

全球钽铌矿产资源开发利用现状及趋势*

曹飞^{1,2,3}, 杨卉芃^{1,2,3}, 张亮^{1,2,3}, 王威^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006; 2. 自然资源部多金属矿评价与综合利用重点实验室, 河南 郑州 450006; 3. 河南省黄金资源综合利用重点实验室, 河南 郑州 450006)

摘要: 美国、欧盟和日本均将铌和钽列入重要战略矿产目录, 2017 年全球钽铌年产量分别为 0.13 万 t 和 6.4 万 t, 从数量上看尽管产量和用量不大, 但钽铌在机械、能源、航空航天和医疗等领域均有很多特殊和重要的应用。概述了钽铌的性质、主要用途、矿床分布及类型、储量和产量等, 介绍了全球典型钽铌矿床, 并对全球钽铌供需情况、价格变化等进行了分析。结果表明: 全球探明的钽铌矿产资源充足, 品质优良, 目前生产集中在少数国家。钽矿开采集中在非洲中部的刚果、卢旺达、尼日利亚, 以手工开采残积风化型钽矿为主, 由于锂资源需求大增, 作为锂矿主要生产国的澳大利亚等国将通过回收锂矿共伴生的钽资源正重新成为钽矿生产大国, 全球部分钽矿供应将逐步从非洲转向澳大利亚等。铌矿开采集中在巴西和加拿大少数的大型碱性碳酸岩型铌矿床中, 由于资源优势, 未来全球铌矿开采仍然将集中在巴西和加拿大。钽矿市场供应混乱, 价格波动较大; 铌矿市场高度垄断, 价格由行业巨头决定。钽铌矿产资源的勘探和开发项目应该注重市场分析及与全球主要在产矿山项目的技术经济指标对比, 避免投资损失。

关键词: 钽; 铌; 矿床; 储量; 价格; 供需分析; 市场

中图分类号: P618.79; P618.86 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2019)05-0056-12

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.06.041

Current Situation and Trend Analysis of Global Tantalum and Niobium Mineral Resources

CAO Fei^{1,2,3}, YANG Huipeng^{1,2,3}, ZHANG Liang^{1,2,3}, WANG Wei^{1,2,3}

(1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Zhengzhou 450006, China; 2. Key Laboratory of Evaluation and Multipurpose Utilization of Polymetallic Ores of Ministry of Nature Resources, Zhengzhou 450006, China; 3. Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Gold Resource in Henan Province, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: Tantalum and niobium identified as the critical materials by the United States, the European Union and Japan, play an important role in many fields such as machinery, energy, aerospace, medicine, and so on, although the output of tantalum and niobium in 2017 was just 1 300 t and 64 000 t, respectively. The properties, applications, distribution of mineral deposits, types of ore, reserves and output about tantalum and niobium were introduced. The typical tantalum and niobium deposits in the world were also introduced. Meanwhile, the price, supply and demand of tantalum and niobium in global world were analyzed. The results indicated that the proved reserves of tantalum and niobium in the world were sufficient, but the output of that was monopolized by a few countries. Tantalum mining was mainly in central Africa – Congo, Rwanda, Nigeria, where the resources mined by manual work were mainly weathered eluvial deposit. Due to the fast – growing requirements of lithium, Australia as a major country of lithium would be the main producer of tan-

* 收稿日期: 2019-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(51504225)

作者简介: 曹飞(1982-), 男, 山西临汾人, 高级工程师, E-mail: caofeide@126.com。

通信作者: 杨卉芃(1962-), 男, 新疆疏附人, 研究员, 长期从事矿产资源综合利用研究工作。

talium by recycling tantalum associated in the lithium deposits. So the supply of tantalum would be transferred from Africa to Australia and other countries. Niobium mining was concentrated in a few large alkaline carbonate niobium deposits in Brazil and Canada, and they would be the key countries of niobium supply because of their abundant resources. The supply market of tantalum was disordered resulting fluctuations in price. What's more, the supply market of niobium was highly monopolized. Therefore the price was determined by industry titans. Based on the above analysis, the exploration and development projects of niobium and tantalum mineral resources should focus on the market analysis and compare with the technical and economic indicators of the major mining projects in the world to avoid failed investment.

Key words: tantalum; niobium; deposits; reserves; price; supply - demand analysis; market

钽、铌具有熔点高、密度大、耐高温、耐腐蚀、耐磨损、超导性和高强度等优异性能^[1],广泛应用于钢铁合金、机械制造、建筑、电子工业等许多领域,是现代尖端电子、航空航天、医疗和军事装备等工业中不可缺少的重要金属原料,很多铌钽产品没有可替代品。作为高新技术产业的关键元素,钽铌日益受到世界各国的青睐,美国、欧盟和日本都将其列为战略性矿产^[2-5]。我国这两种资源都较为短缺,铌、钽的对外依存度均超过80%^[6]。因此从全球的角度,研究钽、铌资源概况和供需分析,对调节国内钽铌的生产及供给无疑具有重要的意义。

1 性质和用途

1.1 钽

钽原子序数为73,相对原子质量为180.95,质地较硬,延展性极佳。纯钽在冷状态下无需中间退

火就可轧成很薄(小于0.01 mm)的箔。钽的熔点高达2 996 ℃,仅次于钨和铼,沸点达到5 425 ℃,密度为16.68 g/cm³,莫氏硬度高达6.5。钽的耐腐蚀能力可与玻璃媲美,在150 ℃左右只有氟、氢氟酸、三氧化硫(包括发烟硫酸)、强碱和某些熔盐可腐蚀钽。金属钽在常温的空气中较为稳定,加热到高于500 ℃则氧化为Ta₂O₅。

钽具有熔点高、蒸汽压低、冷加工性能好、化学稳定性高、抗腐蚀能力强、表面氧化膜介电常数大等一系列优异性能。因此,钽在电子、冶金、化工、原子能、超导技术、汽车、航空航天、医疗卫生等许多领域均有重要应用,详见表1和图1。电容器是钽最大的应用领域,世界上34%的钽用于制作钽电容器。钽电容器具有高容量、低损耗、耐温差、长寿命等特点,多项优异性能是其他电容器无法达到的,因而被广泛用于通讯、计算机、汽车、仪器仪表、航空航天和国防军工等领域。

表1 钽产品的分类和应用

Table 1 Classification and applications of tantalum products

钽产品	应用领域	性质及作用
碳化钽	切削工具	高温下易成型,避免产生纹理缺陷
钽酸锂	表面声波、手机声波过滤器、音响、电视	强化电子信号波,输出更清晰的音频和视频信号
氧化钽	望远镜、相机、手机镜头、X射线薄膜,喷墨印刷机	调节光学玻璃折射率,减少X射线曝光率,提高图像质量,提高电容器在集成电路中的耐用性
钽粉	集成电路中的钽电容器,医疗器械、汽车部件如ABS、安全气囊激活、发动机管理模块、GPS、便携式电子产品、平板电视、电池充电器、功率二极管、油井探头、手机信号屏蔽部件	可靠性高,在-55+200 ℃宽温度范围保持稳定,可承受振动,较强的电子储存能力
钽板	化工设备防腐层、阀门、热交换器、钢结构阴极保护系统、耐腐蚀紧固件、水箱	优良的耐腐蚀性能
钽丝、钽棒	血管支架、骨关节、骨骼修复、缝合夹 高温炉部件 溅射靶材	优良的生物相容性 保护气氛下的高熔点,耐高温
钽锭	高温合金如喷气发动机涡轮盘、叶片、刀具 计算机硬盘	钽、氧化钽、氮化钽薄膜包裹半导体防止铜迁移 含钽3%~11%的合金优良的耐高温、耐腐蚀性能 一种含钽6%的合金具有形状记忆功能
	TOW-2 导弹穿甲弹头	钽的密度和可成形性完美平衡,可使系统更轻更有效

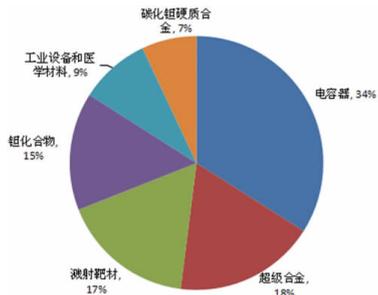


图 1 钽的主要应用领域
Fig. 1 Main applications of tantalum

能,可以和钢铁等金属形成机械性能优良的合金,钽的氧化物具有很好的介电常数和稳定性,钽锡合金和钽钛合金具有超导性能。钽广泛应用于钢铁、高性能合金(包括高温合金)、超硬碳化物、超导体、电子器件和功能陶瓷等制造领域,详见表 2、图 2。

