

铂饰品材料的强化研究进展

张大伟, 魏燕, 汪俊, 郑旭, 蔡宏中, 张翔翔, 胡昌义*
(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: 由于纯铂硬度较低, 改善其硬度和强度对铂饰品应用具有重要意义。重点从合金化和加工工艺两个方面综述了目前铂饰品的主要强化方式, 包括固溶强化、时效强化和细晶等合金化强化方式及其强化机制以及热等静压和表面硬化技术等现代加工工艺。提出了未来应用热等静压工艺以及新型强化材料的选用改善铂饰品材料的加工性能的必要性和迫切性。

关键词: 金属材料; 铂饰品; 硬度; 强度; 强化方式

中图分类号: TG146.3⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2018)04-0083-07

Progress in the Strengthening of Platinum Jewelry

ZHANG Dawei, WEI Yan, WANG Jun, ZHENG Xu, CAI Hongzhong, ZHANG Xuxiang, HU Changyi*
(State Key Laboratory of Advanced technologies Comprehensive Utilization of Platinum Metals,
Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: Due to the low hardness of pure platinum, it is of great significance to improve its hardness and strength for platinum jewelry applications. This paper summarizes the main strengthening methods of platinum jewelry from alloying and processing technology aspects. The alloying approach covers solid-solution strengthening, aging hardening, alloying hardening and their strengthening mechanisms, while the processing technologies consist of thermal isostatic pressing and surface hardening. It is necessary and urgent to improve the processing performance of platinum jewelry materials by using hot isostatic pressing technology and the selection of new reinforced materials in the future.

Key words: metal materials; platinum jewelry; hardness; strength; strengthening methods

铂(Pt)具有明亮的光泽,高化学稳定性,耐腐蚀,具有良好的收藏价值,作为饰品材料,广受消费者的喜爱。另一方面,铂首饰材料作为一个传统行业,几千年来主要是靠实践经验,依赖手工加工,材料性能的稳定难于控制,这在一定程度上限制了铂饰品材料的推广。

由于纯铂的硬度(HV)较低,仅为50,不适合首饰加工并实现饰品的特殊造型,需要进一步强化^[1]。但在强化过程中,硬度也不宜过,如果硬度太高,不容易加工,最佳的硬度范围为130~180^[2]。本文对铂饰品强度和硬度性能强化的方式及机制进行综

述,为铂饰品材料的生产提供参考。

1 合金化强化方式及强化机制

合金化强化方式是通过加入其它元素,使金属成为具有预期性能的合金^[3]。铂添加其它元素,主要是提高其强度和硬度。李小甫^[4]报道铂的合金化强化方式主要有固溶强化、时效强化、形变强化、细晶强化、弥散强化。但是,铂作为饰品材料,铂合金既要考虑其色泽、耐腐蚀性、耐磨性,同时还要考虑其铸造性能和加工性能。形变强化可以通过

收稿日期: 2018-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(51661014)、云南省应用基础研究重点项目(2016FA053)、云南省技术创新人才项目(2013HB112)。

第一作者: 张大伟,男,硕士研究生,研究方向: 新型铂基饰品合金的研制。E-mail: 2544620813@qq.com

*通讯作者: 胡昌义,男,博士,研究员,研究方向: 稀贵金属功能材料。E-mail: hcy@ipm.com.cn

控制变形量来提高铂的强度，但是变形量越大，塑性越差，抗力增加，使得加工困难；弥散强化是指在金属基体中还存在第二相或多相，这些相的存在使金属的强度得到提高，但是弥散相多为一些碳化物或金属的氧化物，这些元素也很少应用到饰品材料中。目前铂饰品合金常用的强化方法为固溶强化、时效强化和细晶强化，有时这几种强化方法同时存在，达到共同强化的效果^[1]。

1.1 固溶强化

铂饰品材料应用最广的强化方法是固溶强化，固溶强化是通过融入某种溶质元素来形成固溶体从而达到金属强化的目的。将其它元素添加到铂中形成铂合金，引起晶体点阵发生畸变，使铂的硬度明显提高。与铂原子半径差异越大、熔点差异越大、晶体结构不同的元素，其强化效果越明显^[5]。Biggs 等^[2]报道了不同元素(钨(W)、钌(Ru)、铱(Ir)和钯(Pd)等)添加到铂中对其硬度的影响，如图 1 所示。

