

白色开金的色度参数和白色分级

宁远涛

(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: 评述了合金元素对 Au 的漂白效果和机制, 介绍了白色开金的几种色度参数, 如 CIE-L a*b* 色度参数和颜色盒, CIE-LAB-C-H-L 米制色度参数和基于 CIE-XYZ 色度参数的 ASTM D1925 黄色指数 YI , 讨论了某些白色开金的色度参数与冶金学特征。基于金合金的漂白效应与合金成分的密切关系, ASTM D1925 黄色指数 YI 为设计白色开金成分提供了基本的指南。

关键词: 金属材料; Au 合金; 白色开金; 色度参数; 色度图

中图分类号: TG146.3⁺¹ **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2013)02-0071-07

The Chromatic Parameters and Color Grading of White Gold Alloys

NING Yuantao

(State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals,
Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: The bleaching effects and mechanism of alloying elements to gold were reviewed. The several chromatic parameters, such as CIE-L a*b* chromatic parameters, CIE-LAB-C-H-L metric chromatic parameters and ASTM D1925 Yellowness Indexes, for determining the whiteness of jewelry gold alloys were introduced. The chromatic parameters and metallurgical features were discussed. Based on the closer relations between the bleaching effects and alloying components, ASTM D1925 Yellowness Indexes could provide a basic guide for designing white jewelry carat gold alloys.

Key words: metal materials; gold alloys; white carat jewelry alloys; chromatic parameters; chromatic

在文献[1]中, 作者评述和讨论了 Au-Ag-Cu 系彩色开金合金的颜色与色度图, 本文评述和讨论白色开金和其它白色贵金属合金的“白色度”指数和它们的色度坐标。

1 合金元素对 Au 的漂白作用

1.1 Ni、Pd 对 Au 的漂白效果

有许多元素对 Au 具有漂白作用, 其中最典型的元素是 Ni 和 Pd。由于 Ni、Pd 是过渡金属, 当它们加入单价贵金属 Au 中并与之合金化时会产生所

谓的“真实束缚态”, 并造成相对宽化的吸收峰, Au-Ni 合金最大吸收峰相应的能量为 0.8 eV, Au-Pd 合金相应为 1.7 eV, 低于纯 Au 反射黄光的电子跃迁能 2.3 eV^[2]。这样, 含 Ni 或含 Pd 的富 Au 的合金在更低能态产生光吸收过程, 降低了可见光谱低能波段的反射率(图 1^[2]和图 2^[3]), 使金的黄色主色调逐渐变淡。富 Ni 或富 Pd 合金直至纯 Ni 与纯 Pd 金属, 合金的反射率曲线变为平滑曲线, 在光谱全波段都有较高的反射率, 合金变成白色, Au 的黄色完全被漂白。

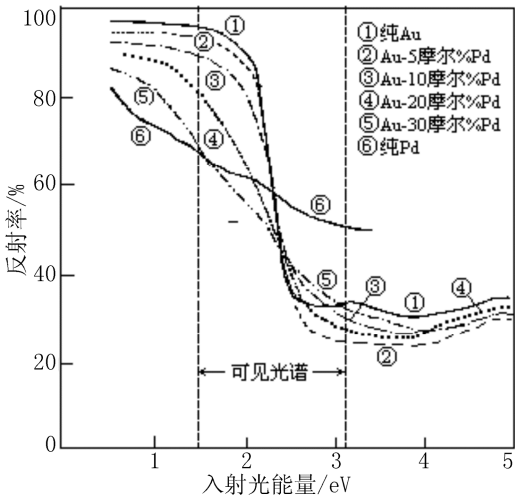


图 1 Au-Pd 合金的反射率与入射光能量的关系

Fig.1 Relationship of reflectivity of Au-Pd alloy with energy of the incident ray

