

贵金属物理性质与原子结构的关系

陈景

(贵金属研究所, 昆明 650221)

[摘要] 按周期表位置排列的8个贵金属元素的物理性质, 归纳出三种类型的规律, 即原子半径相近, 密度与比热接近倍比; 熔点、沸点、硬度及其它力学性质呈线性变化; 热导率和电导率呈不规则变化。文章用价键理论从原子结构特征对产生三类规律的原因进行了讨论。

[关键词] 贵金属; 物理性质; 原子结构

贵金属包括钌、铑、钯、银、钼、铱、铂、金8个元素。前4个元素属周期表中第5周期, 第2过渡系; 后4个元素属第6周期, 第3过渡系; 按纵向分类时它们属第Ⅷ族和IB族。在许多化学、冶金和材料的专著中^[1~3], 贵金属的物理性质都被单个地描述, 彼此没有关联。少数作者指出过按周期表排列时它们的熔点和加工性能存在规律性变化^[4,5], 但没有指出这些规律出现的原因。

笔者将收集到的可比较的物理常数按贵金属在

周期表中的顺序排列, 发现有三种不同规律的变化, 并用金属键理论中的价键理论进行解释。

1 近似倍比或近似相等关系的物理常数

此类物理常数列入表1。为便于讨论, Ru、Rh、Pd、Ag按其原子结构填充4d电子称为4d贵金属, Os、Ir、Pt、Au称为5d贵金属。

表1 贵金属元素的一些结构参数与物理性质*

Table 1 Some structure parameters and physical properties of precious metals

元 素	Ru	Rh	Pd	Ag
原子序数	44	45	46	47
原子量	101.07	102.91	106.40	107.868
电子结构	$4d^75s^1$	$4d^85s^1$	$4d^{10}$	$4d^{10}5s^1$
原子半径/nm	0.133	0.134	0.137	0.144
离子半径/nm	(IV)0.06	(IV)0.065	(IV)0.064	(I)0.126
克原子体积/cm ³	8.22	8.29	8.84	10.3
密度/g·cm ⁻³	12.30	12.42	12.03	10.49
比热容/J·(g·K) ⁻¹	0.231	0.247	0.245	0.234
摩尔热容/J(mol·K) ⁻¹ _{298K}	24.0	25.1	26.0	25.4
晶体结构	六方密堆	面心密堆	面心密堆	面心密堆

[收稿日期] 1999-04-22

[作者简介] 陈景(1935-), 男, 云南大理市人, 中国工程院院士, 贵金属研究所研究员

续表 1

元素	Os	Ir	Pt	Au
原子序数	76	77	78	79
原子量	190.20	192.20	195.09	196.967
电子结构	$4f^{14}5d^66s^2$	$4f^{14}5d^76s^2$	$4f^{14}5d^96s^1$	$4f^{14}5d^{10}6s^1$
原子半径/nm	0.135	0.135	0.138	0.144
离子半径/nm	(IV)0.065	(IV)0.065	(IV)0.064	(I)0.137
克原子体积/cm ³	8.46	8.58	9.12	10.2
密度/g·cm ⁻³	22.48	22.4	21.45	19.32
比热容/J·(g·K) ⁻¹	0.129	0.129	0.132	0.129
摩尔热容/J·(mol·K) ⁻¹ _{298K}	24.8	25.1	25.9	25.2
晶体结构	六方密堆	面心密堆	面心密堆	面心密堆

* 表 1 至表 5 数据主要取自文献[2、3、6]

1.1 原子量及原子、离子半径

5d 贵金属比对应的 4d 贵金属原子序数各大 32, 亦即原子核中的质子数多 32。已知每增加一个质子约需增加两个中子才能维持核的稳定, 因此造成 5d 贵金属比 4d 贵金属原子量约大 1 倍。