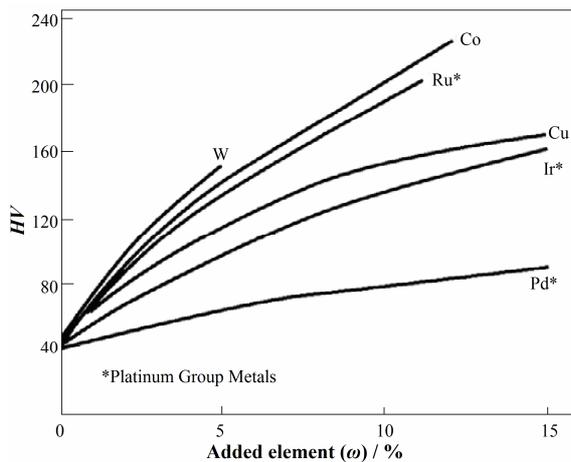


图 1 不同元素添加对铂金硬度的影响^[3]

Fig.1 Effect of different elements on the hardness of platinum

由图 1 可以看出，钨对铂的硬化效果较好，由于 Pt-W 合金具有高熔点和硬度，多用于航空航天材料。铱和钯虽然具有良好的表面光洁度，但是相对质地柔软，在一定程度上限制了它们的应用^[6]。作为饰品材料，目前市场上最常用的添加元素为铜(Cu)、钌、钴(Co)^[6-7]等。

Miller 等^[7]研究发现，对于 Pt-5Cu(质量百分数，下同)合金，添加 5%(质量分数，下同)的铜造成基体晶格畸变，产生固溶强化，使铸态合金的硬度达到 125。Pt-Cu 合金在高温时为连续固溶体，随着铜含量的增加，强化效果明显，但是当含铜量超过 5%

的合金铸造性能变差，合金元素的添加量既要合金具有好的可加工性，又要考虑它的成色，所以在饰品中，一般添加 3%~5%的铜对铂进行固溶强化。Pt-Cu 合金流动性较好，熔点较低且补口材料铜价格便宜，所以一些珠宝制造商优先选择添加铜来增加铂的硬度和强度^[8]。

Okamoto^[9]研究发现，铸态 Pt-5Ru 合金的硬度达到 130，同 Pt-5Cu 合金相比，硬化效果更好，并且晶粒尺寸更加细小和均匀。钌是密排六方结构，添加到铂中具有较高的固溶强化效应，随着钌含量的增加，合金的硬度和抗拉强度显著提高，同时 Pt-Ru 合金拥有极好的白色和抗变色能力，所以 Pt-Ru 合金也多用作饰品材料^[10]。

Huckle^[11]报道钴是铂的强固溶强化元素，钴加入到铂中可以有效地提高合金硬度，同时，Pt-Co 合金是极佳的铸造合金，具有良好的流动性，有利于形状填充和铸造成型。铸态 Pt-5Co 合金硬度达到 135，强度为 450 MPa，随着钴含量增加，硬度提高，如 Pt-10Co 合金硬度可达到 200。Teresa 等^[12]报道 Pt-Co 合金具有很好的铸造性能和耐磨性，在合金内部的孔隙度很低，不易出现缩孔，是一种很好的饰品合金，所以很多珠宝制造商青睐于把钴加入到铂中进行固溶强化。

有些元素虽然能够起到很好的固溶强化效果，但是只能微量添加或限制使用，诸如：1) 有毒或致敏元素(铍(Be)、镍(Ni)、锇(Os))；2) 高活性元素(钛(Ti)、锆(Zr)、钒(V)、铌(Nb)、钽(Ta)、铬(Cr))；3) 易出现生产问题的元素，如易出现热开裂的元素(锗(Ge)、硅(Si))^[13-16]。钛具有很高的固溶强化效应，少量添加到铂中就会有很好的固溶强化效果，但是随着钛含量的增加，在加工过程中易出现铸造开裂等问题。Guan 等^[17]添加 0.3%和 0.5%的钛到铂中，研究不同状态下微量的钛对铂合金的硬度的影响，研究表明，铸态的 Pt-0.3Ti 和 Pt-0.5Ti 的硬度分别达到了 84 和 114，同铸态的纯铂(硬度为 50)相比，其硬度明显提高，并且具有良好的可加工性，这是因为钛和铂电负性具有很大的差异，分别为 1.54 和 2.28，所以微量钛添加到铂中会有较好的硬化效果。赵芽敏^[18]研究 Pt-Ti 合金发现，随着钛含量的增加，强化效果显著，在 1100℃固溶处理后，Pt-0.7Ti 合金硬度达到 118，Pt-1.5Ti 和 Pt-2Ti 合金在固溶处理后硬度甚至分别达到 159.8 和 183.7。