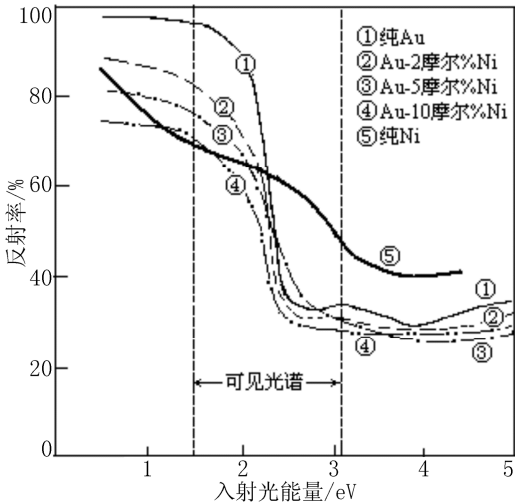


图 2 Au-Ni 合金的反射率与入射光能量的关系

Fig.2 Relationship of reflectivity of Au-Ni alloy with energy of the incident ray

1.2 合金元素对 Au 漂白作用的评述

基于合金元素对Au的反射率和颜色的影响,对Au合金产生褪色或漂白作用的元素有很多,如Ag、Al、Co、Cr、In、Fe、Mg、Mn、Nb、Ni、Pd、Pt、Si、Sn、Ta、Ti、V、Zn等^[3-6]。从满足白色开金装饰材料对颜色的要求而言,主要漂白剂为Ag、Fe、

Ni、Pd和Pt,次要漂白剂有Cr、Co、In、Zn等。表1列出了这些合金元素对Au的漂白能力和冶金学特性的评价,可见Ag、Pd、Pt、Ni、Fe、Mn等是具有好漂白能力的元素,它们加入Au和Au合金中为发展白色开金合金奠定了基础。

表 1 合金元素对 Au 的漂白能力和冶金特性的评价

Table 1 The bleaching effects and metallurgical features of alloying elements to gold

元素	漂白能力	冶金特性(组元成分为质量分数%)
Ag	较好	低浓度增大合金亮度, 适中浓度有好漂白效果, 高浓度 Ag 增大硫化暗晦倾向。
Pd	非常好	低浓度有轻度漂白效果, > 10% Pd 有极好漂白效果; Pd 价格高, 增加合金成本。
Pt	非常好	漂白能力类似 Pd, Pd 和 Pt 升高合金液相线温度; Pt 价格高, 增加合金成本。
Ni	好	低浓度漂白能力不足, 14% Ni 有好漂白效果; 高浓度 Ni 对皮肤有过敏性, 并导致合金硬化和增大合金脆性。
Cr	好	升高固相线温度, 2% Cr 对颜色无影响, 13% Cr 有优良漂白效果, 降低可加工性。
Fe	好	易氧化, 耐蚀性差, 16% Fe 有好漂白效果; 高 Fe 浓度合金导致高硬化和难加工, 赋予合金磁性; 与 Pd 匹配漂白效果更好。
Mn	好	强氧化剂, 高于 10% Mn 显示高活性和高应力腐蚀倾向; 与 Pd 匹配漂白效果好。
In	中等	2% In 对颜色无影响, ≈5.5% In 有适中漂白能力, 高浓度造成高硬化和低可加工性。
Sn	中等	低浓度有弱漂白, ≈5% Sn 有适中漂白能力, 增大合金脆性倾向。
Zn	中等	<2% Zn 改善熔模铸造性能, ≈6% Zn 有适中漂白能力, 高浓度造成大的氧化挥发和失重, 增大淬裂倾向和不利于铸造。
Al	弱	1.5% Al 有轻度漂白作用, 强氧化物生成剂, 损害合金加工性。
Co	弱	1.5% Co 有轻度漂白作用, 升高合金固相线温度和增高硬度, 对皮肤有过敏性。
Ti	弱	1.3% Ti 有可察觉的漂白作用, 强氧化物生成剂, 损害合金加工性。
Ta、Nb	弱	升高液相线温度, 7.4% Ta 有可察觉的漂白作用, 高活性元素使其应用困难。
V	弱	低浓度无漂白, 25% V 有强漂白效果; 高毒性、高活性、强氧化性、损害加工性。

