铱片的显微组织与室温拉伸断裂机制研究

刘 毅,张洞川,陈家林,吴 霏,罗锡明,陈登权 (昆明贵金属研究所,贵研铂业股份有限公司 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室,昆明 650106)

摘 要:采用辉光放电质谱法(GDMS)、光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)和力学试验机等测试手段,对不同加工状态的铱片杂质元素含量、金相组织、断口形貌和室温力学性能进行了研究。结果表明:加工状态对铱片的力学性能有重要影响,1mm厚的热轧态铱片平均抗拉强度为213.6 MPa,延伸率为2.52%,主要为脆性沿晶断裂,部分为脆性穿晶解理断裂;而0.1mm厚的冷加工态铱片平均抗拉强度为954.1 MPa,延伸率为0.55%,断裂模式主要为脆性穿晶断裂;两者在断裂之前均未发生明显的塑性变形,表现为脆性断裂模式。

关键词:金属材料; 铱片; 室温拉伸; 断ロ形貌; 本征脆性 中图分类号: TG146.3⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1004-0676(2015)03-0042-07

Investigation on Microstructure and Fracture Mechanism of Iridium Sheet at Room Temperature

LIU Yi, ZHANG Dongchuan, CHEN Jialin, WU Fei, LUO Ximing, CHEN Dengquan (State Key Laboratory of Advance Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals, Sino-Platinum Metals Co. Ltd., Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: Impurity contents, microstructures, fracture surfaces and mechanical properties of iridium (Ir) sheets under different processing conditions were investigated by means of glow discharge mass spectrometry (GDMS), optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and tensile testing machine. The results indicate that processing condition has great effect on mechanical properties of Ir sheet. The ultimate tensile strength and elongations of 1mm hot rolled Ir sheet were 213.6 MPa and 2.52%, respectively, with a mixture fracture mode of brittle intergranular fracture and brittle transgranular cleavage fracture. The ultimate tensile strength and elongations of 0.1 mm cold worked Ir sheet were 954.1 MPa and 0.55%, respectively, with mainly transgranular brittle fracture. No obviously evidence of plastic deformation was occurred before tensile failure.

Key words: metal materials; Ir sheet; tensile testing at room temperature; fracture morphology; inherent brittleness

金属铱于 1803 年由英国化学家 Tennant 等在铂 的不溶杂质中发现^[1],具有熔点高(2443℃)、硬度高、 弹性模量高(*E*=516 GPa, 泊松比 μ=0.26)、高温力学 性能好、化学性质非常稳定等特点,可以在氧化性 气氛中应用到 2300℃,是唯一在 1600℃以上仍具有 良好机械性能的金属。由于具有这些特殊的物理化 学性质, 铱己成功应用于航天航空、高能物理、兵器、机械电子、医学等诸多领域。铱及其合金用于航空发动机火花塞^[2], 铱合金热电偶为唯一能在大气中测量达 2100℃高温的测温材料^[3], 铱坩埚用于生长高熔点的难熔金属氧化物单晶, 如钇铝石榴石 (熔点接近 2000℃)、钆镓石榴石(GGG)晶体等, 其

收稿日期: 2015-01-15

基金项目:NSFC-国家自然科学基金云南省联合基金(U1202273)、云南省院所技术开发专项(2014DC018)。

第一作者:刘 毅,男,博士,副研究员,研究方向:贵金属合金材料开发。E-mail: liuyicool1982@126.com

使用温度可达到 2300℃,这种坩埚能在 2100~ 2200℃下工作数千小时^[4]。最近几十年^[5-6],美国橡 树岭实验室研制出的 Ir-0.3%W 合金作为放射性同 位素电池 PuO₂ 核燃料密封用包壳材料,能为深空 探测飞行器提供可靠持续的能源,铱在高新技术领 域表现出的重要用途越来越受到重视^[7-8]。