1.2 时效强化

许多铂合金固溶体在适当的温度区间进行低温

时效处理，会析出有序相，产生时效强化。很多固溶强化型合金有时通过时效处理，会使得合金的加工性能、高温力学性能、耐腐蚀性都能得到良好的改善^[19]。

在铂饰品材料中，经常通过时效处理来提高合金的耐磨性、抗腐蚀性和抗氧化性。铂饰品最典型的合金为 Pt-Cu 合金、Pt-Co 合金和 Pt-Ti 合金，图 2 为 Pt-Cu 合金相图，图 3 为 Pt-Co 合金相图。

由图 2 可以看出该合金在高温时为连续固溶

体，低温时(<825℃)会析出 PtCu₃、PtCu 等有序相，产生时效强化，硬度增加。Carelse 等^[20]研究发现，铸态 Pt-5Cu 合金在 100~400℃进行热处理，合金的硬度会进一步增加，这是因为出现了 Pt₇Cu 超晶格结构，部分合金出现了有序转变，产生有序硬化效应，硬度增加。同样，Pt-Co 合金在高温时为连续固溶体，不同的成分和热处理工艺，会产生不同的微观结构。

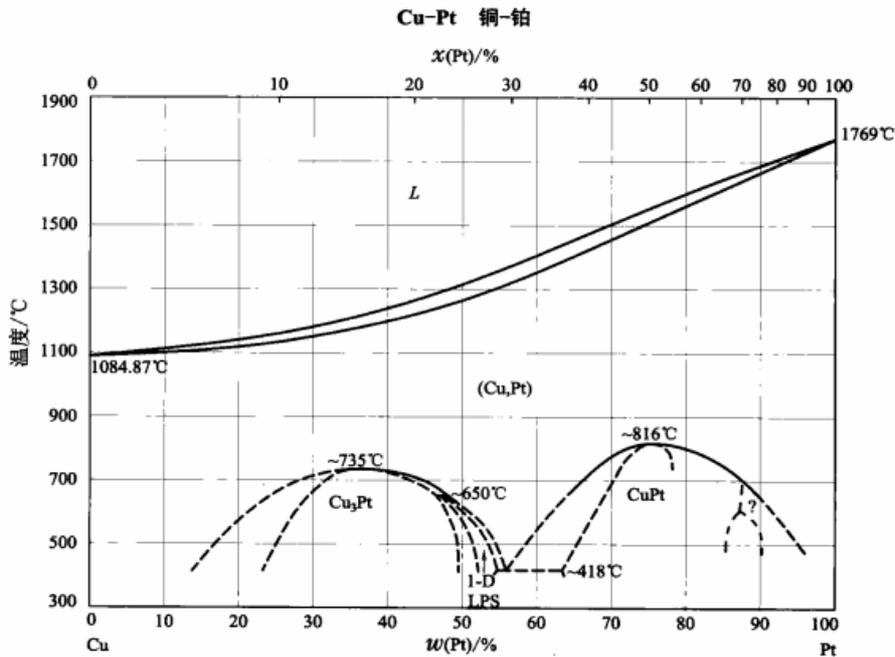


图 2 Pt-Cu 合金相图^[20] Fig.2 Pt-Cu alloy phase diagram

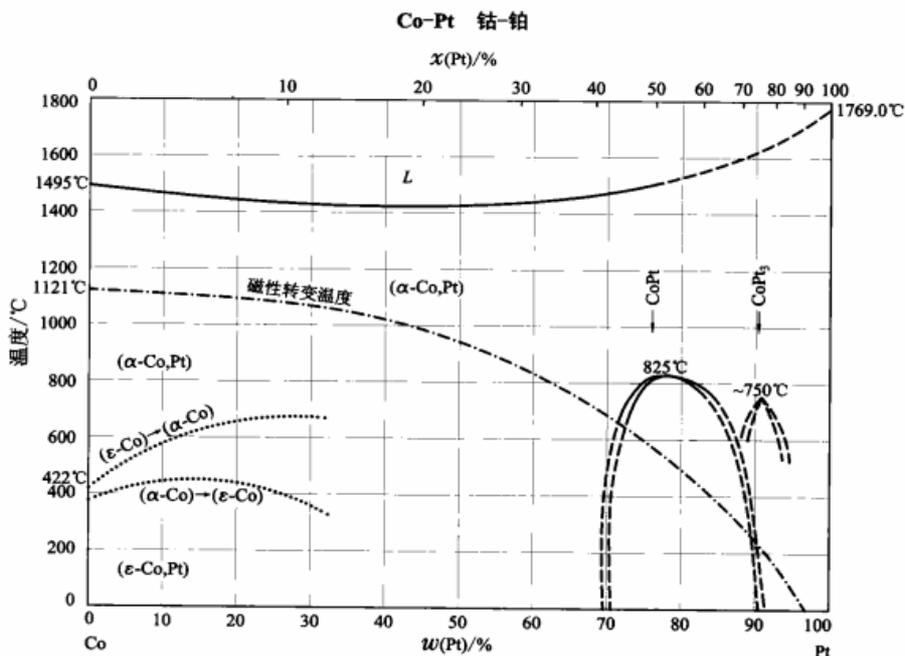


图 3 Pt-Co 合金相图^[21] Fig.3 Pt-Co alloy phase diagram

从图 3 可以看出, 根据成分的不同, 低温时会出现 Pt_3Co 和 PtCo 有序相, 在不同的温度区间发生无序相向有序相的转变, 产生有序硬化效应^[21]。赵芽敏^[18]研究报道 Pt-Ti 合金在 400~800℃进行时效处理, 会析出 Pt_8Ti 有序相, 当位错切过 Pt_8Ti 粒子会产生反相畴界(APB), 阻碍位错运动, 进而导致合金强化。Pt-1.5Ti 合金在 500℃时效处理, 硬度达到 239.8, 相比于固溶态的硬度(159.8)提高了约 50%。Pt-2Ti 合金在 500℃时效处理, 硬度达到 252.9, 相比于固溶态的硬度(183.7)提高了约 38%, 可以看出 Pt_8Ti 有序相析出对 Pt-Ti 合金的强化效果显著。

