

[文章编号] 1004- 0609(2001)02- 0288- 06

原子态与金属态贵金属化学稳定性的差异^①

陈 景

(昆明贵金属研究所, 昆明 650221)

[摘 要] 从化学及冶金中的实验现象归纳出原子态贵金属的化学稳定性是按周期表位置从左到右增强, 即 $Ru < Rh < Pd < Ag$, $Os < Ir < Pt < Au$; 但按晶态贵金属的原子化热、熔点及沸点判断, 金属键的强度则是从左到右降低, 即 $Ru > Rh > Pd > Ag$, $Os > Ir > Pt > Au$, 两种顺序恰好相反。金属态抗酸、碱的腐蚀性能应为原子的化学稳定性与金属键强度的综合表现, 应重视区分原子态和金属态化学稳定性的差异, 并可从原子结构理论和金属键的价键理论作出解释。

[关键词] 贵金属; 原子结构; 金属键; 稳定性

[中图分类号] TG 146·3

[文献标识码] A

金属元素的化学性质, 如与氧、硫、卤族元素、酸和碱的化学反应, 一般是按金属态来描述的。尽管人们知道块状、粉状、超细粉末状的同一种金属的物理化学性质会有差异, 但未引起足够的重视。随着纳米材料的问世, 纳米金属粉末异乎寻常的物理化学性质和催化性质, 如金的熔点为 1063 °C, 纳米金的熔化温度却降至 330 °C, 银的熔点为 960.8 °C, 纳米银降到 100 °C, 纳米铂黑催化剂可使乙烯催化反应的温度从 600 °C 降至室温, 汽车尾气净化催化器上的铂、钯、铑分散到 2~ 4 nm 的粒度, 才会有最好的催化活性等等提示我们元素的物理化学性质与存在状态有着极其密切的联系。

从原子态到块状或晶态是金属元素不同凝聚态的两个极端。超细粉、纳米粉、海绵态、胶体态都属于中间的不同凝聚态。用实验方法直接研究单个金属原子的物理化学性质, 存在许多困难, 但已知的许多化学反应和物理化学常数却是属于单个原子所具有的。根据这一现象, 作者从 8 个贵金属元素最特有的化学稳定性进行讨论。

1 原子态贵金属的化学稳定性

1.1 贵金属氯络铵盐的煅烧分解

除 Ag 和 Au 外, Ru, Rh, Pd, Os, Ir 和 Pt 等铂族金属都可制得氯络酸的铵盐, 这些化合物中 $(NH_4)_3RhCl_6$ 的水溶性大, 但可在无水乙醇中沉淀。这些铵盐干燥后在空气中煅烧至 600~ 750 °C

时, 都分解为金属或再被氧化为氧化物。草酸银和硝酸银都可被煅烧为金属银, 硫化金以及金的所有有机金属化合物都可被煅烧为金属金。

在热分解及再被氧化的反应过程中, 应该经过一个原子态的短暂瞬间, 其产物的氧化程度可以反映原子的稳定性。

从表 1 看出, 在贵金属盐类煅烧产物中, 元素的氧化价态是 Ru(IV), Rh(III), Pd(II), Ag(0) 以及 Os(VIII), Ir(IV), Pt(0), Au(0)。从失去电子的难易反映出原子的化学稳定性从左到右增大。

表 1 贵金属络盐或化合物的煅烧分解产物

Table 1 Roasted products of precious metals complex salts and compounds

Salt	$(NH_4)_2RuCl_6$	$(NH_4)_3RhCl_6$	$(NH_4)_2PdCl_6$	AgCl
Roasted product	RuO ₂	Rh ₂ O ₃	PdO	Ag
Salt	$(NH_4)_2OsCl_6$	$(NH_4)_2IrCl_6$	$(NH_4)_2PtCl_6$	AuCl ₃
Roasted product	OsO ₄	IrO ₂	Pt	Au

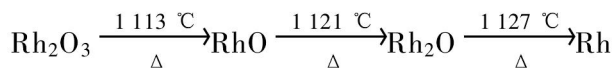
Note: 1. RuO₂ is gradually oxidized to RuO₄ when temperature is higher than 600 °C.
2. AgCl will be decomposed as Ag, NaCl, CO₂ etc when it and Na₂CO₃ are melted together.
3. Heated to 150~ 180 °C, AuCl₃ is decomposed as AuCl and Cl₂; higher than 220 °C, decomposed as Au and Cl₂.