2 白色开金的CIE-L a*b*色度参数和颜色盒

根据国际照明委员会(CIE)于 1976 年采用的 CIE-LAB 色度参比体系, 建立了以 L^* 、 a^* 和 b^* 为坐标建立的 CIE-LAB 三维图^[7], 这里以 L^* 表示亮度, 其值从 0 到 100: L^*0 表示样品完全不反射光, 即为黑色; L^*100 表示样品反射全部入射光, 即为白色。 a^* 坐标表示试样颜色中绿色或红色的强度, 称为红-绿坐标: a^*-100 表示全绿色, a^*100 表示全红色。 b^* 坐标表示试样颜色中蓝色或黄色的强度, 称为黄-蓝坐标: b^*-100 表示全蓝色, b^*100 表示全

黄色。 a^* 和 b^* 坐标的交点表示白色。一个试样的颜色在此三维图中确定为一点, 它可分布在任何象限。图 3^[8]显示了在 CIE-L a*b* 色度坐标图中标准 Au 合金的颜色分布, 它将 Au 合金的颜色分成了几个区域, 形成了绿色、黄色、红色、粉红色和白色区即颜色盒, 颜色盒之间过渡区内的坐标点则是 2 种颜色的混合色。可以看出, 白色 Au 合金的 a^* 、 b^* 坐标值介于 $-3 < a^* < +3$ 和 $b^* < 15$ 的盒内, 其中好白色区的 a^* 、 b^* 坐标值介于 $-2 < a^* < +2$ 和 $b^* < 10$ 的盒内。根据这个颜色盒形成了一个判据: 一个白色 Au 合金的 CIE-L a*b* 色度参数必须是 $L^* > 75.0$, $-3 < a^* < +3$ 和 $b^* < 15$ 。

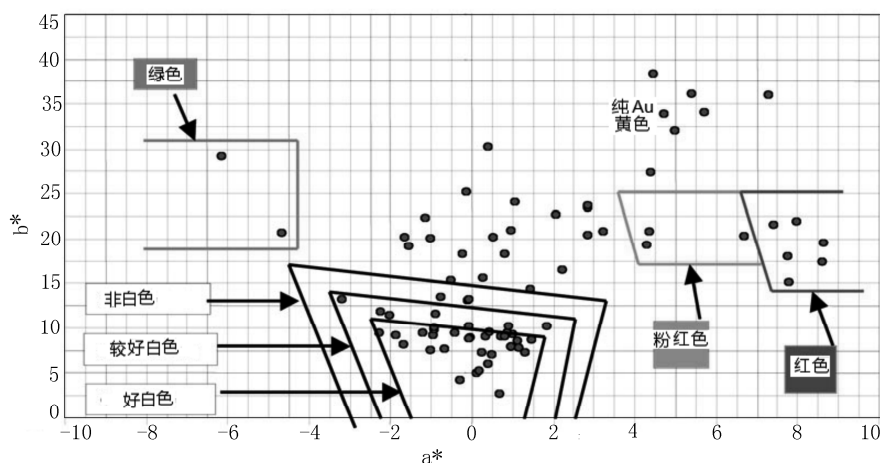


图3 在 CIE-L a*b* 色度坐标图中标准 Au 合金的颜色分布(颜色盒)

Fig.3 The color boxes in CIE-L a*b* coordinates, a^* vs b^* , for all standard color gold alloys

3 白色开金的 CIE-LAB-C-H-L 米制色度参数

3.1 白色开金的米制色度参数

CIE-L a*b* 色度坐标系的极坐标称为米制色度坐标 CIE-LAB-C-H-L, 它用 H 、 C 和 L 三个参数表示合金的颜色或颜色饱和度(图 4^[9])。参数 C 为合金所在位置点至坐标原点的距离, 称为米制色度参数, 它直接表示偏离白色的程度; 参数 H 是在米制色度坐标图中合金所在位置点与 a 轴的夹角, 表示偏离光谱红色的程度, 称为米制色调角度; L 表示亮度, 其值变化于 0(黑色)和 100(白色)之间(L 坐标在图 4 中未显现)^[8]。米制色度坐标系可以用于表述所有 Au 基合金以及介于纯 Au 黄色和白色之间所有合金的颜色。