从电子结构看出, 5d 贵金属都含有 14 个 4f 电子, 4f 电子对 5d 电子的屏蔽常数为 0.94^[7], 全部 4f 电子的失屏效应导致 5d 电子层的收缩, 也即是 5d 贵金属处于“镧系收缩”之后, 造成它们的原子和离子半径与对应的 4d 贵金属几乎相等。横向考察时, Ag 和 Au 的原子半径有显著增大, 这与它们的金属成键电子数减少有关, 将在后面讨论。

1.2 密度、比热容和摩尔热容

由于原子量相差近 1 倍, 原子半径却近似相同, 加以金属晶体结构属六方密堆 (Ru、Os) 和

面心密堆结构, 空间利用率相同, 因此 5d 贵金属的密度比 4d 贵金属高 1 倍。它们是周期表所有元素中密度最大的一些元素, 其中又以 Os 的密度最大, Os、Ir、Pt 因此称重铂族, Ru、Rh、Pd 称为轻铂族。

比热容是每克金属温度升高 1K 所需吸收的热量。温度不太高时这份热量主要是转化为晶格上原子振动的动能。每克 4d 贵金属含有的原子数几乎为每克 5d 贵金属中的 2 倍, 因此 4d 贵金属的比热容也约为 5d 贵金属的 2 倍, 具体倍数为 m_{5d}/m_{4d} (m 为原子量) 倍。对于摩尔热容量, 它消除了所含原子数的差异, 故对 8 个元素都非常相近。

2 呈线性变化的物理量

有关物理量列入表 2。

表 2 贵金属呈线性变化的物理性质

Table 2 Linearly varied physical properties of precious metals

元素	Ru	Rh	Pd	Ag
熔点/℃	2 400	1 960	1 550	960.5
熔化热/kJ·mol ⁻¹	25.5	21.8	16.7	11.3
沸点/℃	4 900	4 500	3 980	2 200
气化热/kJ·mol ⁻¹	647.4	560.9	371.9	284.6
维氏硬度(铸态)/MPa	1 700~4 500	1 390	440	420
屈服强度/MPa	350~400	70~100	50~70	20~25
抗拉强度(加工态)/MPa	5 070	1 400	420	380
弹性模量(静态)/MPa	421 800	324 790	117 400	75 920
切变模量/MPa	172 000	153 000	46 100	29 400
压缩模量/MPa	292 000	280 100	190 900	101 800
热膨胀系数/10 ⁻⁶ ·K _{300K} ⁻¹	5.8	8.50	12.48	18.9

续表 2

元素	Ru	Rh	Pd	Ag
熔点/℃	2 700	2 454	1 769	1 064.4
熔化热/kJ·mol ⁻¹	29.3	26.4	21.8	12.7
沸点/℃	5 500	5 300	4 590	2 880
气化热/kJ·mol ⁻¹	783.3	662.1	563.4	368.4
维氏硬度(铸态)/MPa	8 000	2 100~2 400	630	330~350
屈服强度/MPa	—	90~105	60~80	10~25
抗拉强度(加工态)/MPa	—	2 390	400	230
弹性模量(静态)/MPa	569 430	527 250	134 340	78 740
切变模量/MPa	220 000	214 000	62 200	28 200
压缩模量/MPa	380 000	378 000	280 800	174 600
热膨胀系数/10 ⁻⁶ ·K _{300K} ⁻¹	4.16	6.45	8.99	14.0