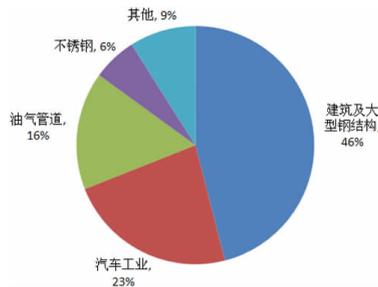


图 2 钼的主要应用领域
Fig. 2 Main applications of niobium

1.2 钼

钼原子序数 41,相对原子质量为 92.1,质地较硬,具有延展性。钼的熔点高达 2 468 ℃,仅次于钨、铼、钽和钿,沸点为 4 930 ℃,密度 8.58 g/cm³,莫氏硬度达到 6。钼具有很好的耐高温、耐腐蚀、耐磨损性

表 2 钼的应用行业及用途
Table 2 Application industry and applications of niobium

应用行业	用途
钢铁工业	世界约 85% ~ 90% 的钼以钼铁形式用于钢铁生产。钢中加入 0.03% ~ 0.05% 的钼可使钢的屈服强度提高 30% 以上。钼还能通过诱导析出和控制冷却速度,实现析出物弥散分布,在较宽的范围内调整钢的韧性水平。因此,钢中加入钼不仅可以提高钢的强度,还可以提高钢的韧性、抗高温氧化性和耐腐蚀性,降低钢脆性转变温度,使钢具有良好的焊接性能和成型性能
超导材料工业	钼的某些化合物和合金具有较高的超导转变温度,因而被广泛用于制造各种工业超导体,如超导发电机、加速器大功率磁体、超导储能器、核磁共振成像设备等。目前,最重要的超导体材料是钼-钛和钼-锡,被广泛应用于医学诊断的磁振图像仪和用于谱线(分析)的核磁共振仪
航空航天工业	航空航天工业是高纯钼的主要应用领域,主要用于生产火箭、飞船的发动机和耐热部件。钼和钼的热强合金具有良好的热强性能、抗热性能和加工性能,广泛用于制造航空发动机的零部件、燃气轮机的叶片。在美国几乎所有喷气式战斗机的发动机的热部件都采用钼合金
原子能工业	钼的热导率高,熔点高,耐腐蚀性好,并且中子俘获截面低,是一种非常合适原子能反应堆的材料。主要用途包括:核燃料的包套材料、核燃料的合金、核反应堆中热交换器的结构材料
电子工业	钼酸盐陶瓷可用于制作电容器,钼酸锂和钼酸钾等化合物单晶是新型光电子学和电子学用晶体,具有良好的压电、热电和光学性质,被广泛应用到红外线、激光技术和电子工业中。此外,钼的熔点高,发射电子能力强,并具有吸气能力,可用于制作电子管及其它电真空器件
医疗领域	钼具有良好的抗生理腐蚀性和生物相容性,不会与人体里的各种液体物质发生作用,并且几乎不会损伤生物的机体组织,对于任何杀菌方法都能适应,因而常被用于制造接骨板、颅骨板骨螺钉、种植牙根、外科手术用具等
其他应用	在化学工业中,钼是优质的耐酸和耐液态金属腐蚀材料,可用于制作蒸煮器、加热器和冷却器等。此外,钼酸也是一种重要的催化剂。钼也被应用到铸造行业,其主要作用是形成坚硬的碳化物(对耐磨有益)和改变石墨片的形貌和尺寸,因而常被用于制造汽车的汽缸盖、活塞环和刹车片等。此外,钼有时会与金和银一起用在纪念币上。钼有助于增加镜片透光性能,因而也被应用到光学行业镜片的制造中。钼也可应用到照明行业,如钼与 1% 锆的合金可用于制作高效高强钠蒸气街灯的精密支架,使这些小部件具有高的热强性、优良的成形性和耐钼蒸气腐蚀的性能

2 全球钼钽资源概述

钼钽在地壳中的含量很低,分别为 2×10^{-6} 和 20×10^{-6} 。相对于多数其他矿产,钼钽资源在全球的绝对数量不多,但相对目前的用量而言,钼钽矿产资源储量充足。钼钽矿物主要赋存于火成岩中,目前探明的具有经济意义的钼钽资源分布相对集中。

2.1 矿物类型

钼钽是同族元素,性质相近,在自然界中常常以共伴生矿物存在,由于钼钽容易与铀、钍、稀土、钛、锆和钨等元素发生类质同象作用,致使含钼钽矿物多达 182 种,含钼钽矿物达到 73 种,同时含钼钽的矿物达到 44 种。这些矿物成分复杂,矿物分类很难统一。

常见的具有工业价值的重要钼、钽矿物包括钼铁

矿、细晶石、锡锰钽矿、烧绿石、铌铁矿、黑稀金矿等。常见的具有工业意义的钽、铌矿物成分及性质见表3。

表3 常见钽铌矿物成分及性质

Table 3 Composition and properties of common minerals of niobium and tantalum

矿物名称	化学式	含量/%			密度 /(g·cm ⁻²)	磁性	介电 常数
		Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	TRE ₂ O ₃			
钽铁矿	(Fe, Mn)(Ta, Nb) ₂ O ₆	15~86.17	2~4		6.7~8.3	弱	7~8
铌铁矿	(Fe, Mn)(Ta, Nb) ₂ O ₆	1.40	10~78.72		5.3~6.6	弱	10~12
细晶石	(Ca, Na, Th, TR) ₂ (Nb, Ta, Ti) ₂ (O, HO, F) ₇	68.4~83.53	0~7.7	0.17~4.2	5.4~6.42	非	4.46~5.72
烧绿石 (黄绿石)	(Ca, Na, Th, TR) ₂ (Nb, Ta, Ti) ₂ (O, HO, F) ₇	0~5.86	37.54~75.12	13.33	4.1~5.4	非	5~9.5
易解石	(Ce, Th)(Nb, Ti) ₂ O ₅	0~6.9	23.8~32.5	15.5~19.5	5.2	弱	3.5~5.7
褐钇铌矿	(Y, Er, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti) ₄ O ₄	2.5~17	33.64~47	50±	5.5~5.8	弱	4~4.96
重钽铁矿	(Fe, Mn)(Ta, Nb) ₂ O ₆	65.67~83.96	1.17~1.37		8.17	弱	6.8
锰钽矿	(Ta, Nb, Sb, Mn, Fe) ₄ O ₈	68.96	8.3		6.94~7.23	弱	6.54
锡锰钽矿	(Ta, Nb, Sb, Mn, Fe) ₂ O ₂	69.58	8.37		7.19~7.36	弱	6.54
铈铌钙钛矿	(Ce, La, Na, Ca, Sr)(Ti, Nb) ₂ O ₃	0.75	16.15	32.29~34.6	4.75~4.99	弱	5~9.5
黑稀金矿	(Y, Ce, Ca, U, Th)(Nb, Ta, Ti) ₂ O ₆	0~22.53	3.83~47.43	16.36~31.45	4.5~5.9	弱	3.74~4.66
钛铌钽矿	(Ti, Ta, Fe) ₂ O ₂	37.65	11.32		5.3~5.5	弱	NA
铌铁金红石	(Ti, Nb, Fe) ₂ O ₂	0.39~14.9	0.9~42.99		4.6~5.14	弱	NA

2.2 矿床类型及分布

钽铌矿床的形成通常与火成岩关系密切,钽、铌矿床的成矿类型通常有花岗伟晶岩型、蚀变花岗岩型、花岗岩型、碳酸岩型、碱性岩浆岩型(霞石正长岩)、风化壳型和冲积型。中华人民共和国地质矿产行业标准 DZ/T 0203-2002《稀有金属矿产地质勘查规范》将钽铌矿床的主要工业类型划分为六种类型:碱性长石花岗岩型矿床、碱性花岗岩型铌-稀土矿床、碱性岩-碳酸岩型铌-稀土矿床、伟晶岩型矿床、白云鄂博型铌-稀土矿床和风化壳型铌铁矿

矿床。国外矿床类型划分不尽相同,根据英国地调局的划分,钽铌矿床划分原生碳酸盐矿床、次生碳酸盐矿床、碱性岩矿床、锂铌钽富集花岗岩矿床和锂铌钽富集伟晶岩矿床五种工业类型(表4)。原生钽铌矿床经过自然风化、搬运和沉积作用可以富集形成次生钽铌矿,次生钽铌矿往往品位高,开采成本低,在全球钽铌生产中占有重要地位,例如全球最重要的钽矿生产地—非洲大湖地区开采的钽矿和全球最大的铌矿开采区巴西的 Araxá 地区目前开采的铌矿都以次生矿床和风化矿床为主。