1.2 贵金属氧化物的热分解

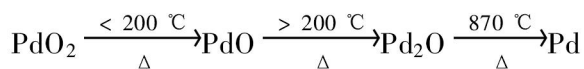
Ru 的高价氧化物为 RuO₄, 熔点 25.4 °C, 沸点 40 °C, 是挥发性物质, 查不到热分解数据。Rh 的高价氧化物为 Rh₂O₃, 其热分解情况如下式:

① [收稿日期] 2000- 06- 26; [修订日期] 2000- 10- 10

[作者简介] 陈 景(1935-), 男, 研究员, 中国工程院院士。



可以看出随温度的升高在氧化物中铑的价态逐渐降低, 最后变为金属原子。当然, 如果在空气中冷却, 它们将重新被氧化为 Rh_2O_3 。 Pd 粉在空气中加热至 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 只能获得 PdO 。 Pd(IV) 氧化物可用湿法制取, 如用碱中和 $\text{Na}_2(\text{PdCl}_6)$ 络盐溶液可制得 PdO_2 , 其热分解情况为:



Ag 粉在空气中加热不能制得氧化物, 用碱中和 Ag 盐溶液获得氢氧化银, 低温下脱水可得 Ag_2O , 但 Ag_2O 在 $185\sim 190\text{ }^\circ\text{C}$ 时即分解为 Ag 。从以上看出一价金属氧化物 Rh_2O , Pd_2O , Ag_2O 分解为金属原子的温度不断降低, 反映了它们从氧原子夺回电子的能力不断增强。其原子态的稳定性应为 $\text{Rh} < \text{Pd} < \text{Ag}$ 。

OsO_4 是更稳定的挥发性物质, 熔点 $40.6\text{ }^\circ\text{C}$, 沸点 $131.2\text{ }^\circ\text{C}$, 查不到分解温度, 其熔点、沸点高于 RuO_4 是因其分子量更大得多, 成为液态或气态需要吸收更多的热能。 Ir 粉在空气中加热到 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 生成 IrO_2 , $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 时开始分解。对 Pt 而言, 即使是很细的铂黑, 加热到 $700\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$ 时只变为海绵铂而不会被氧化, 当加热到 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1700\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 铂的氧化挥发损失也很低, 分别为 9.19×10^{-3} 和 $39 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ (现查不到氧化铂的分解温度)。 Au 的氧化物只能用湿法制取, Au_2O 在 $> 200\text{ }^\circ\text{C}$ 时分解为 Au , Au_2O_3 在 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 时即分解为 Au 。可以比较 5d 贵金属氧化物的分解反应资料更不全, 但从作者接触的其他许多化学反应现象中, 可以推断其原子稳定性顺序 $\text{Os} < \text{Ir} < \text{Pt} < \text{Au}$ 不会发生变化。

1.3 贵金属在提取富集过程中的行为

大量的铂族金属是从硫化铜镍矿中提取生产出来的。在原矿中它们的品位不过是百万分之几 (g/t), 甚至千万分之几, 如我国金川硫化铜镍矿。它们在浮选、电炉熔炼、转炉吹炼等过程中得到不断富集。在金川的转炉吹炼产物—高冰镍中铂族金属及金银的品位也只不过达到十万分之几。高冰镍的物相组成有镍钼、铜钼及铜镍合金。铜镍合金的量占高冰镍的 10%, 但却捕集了贵金属总量的 95% 以上, 品位接近万分之二。在铜镍合金中, 或硫化镍熔铸的阳极和粗镍熔铸的阳极中, 贵金属的存在状态都认为是原子镶嵌在镍、铜、钼的晶格中。当铜镍合金进入后续湿法冶金工艺处理, 或对硫化镍

和粗镍进行电解, 贵金属被富集入阳极泥中时, 一部分贵金属会损失于浸出液或电解液中, 损失量的规律是 $\text{Ru}, \text{Os} > \text{Rh}, \text{Ir} > \text{Pd}, \text{Pt} > \text{Au}$ 。恰恰也是贵金属稳定性从左到右增强的顺序。详情作者已在另一文中论述^[4]。

1.4 对原子结构与电离势的考察

原子电离势的大小, 可以反映金属元素处于原子态时失去电子的难易程度。对 4d 贵金属可以查到第一、第二、第三电离势, 对 5d 贵金属现只有第一及部分第二电离势。见表 2。