2.1 熔点和沸点

熔点、沸点的变化示如图 1。从图 1 可以看出：

按周期表位置从左到右过渡时，贵金属熔点、

沸点都逐渐降低；柱向考察时，5d 贵金属的熔点、沸点都高于 4d 贵金属。

用能带理论很难解释表 2 中各种物理量的变化规律^[8]。我们将用价键理论进行讨论。

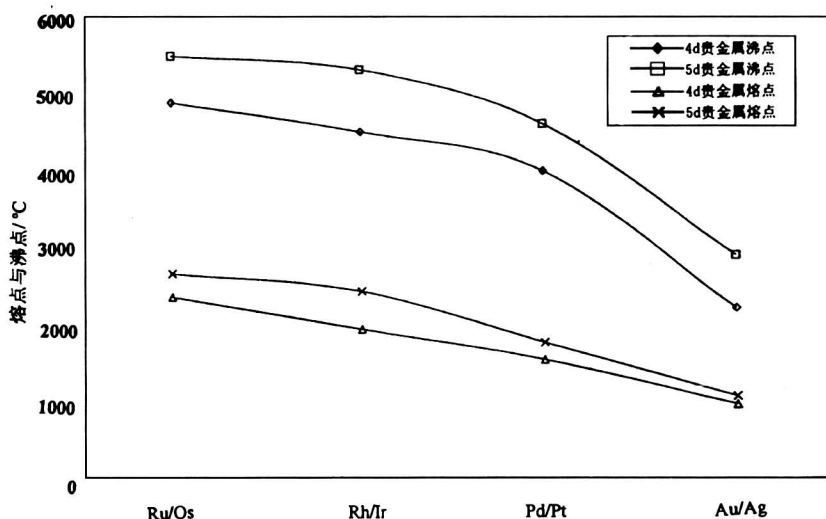


图 1 贵金属熔点、沸点变化图

Fig.1 Melting point and boiling point of precious metals

Pauling 从化学的观点提出的金属键理论^[9]，认为熔点、沸点、硬度的高低与金属价有关，即与金属原子参与键合的未配对电子数有关。根据对铁原子光谱的能级分析，铁原子从基态 $3d^64s^2$ 激发到 $3d^54s4p^2$ 构型时，其所需的升级能只是碳原子从基态 $2s^22p^2$ 跃迁到 4 价碳 $2s2p^3$ 构型的升级能 833 kJ/mol 的一半。铁的升华焓 (406 kJ/mol) 也对应地约为碳的升华焓 (712 kJ/mol) 的一半。已知碳原子在金刚石以至所有有机化合物中均以 sp^3

杂化轨道成键，因此铁也应以 $3d^54s4p^2$ 构型去成键，此时铁将有 8 个未配对电子轨道，可以形成 8 个电子对键，其所需的升级能将从成键能得到补偿。考虑到铁在达到饱和磁化时，每个铁原子的磁矩为 2.22 玻尔磁子。这就要求升级后铁原子的电子构型中只能有 5.78 个电子用于形成电子对键，因此 Pauling 在 1938 年把铁的金属价定为 5.78。其后他认为在原子的成键电子中，也有可能存在未配对电子，即金属中形成了一个单电子键。这相当

于能带理论中电子占据了自旋未耦合的导带，即每一个能级只有1个电子而不是2个电子。根据光谱数据的计算，得出铁原子只有0.26个电子是处在自旋未耦合的能带中，表明每个铁原子的总价数为6.04，其中5.78个电子包含在所形成的电子对键中，0.26个电子则是形成单电子键的电子。Pauling因此取整数6为铁的金属价数。由于Fe、Co、Ni金属的硬度、密度、熔点、沸点都比较接近，Pauling把这三个元素的金属价都定为6，并把它们的左边的Cr和Mn，4d过渡元素中从Mo到Pd，5d过渡元素中从W到Pt的金属价全部都定为6，Cu、Ag、Au则定为5.56。显然，按Pauling的理论8个贵金属元素的金属价都相同，无法解释图1中出现的规律。

Engel和Brewer^[10]修正和发展了Pauling的金属键理论，他们不仅把金属原子的电子结构与金属及其合金的键特性和热力学稳定性关联起来，而且相当成功地把原子的电子结构与金属的晶体结构关联起来。其理论可归纳为两条规则：

1) 金属或合金的键合能取决于每个原子能够键合的未成对电子的平均数，如果由于增加电子对键所释放的键合能够补偿激发所需的升级能，则具有较多未成对电子的低受激电子组态比基态电子组态更为重要。