表4 钽、铌矿床主要工业类型^[7]

Table 4 Main industrial types of tantalum and niobium deposits

矿床类型	特征	储量规模(矿石量)及品位	典型矿山
原生碳酸盐矿床	钽矿床通常赋存于与碳酸盐接触的钾长花岗岩带内	Niobec 矿床,储量 23.5 × 10 ⁶ t, Nb ₂ O ₅ 品位 0.59%	加拿大 Niobec 和 Oka
次生碳酸盐矿床	通常位于含钽矿物碳酸盐岩的强风化带或沉积带中	矿床规模通常小于 1 000 × 10 ⁶ t, 红土型矿床, Nb ₂ O ₅ 品位可达到 3%, 冲积型矿床 Nb ₂ O ₅ 品位可达到 12%	巴西 Araxé 和 Catalao; 俄罗斯 Tomtor; 刚果共和国 Lueshe
碱性岩矿床	钽或少量的钽矿床通常与硅化碱性岩有关。金属矿物在岩浆或热液运移过程中聚集	矿床规模通常小于 100 × 10 ⁶ t, Ta ₂ O ₅ 品位 < 0.1%; Nb ₂ O ₅ 品位为 0.1% ~ 1%	希腊 Motzfeldt 和 Ilimaussa; 俄罗斯 Lovozero; 巴西 Pitinga; 加拿大 Thor Lake 和 Strange Lake; 沙特阿拉伯 Ghurayyah; 马拉维 Kanyika
富含锂铌钽花岗岩矿床	钽铌矿床通常与高铝浅色花岗岩有关,伴随一定热液交代作用	通常小于 100 × 10 ⁶ t, Ta ₂ O ₅ 品位 < 0.05%	埃及 Abu Dabbab 和 Nuweibi; 中国宜春
富含锂铌钽伟晶岩矿床	钽铌矿床通常与富集锂铌钽的伟晶花岗岩有关	通常小于 100 × 10 ⁶ t, Ta ₂ O ₅ 品位 < 0.05%	澳大利亚 Greenbushes 和 Wodgina; 加拿大 Tanco; 巴西 Volta Grande; 埃塞俄比亚 Kenticha; 莫桑比克 Morrua Marropino

澳大利亚的钽矿资源主要赋存于富含锂铍钽伟晶岩矿床中,钽通常与锂辉石和锡石等共生;巴西的钽矿资源主要赋存于大型碳酸岩型烧绿石矿床中或与花岗伟晶岩型锡矿共生;刚果、卢旺达的钽矿主要为风化残积型花岗伟晶岩钽矿,钽矿物主要为钽铁矿和细晶石等,矿山多为手工开采。锡石—黑钨矿热液矿床也是全球钽矿的重要来源,这类钽矿物与锡石矿物关系密切,分离困难,印尼、泰国、马来西亚、澳大利亚、巴西、尼日利亚和玻利维亚等国都生产富含铌钽的锡渣。

巴西和加拿大的铌矿床为碱性岩—碳酸岩型特大型铌矿床,主要铌矿物为烧绿石,品位较高,其他国家的铌矿床多为碱性花岗岩或碱性正长岩型铌矿床,这类矿床也具有很大的规模,但铌的品位较低,这类铌矿床的地质情况和铌矿物赋存状态也远比碳酸岩型矿床复杂,开采成本高,铌的回收率低,经济性较差。

2.3 全球各国储量和产量

2.3.1 钽

全球钽矿资源探明金属储量超过 10 万 t(表 5),主要分布在澳大利亚和巴西。事实上,全球钽矿资源分布广泛,除了以上两个国家外,俄罗斯、刚果(金)、卢旺达、中国、加拿大、美国、布隆迪、埃塞俄比亚、莫桑比克、尼日利亚和卢旺达等都有钽矿资源分布,但美国地调局都未统计,主要原因在于这些国家勘查工作程度低,或钽资源储量不清楚,或钽矿资源品位较低,储量标准不一。比如中国钽矿原矿 Ta_2O_5 品位都较低,一般为 0.01% ~ 0.02%;而国外典型矿山一般为 0.03% ~ 0.06%,达不到国外开发利用标准。非洲地区小型残积风化型钽矿数量多,勘查程度差,如卢旺达钽矿多为砂矿且多年战乱,勘探程度低,虽然产量很高,但无法统计其储量,因此也无法纳入统计。因此美国地调局统计的全球钽矿储量并未完全反映世界钽矿资源的情况。

2017 年全球共生产了 1 270 t 金属钽(表 5),非洲地区生产了全球 80% 以上的钽;巴西和中国分别生产了 100 t 和 95 t,分别占全球产量的 7.87% 和 7.48%。

按近年全球钽矿资源每年消耗 1 200 t 计,全球的钽矿资源储量的静态保障年限达到 80 年以上,钽矿资源储量充足,完全可以满足全球经济长期发展所需。

表 5 世界各国钽矿储量和产量(2017 年)

Table 5 World mine production and reserves of tantalum (2017 year)

国家	储量/t	储量占比/%	产量/t	产量占比/%
澳大利亚	78 000	69.64	NA	NA
巴西	34 000	30.36	100	7.87
刚果(金)	/	/	370	29.13
卢旺达	/	/	390	30.71
尼日利亚	/	/	190	14.96
中国	/	/	95	7.48
埃塞俄比亚	/	/	60	4.72
其他	/	/	65	5.12
合计	112 000	100.00	1 270	100.00

注:数据来源于 USGS,2018。

2.3.2 铌

全球铌矿资源分布较为广泛,目前已经发现的铌矿床主要分布在安哥拉、澳大利亚、中国、格陵兰、马拉维、俄罗斯、南非和美国等国,但探明储量分布相对集中。美国地调局 2017 年统计的全球铌矿资源探明储量为 430 万 t(表 6),仅巴西就占了全球储量的 95.35%,其余的 4.65% 在加拿大。与钽矿一样,许多国家的铌矿资源由于勘查程度低、品位不高等原因,储量未被美国地调局统计。世界已探明的铌矿床主要分布在北美、南美和非洲,并且绝大部分铌资源集中在世界上十几个大型矿床之中。

表 6 世界各国铌矿储量和产量(2017 年)

Table 6 World mine production and reserves of niobium (2017 year)

国家	储量/t	储量占比/%	产量/t	产量占比/%
巴西	4 100 000	95.35	57 000	89.34
加拿大	200 000	4.65	6 000	9.41
其他国家	/	/	800	1.25
合计	4 300 000	100.00	63 800	100.00

注:数据来源于 USGS,2018。

从产量来看,2017 年巴西铌矿产量占全球产量的 89.3%,加拿大占 9.4%,其他国家仅占 1.3%。按 2017 年全球铌矿开采金属量 6.4 万 t/a 计,全球铌矿资源的静态保障年限达到 67 年,资源量估计可以保障全球使用 300 ~ 400 年,可以满足全球经济长期发展所需。

3 全球典型矿山和矿床

全球典型钽、铌矿床分别见表 7 和表 8。从表可知:(1)全球钽、铌矿床主要分布在巴西、澳大利

亚和加拿大等国,非洲地区由于勘查程度低,且多为冲积型矿床,因此矿床数据无法准确统计。(2)目前典型的国外在产钽、铌矿山与国内矿山相比普遍品位较高,如 Ta₂O₅ 品位一般为 0.03% ~ 0.06%, Nb₂O₅ 品位一般为 0.5% ~ 2.3%,并且常共生有锂、锡和稀土等价值较高的矿产,而我国钽、铌矿床品位都较低^[8],Ta₂O₅ 和 Nb₂O₅ 品位一般为 0.008% ~ 0.002%,并且共生高价值的矿产较少。因此与国外矿山相比,我国矿山缺乏市场竞争力。(3)由于非洲地区钽矿开采混乱,导致市场极不稳定,因此新

开钽矿项目需进行综合评估,矿山开发成本是否可抵御价格风险;铌矿市场被巴西和加拿大矿山高度垄断,新开铌矿项目需与目前在产典型矿山(如 Araxa 和 Catalao)进行技术经济指标对比分析,是否有市场竞争力。(4)我国钽铌较为紧缺,而国外钽铌资源非常充足,因此应鼓励国内企业开拓国外市场,积极参与国外大型矿山的勘查开发,而对国内相对品位较低的钽铌矿应限制开采,因为低品位矿的开发利用抵御市场风险能力较弱,并且给矿山环境带来了负面影响。

表7 全球主要钽矿山和钽矿项目
Table 7 Global major tantalum mines and tantalum projects of tantalum