虽然金属铱具有面心立方晶体结构(fcc),但它 的塑性变形行为与其它 fcc 金属如 Cu、Al 完全不同, 与体心立方金属或金属间化合物(如 TiAl、Ni₃Al)的 变形特征较为类似,显示出脆性沿晶断裂^[9]。室温 下多晶铱在拉伸时无明显塑性变形就发生脆性沿晶 断裂(Brittle Intercrystalline Fracture, BIF), 延伸率 一般小于 5%^[10-11]。铱单晶的塑性变形特征非常奇 特,其在拉伸变形时,经历较大的塑性变形后(延伸 率达到 80%), 会发生解理断裂(cleavage fracture), 而在压缩时,不会发生断裂,铱单晶这种经历大的 延伸塑性形变后发生解理的原因仍然不清楚^[12-15]。 另外,铱的加工性能严重依赖于杂质元素含量,即 使 10×10⁻⁶ 的 C 和 O 元素也能恶化其加工性能, 高 纯铱虽然能够像金属铂一样进行锻造变形^[16],但高 纯度的铱往往非常难以制备,需要通过电子束悬浮 区域熔炼技术进行反复的提纯[17]。

关于铱的脆性机制的研究从 20 世纪 60 年代开 始至今,究其原因是大量的研究结果存在自相矛盾 之处。早期的研究结果(1960~1977年)一直把铱的脆 性归因于非金属杂质元素如 C、O 等在晶界的偏聚, 降低了晶界内聚力而导致发生沿晶断裂[10,18-19]。但 随后 1978 年,通过对多晶铱的晶界元素的俄歇电子 探针分析发现^[20],晶界元素的偏析并非是导致多晶 铱晶界脆性的原因,多晶铱的晶界脆性应为铱的固 有特性,而与杂质元素无关。近年来^[21-22],越来越 多的研究人员认为铱的脆性是由于其特殊的原子价 键引起的, 脆性是铱的固有特性, 而与杂质元素和 环境因素无关。至今,人们虽然普遍接受了这种观 点,但关于其脆性本质的物理机制,位错机制一直 争论不休。2005年, Cawkwell 等在 Science 杂志上 发表文章解释铱的脆性本质[23],进一步引起了材料 科学家们的广泛关注^[24-25]。但 2007 年 Balk 等人发 表文章并不赞同 Cawkwell 等人的观点。因而,关 于铱的脆性问题依然没有完全统一的认识^[25]。

本文对不同加工态铱片的杂质元素含量、显微 组织、拉伸力学性能和断裂机制进行了分析讨论, 以期加深对铱的断裂行为的理解。

1 实验

本实验铱片用原料粉末纯度达到 99.995%。铱 片主要制备过程为:先将铱粉压制、烧结后采用电 弧熔炼铸成铱锭,然后用高频感应熔炼,底漏浇注 成型,最后包覆钼板进行热轧,热轧温度控制在 1200℃以上,道次变形量控制在 10%以内,热轧至 1 mm 后空冷;随后,对1 mm 厚的铱片进行冷轧变 形,道次变形量控制在 5%以内,冷轧至 0.1 mm。 采用辉光放电质谱法(GDMS)对轧制成的片材进行 杂质含量分析,表1为铱片的主要杂质含量分析结 果,其中含量低于 0.1×10⁻⁶以下的元素未在此表中 列出。

Tab.1	Impu	ırity	conten	ts (ma	ass fr	action)	of I	r sheet
	investi	gated	by glo	w disc	harge	mass	spectro	ographic
	(GDM	S) ana	lysis					/10 ⁻⁶
元素	Si	S	Mg	Fe	Ru	Rh	Sb	Pt
含量	0.286	0.156	2.591	6.168	7.022	4.727	2.079	34.747
元素	Zn	Cr	Ni	Pd	Sn	Ti	Pb	Bi
含量	0.484	0.107	0.19	0.215	0.833	0.145	0.198	1.978

表1 辉光放电质谱法测定的铱片主要杂质的化学成分

对 2 种不同加工状态铱片的横截面和纵截面的 组织进行金相分析,金相样品的腐蚀介质为加盐酸 和氢氟酸的饱和氯化钠溶液,电压控制在 10 V 左 右,腐蚀时间控制在 10~15 min。对铱片进行维氏 硬度测试,硬度测试的条件为 HV_{0.2}/15s,每个样品 测试 5 个点。采用岛津 AG-X100kN 型万能力学试 验机对铱片进行了室温拉伸力学性能测试,加载速 率为 2 mm/min,为了确保数据的重复性,不同加工 状态铱片的测试样品数量为 3 个,试验完成后由计 算机给出应力-应变曲线。采用日立 S3400N 型扫描 电镜对铱片的拉伸断口进行断口形貌观察。