2) 金属的晶体结构取决于键合中每一个原子的s和p轨道的平均数，当键合中s、p电子数 ≤ 1.5 时，出现体心立方晶型(bcc)；1.7~2.1之间时，出现六方密堆结构(hcp)；2.5~3.2范围时，出现面心密堆结构(ccp)；接近于4时，出现非金属的金刚石结构。以Na、Mg、Al为例，Na以1个3s电子成键，此键分散在8个最近邻原子和六个次近邻原子中，形成体心立方晶型。Mg的基态

外电子结构为 $3s^2$ ，先升级为低受激态 $3s3p$ ，每克原子需要264 kJ的升级能，而两个未配对的3s、3p电子成键时，每克原子可获得410 kJ的成键能，两个电子对键分散在12个近邻和更远的次近邻原子中，形成六方密堆结构。Al则需要用348 kJ/克原子的能量从基态 $3s^23p$ 升级到 $3s3p^2$ ，以便增加成键电子数，形成3个电子对键，分散在12个近邻和更远的近邻原子中，形成面心密堆结构。

Engel和Brewer没有象Pauling那样把6个铂族金属的金属价视为与Fe、Co、Ni一致。Brewer指出，从升华热的变化和磁性来看，Fe、Co、Ni在成键时没有使用全部未配对的d电子，而铂族元素的行为则相反。Brewer还指出，d电子对成键的贡献随元素原子序数的增大而增大。用以解释第6周期过渡元素的熔点和沸点高于第5周期过渡元素。但他给出的贵金属的成键电子数，系按 $d^{n-1.7}sp^{0.7}$ 组态(n为外电子层电子总数)计算Ru、Rh、Pd；用 $d^{n-2}sp$ 组态计算Os、Ir、Pt，用 $d^{9.3}sp^{0.7}$ 组态计算Cu、Ag、Au，显然带有太大的随意性，而且 $d^{n-1.7}sp^{0.7}$ 组态属六方密堆晶型，与Rh、Pd为面心密堆结构不符， $d^{n-2}sp$ 组态属六方密堆结构又与Pt、Ir为面心密堆结构不符。他的全部数据还过于偏低，与Jolly^[11]指出Cu、Ag、Au按 d^8sp^2 成键，具有5个未配对成键电子相差太大。

笔者认为，VIIB族的Tc($4d^65s^1$)和Re($5d^56s^2$)只需把1个d电子或s电子激发入p轨道，即可形成未配对电子数为7的低受激态，因此向右过渡可假定VIII族3个元素激发进p轨道的电子数大于1，并呈分数逐渐增多(见表3)；笔者给出的未配对电子数与Pauling值和Brewer值列入表4。

表3 部分4d过渡元素成键前的受激变化

Table 3 Excited variation prior to bonding of part of the 4 d transition elements

元素	基态电子结构	升级到p轨道电子数	低受激态	未配对d电子数	未配对sp电子数	晶型*	未配对电子总数	熔点/℃
Mo	$4d^55s^1$	0	$4d^55s^1$	5	1	I	6	2610
Tc	$4d^55s^2$	1	$4d^55s^15p^1$	5	2	II	7	—
Ru	$4d^75s^1$	1.2	$4d^{5.8}5s^15p^{1.2}$	4.2	2.2	II	6.4	2400
Rh	$4d^85s^1$	1.5	$4d^{6.5}5s^15p^{1.5}$	3.5	2.5	III	6	1960
Pd	$4d^{10}$	1.8**	$4d^{7.2}5s^15p^{1.8}$	2.8	2.8	III	5.6	1550
Ag	$4d^{10}5s^1$	2	$4d^85s^15p^2$	2	3	III	5	961
Cd	$4d^{10}5s^2$	1	$4d^{10}5s^15p^1$	0	2	II	2	321