1.3 细晶强化

细晶强化, 通常是添加少量元素细化晶粒, 从而提高材料的强度和韧性。目前铂饰品的细晶强化主要通过添加稀土(RE)来实现, 由于稀土金属具有细化晶粒、净化熔体、排气及减少氧化夹杂的效果, 所以通常会微量(<1%)添加到铂中, 形成微合金化铂合金^[22-24]。铂的微合金化能够很好的改善饰品的硬度, 同时由于合金元素的含量较低, 能够很好的保持铂的纯度和色泽, 还具有良好的铸造性能、加工性能。在铂中添加稀土金属, 旨在细化铸态合金的晶粒, 或者在退火过程中防止晶粒长大, 保证铂具有较高的硬度。徐成福等^[25]指出, 少量稀土添加到铂中, 会产生多种金属间化合物, 它们在强度、硬度、弹性模量等方面与基体铂存在很大的差异, 从而使基体周围产生极大畸变, 阻碍位错移动, 细化晶粒。徐国富^[26]在铂合金中添加多种稀土元素, 如 0.05%~0.5%的钇、镧等, 发现无论添加何种稀土元素, 其强度和硬度都有所提高, 而其延伸率却有所下降。赵伟彪等^[27]研究了添加微量钇元素到铂中, 分析其微观组织结构的演变规律, 发现添加 0.01%~1%的钇时, 晶粒细化。即使长时间高温处理, 晶粒也不会出现明显的长大, 这是因为 Pt-Y 合金组织中存在许多细碎的小晶粒, 有些聚集到大晶粒的晶界上, 从而阻碍晶粒的长大。Zaremba 等^[28]报道在 Pt-(5~15)Co 中添加 0.01%~1%的金属钇, 使得晶粒细化、铸造性能提高和机械性能改善。添加微量稀土元素, 可以使铂合金的铸造性能、抗氧化性能、耐腐蚀性能得到显著的改善, 因此 Pt-RE 合金被广泛应用于饰品材料领域^[29]。

2 加工工艺强化方式及强化机制

2.1 传统加工工艺强化方式

在 20 世纪之前, 铂金饰品的制作大部分还是通过手加工来完成的。传统的手加工工艺主要包括金属弯曲、压实、锤击和扭转等^[30-32], 这些手加工工艺主要引入的手段是加工硬化。这种强化机制主要是通过晶格变形来提高材料的强度和硬度, 当然这种强化机制很好的满足了当时的工艺和需求。随着现代社会的发展, 要更多地节约成本、减少劳动力, 手加工操作已经不能满足需求。