2 结果与讨论

2.1 不同加工状态铱片的显微组织分析

图 1 为热轧态 1 mm 和冷加工态 0.1 mm 厚的铱 片金相组织照片。



图 1 不同加工状态 Ir 片的显微组织

Fig.1 Microstructures of Ir sheets at different processing conditions

[(a). Longitudinal section of hot rolled 1 mm Ir sheet; (b). Cross section of hot rolled 1 mm Ir sheet; (c). Longitudinal section of cold worked 0.1 mm Ir sheet]

图 1(a)为1 mm 厚铱片的纵截面组织,可看出 其为未发生完全再结晶组织特征,即它的晶粒还未 完全长大,晶界呈锯齿状,不像完全退火态组织那 样晶界平直;图1(b)为1mm厚铱片的横截面组织, 其晶粒非常粗大,沿轧制方向呈现出一定的扁平状。 值得注意的是图 1(a)中发现铱的金相组织中有退火 孪晶,该退火孪晶是在高温热轧加工后冷却过程中 形成的。一般认为,退火孪晶较多地出现在中、低 层错能的面心立方金属中,例如铜、镍和金等,层 错能分别为 78^[26]、128^[27]和 33 mJ/m^{2 [28]},其出现是 由于再结晶过程中界面迁移趋于界面能降低。由于 层错能的存在,在三叉晶界处以层错为核形成片状 孪晶。文献[28]报道,铱的层错能为 422 mJ/m²,远 远高于其它面心立方金属。在以往文献中鲜有报道 过铱的金相组织存在退火孪晶现象,在图 1(a)中观 察到铱的退火孪晶,说明对于高层错能的金属材料 也具有退火孪晶。图 1(c)为 0.1 mm 厚铱片的纵截面 组织,可看出为明显的加工态的显微组织形貌,存 在明显的加工方向, 晶粒沿着轧制方向被拉长, 晶 粒为扁平状,晶粒大小、形状不均匀,为典型的"混 晶组织"形貌。

2.2 不同加工态铱片的室温拉伸力学性能与显微 硬度

表 2 给出了不同加工态铱片的室温拉伸力学性 能测定数据。

由表 2 可以看出, 1 mm 铱片的平均抗拉强度为 213.6 MPa,延伸率为 2.52%;而 0.1 mm 铱片的 平均抗拉强度约为 954.1 MPa,延伸率为 0.55%。这 些数据表明,铱片的力学性能与加工历程和组织紧 密相关,冷加工态的铱片(0.1 mm)抗拉强度是热轧 态(1 mm)的 4.5 倍,屈服强度是热轧态的 7 倍,说 明了铱片的组织越细,强度越高。

表 2	1 mm 与 0.1 mm	厚度铱片的力学性能
-----	---------------	-----------

Fab.2	Mecha	nical pro	operties	of 1	mm and	0.1	mm Ir	sheets
-------	-------	-----------	----------	------	--------	-----	-------	--------

样品编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
Ir(1 mm)-1	117.0	206.1	2.52
Ir(1 mm)-2	121.0	224.5	2.51
Ir(1 mm)-3	110.0	210.2	2.54
Ir(0.1 mm)-1	810.0	952.1	0.54
Ir(0.1 mm)-2	860.0	958.6	0.55
Ir(0.1 mm)-3	850.0	951.7	0.56

图 2 为铱片的工程应力-工程应变曲线。



Fig.2 Engineering stress - engineering strain curves of Ir sheets

由图 2 可以看出, 0.1 mm 的铱片弹性变形阶段 较长,几乎没有发生塑性变形就断裂,而 1 mm 的 铱片在弹性变形阶段后有相对较长的塑性变形阶 段;但整体上,铱片的塑性变形阶段较小,显示出 脆性材料特征。

^{[(}a).1 mm 热轧态 Ir 片纵截面组织; (b).1 mm 热轧态 Ir 片横截面组织; (c).0.1 mm 冷加工态 Ir 片纵截面组织]

表3给出了不同厚度铱片的显微硬度。

表3	不同加工状	态铱片的	显微硬度
----	-------	------	------

Tab.3 Micr	o-hardness of iridium she	eets at various thicknesses
铱片厚度	1 mm	0.1 mm
HV _{0.2}	323, 331, 325, 311, 308	399, 414, 439, 414, 422