* 晶型I为bcc，II为hcp，III为ccp；** Pd原子的基态电子结构为不规则排列，还有一个d电子升级到s轨道

表4 Pauling, Brewer 及笔者给出的未配对电子数

元素	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd
晶体结构	I	I	II	II	III	III	III	II
Pauling 值	5	6	6	6	6	6	5.56	4.56
Brewer 值	5	6	7	5.4	4.5	3.4	2.4	2
笔者值	5	6	7	6.4	6	5.6	5	2
元素	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg
晶体结构	I	I	II	II	III	III	III	
Pauling 值	5	6	6	6	6	6	5.56	4.56
Brewer 值	5	6	7	6	5	4	2.4	2
笔者值	5	6	7	6.4	6	5.6	5	2

对表3、4讨论如下:

1) Mo成键时可直接用基态电子结构,不需提供升级能。因此,它的未配对电子总数虽不是最高,但其熔点和沸点却是最高。

2) Mo在sp层中的未配对电子数仅为1个s电子,晶型为bcc; Tc、Ru、Cd的sp电子数在1.75~2.25范围,晶型为hcp; Rh、Pd、Ag的sp电子数在2.5~3.2范围,晶型ccp,完全符合Engel-Brewer第2规则。

3) 从Ru、Rh、Pd到Ag,未配对的成键电子总数为6.4、6、5.6到5,逐步减少,因而熔点和沸点也呈线性逐渐下降。

4) 当过渡到Cd时,由于全充满的4d层已明显收缩,d电子能量太低,不可能再激发进5p轨道,仅1个5s电子激发到5p轨道,未配对电子总数下降到2,其熔点也降到321℃。

5) 过渡金属从左向右过渡时,d轨道逐渐收缩,能量逐渐下降,因此其d电子升级到p轨道所需的激发能将逐渐增加,此因素也引起键合能的降低,本文在定性讨论中暂不考虑。

对于第3过渡系元素5d电子的成键力高于第2过渡系元素4d电子的原因,可用4f电子对5d电子屏蔽不良解释^[12,13];也可用相对论效应引起6s电子明显收缩解释^[14],没有必要去调整Ru、Rh、Pd、Ag与Os、Ir、Pt、Au的成键电子数。

2.2 维氏硬度、抗拉强度、弹性模量及热膨胀系数的变化

示如图2~4。图2、图3表明,维氏硬度、抗拉强度和弹性模量的变化趋势与熔点、沸点的变化一致,均为从左到右数值降低;从上到下数值升高。这是因为熔点高表明原子间的结合力大,晶胞

界面不易滑移,晶格结构不易破坏,因此硬度、抗拉强度和弹性模量都随之增大。图4热膨胀系数则因原子间结合力大时体积变化受到限制,因此变化趋势相反。

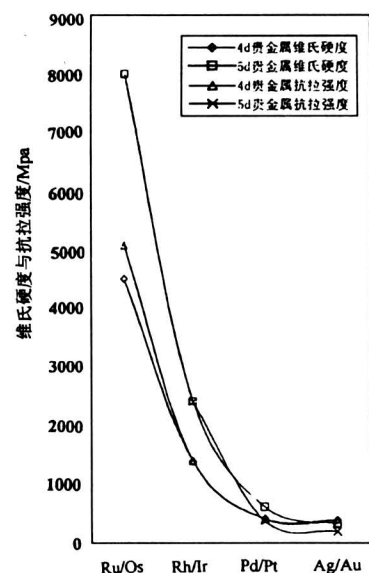


图2 贵金属维氏硬度、抗拉强度的变化

Fig.2 VH and tensile strength of precious metals

贵金属中钨不能加工,钨、铼、铱难加工,铂钯有很好的延展性,金银有最好的延展性,都可用上述观点解释。

3 非线性变化的物理量

热导率和电导率的数据列入表5,273K时的数据绘入图5。

从表5图5可知:

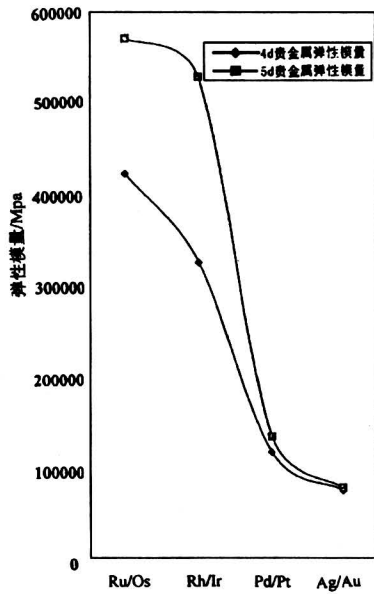


图 3 贵金属弹性模量变化

Fig.3 Modulus of elasticity of precious metals

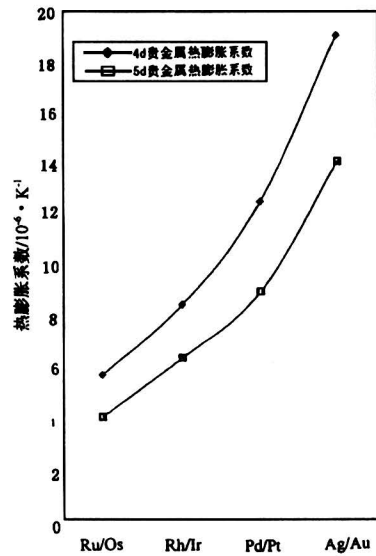


图 4 贵金属热膨胀系数变化

Fig.4 Thermal expansion coefficient of precious metals

除 Pd 和 Pt 的热导率随温度变化不大外，其余贵金属的热导率和电导率均随温度升高而逐渐降低，其中电导率的降低程度更明显。这种现象可归因于温度升高时，晶格原子的振幅加大，电子的运动和动能的传递逐渐受阻。

横向过渡时，从 Rh、Os 到 Rh、Ir 两种数据均略有增加；从 Rh、Ir 到 Pd、Pt 两种数据明显下降；从 Pd、Pt 到 Ag、Au 则两种数据大幅度增加。再往右到 II B 族的 Cd 和 Hg 时，电导率又大幅度下降。这种不规则的变化原因可能相当复杂。

表 5 贵金属的热导率及电导率

Table 5 Heat conductivity and electric conductivity of precious metals

T/K	热导率/W·(m·K) ⁻¹				电导率/10 ⁸ ·(Ω·m) ⁻¹			
	Ru*	Rh	Pd	Ag	Ru	Rh	Pd	Ag
273	119	153	75.1	435	0.149	0.241	0.102	0.689
300	117	152	75.2	433	0.132	0.199	0.092	0.616
400	115	145	75.5	426	0.097	0.141	0.069	0.432
600	105	135	79.0	411	0.062	0.086	0.047	0.279
800	96	126	83.0	397	0.045	0.062	0.037	0.205
	Os*	Ir	Pt	Au	Os	Ir	Pt	Au
273	88	148	75.0	318	0.122	0.209	0.102	0.485
300	87	147	74.1	315	0.094	0.188	0.092	0.444
400	86	141	73.2	309	0.065	0.135	0.068	0.322
600	85	136	73.0	296	0.044	0.089	0.045	0.206
800	-	130	74.8	284	0.033	0.065	0.034	0.148

* Ru, Os 的热导率各向异性，有垂直于 C 轴、平行于 C 轴及多晶三种数据，表中为多晶的热导率数据

Engel 理论认为，d 电子能级低，距核近，它在短空间范围成键是定域性的键，对金属的稳定性起决定性作用，对金属的结构影响不大；s、p 电子起着远程成键的作用，特别是 p 电子方向性很

强，金属的结构主要决定于 s、p 电子总数。s、p 电子可以离域，形成电子气，相当于处在能带理论中的导带。莫特 (Mott) 认为铂族金属具有较高的电阻率是因为铂族金属的 d 层电子不仅不参加电