因为纯 Au 黄色的 C 值为 37.9, 故所有开金合

金的米制色度 C 值介于 0~37.9 之间。一个好的白色开金的米制色度 C 值应尽量小, 如 $C=0$ 为纯白色, $C < 6$ 则为极好的白色, $C < 9$ 为好白色, 若 $C > 9$ 则为灰白色。由图 4 可见, 白色开金的 H 值介于 $82^\circ \sim 86^\circ$ 之间, L 介于 83~85, C 值应小于 9。这样的开金才被珠宝工业界接受为“好白色开金”。

3.2 Au-Pd(Ni, Fe)白色开金的 CIE-LAB 米制色度图

由表 1 已知, Pd、Ni、Fe 等元素对 Au 具有好的漂白能力。为了开发好的白色开金合金, 有必要讨论这几个元素与 Au 所形成的二元合金的结构、性能和漂白效果。

Au-Pd 合金为单相固溶体, 含有相对低浓度 Ni 或 Fe 的合金也为单相固溶体, 而含有高浓度 Ni 或 Fe 的合金为两相合金。图 5^[10]显示了上述合金的硬化效应, 随着合金中 Pd、Ni、Fe 的浓度增高, Au

合金的硬度值明显升高。图 6^[10]显示了 Au-Pd、Au-Ni、Au-Fe 合金的 CIE-LAB 米制色度坐标图, 随着合金中 Pd、Ni、Fe 的摩尔含量增高, Au 合金的米制色度 C 值和亮度 L 值降低, 米制色调角 H

值则相应减小或增大。比较这 3 个二元 Au 合金可见, Au-Pd 合金的米制色度值、亮度值和硬化效应都低于 Au-Ni 和 Au-Fe 合金。

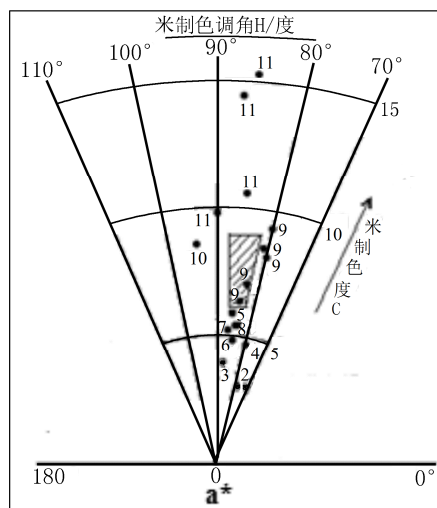


图 4 CIE-LAB-C-H-L 米制色度坐标和某些白色合金的分布(表中序号合金的成分见表 3)

Fig.4 CIE-LAB-C-H-L metric chromatic parameters and distribution of some white gold alloys

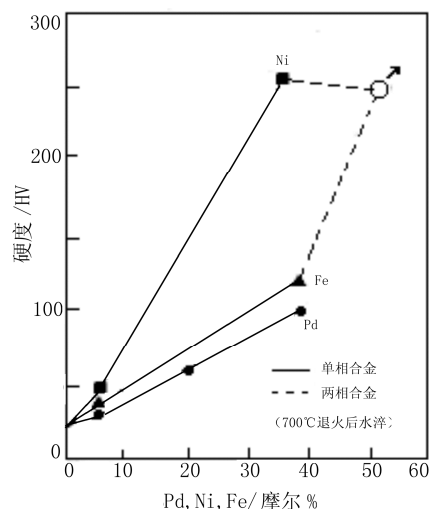


图 5 Au-Pd、Au-Ni 和 Au-Fe 合金的硬化效应
Fig.5 Hardening effects of Au-Pd, Au-Ni and Au-Fe alloys