由表 3 可看出, 0.1 mm 加工态铱片的平均显微 硬度为 417.6, 热轧态 1 mm 铱片显微硬度为 319.6。

从图 1(c)可以看出铱片基本属于加工硬化组织,而 图 1(a)为热轧铱片的不完全再结晶组织,纯铱片从 流线型加工硬化组织到再结晶组织伴随着加工应力 的消除,这种组织关系反映在硬度上有很好的对应 性。对冷轧态 0.1 mm 厚板材试样来说,由于加工 硬化的存在,使得其硬度高于热轧态。

2.3 不同加工状态铱片的室温拉伸断口形貌

图 3 为铱片拉伸断口的扫描电镜形貌图像。



图 3 Ir 片的拉伸断口扫描电镜图像 [(a)、(b)和(c)为1mm 厚 Ir 片的拉伸断口; (d)为0.1mm 厚 Ir 片的拉伸断口]

Fig.3 SEM micrographs of the fracture surfaces of Ir sheets

[(a), (b), and (c) represent fracture surfaces of 1 mm Ir sheet; (d) represents fracture surface of 0.1 mm Ir sheet]

从图 3(a)、(b)和(c)可看出,1 mm 厚的铱片为 混合断裂模式,其断裂模式主要为脆性沿晶断裂 (BIF);图 3(b)为厚 1 mm 铱片脆性沿晶断裂晶粒表 面形貌,可以看出晶粒表面非常光滑且有些晶界处 有裂纹,为典型的沿晶断口形貌。图 3(c)中箭头所 示为厚 1 mm 铱片穿晶解理断裂表面,其表面具有 解理断裂典型的"河流状花样"和解理台阶,与文 献^[29]报道的铱解理断口形貌类似。图 3(d)为 0.1 mm 厚铱片断口形貌,可以看出冷轧制的铱片由多层扁 平状的晶粒组成,每一层的晶粒都为脆性穿晶断裂, 且层与层之间存在裂缝,其断裂模式主要为脆性穿 晶断裂(Brittle Transcrystalline Fracture, BTF),较少 观察到沿晶断裂。不同加工态的铱片都未发生明显 塑性变形,且都为脆性断裂。

关于多晶铱的断口形貌, Panfilov 等在文献 [30-32]中进行过报道。文献[30]给出了多晶铱的沿 晶脆性断裂断口形貌与本文图 3(a)和(b)的研究结果 较为类似,沿晶断口表面非常光滑,晶界处有裂纹; 文献[32]给出了高纯铱的穿晶解理断口形貌与本文 图 3(c)的穿晶解理断口形貌与其研究结果类似,晶 粒表面呈现出河流状花样。Panfilov 等认为铱的穿 晶断裂为其室温下的内在断裂模式,不管是多晶还 是单晶。

2.4 铱片的拉伸断裂机制讨论

Pugh 等^[33]提出了一个纯金属塑/脆性质的 *K/G* 判据,其中 *K* 为体模量,*G* 为剪切模量,该模型得 到了较为广泛的认可^[34-35]。*K/G* 的比例反映了脆性 断裂和塑性流变的难易程度,*K/G* 的比值比较低时, 材料表现为脆性;*K/G* 比值比较高时,材料表现为 韧性。表 4 为金属的 *K/G* 值,表中给出铱和铑的 *K/G* 比值为 1.77 和 1.83,金和铂的 *K/G* 比值为 6.19 和 4.52。众所周知,金和铂有优异的延展性,其对 应的比值较高表现为塑性断裂;铱和铑虽然为面心 立方金属,但难以加工,其对应的 *K/G* 比值比较低 表现为脆性断裂,这就从体积模量和剪切模量上说 明铱的脆性本质。

表4 由多晶和单晶弹性常数计算的 K/G^[29]

Tab.4 Calculation of *K/G* from polycrystalline and single crystal elastic constants^[29]

Matarial	Polycrystalline constants			Single crystal constants		
Material	K/GPa	G/GPa	K/G	K/GPa	G/GPa	K/G
fcc Ir	370.7	209.9	1.77	366.7	190.6	1.92
Rh	274.7	150.0	1.83			—
Ni	186.9	77.0	2.43	180.4	62.1	2.91
Pt	275.5	61.0	4.52	282.7	67.3	4.20
Cu	131.3	45.5	2.89	137.1	31	4.50
Ag	99.8	28.8	3.46	103.6	19.7	5.26
Au	171.2	27.7	6.19	166.7	18.7	8.91
bcc Cr	190.4	71.6	2.66	155.2	127.2	1.22
W	312.4	151.3	2.06	307.7	160.0	1.92
Mo	274.6	116.7	2.37	270.7	129.4	2.09
Fe	168.3	83.1	2.03	178.3	59.0	3.02
V	162.1	46.7	3.47	155.3	49.9	3.11
Та	206.4	68.6	3.01	196.3	60.2	3.26
Nb	173.3	37.5	4.63	171.3	42.5	4.03