矿山	国家	公司	品位/%	储量/资源量(矿石量)	产能
Mibra	巴西	AMG Mineração	Ta ₂ O ₅ 0.034 Li ₂ O 1.06 Sn 0.037	资源量 20.29 × 10 ⁶ t 回收率 56%	Ta ₂ O ₅ 136 t/a 2018 年可达 272 t/a
Wodgina	澳大利亚	Mineral Resource limited	Ta ₂ O ₅ 0.03 Li ₂ O 1.38 Sn 0.03	资源量 25.35 × 10 ⁶ t (2017)	勘探阶段
Pilgangoora	澳大利亚	Pilbara Minerals	Ta ₂ O ₅ 0.012 Li ₂ O 1.27	储量 80.13 × 10 ⁶ t, 资源量 156.3 × 10 ⁶ t	建设阶段 Ta ₂ O ₅ 145 t/a
Greenbushes	澳大利亚	Global Advanced Metal	Ta ₂ O ₅ 0.059 Nb ₂ O ₅ 0.44 Sn 0.15	硬岩储量 13.46 × 10 ⁶ t (1991)	Ta ₂ O ₅ 550 t/a 停产
Bald Hill	澳大利亚	Tawana Resources	Ta ₂ O ₅ 0.016 Li ₂ O 1.18 Ta ₂ O ₅ 0.031	锂钽矿资源量 12.8 × 10 ⁶ t 高品位钽矿资源量 5.7 × 10 ⁶ t	设计产能 Ta ₂ O ₅ 120 t/a
Mount Cattlin	澳大利亚	Galaxy Resources	Ta ₂ O ₅ 0.016 Li ₂ O 1.08	资源量 16.4 × 10 ⁶ t (2016)	Ta ₂ O ₅ 25 t/a 锂辉石精 矿 6% Li ₂ O 137 000 t/a
Pitinga	巴西	Mineracao Taboca	Ta ₂ O ₅ 0.027 Nb ₂ O ₅ 0.202 Sn 0.134	资源量 330.85 × 10 ⁶ t (2015)	Ta ₂ O ₅ 220 t/a Nb ₂ O ₅ 1 600 t/a
Tanco	加拿大	Tantalum Mining Corporation	Ta ₂ O ₅ 0.12 Li ₂ O 2.7 Cs ₂ O 23.3	107.5 × 10 ⁶ t 350 × 10 ⁶ t 31.5 万 t 资源量(1992)	停产
Kenticha	埃塞俄比亚	EMDSC	Ta ₂ O ₅ 0.017 Ta ₂ O ₅ 0.015	硬岩资源量 100 × 10 ⁶ t 风化矿资源量 16 × 10 ⁶ t	Ta ₂ O ₅ 70 t/a
Marropino	莫桑比克	Noventa	Ta ₂ O ₅ 0.022	资源量 7.4 × 10 ⁶ t	Ta ₂ O ₅ 90 t/a 2013 关闭
Abu Dabbab	埃及	Gippsland Ltd.	Ta ₂ O ₅ 0.014 Nb ₂ O ₅ 0.01	资源量 98 × 10 ⁶ t	Ta ₂ O ₅ 270 t/a 未实施
Motzfeldt	格林兰	Regency Mines plc	Ta ₂ O ₅ 0.012 Nb ₂ O ₅ 0.185 ZrO ₂ 0.46 TREO 0.26 Th 0.012	资源量 340 × 10 ⁶ t	勘探阶段
Blue River	加拿大	Commerce Resources Corp	Ta ₂ O ₅ 0.019 Nb ₂ O ₅ 0.176	资源量 48.4 × 10 ⁶ t	勘探阶段
Crevier	加拿大	Niobay Metals Inc	Ta ₂ O ₅ 0.023 Nb ₂ O ₅ 0.196	资源量 25.4 × 10 ⁶ t	可研阶段

表8 全球主要铌矿山和铌矿项目
Table 8 Global major niobium mines and niobium projects of niobium

矿山	国家	公司	主要矿物	品位/%	储量/资源量(矿石量)	产能
Araxa	巴西	CBMM	烧绿石	Nb ₂ O ₅ 2.3 Nb ₂ O ₅ 1.5	风化壳储量 808 × 10 ⁶ t 下部原生资源量 1 800 × 10 ⁶ t, 回收率 50%	66% FeNb 合金 150 000 t/a
Catalao	巴西	China Molybdenum	烧绿石	Nb ₂ O ₅ 0.81 Nb ₂ O ₅ 1.14	储量 44.3 × 10 ⁶ t 资源量 62.9 × 10 ⁶ t	66% FeNb 合金 15 000 t/a
Niobec	加拿大	Magris Resources	烧绿石	Nb ₂ O ₅ 0.41 Nb ₂ O ₅ 0.42	储量 416.4 × 10 ⁶ t 资源量 629.9 × 10 ⁶ t 选矿回收率 58%	66% FeNb 合金 8 300t/a
Aley	加拿大	Taseko's	烧绿石 铌铁矿	Nb ₂ O ₅ 0.5	储量 84 × 10 ⁶ t	未生产
Nechalcho	加拿大	Avalon Rare Metals Inc.	铌铁矿 褐钇铌矿	Nb ₂ O ₅ 0.4 Ta ₂ O ₅ 0.04	储量 61.9 × 10 ⁶ t 稀土、锆、铌、钽共生矿	未生产
Ghurayyah	沙特	Tertia Minerals	铌铁矿 烧绿石	Nb ₂ O ₅ 0.28 Ta ₂ O ₅ 0.024	资源量 385 × 10 ⁶ t, 锆、钇、铌、钽共生矿	未生产
MrimaHill	肯尼亚	Pacific Wildcat Resource corp	烧绿石	Nb ₂ O ₅ 0.66	资源量 47.8 × 10 ⁶ t, 稀土共生矿	回收率 33% 未生产
EIK Creek	美国	NioCorp	烧绿石	Nb ₂ O ₅ 0.79 Sc 71.6 g/t	探明储量 31.7 × 10 ⁶ t 资源量 90.9 × 10 ⁶ t 铌湿法冶炼回收率 82.4%	设计产能 66% FeNb 6 800 t/a
Mt Weld	澳大利亚	Lynas	烧绿石 铌金红石	Nb ₂ O ₅ 1.4 Ta ₂ O ₅ 0.037	资源量 37.7 × 10 ⁶ t, 铌、钽、锆、 稀土、金红石、磷共生矿	未生产
Mabounie	加纳	ERAMET	烧绿石 铌铁矿	Nb ₂ O ₅ 1.2 REO 1.0	资源量 195 × 10 ⁶ t, 铌、 钽、稀土、磷共生矿	未生产
Dubbo	澳大利亚	Alkane Resources Ltd	钠铌矿	ZrO ₂ 1.89 Nb ₂ O ₅ 1.2 Ta ₂ O ₅ 0.03 TREO 0.74	储量 18.9 × 10 ⁶ t, 资源量 75.18 × 10 ⁶ t, 锆、 钨、铌、钽、稀土共生矿	未生产
Panda Hill	坦桑尼亚	Cradle Resources	烧绿石	Nb ₂ O ₅ 0.5	资源量 178 × 10 ⁶ t, 选矿回收率 65%	设计产能 66% FeNb 8 200 t/a 项目已暂停
Kanyika	马拉维	Globe Metals & Mining	烧绿石	Nb ₂ O ₅ 0.29 Ta ₂ O ₅ 0.014	资源量 90 × 10 ⁶ t, 铌、钽、铀、锆多金属矿	未生产
白云鄂博矿	中国	包钢集团	铌铁矿烧绿石	Nb ₂ O ₅ 0.14	存于尾矿库储量 197 × 10 ⁶ t, 稀土共生矿	未生产
宜春	中国	江西钨业集团	铌钽铁矿、 细晶石	Nb ₂ O ₅ 0.008 Ta ₂ O ₅ 0.01	储量 193 × 10 ⁶ t	停产
横峰	中国	德鑫矿业公司	铌铁矿 钽铁矿	Nb ₂ O ₅ 0.021 Ta ₂ O ₅ 0.014	资源量 213.8 × 10 ⁶ t	未生产
南平	中国	东方钨业	铌铁矿 钽铁矿 重钽铁矿	Nb ₂ O ₅ 0.016 Ta ₂ O ₅ 0.018	资源量 16.4 × 10 ⁶ t	停产