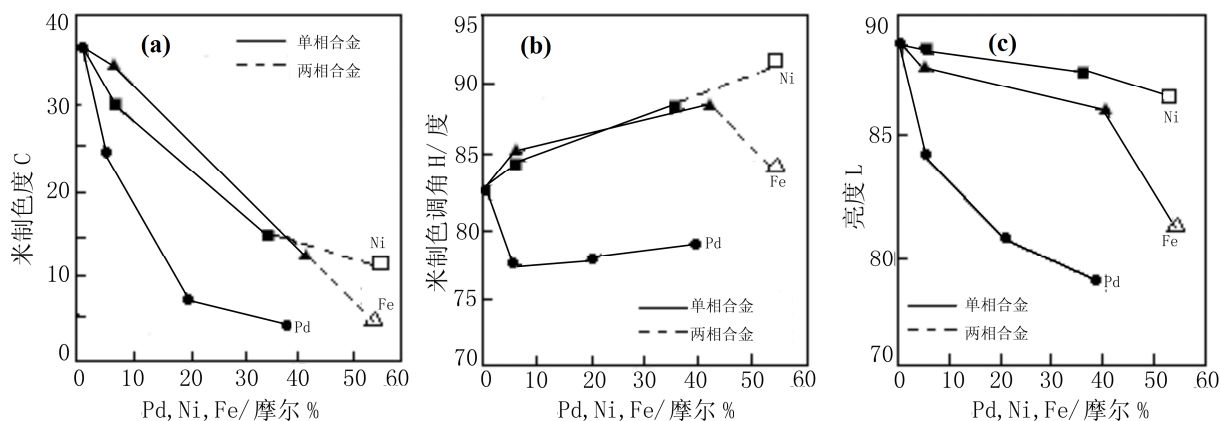


图 6 Au-Pd、Au-Ni 和 Au-Fe 合金在 CIE-LAB-C-H-L 色度坐标系中的米制色度参数

[(a) 米制色度参数 C ; (b) 色调角 H ; (c) 亮度 L]

Fig.5 CIE-LAB-C-H-L metric chromatic charts of Au-Pd, Au-Ni and Au-Fe alloys

[(a) metric chromatic parameter C ; (b) metric hue angle H ; (c) lightness L]

表 2^[10]列出了包括 Au-Pd、Au-Ni、Au-Fe 合金的米制色度参数值。18K Au-Pd 合金有小的米制色度值($C=4.83$), 因而具极好白色, 但它的色调角(H)和亮度(L)低于纯 Au, 这使它的色调略偏向红色。

18K Au-Fe 也显示好的白色($C<6$), 18K Au-Ni 显示灰白色($C>9$), 它们的色调角比 Au 增大使其色调偏向黄色。由于 18K Au-Fe 和 18K Au-Ni 含有高摩尔百分数 Fe 和 Ni, 它们有两相结构并具有高硬度,

同时也有高的氧化倾向，因而实用性较小。这表明 Pd 对 Au 既具有好的漂白作用，又具有适中的强化效果，这正是珠宝饰品所需要的特性。

表 2 Au-Pd、Au-Ni、Au-Fe 合金的 CIE-LAB-C-H-L 米制色度参数值
Table 2 CIE-LAB-C-H-L metric chromatic parameters of Au-Pd, Au-Ni and Au-Fe alloys

序号	合金成分 $W_B/\%$	合金成分 $X_B/\%$	米制彩度 C	色调角 H	亮度 L
1	100Au	100Au	37.90	82.5	88.8
2	97.2Au-2.8Pd	95Au-5Pd	24.00	77.2	84.3
3	88.2Au-11.8Pd	80.1Au-19.9Pd	7.07	77.6	81.0
4	75Au-25Pd	61.8Au-38.2Pd	4.83	78.9	79.0
5	98.5Au-1.5Ni	95Au-5Ni	30.12	84.6	88.5
6	86Au-14Ni	64.7Au-35.3Ni	15.03	89.0	87.6
7	75Au-25Ni ^①	47.2Au-52.8Ni	11.19	92.0	86.6
8	98.5Au-1.5Fe	95Au-5Fe	35.47	85.3	87.9
9	86Au-14Fe	59.8Au-40.2Fe	13.69	89.5	86.7
10	75Au-25Fe ^①	46Au-54Fe	4.15	84.3	81.2