2005 年, Oleg 等^[36]给出了 Ir、Rh 及其难熔合 金,以及其它韧性 fcc 金属的熔点、理论体模量、 柯西压力和 Rice-Thomson 比值,如表 5 所示。从表 5 可看出, Ir 和 Rh 都具有负的柯西压力,而 Au 的 柯西压力值为 2.73, Al 的柯西压力值为 1.15。负的 柯西压力意味着这类材料键合特征具有强的定向共 价键^[37]。根据 Rice-Thomson 准则(晶体塑性/脆性行 为),减聚能反映出裂纹尖端位错发生和裂纹扩张的 相互作用,一般情况 μb/γ_s>7.5~10 时,晶体发生解 理脆性断裂。对于大多数的 fcc 金属, Rice-Thomson 比值 μb/γ_s≤7.5, 但是 Ir 和 Rh 的值达到 24.5 和 14.6, 说明 2 种金属易发生解理。其主要原因如 Gornostyrev^[38]所述, 铱的 d 电子轨道电荷密度分布 具有定向性, 在剪切变形中形成了"赝共价键"的 原子交互作用。因而, Ir 和 Rh 脆性本质源于其电 子结构特征而导致的原子间的异常强的结合力, 最 终导致非常大的剪切模量。从表 1 的 GDMS 分析铱 片杂质元素分析结果可看出杂质总含量小于 50×10⁶, 铱片的纯度高达 99.995%, 可以认为本工 作研究的铱片属于高纯铱片。因此说明铱的脆性断 裂为本征脆性断裂,即铱中不含任何有害杂质元素 时其断裂模式也为脆性断裂。本文从室温拉伸的断 口形貌上只能给出铱的宏观脆性现象,并不能给出 其脆性本质,关于铱的脆性研究还有待进一步研究。

- 表 5 Ir、Rh 及其难熔合金的熔点、理论体模量、柯西压 力、Rice-Thomson 比率,以及与 Ni₃Al 和大量韧性 fcc 金属的比较^[39]
- Tab.5 Melting temperatures, theoretical bulk moduli, Cauchy pressures and Rice-Thomson ratios for Ir, Rh, and their refractory alloys, in comparison with Ni₃Al and a number of ductile fcc metals^[39]

	Melting	Bulk	Cauchy	Rice-Thomson
Metal	temp.	modulus	pressure	ratio
/Alloy	/K	/GPa	$(C_{12}-C_{44})/C_{44}$	$/(\mu b/\gamma_s)$
Au	1338	167	2.73	6.1
Al	933	77	1.15	5.9
Ni	1726	186	0.15	7.6
Ni ₃ Al	1663	176	0.18	7.8
Ir	2716	362	-0.05	24.5
Rh	2233	269	-0.05	14.6
Ir ₃ Ti	2388	294	-0.19	22.4
Ir ₃ Zr	2553	272	-0.05	15.3
Ir ₃ Hf	2743	271	-0.07	16.1
Ir ₃ V	2373	318	-0.24	21.1
Ir ₃ Nb	2708	315	-0.10	18.4
Ir ₃ Ta	2727	319	-0.05	15.0
Rh ₃ Ti	2023	226	0.03	12.5
Rh ₃ Zr	2173	204	0.11	12.2
Rh ₃ Hf	2403	213	0.11	11.2
Rh_3V	2013	250	-0.11	15.6
Rh ₃ Nb	2236	245	-0.03	14.8
Rh ₃ Ta	2730	256	-0.02	14.6

3 结论

(1) 厚 0.1 和 1 mm 的铱片抗拉强度分别为 213.6 和 954.1 MPa, 延伸率分别为 2.52%和 0.55%。

(2) 1 mm 铱片为脆性沿晶断裂和脆性穿晶断裂的混合断裂模式,其中主要为脆性沿晶断裂,而 0.1 mm 铱片主要为脆性穿晶断裂,且二者断裂前均 未发生明显的塑性变形。

参考文献:

- Hunt L B. A history of iridium[J]. Platinum Metals Review, 1987, 31(1): 32-41.
- [2] Shoobert G W. Iridium electrodes Increase spark plug life[J]. Platinum Metals Review, 1962, 6(3): 92-94.
- [3] 刘毅,陈登权,陈家林,等.Ir和IrRh40合金热电偶丝的显微组织和力学性能研究[J].贵金属,2014,35(3):40-44.