3.1 全球典型钽铌矿山

3.1.1 巴西矿冶公司(CBMM) Araxá 铌矿

CBMM 成立于 1955 年, 拥有全球储量最大、品位最高的铌矿床—巴西米纳斯吉拉斯州的 Araxá 铌矿床(详见表 9)。该矿的铌矿资源量可以满足全世界 400 余年的铌资源需求。CBMM 公司是全球最大的铌产品生产商和铌行业的领导者, 铌产品产量约占世界总产量的 85%。2008 年巴西矿冶公司铌铁

年生产能力已达到 90 000 t; 公司正在扩产, 预计到 2018 年年生产能力可达到 150 000 t 铌铁。CBMM 公司是世界上唯一一家可以生产全系列铌产品(包括标准铌铁、特殊牌号铌铁、真空铌铁、真空镍铌、铌金属和五氧化二铌)的企业, 公司多年来持续进行铌产品的生产技术和应用技术研究, 并通过外包仓库在全球建立广泛的供应网络, 确保客户能够及时获得稳定的高质量铌产品。

表9 巴西 Araxú 钽矿概况

Table 9 Overview of Araxú niobium mine in Brazil

储量	截至2012年12月,归属CBMM公司的风化残积型钽矿石储量为8.08亿t, Nb_2O_5 平均品位2.3%,下部的原生钽矿石资源量18亿t,平均 Nb_2O_5 品位1.5%,足以保证全球数百年的供应
矿床、 矿石	Araxú 钽矿属于碱性岩—碳酸岩型钽矿床。九千万年前由碳酸岩和碱性岩构成的杂岩体侵入石英岩和片岩,构成了直径4.5 km、面积约16 km ² 、厚度超过820 m的 Araxú 钽矿。杂岩体主要由白云石碳酸岩、方解石碳酸盐岩和闪长岩组成。矿床构造的核心钽含量最高。矿床上部250 m主要是风化残积矿,这部分矿石由于风化淋滤和地质作用,钽得到富集,含钽的主要矿物烧绿石中的钙和钠逐渐为钽所取代,形成了钽烧绿石(4%),其他主要矿物有褐铁矿/针铁矿(36%)、重晶石(20%)、磁铁矿(16%)、磷钼铝矿(6%)、钛铁矿(5%)、独居石(4%)和石英(4%)等。250 m以下的原生矿主要矿物有白云石、方解石、辉绿石、磁铁矿、磷灰石和烧绿石,局部地区的矿石还含有辉石和橄榄石类矿物
采矿	得益于得天独厚的资源条件,Araxú 钽矿目前开采的主要是矿床上部的风化残积矿,采用露天开采方式,矿石较软不需使用钻孔和爆破,使用采矿挖掘机将矿石挖出,汽车送到配矿场,再通过约3 km长的传送带运至其选矿厂
选矿	矿石经对辊破碎,球磨磨至-104 μm,磁选脱高磷磁铁矿,旋流器脱去-5 μm细泥,浮选烧绿石,得到钽精矿产品
精炼	钽精矿中约含1%的铅、0.5%的磷和硫,16%的氧化钽,在生产钽铁之前这些杂质必须预先去除。浮选精矿经过造粒,烧结脱硫,电炉精炼脱铅、脱磷、水淬,最终达到钽铁冶炼的要求

3.1.2 加拿大 Magris Resources 公司 Niobec 钽矿

Niobec 钽矿位于加拿大魁北克市以北约200 km的 Saint-Honoré 市。Niobec 钽矿是目前世界上唯一在采的地下钽矿,也是世界上三大钽矿之一,目前产量约占世界钽产量的8%~10%(表10)。Niobec 钽矿生产的钽精矿销往欧洲、印度、日本和美

国。Niobec 钽矿发现于1967年,1976年开始商业开采,1994年公司建立了自己的钽铁冶炼厂,Nibec 正式成为一个集采矿和冶金为一体的综合型企业,使得 Nibec 公司得以跻身于国际领先的铁生产商之列,目前公司的主要产品为各牌号的钽铁合金块和钽铁合金线材,2016产能达到8300 t钽铁。Magris Resources 资源公司于2015年1月22日并购了该矿山。

表10 Niobec 钽矿山概况

Table 10 Overview of Niobec niobium mine

储量	截至2013年公司钽矿储量 416.4×10^6 t, 矿石 Nb_2O_5 平均品位0.41%;资源量 629.91×10^6 t, 矿石 Nb_2O_5 平均品位0.42%;推断的资源量 67.7×10^6 t, 矿石 Nb_2O_5 平均品位0.42%
矿床	Niobec 钽矿床属于碳酸岩—碱性岩型矿床,直径4 km左右的碳酸岩—碱性岩杂岩体侵入闪长岩、片麻岩、正长岩中,构成了面积12 km ² 的碱性杂岩侵入体,矿床核心由新月形碳酸岩透镜体组成,钽主要集中在赋存于矿床东南部600 m×800 m的矿体中,矿体纵向厚度达到750 m以上。已勘探的钽矿矿体主要集中在矿床深部90~600 m左右,目前的钻孔最大深度1200 m,进一步的勘探工作还在进行中
矿石	矿石中70%的钽主要赋存在烧绿石和钽铁矿中,多以微小的晶体和颗粒分散在碳酸岩中,肉眼很少能看到,矿物种类较多,其中,碳酸盐矿物(白云石、方解石、方解石等)、硅酸盐矿物(锆石、黑云母、绿泥石、钾钠长石)、磷灰石和钽矿物(烧绿石、钽铁矿)含量分别为64.9%、21.1%、6.8%和1.1%
采矿	目前采用空场法进行地下开采,采出的矿石通过850 m深度的竖井提升到地面,目前已设计了8个采区,正在开采的主要是1#、2#、3#和4#采区,未来计划采用充填法采矿,进一步提高回采率,目前采矿能力为 2.4×10^6 t/a,未来计划将采矿能力逐步提高到 10×10^6 t/a
选矿	采出的矿石在地下破碎站破碎到-150 mm后提升到地面送到原矿堆场,再经过中碎到-38 mm,经过棒磨—球磨—分级达到-105 μm含量80%的细度,经过两段旋流器脱泥后浮选碳酸盐杂质矿物,尾矿浓密脱水磁选去除磁性矿物,浮选黄绿石等钽矿物,浮选精矿进行浮选脱除硫化物,浸出脱除磷酸盐等杂质,过滤干燥得到 Nb_2O_5 含量为58%的钽精矿,每吨矿石可以生产含钽2.4 kg Nb_2O_5 的钽精矿,选矿回收率58%
精炼	钽精矿与铝粉、铝粒、铁粒、硝酸钠、熔剂矿物等配料,再经铝热还原反应,依靠自放热达到2250℃,再经过冷却、脱渣、破碎生产钽含量63%~68%的钽铁产品

3.1.3 荷兰 AMG 公司巴西 Minas 锂钽矿

AMG公司(Advanced Metallurgical Group)是一家由多家公司合作于2006年在荷兰成立的国际化公司,主要生产特种金属材料 and 矿物,主要产品包括铝合金和合金粉末、钛合金、涂层材料、铬金属、钒铁、铈产品、钽产品、钽产品、金属硅和天然石墨。AMG公司还为客户提供冶金真空炉系统、材料热处理系统的

设计和制造服务。产品主要应用于服务以汽车为代表的运输行业、基础设施建设行业和能源行业。

AMG在巴西Mibra的采矿业务位于距离巴西首都里约热内卢西北约225 km的 Minas 州 Nazareno 市附近,Minas 矿是一个典型的花岗伟晶岩型锂、钽、钽、锡矿床,主要包含三个矿体,以原生矿为主,原生硬岩矿体上部还包含风化的高岭土矿体,这

些矿体均含有钽铌矿物和锡石,钽铌矿物主要为钽 铁矿、铌铁矿和细晶石等(表 11)。

表 11 Minas 矿山概况
Table 11 Overview of Minas mine

储量	储量为 2 028.9 万 t, Li_2O 、 Ta_2O_5 、 Nb_2O_5 和 Sn 含量分别为 1.06%、0.034%、0.007% 和 0.037%
矿床 岩石	原生伟晶岩矿体主要矿物包括钠长石(25%~30%)、钾长石(15%~20%)、石英(20%~30%)、锂辉石(10%~15%)、铁锂云母(8%~10%)和钽铌矿物(<1%)等;风化矿体主要包括石英(50%~60%)、高岭土(35%~40%)、白云母(1%~5%)、铁氧化物(0~2%)和钽铌矿物(<1%)
采矿	露天采矿,每年约开采 70 万 t 矿石,计划 2019 年开采能力提升到 140 万 t/a,锂辉石精矿产能从目前的 9 万 t/a 提升到 2019 年的 18 万 t/a,同时钽精矿产能从目前的 136 t/a 提升到 272 t/a
选矿	选矿流程包括原矿—破碎—磨矿—旋流器分级—溜槽重选—磁选分离锡石和细晶石,得到钽精矿,与锡石共同分离的细晶石中的钽在锡冶炼渣中回收后混入钽精矿。重选尾矿浮选锂辉石精矿,浮选尾矿磁选脱去铁钛杂质矿物,得到长石产品作为陶瓷材料。精矿 Ta_2O_5 品位 30% 左右,钽回收率为 56%;锂辉石精矿 Li_2O 品位 5.5%,锂辉石回收率 65%