[注] ① 两相合金。

3.3 某些商业白色开金的 CIE-LAB-C-H-L 米制色度参数

图 4^[8]中显示了某些商业白色金属与合金的数据点和分布区，图中各序号合金的成分及其米制色度参数值列于表 3^[8-9]。Ag 镀 Rh 和 Ni 镀 Rh 层具

有最低的 C 值和最好的白色；4~10 号合金是含有 Pd、Fe、Ni 组分的三元或四元 18K Au 合金，都是单相合金，也具有好的白色($C<6$)。11 号商业 18K 合金的色度 C 值都大于 9，是呈灰白色的普通商业白色开金合金。

表 3 贵金属商业白色合金的 CIE-LAB-C-H-L 米制色度参数值
Table 3 CIE-LAB-C-H-L metric chromatic parameters of some commercial white gold alloys

序号	合金成分 $W_B/\%$	米制彩度 C	色调角 H	亮度 L
1	Ag 镀 Rh	3.01	77.0	89.0
2	Ni 镀 Rh	2.96	74.8	89.1
3	95Pt-5Cu	3.92	87.6	87.0
4	75Au-25Pd	4.83	78.9	79.0
5	75Au-10Pd-15Ni	5.77	85.0	82.9
6	75Au-10Pd-15Fe	4.80	84.6	83.4
7	75Au-10Pd-10Ni-5Fe	5.20	87.1	84.3
8	75Au-10Pd-10Fe-5Ni	5.33	84.8	83.4
9	商业富 Pd18K 白色开金	6~9	82~88	—
10	商业富 Ni18K 白色开金	≈9	≈93	—
11	其它商业 18K 白色开金	>10	85~90	—

图 4 中画影线的区域包含有一系列含 Pd 的多元商业 18K 白色 Au 合金，其成分的质量分数范围是(%)：75Au-10Pd-(5~10)Fe-(0~10)Ni-(0~10)Ag-(0~5)Zn，实质上是在表 3 中 7、8 号合金成分基础上通过添加 Ag、Zn 等其它组元改性的多元 18K 白色开

金，它们的米制色度坐标 $C<9$ ，具有好的白色，是一类具开发前景的白色开金合金区。由此可见，发展较低 Pd 含量(如 10% Pd)的 18K 白色合金不仅具有好的白色与硬度的结合，而且可以节约 Pd 用量和降低成本。

4 白色开金合金的黄色指数和白色分级

虽然 CIE-LAB-C-H-L 米制色度参数可以用来分析和比较各种白色金属的颜色饱和度,但珠宝工业对白色金属的“白色”并无严格的法律定义。为了对白色金属的“白色”建立一个可以被接受的分级标准,基于英国和美国的特别工作组的工作,珠宝工业界决定采用美国材料试验学会(ASTM)建立的“黄色指数 YI ” (Yellowness Index D:1925)作为鉴别“白色”分级的标准。当使用国际照明委员会 CIE 系统的标准照明体“C”和 1931CIE 2° 视场的标准观察者测量颜色时,ASTM D1925 的黄色指数按下式计算^[8]:

$$YI_{D1925} = [100(1.28X_{CIE} - 1.06Z_{CIE})]/Y_{CIE} \quad (1)$$

式中 X 、 Y 、 Z 是通过 CIE-XYZ 系统测定的被检测物体的颜色三刺激值(参见文献[1,3,7])。

ASTM D1925 标准最初是对颜料和塑料建立的,在应用到白色开金合金时,需要采用特制的抛光平板试样并在分光光度计上测量试样的 X 、 Y 、 Z 三刺激值,然后按(1)式计算黄色指数 YI 。根据 ASTM D1925 黄色指数“ YI ”值的大小可将白色金属的“白色”分为三级: $YI < 19$ 时定义为一级白(纯白色),白色金属无需镀 Rh; YI 值介于 19.0~24.5 时,定义为二级白(标准白色),白色金属不强制镀 Rh; YI 值介于 24.5~32.0 时,定义为三级白(灰白色),白色金属必须镀 Rh; $YI > 32$ 时为非白色合金(见表 4)。因此,白色金属的“ YI ”值越接近于零,其颜色越白;只有当“ YI ”值低于 32.0 时,才被珠宝工业界承认和接受为用于制造珠宝饰品的白色金属或“白色开金”。