表 2 贵金属元素的电离势

Table 2 Ionization potentials of precious metals

Element	Electron construction	Ionization potentials			Sum of $E_1 \sim E_3/\text{eV}$
		E_1/eV	E_2/eV	E_3/eV	
Ru	$4d^7 5s^1$	7.36	16.76	28.46	52.58
Rh	$4d^8 5s^1$	7.46	18.07	31.05	56.58
Pb	$4d^{10}$	8.33	19.42	32.92	60.67
Ag	$4d^{10} 5s^1$	7.57	21.48	34.82	63.87
Os	$4f^{14} 5d^6 6s^2$	8.70	17.00		
Ir	$4f^{14} 5d^7 6s^2$	9.10	18.56		
Pt	$4f^{14} 5d^9 6s^1$	9.00	20.50		
Au	$4f^{14} 5d^{10} 6s^1$	9.22			

从外电子结构看, 4d 贵金属中 Pd 无 5s 电子, 5d 贵金属中 Pt 只有一个 6s 电子, 相对于 Os, Ir 的电子结构又出现不规则排布。过渡系金属原子外电子的不规则排布来源于能级交错, 并受最低能量原理、泡利原理和洪特规则共同支配, 这是公知的事。作者认为从电子排布时的能量最低原理出发, Pd 除 4d 全充满有利于体系能量降低外, 4d 轨道能级已明显低于 5s, 所以 10 个 d 电子都排列到 d 轨道, 并因此造成第一电离势陡然增高。 Rh 与 Ag 相比时, Rh 的 5s 能量接近 4d, 8 个 d 电子对 s 电子的屏蔽稍差一些, Ag 的 4d 轨道能级更低, 10 个 d 电子对 5s 电子的屏蔽更好一些, 于是 Ag 的第一电离势只稍高于 Rh , 这种分析从里琦 (Rich) 图中可直观看出^[5]。但从第二电离势和第三电离势看出, 由于外层电子都是 d 电子, 可比性很好, 电离势从左到右呈有规律地增大。同理, Pt 的外电子也是不规则变化。对 Ir 来说, 两个 6s 电子相互屏蔽差, 因此第一电离势还略高于核正电荷增加了一个单位的 Pt , 但 Au 则明显高于 Pt 。此外, 5d 贵金属与 4d 贵金属相比时, 由于“镧系收缩”后 4f 电子对 5d 电子的屏蔽不良, 5d 轨道明显收缩。加之第六周期元素的核正电荷相当大, 1s 电子的运动速度接近光速,

出现了相对论性效应。据量子力学计算, Hg 的 1s 电子质量已达到电子静止质量的 1.2 倍^[6]。相对论性效应使外层的 6s 轨道收缩, 能级降低, 因此 5d 贵金属的第一电离势高于 4d 贵金属的第一电离势。

以上论述表明, 从原子结构和电离势分析, 贵金属原子的化学稳定性从失电子的难易考虑, 也是从左到右和从上到下增强。

2 金属态贵金属的化学稳定性顺序

贵金属的丝材、片材、板材, 在常温下除 Ag 与 H₂S 气体接触能缓慢生成黑色 Ag₂S 表面层外, 对其它气体, 甚至对腐蚀性极强的卤素, 都相当稳定。这里主要讨论对各种酸碱的抗腐蚀性。

2.1 贵金属对酸、碱的抗腐蚀行为

贵金属对酸、碱的抗腐蚀性能列于表 3 及示意图 1。

表 3 贵金属腐蚀性能评价^[1, 7]

Table 3 Corrosion properties of precious metals by acid or alkali^[1, 7]

Medium	t/ °C	Ru	Rh	Pd	Ag	Os	Ir	Pt	Au
Conc. H ₂ SO ₄	18	A	A	A	C	A	A	A	A
HCl (36%)	18	A	A	AB	C	A	A	A	A
HNO ₃ (2 mol/L)	18	A	A	C	D	B	A	A	A
HNO ₃ (70%)	18	A	A	D	D	C	A	A	A
Aqua regia	18	A	A	D	C	D	A	D	D
HF (40%)	18	A	A	A	C	A	A	A	A
dry Cl ₂	18	A	A	C	—	A	A	B	B
NH ₃ ·H ₂ O	18	A	A	A	A	A	A	A	A
NaOH (solution)	18	A	A	A	A	A	A	A	A
H ₂ SO ₄	100	A	A	B	D	A	A	A	A
Aqua regia	Boiling	AB	AB	D	D	D	A	D	D
HCl (36%)	100	A	A	B	D	C	A	B	A
HNO ₃ (70%)	100	A	A	D	D	D	A	A	A