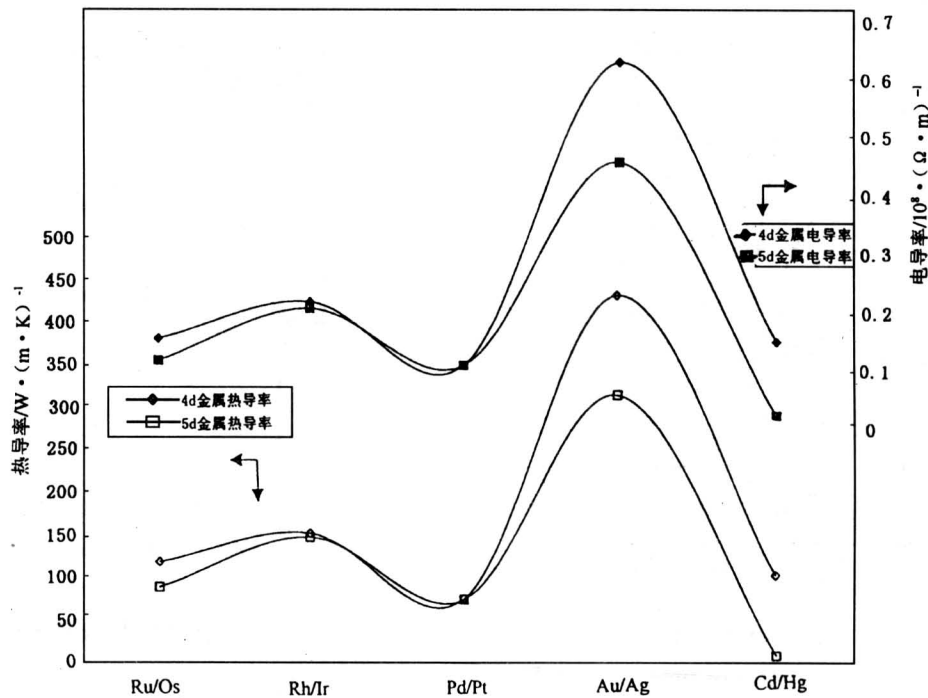


图5 贵金属电导率、热导率变化

Fig.5 Electric conductivity and heat conductivity of precious metals

导, 而且对传导电子产生散射作用, 称为 d-s 散射^[3]。

按照 Engel-Brewer 理论和 Mott 的观点, 笔者认为 Ag 和 Au 有最好的导电性可能缘于它们的 s、p 电子有最适宜的运动空间。与左边的 Pd、Pt 相比, Ag、Au 的 d 轨道更趋收缩, 但它们在金属中的原子半径却因 d 到 p 轨道所需激发能的升高和成键电子总数的降低 (见表 4) 而明显增大, 从而造成 s、p 电子的运动空间增大; 与右边元素 Cd、Hg 相比, 后二者因成键电子数只有 2 而使原子体积过大, s、p 轨道不能充分交迭, 削弱了 s、p 电子在金属中的共有化程度, 因而电阻增大。当然这种解释只能作为提供讨论。

纵向考察时看出, Ag 的导热性和导电性明显优于 Au, 两者差异较大; Pd 只略优于 Pt, 两种数据十分相近; Ru、Rh 与 Os、Ir 相比, 前者也优于后者。4d 贵金属与 5d 贵金属的这种差异可以像解释熔、沸点差异那样, 用有效核电荷增加或用“相对论性效应”使 6s 电子轨道收缩, 能量降低, 成键力增大, 定域性增大来解释。但 Pd 与 Pt 数据接近的原因还需进一步研究。