Liu Yi, Chen Dengquan, Chen Jialin, et al. Investigation on microstructure and properties of Ir and IrRh40 alloy thermocouple wire[J]. Precious Metals, 2014, 35(3): 40-44.

- [4] Cockayne B. Czochralslri growth of oxide single crystals[J]. Platinum Metals Rev, 1974, 18(3): 86-91.
- [5] Inouye H. Platinum group alloy containers[J]. Platinum Metals Rev, 1979, 23(3): 100-108.
- [6] Liu C T, Inouye H. Development and characterization of an improved Ir-0.3% W alloy for space radioisotopic heat sources[R]. Tenn (USA): Oak Ridge National Lab, 1977.
- [7] Panfilov P, Yermakov A, Antonova O V, et al. Plastic deformation of polycrystalline iridium at room temperature[J]. Platinum Metals Review, 2009, 53(3): 138-146.
- [8] Ohriner E K. Processing of iridium and iridium alloys[J]. Platinum Metals Review, 2008, 52(3): 186-197.
- [9] Takasugi T, George E P, Pope D P, et al. Intergranular fracture and grain boundary chemistry of Ni₃Al and Ni₃Si[J]. Scripta Metallurgica, 1985, 19(4): 551-556.
- [10] Mordike B L, Brookes C A. The tensile properties of iridium at high temperatures[J]. Platinum Metals Review, 1960, 4(3): 94-99.
- [11] Panfilov P, Dmitriev A Y V. Fracture behaviour of poly-crystalline iridium under tension in the temperature range 20-1500°C[J]. Journal of Materials Science Letters, 1994, 13(9): 137-141.

- [12] Brookes C A, Greenwood J H, Routbort J L. Brittle fracture in iridium single crystals[J]. Journal of Applied Physics, 1968, 39(5): 2391-2395.
- [13] Reid C N, Routbort J L. Malleability and plastic anisotropy of iridium and copper[J]. Metallurgical Transactions, 1972, 3(8): 2257-2260.
- [14] Panfilov P. Deformation tracks distribution in iridium single crystals under tension[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(19): 8230-8235.
- [15] Yermakov A, Panfilov P, Adamesku R. The main features of plastic deformation of iridium single crystals[J]. Journal of Materials Science Letters, 1990, 9(6): 696-697.
- [16] Panfilov P, Yermakov A, Antonova, O V, et al. Plastic deformation of polycrystalline iridium at room temperature[J]. Platinum Metals Review, 2009, 53(3): 138-146.
- [17] Hieber H, Mordike B L, Haasen P. Deformation of zone-melted iridium single crystal[J]. Platinum Metals Review, 1964, 8(3): 102-106.
- [18] Brookes C A, Greenwood J H, Routbort J L. Hightemperature tensile properties of iridium single crystals[J]. J Jpn Inst Met, 1970, 98(1): 27-31.
- [19] Fortes M A, Ralph B. A field-ion microscope study of segregation to grain boundaries in iridium[J]. Acta Metallurgical, 1967, 15(5): 707-720.
- [20] Hecker S S, Rohr D L, Stein D F. Brittle fracture in iridium[J]. Metallurgical Transactions A, 1978, 9(4): 481-488.
- [21] Gornostyrev Y N, Katsnelson M I, Medvedeva N I, et al. Peculiarities of defect structure and mechanical properties of iridium: Results of ab initio electronic structure calculations[J]. Physical Review B, 2000, 62(12): 7802-7808.
- [22] Liang C P, Li G H, Gong H R. Concerning the brittleness of iridium: An elastic and electronic view[J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 133(1): 140-143.
- [23] Cawkwell M J, Nguyen M D, Woodward C, et al. Origin of brittle cleavage in iridium[J]. Science, 2005, 309(5737): 1059-1062.
- [24] Lynch S P. Concerning the anomalous brittle fracture behaviour of iridium[J]. Scripta Materialia, 2007, 57(2): 85-88.
- [25] Balk T J, Hemker K J, Kubin L P. On anomalous strain hardening in iridium crystals[J]. Scripta Materialia, 2007, 56(5): 389-392.