Note: A—Very stable (uncorrodible); B—Stable (little corrodible); C—Not stable (corrodible); D—Very unstable (easy corrodible)

从表 3 及图 1 看出: 除 Ag 外, 块状金属态的其它贵金属不溶于 HCl, H₂SO₄ 和 HF; 除 Os 外, Ru, Rh, Ir 不溶于王水, 但 Pd, Pt, Ag, Au 可溶于王水; 在后 4 个元素中 Pd 和 Ag 可溶于硝酸, 但 Pt 和 Au 则不溶于硝酸。Os 抗酸腐蚀性能差是由于可形成挥发性的 OsO₄, 促进了氧化酸溶的速度。Ru 在沸腾王水中有微量腐蚀, 也缘于会生成挥发性的 RuO₄。但因第一步生成稳定的 RuO₂, 有一定的保

护作用, 被腐蚀的程度小于 Os。

因此, 金属态贵金属对各种酸的抗腐蚀性顺序为 Ru< Rh> Pd> Ag 和 Os< Ir> Pt> Au, 纵向比较时, 除 Ru 和 Os 外, 抗腐蚀性是 Ir> Rh, Pt> Pd, Au> Ag。

2.2 贵金属冶金中精炼物料及合金材料的溶解

贵金属精炼是指贵金属相互分离提纯的过程。国际上, 进入精炼工段的物料, 其贵金属品位已达 45%~60%。各个贵金属元素已不象提取富集过程中那样以原子状态镶嵌在大量贱金属铜、镍、钨的晶格中, 而是呈金属态存在。1970 年以前, 贵金属精炼的处理流程都是用稀王水溶解富集物 (concentrate), 使金、铂、钯转入溶液, 铑、铱、钨、钼则残留于王水不溶渣中。不溶渣加铅熔炼, 再用硝酸分铅使不溶渣转化为细粉, 接着用 NaHSO₄ 熔融后浸溶出 Rh₂(SO₄)₃, 铱、钨、钼浸出渣干燥后加 Na₂O₂ 熔融, 从水浸液中蒸馏分离钨、钼, 最后的碱不溶物用王水溶解后提纯铱。

此外, 在分离提纯工艺中, 对于王水很难溶解的铂铱合金或铂钯合金, 如 Pt-25Ir, Pt-30Rh, 人们是加入大量铂进行熔炼稀释, 然后才进入王水溶解。有时还会残留一些不溶的铑粉或铱粉。进一步反复用王水处理时, 还会发现细粒铑粉可溶而铱粉则不溶。

对于整块的铑, 可用加大量铝在感应炉中 1 000 °C 左右熔炼, 然后用盐酸除铝, 得到相当细的铝粉可溶于盐酸, 冶金中称为铝碎化。铑可用锡、铅、锌等碎化, 获得的铑粉还需碱熔处理后才能用王水溶解。

上述冶金方法中, 贵金属也表现了与单金属抗酸腐蚀结果相同的稳定性顺序。

2.3 金属态贵金属稳定性顺序的理论解释

金属在酸中溶解时需要破坏金属键, 才能使原子单个地转入溶液, 这需要吸收能量。贵金属原子的惰性使酸中的氢离子不可能夺取金属原子的外电子, 只有硝酸或热浓硫酸的氧化作用才能破坏结合不太牢固的金属键, 并还原出 NO, NO₂ 或 SO₂。王水是 HNO₃ 和 HCl 的混合溶液, 两种酸自身的氧化还原反应产生了氧化性更强的新生态氯以及氯化亚硝酰 (NOCl), 它们可以夺取贵金属的外电子。以原子氯为例, 夺取电子时会释放电子亲和能, 另一方面形成的氯离子与贵金属离子配位则释放配位能, 如果释放的能量可以补偿破坏金属键所需的能量,

