute, 1991.
- [2] 宁远涛, 杨正芬, 文飞. 铂[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [3] Cowley A. Platinum 1998[M]. London: Johnson Matthey, 1998: 26.
- [4] Jollie D. Platinum 2008[M]. London: Johnson Matthey, 2008.
- [5] Fisher B, Freund D, Behrend A, et al. Dispersion hardened platinum and platinum alloys for very high temperature applications[C]// Manziek L. Precious Metals. Toronto: International Precious Metals Institute, 1998: 333-346.
- [6] Jollie D. Platinum 2010[M]. London: Johnson Matthey, 2010.
- [7] Butler J. Platinum 2011 Interim Review[M]. London: Johnson Matthey, 2011.
- [8] Savitskii E M, Prince A. Handbook of Precious Metals [M]. New York: Hemisphere Publishing Corp, 1989.
- [9] Savitsky E M, Polyakova V, Gorina N. Physical Metallurgy of Platinum Metals[M]. Oxford: Pergamon Press, 1978.
- [10] 宁远涛. Pt与Pt-Rh合金的高温强化[J]. 贵金属, 1984, 5(2): 39-45.
- [11] 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.
- [12] 宁远涛, 王永立. 几种合金元素对Pt高温蠕变激活能的影响[J]. 金属学报, 1979, 15(4): 548-556.
- [13] Selman G L. The wetting of platinum and its alloy by glass: (I) Contact angle determination between glass and pure platinum[J]. Platinum Metals Review, 1965, 9(3): 92-98.
- [14] Selman G L, Spender M R, Darling A S. The wetting of platinum and its alloy by glass: (II) Rhodium-platinum alloys and the influence of gold[J]. Platinum Metals Review, 1965, 9(4): 130-135.
- [15] Selman G L. The wetting of platinum and its alloy by glass: (III) Microstructure and mechanical properties of gold-rhodium-platinum alloys[J]. Platinum Metals Review, 1966, 10(2): 54-59.
- [16] 宁远涛, 邓德国, 王永立. 玻纤漏板材料Pt-Rh-Au合金研究: (I)熔融玻璃对Pt-Rh-Au合金的接触角[J]. 贵金属, 1981, 2(2): 10-15.
- [17] 宁远涛, 邓德国, 王永立. 玻纤漏板材料Pt-Rh-Au合金研究: (II)Pt-Rh-Au合金的结构与工艺特性[J]. 贵金属, 1981, 2(3): 24-28.
- [18] 宁远涛, 邓德国, 王永立. 玻纤漏板材料Pt-Rh-Au合金研究: (III)Pt-Rh-Au合金的高温强度、电阻及膨胀系数[J]. 贵金属, 1982, 3(1): 35-38.
- [19] 宁远涛, 邓德国, 王永立. 玻纤漏板材料Pt-Rh-Au合金研究: (IV)Pt-Rh-Au合金的挥发[J]. 贵金属, 1982, 3(2): 36-40.
- [20] Selman G L, Day J G, Bourne A A. Dispersion strengthened platinum[J]. Platinum Metals Review, 1974, 18(2): 46-57.
- [21] Selman G L. Dispersion strengthened rhodium-platinum[J]. Platinum Metals Review, 1976, 20(3): 86-92.
- [22] Heywood A E, Benedek R A. Dispersion strengthened gold-platinum[J]. Platinum Metals Review, 1982, 26(3): 98-104.
- [23] McGrath R B, Badcock G C. New dispersion strengthened platinum alloys[J]. Platinum Metals Review, 1987, 31(1): 8-11.
- [24] 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.
- [25] 钱琳, 谢自能. 旋压工艺与弥散强化铂的塑性变形[J]. 贵金属, 1988, 9(2): 28-31.
Qian Lin, Xie Zineng. The influences of spinning process on the plastic deformation of the dispersion strengthened platinum[J]. Precious Metals, 1988, 9(2): 28-31.
- [26] 谢自能, 卢峰, 王健. 弥散强化Pt-5Rh合金(制造大型玻纤漏板新材料)[J]. 贵金属, 1996, 17(3): 10-14.
Xie Zineng, Lu Feng, Wang Jian. Dispersion strengthened Pt-5Rh alloy—a new material for fabricating large bushing in glass fibre industry[J]. Precious Metals, 1996, 17(3): 10-14.
- [27] 熊易芬. 弥散强化铂材料的发展历史及研究状况[C]//侯树谦. 昆明贵金属研究所成立七十周年论文集. 昆明: 云南科技出版社, 2008: 190-198.