2.2 现代加工工艺强化方式

2.2.1 铸造和热等静压工艺

现代铂金饰品的加工主要是通过铸造来完成。铸造工艺成本低, 可以生产各种形状的饰品, 工艺简单。但是, 由于铂具有熔点高、凝固时收缩率大、导热系数低、表面张力大、粘度高等一系列热物理性质, 导致铂比银和金更难铸造加工, 因此在铸造过程中经常出现铸造开裂、产生砂孔等问题^[10]。目前对铂合金在不同状态下的凝固行为还不能完全掌握, 通过铸造工艺加工出来的饰品材料也面临一些问题。如铸造出来的材料硬度和强度不高, 远远达不到手加工材料的效果, 即使用高端的铸造设备铸造成型, 合金中依然会出现大量孔隙和夹杂物^[33]。所以, 虽然铸造工艺经济实惠, 操作简单, 但是存在的问题很大程度上影响了铂金饰品的质量。

为了提高铂饰品的质量, 一些珠宝制造商尝试采用热等静压工艺, 提高其硬度和强度。热等静压工艺是将制品放到密闭容器中, 向制品施加各向同等压力, 同时施加高温。在高温高压的作用下, 使制品烧结致密化。有研究^[12]表明, 在经过热等静压(HIP)后, 表面的孔隙度将会出现大幅度的下降, 在这个过程中, 周围的材料会发生塑性流动进入到之前的孔隙中, 发生粘结, 从而消除材料的内部孔隙。经过热等静压后的铂合金硬度大概增加 10~20 左右, 这主要归因于制品的高致密化。

Teresa 等^[34]发现热等静压对铸件的微观结构和机械性能影响较大。鉴于在熔炼过程中, Pt-5Ru 的孔隙度较高, 而 Pt-5Co 的孔隙度较低, 两者在铸造和热等静压条件下的显微组织图像如图 4~5 所示。

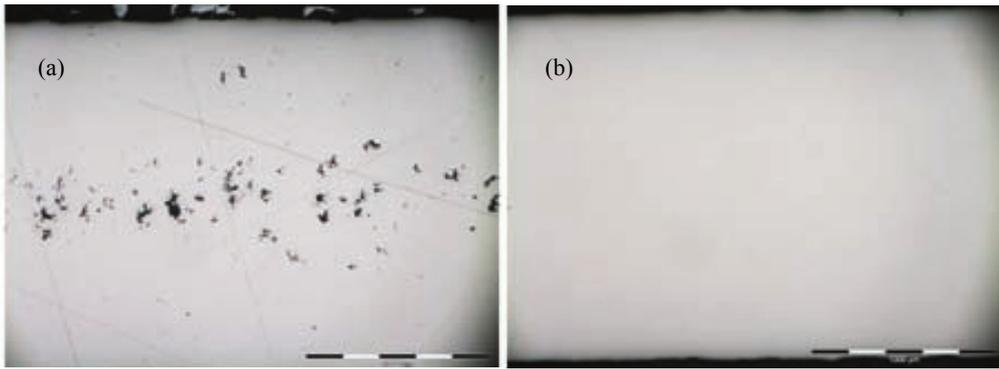


图 4 不同强化状态((a). 铸造; (b). 热等静压)下 Pt-5Ru 合金的显微组织图^[12]

Fig.4 Microstructure of Pt-5Ru alloy in different strengthening states: (a). Casting; (b). Hot isostatic pressing

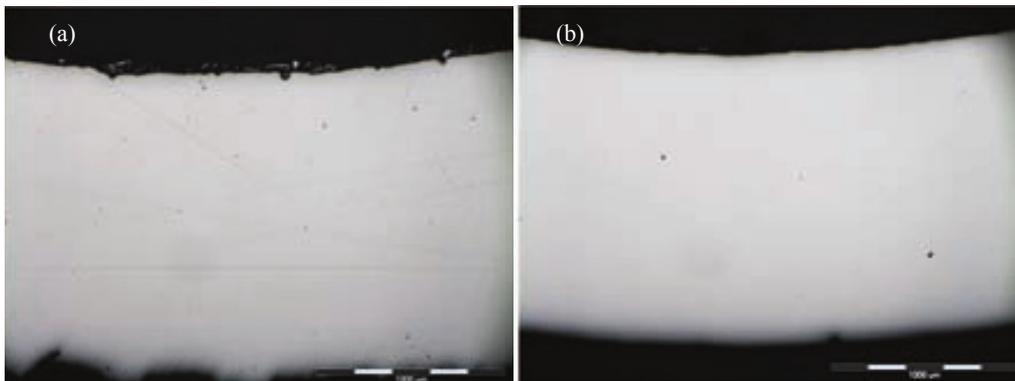


图 5 不同强化状态((a). 铸造; (b). 热等静压)下 Pt-5Co 的合金显微组织图^[12]