贵金属导电率和导热率的变化虽不呈线性, 但两者数据的涨落同步, 曲线十分类似, 表明金属导

电和导热的微观机制是相同的。

4 结语

4d 贵金属与 5d 贵金属的原子量、密度、比热接近倍比关系, 原子半径、离子半径和摩尔热容则接近相等。

熔点、熔化热、沸点、气化热及力学性质的维氏硬度、屈服强度、抗拉强度、弹性模量、切变模量、压缩模量等物理量呈线性变化。从左到右过渡时, 这些物理量的数值降低, 从上到下过渡时增高。

热导率和电导率从左到右呈不规则变化, 但两种数据的涨落相同, 表明金属导热和导电的微观机制相似。还可看出原子体积的变化对两种数据有明显影响。

以金属结构理论中的价键理论为基础, 定性地讨论贵金属物理性质与原子结构的关系。指出了按 Pauling 的金属价概念和 Engel-Brewer 规则难于同时解释贵金属的熔、沸点变化及晶型结构变化。笔者提出 4d、5d 贵金属原子成键时, 从基态电子结构中的 d 轨道升级到低受激态的 p 轨道的电子数呈分数变化的假说, 所得结果可满意地解释晶型、熔点、沸点及力学性质等物理量的变化。

用价键理论较难解释贵金属导热、导电性的变化规律。本文只提出了一种可供讨论的意见。对这种变化规律的研究将有助于对金属导热、导电微观机制的更深入了解，丰富和发展金属结构理论。

参考文献

- [1] Ginzburg S I, Ezerskaya N A. Analytical chemistry of platinum metals [M]. Keter Publishing House Jerusalem Ltd, 1975, 12
- [2] 谭庆麟, 阙振寰主编. 铂族金属性质及冶金材料应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990, 11~20
- [3] 黎鼎鑫主编. 贵金属材料学, 长沙: 中南工业大学出版社, 1991, 1~20
- [4] 马斯列尼茨基 И. H. 贵金属冶金学 [M]. 北京: 原子能出版社, 1992, 339
- [5] 黎鼎鑫主编. 贵金属提取与精炼 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991, 33
- [6] 日本分析化学会编, 邵俊杰译. 周期表与分析化学 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1981, 20~26
- [7] Edited by Benner L S. Precious Metals Science and Technology [M]. Published by IPMI, 1991, 13~93
- [8] 徐光宪编著. 物质结构 (上册) [M]. 北京: 人民教育出版社, 1978, 111
- [9] 鲍林 L. 化学键的本质 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1966, 384~411
- [10] Brewer L. Science, 1968, 161: 115~122; Electronic Structure and Alloy Chemistry of the Transition Elements [M]. Beck P A, ed, New York, 1963, 221~235
- [11] 乔利 W L. 现代无机化学 (下册) [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1989, 1~8
- [12] 陈景. 贵金属, 1984, (3): 1~10; 贵金属 1994, (3): 1~8
- [13] 陈景. 铂族金属化学冶金理论与实践 [M]. 云南科技出版社, 1995, 1~15
- [14] 严成华. 化学通报, 1983, (1): 42~47

Relationship Between Physical Properties of Precious Metals and Atomic Structure

Chen Jing

(*Precious Metals Research Institute, Kunming 650221, China*)

[Abstract] Through arranging the physical properties of the eight precious metals in accordance with their positions in the Periodic Table, three laws can be obtained: their atomic radii are close to each other and the density and specific heat nearly obey the relation of multiple proportions; melting point, boiling point, hardness and other mechanic properties vary linearly; electrical conductivity and heat conductivity vary irregularly. The cause of these three laws is analyzed by aid of the valence bond theory on the basis of atomic structure characteristics.

[Key words] precious metals; physical properties; atomic structure

* * * *

作者·编者

敬告作者

为适应我国信息化建设需要, 扩大作者的学术交流渠道, 本刊已加入《中国学术期刊(光版盘)》和中国期刊网, 其相应的作者文章著作权使用费交中国版权保护中心统一处理。如作者不同意将文章编入上述数据库, 请在来稿时声明, 本刊将作适当处理。

《中国工程科学》编辑部