- [26] San X Y, Liang X G, Cheng L P, et al. Effect of stacking fault energy on mechanical properties of ultrafine-grain Cu and Cu-Al alloy processed by cold-rolling[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2012, 22: 819-824.
- [27] 温玉锋,孙坚,黄健,等. 镍基合金广义层错能的第一 性原理研究[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(7): 1664-1667.
 Wen Yufeng, Sun Jian, Huang Jian, et al. First-principles study of generalized stacking fault energy in Ni-based alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,
- [28] Balk T J, Hemker K J. High resolution transmission electron microscopy of dislocation core dissociations in gold and iridium[J]. Philosophical Magazine A, 2001, 81(6): 1507-1531.

2011, 21(7): 1664-1667.

- [29] Hecker S S, Rohr D L, Stein D F. Brittle fracture in iridium[J]. Metallurgical Transactions A, 1978, 9A: 481-488.
- [30] Panfilov P, Aexander Y. On brittle fracture in polycrystalline iridium[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(14): 4543-4552.
- [31] Panfilov P, Aexander Y. Mechanisms of inherent and impurity-induced brittle intercrystalline fracture in pure FCC -metal iridium[J]. International Journal of Fracture, 2004, 128(1/4): 147-151.

- [32] Panfilov P. On the inherent fracture mode of iridium at room temperature [J]. Journal of Material Science, 2005, 40(22): 5983-5987.
- [33] Pugh S F. Relations between the elastic moduli and the plastic properties of polycrystalline pure metals[J]. Philosophical Magazine, 1954, 45(367): 823-843.
- [34] Sami K, Chen K Y, Liang C, et al. Electronic origin of anomalously high shear modulus and intrinsic brittleness of fcc Ir[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2008, 20(8): 5221-5225.
- [35] Bannikov V V, Shein I R, Ivanovskii A L. Influence of carbon, nitrogen and oxygen impurities on the ductility and electronic properties of fcc iridium: First-principles study[J]. Solid State Communications, 2009, 149(41/42): 1807-1809.
- [36] Oleg Y K, Yuri N G, Arthur J F. Modeling the dislocation properties and mechanical behavior of Ir, Rh, and their refractory alloys[J]. JOM, 2005, 57(3): 43-47.
- [37] Brovman E G, Kagan Y M. Phonons in nontransition metals [J]. Sov Phys Uspekhi, 1974, 17(2): 125-152.
- [38] Gornostyrev Y N, Katsnelson M I, Medvedeva N I. Peculiarities of defect structure and mechanical properties of iridium: Results of ab initio electronic structure calculations[J]. Physical Review B, 2000, 62(12): 7802-7808.

欢迎订阅 2016 年《黄金》 传播信息 传递经验 促进创新 服务行业

《黄金》于 1980 年创刊,是黄金行业的综合性科技期刊。主 要报道黄金及其相关行业在矿业经济与管理、黄金市场、工业用 金、黄金地质、采矿工程、机电与自动控制、选矿与冶炼、安全 与环保、分析测试等方面的科研成果和综合评述,以及新理论、 新技术、新工艺、新设备、生产管理经验等内容,同时还开辟了 信息纵横(国内信息、国外信息)、读编往来等栏目。

《黄金》具有权威性,内容翔实,信息量大,实用性强,覆 盖面广,现已遍布黄金、冶金、有色金属、黑色金属、地质矿产、 化工、机械、核工业、耐磨、金融及金银饰品等行业。

《黄金》为月刊,国际标准连续出版物号 ISSN 1001-1277,中国标准连续出版物号 CN 22-1110/TF, 国际期刊 CODEN 码 HANGFV,彩色封面,国际开本(A4),国内外公开发行,国内邮发代号12-47。国 外发行由中国国际图书贸易总公司代理,代号 M3331。全国各地邮局和我社发行部均可订阅。国内每册定 价 25.00 元,全年 300.00 元。

- 地 址: 吉林省长春市南湖大路 6760 号 黄金杂志社
- 电话: 0431-89243511
- 网址: gold.ccgri.com



邮 编: 130012 传 真: 0431-85511548-3235 电子信箱: ggb3068@126.com