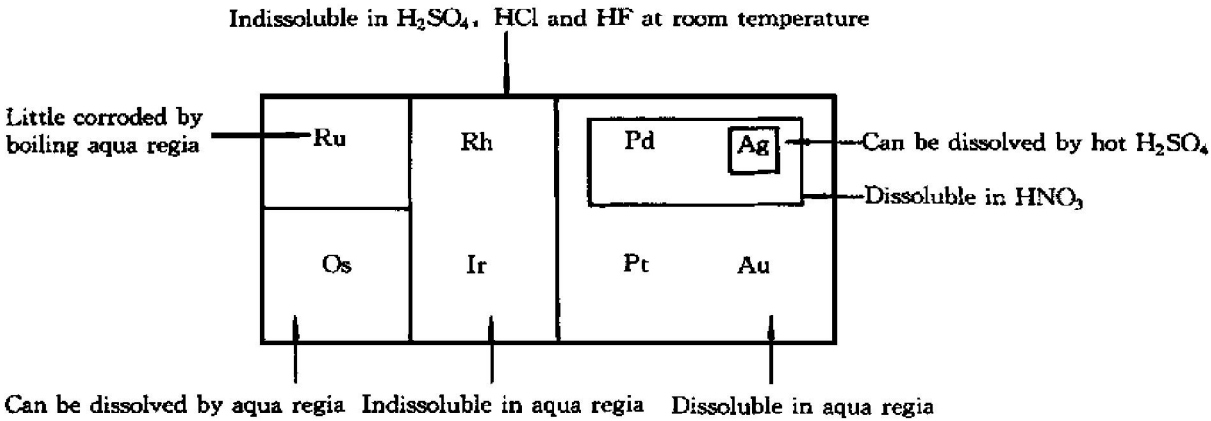


图 1 贵金属对各种酸的抗蚀图示

Fig. 1 Anti-corrosion properties of precious metal

则该种贵金属可以转入溶液，如金属键太强则王水也难于破坏。

作者在“贵金属的物理性质与原子结构的关系”^[8]中用价键理论讨论了贵金属的金属键，指出能够参与形成金属键的价电子数是 Ru, Os> Rh, Ir> Pd, Pt> Ag, Au。因为它们在成键时，先把一部分 d 电子激发到 p 轨道，而成键能则可补偿激发能而有余。根据 Engel 定律^[9~11]，金属键的强度主要取决于参与成键的 d 电子数，而贵金属能参与成键的 d 电子数是周期表中从左到右逐渐降低的，图 2

为从 Ru 到 Ag 的基态和激发态的电子结构图。从图 2 看出，在激发态中 5p 轨道有两个未配对电子时，从 Ru 到 Ag 的未配对的 d 电子数分别为 5, 4, 3, 2；可成键的 d, s, p 总电子数分别为 8, 7, 6, 5。考虑到这些金属的晶体结构要符合 Engel 第二定律，这些递减的整数采用了分数^[10]。以上非常直观地表明了贵金属的金属键强度应为 Ru> Rh> Pd> Ag，同理 5d 贵金属的键强度应为 Os> Ir> Pt> Au。由于键强度与金属熔点、沸点以及实验测定的原子化热有关，因此 4d 和 5d 贵金属的这些物理常数均呈有规律地从左到右下降。其中 5d 贵金属的这些物理常数高于相应的 4d 贵金属的原因，则系如本文 1.3 节所述，来自 4f 电子对 5d 轨道的失屏效应，引起 5d 电子感受到的有效核电荷增加，以及重元素相对论性效应引起 6s 轨道收缩，使 5d 电子和 6s 电子的成键力增大所致。贵金属的熔点及原子化热的变化示于图 3 和 4。

作者认为，块状贵金属的表面抗腐蚀性和在酸中溶解，既包含了原子态贵金属稳定性的影响，也

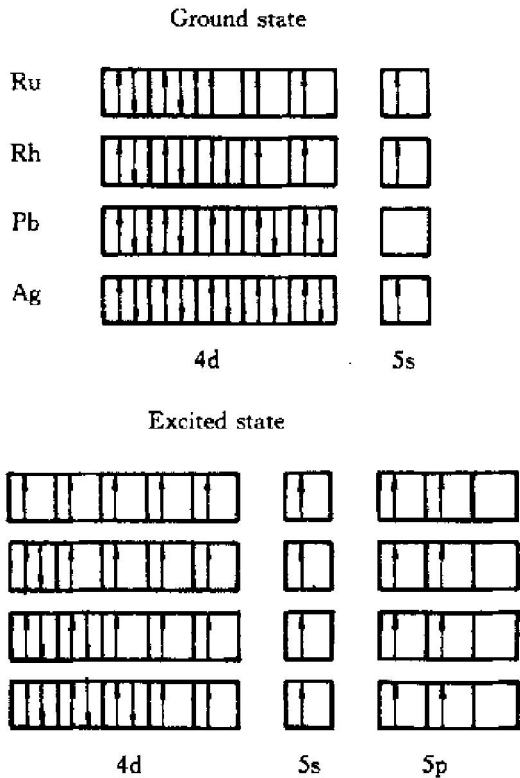


图 2 4d 贵金属基态和成键前激发态的电子结构
Fig. 2 Electronic structures of ground and excited states of 4d precious metals