- [28] Des Forges C D, Stanley R G, Wilson F G. The strengthening of platinum-the role of yttrium oxide[C]// Proceedings on the Production and Applications of Less-Common Metals. Hangzhou, China: The Metals Society and Chinese Society of Metals, 1982.
- [29] Darling A S, Selman G L. Platinum-clad equipment for handling molten glass[J]. Platinum Metals Review, 1968, 12(3): 92-98.
- [30] Coupland D R, Williams P. New stirrer technology for the glass industry[J]. Platinum Metals Review, 2005, 49(2): 62-69.
- [31] Rowe M S, Heywood A E. Composite platinum group metals[J]. Platinum Metals Review, 1984, 28(1): 7-12.
- [32] Panfilov P. The transition layer in platinum-alumina[J]. Platinum Metals Review, 2004, 48(2): 47-55.
- [33] Coupland D R. Advanced coating technology ACTTM[J]. Platinum Metals Review, 1993, 37(2): 62-70.
- [34] Coupland D R, McGrath R B, Evens J M, et al. Progress in platinum group metal coating technology ACTTM[J]. Platinum Metals Review, 1995, 39(3): 98-107.
- [35] Williams P. ACTTM power coating[J]. Platinum Metals Review, 2002, 46(4): 181-187.

(上接第 87 页)

- [39] Lin Y R, Teng H. A novel method for carbon modification with minute polyaniline deposition to enhance the capacitance of porous carbon electrodes[J]. Carbon, 2003, 41(14): 2865-2871.
- [40] Dastgheib S A, Karanfil T. Adsorption of oxygen by heat-treated granular and fibrous activated carbons[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 274(1): 1-8.
- [41] 姜瑞霞, 宋兴涛, 陈大伟, 等. 高温氢气处理对活性炭及钯炭催化剂性能的影响[J]. 化学反应工程与工艺, 2007, 23(4): 375-379.
Jiang Ruixia, Song Xingtao, Chen Dawei, et al. Effects of hydrogen treatment on the properties of activated carbon and Pd/C catalysts[J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2007, 23(4): 375-379.
- [42] Kang M, Song M W, Kim K L. Palladium catalysts supported on activated carbon with different textural and surface chemical properties[J]. Reaction Kinetics and Catalysis Letters, 2002, 76 (2): 207-212.
- [43] Jen P H, Hsu Y H, Lin S D. The activity and stability of Pd/C catalysts in benzene hydrogenation[J]. Catalysis Today, 2007, 123(1): 133-141.
- [44] Szymański G S, Karpiński Z, Biniak S, et al. The effect of the gradual thermal decomposition of surface oxygen species on the chemical and catalytic properties of oxidized activated carbon[J]. Carbon, 2002, 40(14): 2627-2639.

《贵金属》期刊编辑部网站启用通知

《贵金属》期刊编辑部网站于 2013 年 8 月建立。网址为:

1. <http://journal.ipm.com.cn>
2. <http://www.i-preciousmetals.com>

网站已经上传近期期刊摘要, 并可下载投稿模板。

由于网站尚处在建设期, 目前投稿、与编辑部联系仍然使用现有电子邮箱 (bjba@ipm.com.cn; gjsz@chinajournal.net.cn), 今后将逐步启用网上投稿系统。

欢迎广大读者、作者登录网站, 为期刊建设提出宝贵建议。

《贵金属》编辑部
2013 年 8 月