表 4 ASTM D1925 黄色指数和白色分级

Table 4 ASTM D1925 Yellowness Indexes and whiteness

grading				
分类	纯白色 (一级)	标准白色 (二级)	灰白色 (三级)	非白 色
黄色指数 YI 值	<19.0	19.0~24.5	24.5~32.0	>32
镀 Rh 要求	无需镀 Rh	不强制镀 Rh	必须镀 Rh	—

5 白色开金设计的指导原则

白色开金的黄色指数与合金成分有密切关系。

因此,“ASTM D: 1925 黄色指数”为设计与制造特别级别的白色开金的成分选择提供了基本的但非权威的指南。根据英国伯明翰检验机构的工作,达到特定白色开金的成分设计讨论如下^[8, 11]。

(1) 22K 合金: 由于在 22K 合金中 Au 含量达到 91.7% 高值,因而发展高级别白色开金的余地很小,即使含有 8.3% Pd 的 22K 合金也只能产生三级灰白色,其平均 YI 值=29.336。

(2) 18K 合金: 18K 合金含有 75% Au, 添加不同漂白元素可以达到不同级别白色。

一级白色开金:

方案 1: 75% Au+至少 17.5% 漂白元素(其中 13.5% 应为主要漂白元素,其余为次要漂白元素)+7.5% 其它合金化元素,这里主要漂白元素为 Pd 或 Ni 或 Pd+Ni。

方案 2: 75% Au+至少 24.5% 漂白元素(其中 17% 应为主要漂白元素,其余为次要漂白元素)+0.5% 其它合金化元素。

二级白色开金: 75% Au+至少 19.5% 漂白元素(其中 7.4% 应为主要漂白元素,其余为次要漂白元素)+5.5% 其它合金化元素。

(3) 14K 合金: 14K 合金的 Au 含量为 58.5% Au。

一级白色开金: 58.5% Au+至少 26.5% 漂白元素(其中 16.5% 应为主要漂白元素,其余为次要漂白元素)+15% 其它合金化元素。

二级白色开金: 58.5% Au+至少 22.5% 漂白元素(其中 12% 应为主要漂白元素,其余为次要漂白元素)+19% 其它合金化元素。

(4) 9K 合金: 9K 合金的 Au 含量为 37.5% Au, 以 Ag 作为主要漂白元素。

一级白色开金: 37.5% Au+至少 62% 漂白元素+0.5% 其它合金化元素。

二级白色开金: 7.5% Au+至少 45% 漂白元素+17.5% 其它合金化元素。

低开金中的 Ag 可以用其它漂白元素替换,达到类似漂白效果的替换量大体为: 1% Ag $\approx$ 1% Zn $\approx$ 0.6% Ni 或 Pd。

基于主要漂白元素的作用不同,一般地说,含有高 Pd 的白色开金通常为一级纯白色;含有高 Ni 的白色开金通常为二级标准白色;含有低 Ni 或低 Pd 的许多商业白色开金通常归类为三级灰白色;低开金以 Ag 作为主要漂白元素,可以产生二级白色,若添加适量 Pd,还可以制造一级白色低开金。表 5^[11-12]列出了 9~22K 白色开金黄色指数 YI 。22K 合

金一般为灰白色甚至非白色；14~18K 合金视其合金组元类型和含量不同，可产生 1~3 级白色；以 Ag 作为主要漂白元素的低开金可以产生二级白色，若添加适量 Pd，还可以制造一级白色低开金。

表 5 9~22K 白色开金黄色指数 *YI* 和白色等级
Table 5 Yellowness Indexes *YI* and whiteness grades of 9~22K white gold alloys