Fig.5 Microstructure of Pt-5Co alloy in different strengthening states: (a). Casting; (b). Hot isostatic pressing

对比图 4 和图 5 可以发现，热等静压工艺对 Pt-5Ru 的微观结构改善比较明显，内部的气孔和砂眼基本消失，而铸态 Pt-5Co 合金本身孔隙度较低，热等静压对其改善不明显。

表 1 列出了 Pt-5Ru 和 Pt-5Co 的拉伸性能。从表 1 中可以看出，热等静压后 Pt-5Ru 的延伸率和断面收缩率变化最大。对于 Pt-5Co 合金，在铸态时已经展现出较小的孔隙度和较高的断面收缩率，所以在热等静压后，断面收缩率变化较小。高断面收缩率表明材料具有更好的延展性，这对于饰品来说，可以更好的实现弯曲成型以及饰品中钻石、红宝、蓝宝等的镶嵌。

热等静压工艺可以提高样品的致密度和消除内部缺陷，极大改善制品的性能，所以热等静压工艺将会在饰品材料领域具有巨大的潜力和优势。由于目前铂饰品材料行业仍以铸造为主，如何优化工艺和节约制造成本成为了亟待解决的问题。

2.2.2 表面硬化技术

表面硬化，就是通过适当的方法使材料的表层硬化。作为饰品材料，由于经常与人体肌肤接触摩擦，要求在佩戴时不易产生划痕，耐磨性是判断其

表 1 不同状态下的 Pt-5Ru 和 Pt-5Co 合金拉伸性能测试^[34]

Tab.1 Tensile properties test of Pt-5Ru and Pt-5Co under different conditions

合金	状态	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa	延伸率/%	断面收缩率/%
Pt-5Ru	铸态	225	412	30	55
	热等静压后	236	420	39	87
Pt-5Co	铸态	220	452	36	76
	热等静压后	189	449	38	82

质量好坏的一个重要指标，为了克服纯铂和铂合金饰品表面硬度低和耐磨性差的缺点，可以通过表面硬化加以改善。目前使用比较多的表面硬化技术包括表面硼化、表面氮化、表面金属间化合物涂层及表面扩散等，但是表面硬化易于损害饰品材料本身的表面光泽和质量，同时也增加铂金饰品的制造成本，所以技术问题是制约表面硬化推广发展的关键。

硼(B)与铂的原子半径分别为 0.083 和 0.138 nm，两者相差较大，故硼原子可溶解于铂晶格形成间隙固溶体表面层。中国专利预先使用硼单独或与硅结合扩散并渗入到由铂和铜或者由铂、钨和铜组

成的铂合金表层,从而实现硬化^[35]。Weber 等^[36]发现,经过表面硼化处理后,铂合金表层中晶格间的硼含量可控制在 0.3%~1.5%,硼化层的厚度在 20~500 μm ,硼原子插入到金属晶格中,优先形成间隙混合晶体,尽管没有产生金属间化合物,但是在该表面层中获得了具有非常高硬度的合金。这在很大程度上提高了铂合金的耐磨性和抗划伤能力,同时,硼的渗入浓度不高,不影响铂合金饰品的固有成色。

通过扩散作用,集中引入几种元素到铂的表面形成表面层,也可以实现铂合金的表面硬化和改性。中国专利^[35]通过添加 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 和 ThO_2 中的一种、二种或者多种陶瓷材料,在电炉或感应加热炉中在碳(C)气氛中进行热处理,从而使陶瓷元素中的任意一种、二种或者多种元素通过碳的还原分解作用,扩散到纯铂和铂合金的表层部分,起到表面硬化的结果。该专利还报道了一种表面硬化方法,是通过化学气相沉积(CVD)将金属元素铝、锆、铬和钛扩散并渗入到至少 85%铂的饰品材料中,可在表面形成金属间化合物从而产生硬化^[35]。