3.1.4 澳大利亚皮尔巴拉矿物公司 Pilgangoora 锂钽矿

皮尔巴拉矿物公司是一家新兴的锂、钽生产商,公司致力于开发拥有完全产权的世界级 Pilgangoora 锂钽矿。Pilgangoora 锂钽矿位于澳大利亚西部皮尔巴拉地区,距离黑德兰港(Port Hedland)约 120 km,是世界最大的锂钽矿床之一(表 12),公司的目标是成为世界最大的锂辉石供应商,公司在生产锂辉石时,同时也会回收共伴生的钽矿物作为一种有价值

的副产品。

公司计划 2018 年 6 月投产,第一阶段的目标是每年生产 Li_2O 品位 6% 的锂辉石精矿 31.4 万 t,生产钽精矿 145 t(Ta_2O_5);第二阶段的目标是通过加强地质勘查工作,扩大资源储量,锂辉石精矿产能增加到 56.4 万 t/a,钽精矿产能增加到 262 t/a(Ta_2O_5),皮尔巴拉矿物公司与中国的赣锋锂业公司签订了合作协议,保障公司产品的销售。

表 12 Pilgangoora 锂钽矿概况
Table 12 Overview of Pilgangoora lithium - tantalum mine

储量	公司持续在 Pilgangoora 矿床周边进行勘探,2017 年底公司探明的矿石储量达到 80.3×10^6 t, Li_2O 和 Ta_2O_5 品位分别为 1.27% 和 0.0123%;矿石资源量达到 156.4×10^6 t, Li_2O 和 Ta_2O_5 品位分别为 1.25% 和 0.0128%。锂辉石资源量在全球硬岩锂资源排名第三
矿床	Pilgangoora 锂钽矿是典型的花岗伟晶岩型矿床,皮尔巴拉地区同一地层构造内存在一系列钽矿床,包括 Pilgangoora、Wodgina、Mount Cassiterite、Tabba 和 Strelley 等,在 Pilgangoora 矿床中,绿岩被一群北向、东倾、带状伟晶岩侵入,其走向长度超过 7 km,宽度约 1 km,侵入的横切区域呈现叶状构造。这些伟晶岩被认为是一个区域性的南北走向断裂系统。个别伟晶岩岩体的长度可达 600 m 甚至 1 250 m,表面宽度可达 300 m,多数的伟晶岩体长 100~250 m,宽 1~8 m,具有不规则的脉状,通常形成叉状或波纹状的末端,赋存在镁铁质和超镁铁质变质岩角闪石中
矿石	主要矿物组成包括石英、钠长石、白云母、钾长石、石榴石、锂辉石、锂云母和钽铁矿,少量的重钽铁矿、细晶石、锡石和绿柱石等
采矿	露天开采,根据矿床矿脉情况设置 6 个露天采场,开采工序包括钻孔、爆破、装载、汽车矿车运输到选矿厂矿石堆场。第一阶段设计采矿能力为 200 万 t/a,矿山设计寿命 36 年,前 5 年剥采比为 3.3:1,随后的 31 年剥采比为 3.9:1。公司正在进行将产能扩大到 400 万 t/a 的可行性研究
选矿	选矿工艺包括原矿颚破—圆锥中碎—高压辊磨三段破碎—磨矿—分级,粗粒经过两段重介质旋流器分选得到钽精矿和锂辉石精矿,细粒部分经过螺旋溜槽分选得到钽精矿,然后再经过浮选去除云母和铁矿物等杂质矿物,再浮选锂辉石,得到的锂辉石精矿再经过弱磁选和强磁选除铁,得到低铁锂辉石精矿。设计的锂辉石 Li_2O 品位 6%,选矿回收率 77.5%;钽铁矿 Ta_2O_5 品位 30%,选矿回收率 57.4%,计划 2018 年下半年开始生产

3.1.5 卢旺达 Kigali 钽矿

卢旺达和刚果地区的钽铌铁矿床以残积矿床为主,Kigali 钽矿也是一个由风化岩屑积残、冲积而形

成的风化矿床(表 13),主要由黏土和岩屑构成,呈现层状和囊状结构,向下延伸到基岩。卢旺达已发现的钽铌铁矿床,其矿化仅与伟晶岩脉有关,伟晶岩脉是卢旺达勘探钽、钽、锡矿床的重要目标。

表 13 Kigali 钽矿概况
Table 13 Overview of Kigali tantalum mine

矿床、 矿石	卢旺达成矿模式很大程度上与基巴拉造山 Kibaran orogeny 运动相关。基巴拉造山运动主要由不同年代的花岗岩和镁铁质岩侵入基岩和中元古代岩形成。这个造山运动过程形成了很大的成矿区域,产生了大量与花岗岩相关的矿床,这些矿床富含锡石、钽钽铁矿、黑钨矿、绿柱石、锂辉石、独居石和金等矿种。矿床以原生矿床或冲积矿床(残积矿床)的形式出现。很多地质学家认为卢旺达的 Sn - Nb - Ta - W 矿床为岩浆成因类型,原生矿床中 Sn - Nb - Ta - W 的矿化产生于伟晶岩脉和石英岩脉中
采矿	采用传统的水力采矿,利用高压水枪和水炮采矿,每小时可采 400 m ³ 矿石,采出的矿石用水力和砂石泵送到选厂给矿站
选矿	选矿工艺包括原矿—圆筒筛筛除除去砾石—细粒部分跳汰粗选—跳汰再选—振动溜槽精选得到钽钽精矿

4 供需分析

4.1 钽

4.1.1 市场供应混乱,价格波动较大

根据美国地调局统计,1970 年全球的钽产量仅为 318 t,到 2017 年全球钽产量也仅仅增长到 1 270 t,接近 50 年,产量仅仅增加了 4 倍。与其他矿产比较,全球钽矿的产量和市场需求量都比较小。目前在产的钽矿中,小型钽矿山较多,手工矿山在钽矿供应中占据主导地位,市场需求和供给不稳定造成钽价格波动较大,1970 年钽的价格为 19 200 美元/t,2000 年钽价曾暴涨到历史最高的 591 000 美元/t,2011 年以来,钽价达到阶段高点后开始低迷(图 3),2017 年初钽矿价格降到 115 000 美元/t,随后开始反弹,2017 年 7 月钽精矿价格涨到了 159 000 美元/t,涨幅达到 38%,2018 年钽精矿价格涨到 205 300 美元/t,近 50 年涨了 10 倍。预计未来钽价将在 130 ~ 220 美元/kg 之间波动。钽没有在任何金属交易所挂牌交易,因而没有官方的钽价格,钽的价格完全由买卖双方协商决定。

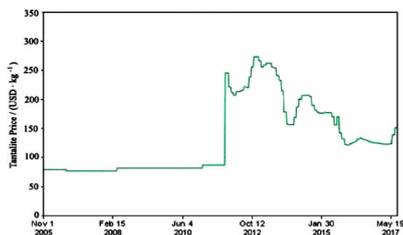


图 3 钽金属价格趋势
Fig. 3 Price trend of tantalum

4.1.2 钽的消费重点发生转移,需求量稳步缓慢增长

2008 年、2016 年和 2026 年钽的需求变化趋势见图 4。从图 4 可知,钽在电容器中的消费占比逐渐减小,而在其他领域如超级合金、化学品、半导体工业钽溅射靶材等的消费占比逐渐扩大。从 2017 年初到 2026 年底未来 10 年,全球钽的市场需求年

增长率估计为 3.4%,其中钽电容器由于电子市场趋于饱和,替代产品取代,年均增长率仅为 1.5%;钽常规材料和制品随全球经济增长,年均增长率可达 4%;碳化钽硬质合金由于廉价替代品,年均增长率仅为 2%;半导体工业钽溅射靶材需求增长强劲,年均增长率可达 4.5%;超级合金随着航空工业发展,年均增长率可达 4.6%;用于滤波器和光学玻璃等的钽酸锂和五氧化二钽等钽化物的需求乐观估计为年均增长率为 5%。高温合金中钽的需求达到 7% 的年均增长率,主要是由于商业航空航天部门的广阔前景。