合金代码 ^①	合金成分 <i>Wx</i> /%	密度/(g/cm ³)	黄色指数 <i>YI</i> (最好值)
9K Ag+Pd 白色开金	37.07Au-10.57Ag-20.1Cu-32.44Pd	—	16.6119(一级白色)
9K Ag 白色开金	33.32Au-66.68Ag	11.9	22.501(二级白色)
14K Ni 白色开金	58.5Au-2Ag-13Ni + 26.5 贱金属	12.9	21.26(二级白色)
14K Ag+Pd 白色开金	58.5Au-19Ag-16Pd + 6.5 贱金属	14.6	15.16(一级白色)
18K Ni 白色开金	75Au-14Ni + 11 贱金属	14.8	16.36(一级白色)
18K Pd 白色开金	75Au-14Pd + 11 贱金属	15.9	13.02(一级白色)
22K Pd 白色开金	91.7Au-8.3Pd	—	29.336(三级白色)
22K Ag 开金	91.67Au-2.76Ag-5.57Cu	—	38.634(非白色)

[注] ①表中 Ag、Ni、Pd 和 Ag+Pd 白色开金是以 Ag、Ni、Pd 和 Ag+Pd 作为主要漂白元素的白色开金。

6 结语

(1) 在 CIE-L a*b*色度坐标系中，白色开金的 CIE-L a*b*色度参数为： $L^*>75.0$ ， $-3<a^*<+3$ 和 $b^*<15$ 。

(2) 在 CIE-LAB-C-H-L 米制色度坐标系中，白色开金的 *H* 介于 82°~86° 之间，*L* 介于 83~85，*C* 值应小于 9。

(3) 基于 CIE-XYZ 色度参数的 ASTM D1925 黄色指数 $YI=[100(1.28X_{CIE}-1.06Z_{CIE})]/Y_{CIE}$ 。根据黄色指数“*YI*”值的大小可将白色金属的“白色”分为三级：*YI*<19 时定义为一级白(纯白色)，白色金属无需镀 Rh；*YI* 值介于 19.0~24.5 时，定义为二级白(标准白色)，白色金属不强制镀 Rh；*YI* 值介于 24.5~32.0 时，定义为三级白(灰白色)，白色金属必须镀 Rh；*YI*>32 时为非白色合金。

(4) Pd、Ni 和 Ag 是 Au 的主要漂白元素，即是白色开金的主要组成元素。含有高 Pd 的白色开金通常为一级纯白色；含有高 Ni 或高 Ag 的白色开金通常为二级标准白色；含有低 Ni 或低 Pd 的许多商业白色开金通常归类为三级灰白色。

参考文献：

[1] 宁远涛. Au-Ag-Cu 系开金合金的颜色与色度图[J]. 贵金属, 2012, 33(3): 65-72.

[2] Saeger K E, Rodies J. The colour of gold and its alloys[J]. Gold Bulletin, 1977, 10(1): 10-14.

[3] Roberts E F I, Clarke K M. The colour characteristics of gold alloys[J]. Gold Bulletin, 1979, 12(1): 9-19.

[4] Benner L S, Suzuki T, Meguro K, et al. Precious metals science and technology[M]. Austin in U.S.A: The International Precious Metals Institute, 1991.

[5] 赵怀志, 宁远涛. 金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003.

[6] O'Connor G P. Improvement of 18 carat white gold alloys [J]. Gold Bulletin, 1978, 11(2): 35-39.

[7] Cretu C, Lingen Van Der E. Coloured gold alloys[J]. Gold Bulletin, 1999, 32(4): 115-126.

[8] Henderson S, Manchanda D. White gold alloys: colour measurement and grading[J]. Gold Bulletin, 2005, 38(2): 55-67.

[9] Agarval D P, Raykhtsaum G, Markic M. In search of a new gold[J]. Gold Technology, 1995(15): 28-37.

[10] Maccormak I B, Bowers J E. New white gold alloys[J]. Gold Bulletin, 1981, 14(1): 19-24.

[11] Allchin M. Palladium- a new opportunity[OL]. The Assay office of Birmingham, 4th September, 2006.

[12] Brelle J, Blatter A. Precious palladium-aluminium-based alloys with high hardness and workability[J]. Platinum Metals Review, 2009, 53(4): 189-197.