3 展望

人类生活水平的日益提高,对铂金首饰材料的强度和硬度提出了更高的要求。目前的强化机制还不能完全满足要求,为更好的研制出优质的铂金饰品,今后的研究工作中,以下内容值得关注:1) 铂金饰品材料力学性能与加工性能的改进;2) 新型强化材料的选用,更好的改善铂饰品的强度和硬度;3) 优化工艺,降低热等静压的成本,研发出最佳性能的铂饰品。

参考文献:

- [1] 宁远涛, 宁奕楠, 杨倩. 贵金属珠宝首饰材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
NING Y T, NING Y N, YANG Q. Precious metal jewelry materials[M]. Beijing: Metallurgical industry press, 2013.
- [2] BIGGS B T, TAYLOR S S, VAN D L E. The hardening of platinum alloys for potential jewellery application[J]. Platinum metals review, 2005, 49(1): 2-15.
- [3] 田家敏, 刘拼拼, 范景莲, 等. 钼合金化的研究现状[J]. 中国钨业, 2008, 23(4): 27-30.
TIAN J M, LIU P P, FAN J L, et al. Research status of molybdenum alloying[J]. China tungsten industry, 2008, 23(4): 27-30.
- [4] 李小甫. 铂材料的强化及其应用[J]. 有色金属工程, 2004, 56(3): 21-25.
LI X F. Strengthening methods and application of platinum materials[J]. Nonferrous metals engineerin, 2004, 56(3): 21-25.
- [5] 扬兴无. 铂材料的强化研究综述[J]. 材料导报, 2003, 17(12): 22-25.
YANG X W. Progress in research on strengthening of platinum materials[J]. Materials review, 2003, 17(12): 22-25.
- [6] KLOTZ U E, DRAGO T. The role of process parameters in platinum casting[J]. Platinum metals review, 2011, 55(1): 20-27.
- [7] MILLER D, KERAAN T, PARKROSS P, et al. Casting platinum jewellery alloys[J]. Platinum metals review, 2005, 49(4): 174-182.
- [8] JACKSON K M, LANG C. Mechanical properties data for Pt-5wt% Cu and Pt-5wt% Ru alloys[J]. Platinum metals review, 2006, 50(1): 15-19.
- [9] OKAMOTO H. Pt-Ru (platinum-ruthenium)[J]. Journal of phase equilibria & diffusion, 2008, 29(5): 471.
- [10] MEHMOOD S, KLOTZ U E, POTTLAGHER G. Thermophysical properties of platinum-copper alloys[J]. Metallurgical & materials transactions A, 2012, 43(13): 5029-5037.
- [11] HUCKLE J. Choosing platinum alloys to maximize production efficiency[J]. Platinum manufacturing process, 1995, 1(1): 2-6.
- [12] TERESA F, JOERG F B. Platinum alloys in the 21st century: A comparative study[C]. The Santa Fe symposium on jewelry manufacturing technology. 2011: 201-230. http://www.techformcasting.com/wp-content/uploads/2015/01/PtAlloys_SantaFe2011.pdf
- [13] GAO Y, GUO C, LI C, et al. Thermodynamic modeling of the Pt-Zr system[J]. International journal of materials research, 2013, 101(7): 819-826.
- [14] 宁远涛. 贵金属-稀土合金的结构、性能和新材料研究[J]. 贵金属, 1994, 15(2): 61-71.
NING Y T. Research on structure, properties and new materials of RE-precious metal alloys[J]. Precious metals, 1994, 15(2): 61-71.
- [15] 中山公晶. 铂合金及其制作方法: CN 105266291A[P]. 2016-01-27.
NAKAYAMA G G. Platinum alloy and manufacturing method: CN 105266291A[P]. 2016-01-27.

- [16] 康玉霜, 陶瑛, 娄六红, 等. 首饰中有害元素限量及测定[J]. 中国宝玉石, 2015(1): 132-134.
KANG Y S, TAO Y, LOU L H, et al. Limits and determination of harmful elements in jewelry[J]. Chinese gemstone, 2015(1): 132-134.
- [17] GUAN Y M, XU S Y, GUO J X, et al. Hardening behavior of Pt-Ti microalloys[J]. Journal of alloys & compounds, 2015, 645(1): 34-37.
- [18] 赵芽敏. Pt-Ti 合金组织和力学性能的研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
ZHAO Y M. Study on microstructure and mechanical properties of Pt-Ti alloy[D]. Kunming: Yunnan University, 2016.
- [19] CORNISH L A, CHOWN L H. Platinum-based alloys and coatings: materials for the future?[M]. Advances in gas turbine technology, Ernesto Benini, IntechOpen, 2011: 337-370. DOI: 10.5772/19886. Available from: <https://www.intechopen.com/books/advances-in-gas-turbine-technology/platinum-based-alloys-and-coatings-materials-for-the-future>
- [20] CARELSE M, LANG C I. Order hardening in platinum 14 at.% copper[J]. Scripta materialia, 2006, 54(7): 1311-1315.
- [21] GREEBERG B A, KRUGLIKOV N A, RODIONOVA L A, et al. Optimised mechanical properties of ordered noble metal alloys[J]. Platinum metals review, 2003, 47(2): 46-58.
- [22] 宁远涛. 银[M]. 长沙:中南大学出版社, 2005.
NING Y T. Silver[M]. Changsha: Central South University Press, 2005.
- [23] 赵怀志, 宁远涛. 金[M]. 长沙:中南大学出版社, 2003.
ZHAO H Z, NING Y T. Gold[M]. Changsha: Central South University Press, 2005.
- [24] CORTI C W. Metallurgy of microalloyed 24 carat golds[J]. Gold bulletin, 1999, 32(2): 39-47.
- [25] 徐成福, 顾正飞, 林远艳, 等. 稀土 RE-Pt 材料的应用与研究进展[J]. 金属功能材料, 2009, 16(1): 45-48.
XU C F, GU Z F, LIN Y Y, et al. Progress of application and research of rare-earths-platinum materials[J]. Metal functional materials, 2009, 16(1): 45-48.
- [26] 徐国富. 稀土在贵金属铂及其合金中的作用和应用[J]. 稀有金属与硬质合金, 1993(4): 54-59.
XU G F. The function and application of rare earth to platinum and its alloys[J]. Rare metals and cemented carbides, 1993(4): 54-59.
- [27] 赵伟彪, 陶正炎. 含微量 Y,Zr 的 Pt 合金的组织结构[J]. 贵金属, 1992, 13(3): 17-21.
ZHAO W B, TAO Z Y. Microstructure of platinum alloy with microamount of yttrium and zirconium[J]. Precious metals, 1992, 13(3): 17-21.
- [28] ZAREMBA V I, RODEWALD U C, LUKACHUK M, et al. Transition metal centered trigonal prisms as building units in various rare earth-transition metal-indides[J]. Monatshefte für chemie, 2006, 137(3): 249-261.
- [29] 赵昆渝, 黎鼎鑫. 微量稀土元素对铂再结晶温度及组织的影响[J]. 云南工业大学学报, 1990(3): 15-23.
ZHAO K Y, LI D X. Effect of trace rare earth elements on recrystallization temperature and microstructure of platinum[J]. Journal of Yunnan Polytechnic University, 1990(3): 15-23.
- [30] 杨超, 李飞. 首饰加工与制作工艺[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2013.
YANG C, LI F. Jewelry processing and manufacturing process[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2013.
- [31] 黄云光. 首饰制作工艺学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2005.
HUANG Y G. Jewelry making technology[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 2005.
- [32] 袁军平, 王昶, 郭文显, 等. 依靠现代技术提升首饰加工产业[J]. 黄金, 2011, 32(6): 5-8.
YUAN J P, WANG C, GUO W X, et al. Promoting the traditional jewelry manufacturing industry by means of modern Technology[J]. Gold, 2011, 32(6): 5-8.
- [33] KLOTZ U E, DRAGO T. The role of process parameters in platinum casting[J]. Platinum metals review, 2011, 55(1): 20-27.
- [34] TERESA F, JOSEPH T S, JOERG F B, et al. The effects of hot isostatic pressing of platinum alloy castings on mechanical properties and microstructures[J]. Johnson matthey technology review, 2015, 59(3): 207-217.
- [35] 村田敬昭. 硬化的铂装饰制品: CN 1760403[P]. 2006-04-19.
KEISHO M. Hardened platinum ornament: CN 1760403 [P]. 2006-04-19.
- [36] WEBER W, ZIMMERMANN K, BEYER H H. Surface-hardened objects of alloys of platinum and palladium and method for their production: US 5518556[P]. 1996-03-27.