图 4 钽的需求变化趋势(数据来源:Roskill 咨询公司)
Fig. 4 Changes in the pattern of demand for tantalum

4.1.3 钽资源供给充足,但供应格局会发生变化

全球钽矿资源丰富,目前开采的钽矿资源主要来自于伟晶岩矿体中的钽铁矿、钽钽铁矿、钽锰钽矿和细晶石等矿物,其中最主要的钽矿床位于澳大利亚、巴西和非洲。全球钽资源的供给主要有三个来源:(1)伟晶岩型钽、钽、锡硬岩矿床及残积风化型钽矿床;(2)锡冶炼渣及其他废料中的钽回收;(3)钽制品的二次资源回收。

2010 年以前的十多年里,澳大利亚的钽矿产量占全球钽供应量的 60% 以上,2010 以后澳大利亚的钽矿产量快速下降,2016 年几乎降至零,原因是钽的价格走低,使当地的常规钽矿开采变得不经济,澳大利亚仅在锂辉石生产时附带回收了少量的共伴生钽矿。非洲中部大湖地区逐渐填补了钽的供应缺口,2017 年非洲地区钽矿占到全球钽矿供应的 80%,其中主要是卢旺达和刚果民主共和国。近年来,大湖地区钽矿产量已占全球产量的 45% ~

55%。未来的钽消费者将很可能转向低成本、无冲突的钽矿供应商,避免违反“冲突矿产采购政策”,到2026年大湖地区的钽供应预计将出现明显下降。

2016年约19%的钽供应来自南美洲,主要来自巴西的两个大型矿山:巴西 Mibra 锂钽矿在2017年初火灾发生后已经重建,锂共伴生钽矿产量将增加;巴西的 Pitinga 锡钽矿也在扩大生产。到2026年,南美洲可能占全球钽供应的24%。

2017年,澳大利亚锂矿的副产品—钽供应开始增加,到2026年,澳大利亚锂辉石和锡矿等矿产中回收钽矿资源,将供应全世界钽需求量的20%。随着澳大利亚锂辉石矿开采的大规模增长,共伴生的钽副产品产量将会增加,这将是该行业在未来几年可能会发生的重大变化。

2017—2026年,钽资源的新增供应量可能会增加37%。随着大量矿产地明确的钽资源进入市场,预计中部非洲的重要性将减弱,到2020年以后,非洲大陆在世界钽产量中所占的份额可能会降至40%以下。刚果民主共和国政府将特许权使用费提高到10%的决定也可能影响非洲的钽市场份额。

钽供应预测分析见图5。从图5可知,2017年全球手工开采、传统钽矿山、从锂辉石生产中回收的共伴生钽矿、从冶炼渣和废旧钽制品中回收的人造钽矿产量分别占全球钽产量的53%、33%、7%和7%,到2026年这一数据将变化为34%、41%、20%和5%。随着共伴生钽的大型锂矿山大规模的开发,未来钽供给将逐步从非洲手工开采的小、散矿山逐步向南美洲、澳大利亚等地区的钽矿山转移。

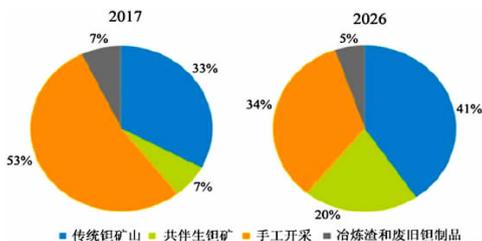


图5 钽供应预测分析(来源:Roskill)
Fig. 5 Forecast of supply for new tantalum

4.2 铌

4.2.1 铌产量趋于稳定,价格和市场高度垄断

1965年全球铌产量仅为3 120 t,到2017年全球铌产量达到64 000 t,50多年增加了20倍,铌的

价格也从1965年的2 680美元/t上涨到2017年的42 000美元/t,价格上涨了16倍。在2004年到2014年的10年里,铌的产量以每年9.5%的复合增长率增长,2014年全球铌产量达到创纪录的6.86万t,此后2015年和2016年铌产量开始小幅下降,2017年趋于稳定。

全球铌矿生产被巴西CBMM公司、中国洛阳钼业(2016年收购了Anglo American公司巴西Catalao铌矿的资产)和加拿大Magris Resources公司三家公司垄断,铌市场占有率分别为75%~85%、8%~12%和8%~10%。这三家公司分别开采全球最大的三个高品位铌矿:巴西的Araxá铌矿,巴西的Catalao铌矿和加拿大的Niobec铌矿,这三个矿床不仅储量大,而且品位高,具有很大的资源优势。

几十年来,世界没有发现新的大型高品位铌矿资源,也没有规模化的新的铌矿企业投入生产,目前全球的铌铁生产能力已经过剩,未来还有两家铌矿企业可能在近期投入生产:一家是澳大利亚上市的Cradle Resources公司,该公司位于坦桑尼亚的Panda Hill项目有可能在2020年前投产,计划每年生产含铌66%的铌铁8.2万t,计划占全球份额的5%左右;另一家公司是加拿大上市的美商公司NioCorp,该公司正在建设开发位于美国内布拉斯加州的Elk Creek铌钽矿,该矿山采用湿法冶金工艺,计划每年生产铌4 500 t左右,占全球铌产量份额的6%左右。这些新的供应市场份额较小,不会对铌的市场垄断形势产生大的影响。

铌没有在任何金属交易所挂牌交易,因而没有官方的铌价格,铌的价格完全由买卖双方协商决定。在1999年以前的相当长一段时间(图6),铌的价格稳定在6 600美元/t,但是具有市场垄断地位的CBMM公司倾向于控制价格,在2000年实施了价格翻番计划,将铌价提高到13 780美元/t,此后每年小幅加价,直到2010年涨到41 500美元/t,这个价格一直稳定到2017年,期间钢铁市场的变化似乎对铌的价格没有影响,2008年全球金融危机也没有影响其价格下跌,2010年到2017年中国钢铁产量快速增长也没有刺激铌价进一步上涨。由于铌的价格完全由买卖双方协商决定,因此,全球铌的价格明显缺乏弹性,鉴于铌的垄断性和全球对铌的稳定需求,因此,本文认为在未有特殊情况影响下(如垄断公司强行涨价、停产等)未来的铌价前景是温和稳定的

增长,不太可能出现急涨。

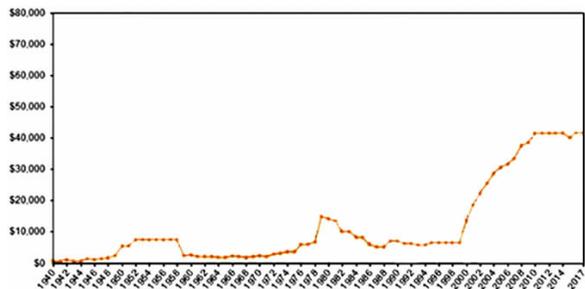


图 6 全球铌金属价格变化趋势

Fig. 6 Changes in the pattern of global niobium price in 1940—2017

4.2.2 铌需求潜力巨大,但增长缓慢

实际上,2006—2017 年全球铌产量和市场需求增长缓慢,年均复合增长率仅为 0.3% (图 7)。

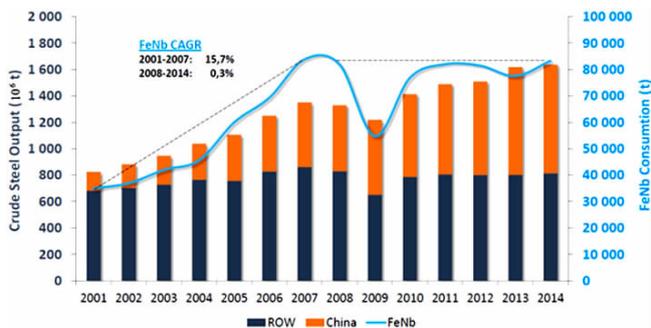


图 7 中国粗钢产量在全球的占比及铌铁的复合增长率(2001—2014) (来源于世界钢铁协会)

Fig. 7 Proportion of China's crude steel production in the world and FeNb CAGR(2001—2014)

铌具有很多优异性能,在低合金高强度钢方面体现的最为突出。铌被美国视为一种“战略金属”,因为它对国家安全和工业至关重要。世界上 90% 的铌被制备成为铌铁产品用于钢铁工业,仅有约 10% 铌用于高性能合金(包括高温合金)、超硬碳化物、超导体、电子元件和功能陶瓷等高附加值产品。