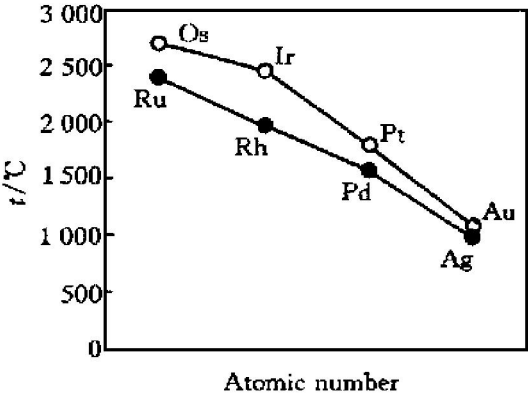


图 3 贵金属熔点变化的趋势
Fig. 3 Variation tendency of melting points of precious metals

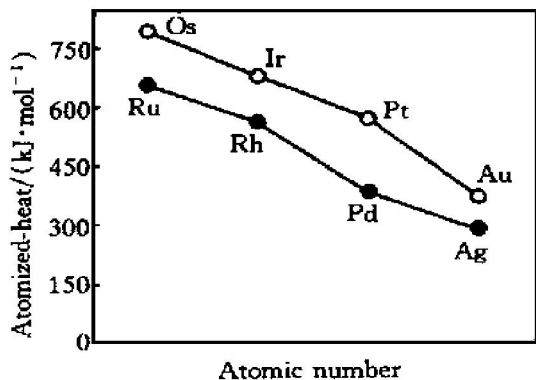


图 4 贵金属原子化热变化的趋势

Fig. 4 Variation tendency of atomized heats of precious metals

包含了金属键强度的影响,其变化规律是两种变化规律的综合表现,如图 5 所示。

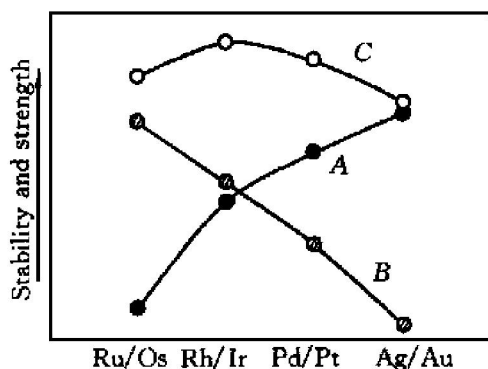


图 5 原子态稳定性与金属键强度的变化趋势及综合影响

Fig. 5 Variation tendency of atomic stability and metal-bond strength and their synergetic influence

A —Atomic stability of precious metals;

B —Bond strength of precious metals;

C —The anti-corrodible intensity of lumpy PM

图 5 只是一种定性的示意图,可以看出,叠加线 C 变化趋势符合金属态贵金属抗酸腐蚀的变化趋势,即 Ru, Os < Rh, Ir > Pd, Pt > Ag, Au。

3 结论

1) 提出对金属元素的物理化学性质应区分原子态和金属态的概念。

2) 根据化学及冶金中的实验现象,归纳提出原子态贵金属的化学稳定性系按周期表位置从左到右增强,即 Ru < Rh < Pd < Ag, Os < Ir < Pt < Au, 上下相比时, Rh < Ir, Pd < Pt, Ag < Au 也十分明显。

并从原子结构理论作了解释。

3) 当贵金属呈晶态时,按照 Engel 的两条定律以及作者的观点,贵金属原子间的结合力即金属键的强度恰与原子态相反,即 Ru > Rh > Pd > Ag, Os > Ir > Pt > Au。两种稳定性的综合影响可满意地解释贵金属对各种酸的抗腐蚀行为、以及贵金属精炼工艺中的一些方法原理。

4) 在贵金属原子态和块状晶态之间,从体积尺寸和包容的原子数量来看,存在着粉末、超细粉、超微细粉、纳米粉、海绵态以及从水溶液中还原的所谓铂黑、钯黑等一系列过渡态。它们的物理化学性质有一定变化,利用本文的观点可作出较好的解释。

[REFERENCES]

- [1] LI Ding-xin(黎鼎鑫). The Material Science of Precious Metals(贵金属材料学) [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1991. 37- 40.
- [2] Masniettsqui N H. Metallurgy of Precious Metals(贵金属冶炼) [M]. Beijing: Nuclear Energy Press, 1992. 342.
- [3] CHEN Jing(陈景). The PGM Chemical Metallurgy Theory and Practice(铂族金属化学冶金理论与实践) [M]. Kunming: Yunnan Sci & Tech Press, 1995. 1- 15.
- [4] CHEN Jing(陈景). 从原子结构探讨贵金属在提取冶金过程中的行为 [J]. China Engineering Science(中国工程科学), 1999, 1(2): 34- 40.
- [5] Rich R. Period Correlations [M]. New York: Benjamin W A Inc, 1965. 1- 16.
- [6] YAN Cheng-hua(严成华). 相对论效应和元素的化学性质 [J]. Bulletin of Chemistry(化学通报), 1983, 1: 42.
- [7] TAN Qing-lin(谭庆麟) and QUE Zhen-huang(阙振寰). The Properties, Metallurgy, Material and Application of PGMs(铂族金属性质、冶金、材料、应用) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990. 31.
- [8] CHEN Jing(陈景). 贵金属物理性质与原子结构的关系 [J]. China Engineering Science(中国工程科学), 2000, 2(7): 66- 73.
- [9] Brewer L. Bonding and structures of transition metals [J]. Science, 1968, 161: 115.
- [10] Brewer L. Electronic Structures and Alloy Chemistry of the Transition Elements [M]. New York: 1963. 221 - 235.
- [11] Joly W L. Modern Inorg-Chemistry(现代无机化学) [M]. Beijing: Sci & Tech Press, 1989. 1- 8.

Chemical stability differences between atom and metal state precious metals

CHEN Jing

(Institute of Precious Metals, Kunming 650221, P. R. China)

[Abstract] The chemical stability of atom-state precious metals is according with the order of $Ru < Rh < Pd < Ag$ and $Os < Ir < Pt < Au$; while the order of metal state stability and strength of metal bonds is according with $Ru > Rh > Pd > Ag$ and $Os > Ir > Pt > Au$ from the data of atomized- heats, melting points, and boiling points of precious metals, The differences in concepts of atom and metal state of precious metals were also given out, and the explanations for these were discussed from the atomic structure and metal bond theories.

[Key words] precious metals; atomic structure; metal bond; stability

(编辑 朱忠国)

“21 世纪重有色金属冶金高新技术及新材料国际会议”

通 知

为了进一步推动我国有色金属工业的发展,提高我国有色金属冶金和新材料开发的技术水平,中国有色金属学会定于 2001 年 10 月在昆明召开“21 世纪重有色金属冶金高新技术及新材料国际会议”。会议将邀请世界各国重有色金属行业的高层次专家、学者、著名厂商和企业经管人员到会进行学术交流,展示高新技术和新材料、新产品。本次会议为重有色金属冶金企业提供了一个宣传、引进、咨询和加强交流、扩大合作的好机会。会议由中国有色金属学会主办,中国有色金属学会重有色金属冶金学术委员会和昆明理工大学承办。现将会议有关事项通知如下:

1 论文征集

鉴于本次会议筹备时间较短,请作者将中文或英文全文于 2001 年 6 月 30 日前寄到会务组。经审稿后被录用的论文需缴纳论文版面费,每篇 400 元。稿件为 A4 纸型 4 页。需要代为翻译的稿件,另缴翻译费 400 元。论文稿件请随附 WORD 文档软盘。会议论文集将正式出版。

2 会议时间、地点

时间: 2001 年 10 月 22 日至 26 日。地点: 云南省昆明市

3 会 务

国内代表会议注册费 900 元,交通、食宿费自理。

联 系 人: 朱祖泽

陈 莉

通讯地址: 昆明理工大学材料与
冶金工程学院

北京复兴路 12 号

北京有色金属设计研究总院重冶学委会

邮政编码: 650093

100038

电 话: (0871) 5198154, 5154062

(010) 63962233- 3247

传 真: (0871) 5161278

(010) 63957339

电子信箱: mekust@public.km.yn.cn

yehaso@263.net

中国有色金属学会

2001 年 3 月