铌铁在钢铁工业中主要用于生产高强度低合金钢,而广泛应用于建筑业和大型钢铁工程建造、汽车工业和油气管道制造业等行业。铌铁也适用于某些类型的不锈钢和耐热钢。在钢铁中添加 0.05% 质量的铌,就可以显著提高钢材的强度,因此减少钢材用量和质量,这可以大大降低成本。世界钢铁协会的报告表明仅需要 9 美元约 0.22 kg 的铌,一辆中型汽车的质量就可以减少 100 kg,汽车的燃油效率可以增加 5%。在法国引以为傲的 Millau Viaduc 钢索高架桥工程中低合金钢材加入 0.025% 的铌,使

钢和混凝土的重量在整个工程中减少了 60%。铌是一种对未来经济社会向节能、环保可持续方面发展至关重要的元素。

目前全球仅有 10% 的钢铁产品中添加了铌,发达国家的钢材铌使用强度约为 80 ~ 100 g/t(图 8),发展中国家钢材铌使用强度一般为 50 g/t,2017 年我国的粗钢产量达 8.3 亿 t,全球产量占比高达 49.2%,截至 2014 年,中国的钢材铌使用强度仅为 23 g/t,铌在中国还有很大的市场潜力。随着钢铁工业的发展和钢铁产品升级需求,铌在钢材中的使用强度会不断增长,尤其在中国和印度等发展中国家,更轻、更耐用、更坚固的含铌钢材的应用领域会不断扩大,应用于航空航天和发电设备的铌超级合金不仅在美国、西欧和日本,而且可能在中国、巴西、印度和俄罗斯也有所增长,俄罗斯和美国等国家油气管道用铌量也会有所增加。本文认为,未来铌需求逐步稳定增长,预计未来铌的需求增长率将与全球经济增长率接近。

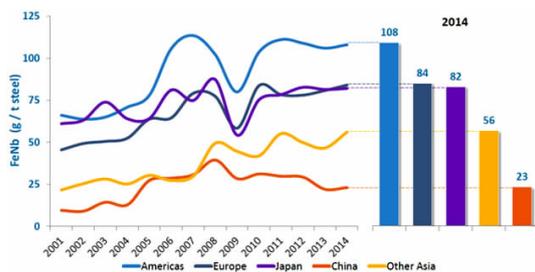


图 8 全球不同地区铌铁在钢材中的添加量

Fig. 8 Addition of niobium iron to steel in different regions of the world

5 结论

随着中国和印度等国工业的持续发展,以及全球人口的增长对汽车、手机和电脑等高科技产品的需求增加,预计未来几年铌和钽的消费将持续增加。虽然铌和钽现有的资源和产量可满足目前全球的需求,但我国优质钽铌资源都较为匮乏,缺乏自给自足的能力,因此须长期依赖进口,资源安全保障形势不容乐观。因此国内企业应借助“一带一路”倡议,积极开拓国外市场,参与国外资源勘查与开发,以保证国内的长期稳定供应。

参考文献:

[1] 王汾连,赵太平,陈伟. 钼铌矿研究进展和攀西地区钼铌矿

- potentials from NdFeB magnet material[J]. *Resour. Conserv. Recy.*, 2016(113): 12–27.
- [26] Zeng, X., Li, J.. Urban mining and its resources adjustment: characteristics, sustainability, and extraction[J]. *Sci. Sin. Terrae*, 2018(48): 288–298.
- [27] Al-Jabri K., Baawain M., Taha R., et al. Potential use of FCC spent catalyst as partial replacement of cement or sand in cement mortars[J]. *Constr build mater*, 2013(39): 77–81.
- [28] Zhang H., Xiao R., Wang D., et al. Catalytic fast pyrolysis of biomass in a fluidized bed with fresh and spent fluidized catalytic cracking (FCC) catalysts [J]. *Energy Fuels*, 2009(23): 6199–206.
- [29] Ferella F., D'Adamo I., Leone, S., et al. Spent FCC E-Cat: towards a circular approach in the oil refining industry [J]. *Sustainability*, 2019b(11): 1–19.
- [30] Ujaczki, E., Zimmermann Y., Gasser C., et al. Red mud as secondary source for critical raw materials – Purification of rare earth elements by liquid/liquid extraction[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2017(92): 2835–2844.
- [31] Borra, C. R., Pontikes Y., Binnemans K., Gerven, T. V.. Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud)[J]. *Minerals Engineering*, 2015(76): 20–27.
- [32] Davis P., Balomenos E., Panias D., et al. Selective leaching of rare earth elements from bauxite residue (red mud), using a functionalized hydrophobic ionic liquid[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016(4): 125–135.
- [33] Yang Q., Bin L.. Bioleaching of rare earth and radioactive elements from red mud using *Penicillium tricolor* RM-10[J]. *Bioresource Technology*, 2013(136): 16–23.
- [34] Ponou J., Dodbiba G., Anh J. W., et al. Selective recovery of rare earth elements from aqueous solution obtained from coal power plant ash[J]. *Journal of environmental chemical engineering*, 2016(4): 3761–3766.
- [35] Bogart J., Cole B., Boreen M., et al. Accomplishing simple, solubility based separations of rare earth elements with complexes bearing size – sensitive molecular apertures [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016(113): 14887–14892.
- [36] Bogart J. A., Lippincott C. A., Carroll P. J., et al. An operationally simple method for separating the rare – earth elements neodymium and dysprosium[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2015(54): 8222–8225.
- [37] Peelman S., Sun Z. H. I., Sietsma J., et al. Hydrometallurgical extraction of rare earth elements from low grade mine tailings[J]. *Rare metal technology*, 2016(1): 17–29.
- [38] López J., Reig M., Torres E., et al. Application of nanofiltration for acidic waters containing rare earth elements: influence of transition elements, acidity and membrane stability [J]. *Desalination*, 2018(430): 33–44.
- [39] Wilfong W. C., Kail B. W., Bank T. L., et al. Recovering rare earth elements from aqueous solution with porous amine – epoxy networks [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017(9): 18283–18294.
- [40] Reed D. W., Fujita Y., Daubaras D. L., et al. Bioleaching of rare earth elements from waste phosphors and cracking catalysts[J]. *Hydrometallurgy*, 2016(166): 34–40.
- [41] Wang J., Huang X., Cui D., et al. Recovery of rare earths and aluminum from FCC waste slag by acid leaching and selective precipitation[J]. *Rare Earths*, 2017(35): 1141–1148.
- [42] Sprecher B., Daigo I., Murakami S., et al. Framework for resilience in material supply chains, with a case study from the 2010 rare earth crisis[J]. *Environ Sci Technol.*, 2015(49): 6740–6750.

引用格式:李芳琴,代涛,王高尚.稀土金属二次回收再利用研究综述[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(5): 84–89.

LI Fangqin, DAI Tao, WANG Gaoshang. A review on recycling and reuse of rare earth metals[J]. *Conservation and utilization of mineral resources*, 2019, 39(5): 84–89.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn

(上接第67页)

- 成因初探[J]. *矿床地质*, 2012, 31(2): 293–308.
- [2] Deloitte Sustainability, British Geological Survey, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, et al. Study on the review of the list of Critical Raw Materials[R]. *European Commission*, 2017.
- [3] 中国、美国、欧盟对战略性矿产界定的差异[J]. *矿产保护与利用*, 2017(2): 24.
- [4] 彭齐鸣. 提高战略性矿产供应能力, 推动新兴产业快速发展[J]. *国土资源情报*, 2017(1): 1–3, 41.
- [5] 王盘喜, 包民伟. 我国钽铌等稀有金属矿概况及找矿启示[J]. *金属矿山*, 2015(6): 1–3, 41.
- [6] 中国有色网. 协会钽铌分会会员代表大会暨理事会换届会议在京召开[EB/OL]. (2013–12–17) [2018–09–15]. <http://xianhuo.hexun.com/2013-12-17/160659100.html>.
- [7] British Geological Survey. *Nature environment research council [R]. Nottingham*, 2011.
- [8] 田敏, 王盘喜, 郭俊刚, 等. 河南某含电气石、长石铌钽矿综合回收试验研究[J]. *矿产保护与利用*, 2016(2): 28–34.

引用格式:曹飞,杨卉芃,张亮,王威.全球钽铌矿产资源开发利用现状及趋势[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(5): 56–67, 89.

CAO Fei, YANG Huipeng, ZHANG Liang, WANG Wei. Current situation and trend analysis of global tantalum and niobium mineral resources[J]. *Conservation and utilization of mineral resources*, 2019, 39(5): 56–67, 89.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn