

鍍 的 应 用

宁夏有色金属研究所 编

内 容 简 介

铍是导弹、卫星、宇宙飞船、飞机、惯性导航和原子能反应堆等方面的优良材料。本资料主要介绍了国外铍工业概况和铍的应用情况，供应用铍的部门和从事铍工业的同志们参考。

铍 的 应 用

宁夏有色金属研究所 编

*

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

开本小 32 印张 4 1/2 字数 96 千字

1973年9月第一版 1973年9月第一次印刷

印数 00,001~6,900 册

统一书号: 15062·3067 定价 (科四) 0.39 元

目 录

第一章	国外铍工业的概况	1
第二章	铍在导弹、卫星和宇宙飞船方面的应用	15
一	铍的某些优异性能和应用概况	15
二	铍在“民兵”洲际导弹中的应用	21
三	铍在阿吉纳宇宙飞船中的应用	29
四	铍在“水星”和“双子座”宇宙飞船中的应用	33
五	铍在卫星中的应用	34
六	铍在太阳能电池中的应用	38
七	其它	41
第三章	铍在飞机上的应用	43
一	概述	43
二	铍舵	44
三	铍压缩机盘和叶片	46
四	铍转矩管	47
五	铍圆盘制动器	47
第四章	铍在惯性导航系统中的应用	52
第五章	铍在原子能反应堆中的应用	66
一	铍的核性能及在反应堆中应用的概况	66
二	铍在试验研究反应堆中的应用	76
三	氧化铍在试验反应堆中的应用	90
四	铍和氧化铍在潜艇和船用反应堆中的应用	95
五	铍和氧化铍在飞机实验反应堆中的应用	96
六	铍和氧化铍在空间系统反应堆中的应用	98
七	氟化铍在熔融盐反应堆中的应用	101
八	铍用于反应堆时设计应考虑的问题	103
第六章	铍在其它方面的应用	108

一 铍合金	108
二 氧化铍	112
三 高能燃料	117
四 中子源	118
五 铍线材	118
六 光学镜体	119
七 其它	123
第七章 结束语	127
一 铍加工技术的改进	127
二 铍应用领域的分配情况	128
参考文献	131

第一章 国外铍工业的概况

1798年法国化学家沃克兰在分析一种矿石时，发现一种新元素，取名为“铍土”。1828年，德国和法国的化学家同时分别用钾还原氯化铍得到了少量纯度不高的光亮的金属铍。直到1898年，法国化学家用纯氟化铍和氟化钾或氟化钠的熔盐电解方法，得到了纯度为99.5~99.8%的金属铍。

已发现较重要的含铍矿物有数十种，但目前除美国使用了少量的硅铍石外，可用作工业原料的实际上只有绿柱石一种。兹将1935年至1970年（缺1957年的统计数字）的35年间世界绿柱石的产量列于表1中。由表1可以看出，铍精矿的产量以巴西居首位，占世界总产量的四分之一以上。其次为阿根廷、印度、津巴布韦等。近年来的统计数字表明，苏联铍矿石的年产量在一千吨左右，可能仅次于巴西和印度，但以前的产量数字不详。美国自产绿柱石极少，绝大部分靠进口，资本主义世界所产的绿柱石约80%输入美国。

根据表1的统计数字，从1935年到1970年世界铍精矿的总产量已近十八万吨，若按含铍量3.96%计，则铍的总产量已达七千吨以上。因此，在第二次和平利用原子能国际会议上所作的世界绿柱石的蕴藏量的估计数字（含铍约五万吨），是不精确的。

绿柱石中氧化铍的理论含量为14%，但一般矿石中含氧化铍为10~12%。绿柱石的化学稳定性很高，不易为一般化学方法所分解，因此，工业上所采用的提取与冶炼方法都是比较复杂的，需先将氧化铍自矿石中分离出来，这构成了铍生产过程中由矿石到氧化铍的工艺部分。氧化铍也是很稳定的

表 1 铍精矿的世界总产量 [58, 44, 77, 124] (吨, 11% BeO)

年 代	阿根廷	巴西	扎伊尔	印度	马加	尔什	津布	巴韦	乌干达	苏等	联合国	其家	年世总产量	度界产量
1935 ~1950	7034	19071	—	2662	782	876	188	—	7561	38174				
1951 ~1955	3239	9553	381	1697	2270	5546	224	—	11951	34861				
1956	1562	1815	1633	3049	178	550	93	—	2368	11248				
1957	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
1958	911	1192	964	544	164	300	78	—	2830	6983				
1959	585	1022	254	—	420	200	212	—	3085	5778				
1960	670	1697	335	908	636	489	426	—	3550	8711				
1961	600	1528	167	803	758	359	1030	—	3121	8366				
1962	600	1497	440	136	726	507	946	—	2588	7440				
1963	748	1970	213	—	411	226	380	1000	1678	6626				
1964	401	1421	123	—	212	165	393	1600	746	4461				
1965	159	1113	19	1361	20	91	196	1000	1600	5559				
1966	198	795	19	544	20	65	226	1080	1170	4117				
1967	268	1310	—	1300	30	109	312	1200	386	4915				
1968	—	2079	—	1289	77	28	300	1190	580	5543				
1969	518	2813	—	1300	—	—	286	1250	7540	13707				
1970	454	2722	—	1360	—	—	272	1190	4628	10626				
该 国 总产量	17947	51598	4548	16953	6704	9511	5562	8910	55382	177115				

化合物，不易将之直接还原成金属，加之金属铍的活性很高，不能从含水的化合物中制取，因此，一般都要先转化成无水的卤族化合物，而后将之还原成金属，这就构成了由氧化铍至金属铍的工艺部分。

在由矿石生产氧化铍的工艺中，成熟的工业方法有硫酸法和氟化法。

在硫酸法中，将矿石（有时加助熔剂）在高温下熔融后经水淬，得铍玻璃。将铍玻璃经（或不经）过热处理后

与浓硫酸作用。矿石中的铍及铁铝等杂质，转化为可溶性的硫酸盐，在水浸时与二氧化硅分离，进入溶液。这一溶液经除铁、铝杂质的处理后，用硷使铍以氢氧化铍形式沉淀析出。

在氟化法中，将矿石粉碎，与氟硅酸钠、碳酸钠或氟铁酸钠按一定比例混合、制团、烧结。在烧结过程中发生氟化反应，矿石中的铍转化为可溶性的氟铍酸钠，而铝、硅等杂质不发生此种变化。在水浸时，铍便与杂质分离，含铍溶液再用硷处理使得沉淀的氢氧化铍。

美国有分别采用这两种方法的工厂，而英、法、日等国则以采用氟化法为主。

上述两种方法制得的氢氧化铍可以经煅烧得到氧化铍而用于生产铍铜合金，或经提纯后制取纯氧化铍，这种纯氧化铍可作特殊陶瓷原料，也可直接用于生产金属。

由氧化铍生产金属铍的工艺中，用于工业生产的成熟方法有镁还原法和熔盐电解法。

在氟化铍的镁还原法中，将氢氧化铍溶于氟化铵中，得到氟铍化铵的溶液，经净化、浓缩和结晶后，便制得氟铍化铵的结晶。此种结晶经加热分解，得到无水氟化铍，将之用金属镁还原而得到金属铍，一般因其形状而叫做铍珠。

在氯化铍熔盐电解法中，将氧化铍与碳混合，制团，焦化后，在高温下，用氯或其它氯化剂，使氧化铍转化为氯化铍。这种无水氯化铍可经蒸馏予以提纯。最后纯的无水氯化铍与氯化钠（或其它一些氯化物）混合熔融，在熔融状态下进行电解，在阴极上沉积的金属铍，一般称为铍鳞片。

上述的两种方法，美、苏两国都有采用，而法、日等国则只用熔盐电解法。

铍珠或铍鳞片一般都要经过真空熔炼，以除去卤化物杂质和得到大的铍块。

由于金属铍缺乏延性，不能用熔铸的铍锭直接加工成材，一般都要经过粉末冶金的过程。这包括将熔铸铍锭车屑，制粉，经真空热压而制得真空热压铍。这种真空热压铍已具有一定的机械性能，可以直接用作铍部件材料，也可经轧制、挤压、拉伸等加工工序而制成结构用的型材。目前所用的铍材，绝大部分是经这一工艺过程制得的。

下面对几个国家铍的生产情况作简要介绍。

1. 美国 美国铍的工业性生产始于1916年。生产数字未正式公布过，根据美国矿务局估计的数字，近几年来美国铍矿石消耗量每年约为6000~9000吨，折合成可提炼的铍约为150~250吨。其中生产合金（铍铜合金为主）的占50%以上。生产氧化铍陶瓷的占百分之几，其余则生产金属。美国现有两个主要生产厂家，卡韦基—铍公司（Kawecki Berylco Industries Inc.）和布拉士—威尔曼公司（Brush Wellman Inc.）。这两个公司都从事由矿石到氧化铍，铍铜合金，金属铍以至铍加工制品的生产。出于资本主义竞争的需要，美国铍的生产厂家进行了合并和改组。例如，1968年铍公司与卡韦基化学公司合并组成卡韦基—铍公司。该公司财政力量增加，竞争能力有所加强，又于1971年收买了原为美国第三个铍生产者——通用宇宙金属公司的两处生产设施。布拉士铍公司也在1971年与威尔曼公司合并，后者专门生产金属摩擦材料，两个公司的合并显然是为了增强其在铍刹车盘的生产与销售领域中的竞争能力。

美国铍工业生产几乎完全从属于政府与军事的订货，因而生产极不平衡，常常处于生产能力开工不足的状态，有时

开工率仅为25~30%，这是美国经济的战争性质所决定的。

2. 苏联 苏联铍工业生产始于1932年。生产数字未见报导。据估计，近年来铍矿石年产量为一千吨左右。据其在各种反应堆中应用铍及氧化铍的情况来看，似乎铍的有关工业已具有一定的规模。

3. 英国 英国铍工业始建于1956年，主要着眼于铍在反应堆中的应用。建立了一系列由矿石提取氧化铍，生产金属铍及铍制件的工厂，1960年曾有四个工厂。帝国化学工业公司所属的铍制件厂的设计生产能力为每年7吨。但在1962年，由于在气冷反应堆中不采用铍作为燃料元件的包套材料，这些工厂停止了生产。目前只有氧化铍和铍铜生产部分继续运转，这一部分的生产能力为美国铍公司和英国帝国熔炼公司所共有。

4. 法国 第二次世界大战结束时，法国将原德国德古萨公司的铍生产设施拆迁至法国，于巴黎附近建立了由培西尼(Pechiney)公司经营的铍厂，据称生产能力每年达10吨，这包括铍铜及铍金属的生产。所生产的铍金属主要用于本国核反应堆中作燃料套管材料，此外，有部分出口至美、德、日等国。1971年与美国铍公司合组了一个新公司，在法国生产铍铜，产品在欧洲销售。

5. 日本 日本的铍生产始于1958年。据称，主要是靠自己的力量建立了从原料到制品的较完整的生产系统。其中以生产铍铜合金为主，1970年产430吨。日本金属铍的生产能力很低，每年不过几百公斤。目前日本铍生产集中于日本碍子公司。

从以上情况可以看出，美国是资本主义世界中铍矿石的主要消费者，也是铍及其有关制品的主要生产者，同时，美

国也是铍及其有关制品的主要应用者。

兹将美国金属铍的产量与消费状况列于表 2 中。

表 2 美国金属铍产量与消费状况〔121〕

年 份	产量,吨	消 费 状 况
1960	136	
1962	250	75%用于核反应堆, 15%用于铍铜, 10%用于空间
1963	150	
1964	91	50%用于航空及宇宙航行
1966	172	
1967	176	
1968	181	45%用于原子能, 19%用于航空及宇航, 36%用于合金
1969	212	
1970	180	30%用于宇航, 20%用于原子能, 50%用于合金

据美国宇航结构金属手册〔126〕所载, 1963年美国能生产的铍产品的尺寸和重量达到如下水平:

交叉轧制铍板: $0.025 \times 51 \times 51$ 毫米

$0.127 \times 254 \times 406$ 毫米

$0.254 \times 305 \times 610$ 毫米

$0.406 \times 381 \times 762$ 毫米

$0.508 \times 914 \times 2438$ 毫米

$4.75 \times 914 \times 2438$ 毫米

1970年达到水平:

生产 $0.5 \times 1220 \times 4572$ 毫米的铍板〔33,119〕。

挤压产品直径12.7~89毫米。

生产各种不同断面长6米的挤压产品：

锻件 ≤ 91 公斤环轧产品；

线材直径 ≥ 0.101 毫米。

生产直径0.025~0.127毫米 $\times$ 15240米的线材^[11]。

热压铍直径1880毫米，重量 ≤ 5.5 吨。

热等静压能生产管状产品。

据1971年11月12日美国金属市场报导，铍珠（含97%Be）的价格为134美元/公斤。铍粉（200筛目）为107美元/公斤。真空铸铍为147~156美元/公斤。铍粉的价格低于铍珠的价格，是因为混入了清洁废屑制的铍粉，这些废屑的价格与铍珠价格比较是很低的。

铍热压铍的价格为121~154美元/公斤，成本的组成如下^[119]：

成本组成	成本的百分比
铍矿	30
从铍矿提炼成铍珠	50
从铍珠到热压铍	20
热压铍总的价格	100%

由真空热压铍机械加工成的各种产品，因其产品形状的复杂程度不同，价格由每公斤231美元到770美元^[119]。

用真空热压铍轧制的铍板，板材越薄成品率越低，所以，价格也越高。在规定板材的宽度均为914毫米和长度均为2438毫米的条件下，不同厚度板材的价格如表3所示。如果铍板的月产量能够增加，则铍板的价格也可以降低，表3进行了这方面的估计。

表 3 铍板厚度和月产量与价格的关系 [119]

铍板厚度 毫米	目前月产, 公斤	预 计 月 产, 公 斤		
	273	1818	4545	9090
	铍板价格, 美元/公斤			
0.508	1540	770	528	440
1.016	901	473	352	297
1.778	715	330	242	220
3.048	506	264	198	165

文献 [10] 介绍了美国 1961~1964 年间铍产品的生产情况, 如表 4 所示。由此可对美国 1961~1964 年间铍的生产、应用、研究试验等情况有一概括的了解。

表 5~8 是另一文献介绍美国铍的应用情况。根据设计要求的主要性质列出了已经生产或正在研制或有远景应用可能的领域。产品应用状态一栏的“生产”、“发展”和“远景”三项凡有△记号的, 是指该种产品已经生产, 以后在技术方面又得到了发展, 将来还有可能扩大应用。例如导航系统元件过去已经生产了数千个, 现在通过热等静压和铬涂层等技术使产品质量大为提高, 将来铍导航系统元件还有可能扩大应用。

为了便于叙述起见, 对目前铍的实际应用情况分成以下几章介绍: 第二章, 铍在导弹、卫星和宇宙飞船方面的应用; 第三章, 铍在飞机上的应用; 第四章, 铍在惯性导航系统中的应用; 第五章, 铍在原子能反应堆中的应用 (包括一些其它国家的反应堆); 和第六章, 铍在其它方面的应用。

表 4 1961~1964年期间美国被产品的生产情况 [10]

产 品	状况	生 产 厂	计划状态	产 品 状 态	特 征
太阳能电池板	CI	布拉士	生产	板、棒	钹螺栓、钹铜焊于钹板上
“民兵”导弹的导航与控制室	C	布拉士	试验阶段	板	钹于钹底座上
热屏蔽	C	布拉士	少量生产	热压钹S-200	化学抛光钹的第一次半生产
“双于星座”宇宙飞船盖屋顶板	CI	赖迪士	生产	轧制厚板	钹厚板成型, 机械加工和化学抛光的第—次应用
“民兵”导弹用的转接壳体	C	布拉士, 赖迪士	发展阶段	环轧厚板	环轧壳体, 成型和焊接纵梁, 化学抛光, 焊接组装
“民兵”导弹用的转接壳体	CI	布拉士, 赖迪士	生产	环轧厚板	环轧壳体, 成型和焊接纵梁, 化学抛光, 焊接组装
喷嘴-开动管	CI	布拉士黄铜公司	试验阶段	挤压、钹造 (S-200)	带有不同末端的配件, 包括钹配件直径为152毫米的管
隔箱部分	I	布拉士	试验阶段	挤压角材	成型, 挤压 S-200 角材, 连接于网板上构成直径660厘米的隔箱的90°部分
“阿吉纳”嵌板	CI	洛克希德, 布拉士	生产	板	成型, 化学抛光, 钻孔, 用螺钉连接
钹天线	C	布拉士钹公司	少量生产	线	热成型螺旋状线圈、铜焊于钹件上
压缩机叶片	C	布拉士 Ex-Cell-O	试验阶段	挤压I-400	挤压、钹造、扭转、机械加工
压缩机叶片	C	TRW	试验阶段	挤压I-400	毛坯在密闭模中钹造, 机械加工
压缩机叶片	C	布拉士 Ex-Cell-O	试验阶段	挤压I-400	挤压、钹造、扭转、机械加工
压缩机盘	C	布拉士 Ex-Cell-O	试验阶段	钹造I-400	从薄饼钹件、机械加工

产 品	状况	生 产 厂	计划状态	产 品 状 态	特 征
压缩机盘	CI	布拉士	試驗阶段	鍛造I-400	桶鍛以后, 机械加工
常平架	I	布拉士	試驗阶段	块、板	旋压成半球、Al-Si 銅焊于从 S-200 热压 錠机械加工的耳軸上
导航系统稳定元件	CI	布拉士	試驗阶段	粉冶	水静压和烧结成复杂形状, 只需极少量的 机械加工
“波音”箱梁	I	波音	試驗阶段	板	成型的錠板, 用銅焊或鉚接成箱梁
錠构件加工技术的研究	I				加工数据的研究计划
錠板组合构件	C	Aeronca	試驗阶段	板	銅焊夹心构件
辐射聚光器模型	C	太阳公司	試驗阶段	板	錠板成型和銅焊于鋼管上
“土星”箱梁	I	共和公司	試驗阶段	板	鉚接装配
“阿波罗”导航基座	C	布拉士	少量生产	S-200錠	銀炉焊装配
引擎箱(压力容器)	I	布拉士, 賴迪士	試驗阶段	鍛造S-200	反挤制成, 用銅焊
“红眼”常平架	CI	賴迪士, 斯皮德林	生产	錠件	三軸向鍛造
重返大气层飞行器结构	C	布拉士	試驗阶段	块、板	板成型圆筒、惰性气体钨弧焊于机械加工 的S-200半球上
导航系统馬达箱	CI	賴迪士	試驗阶段	鍛造S-200	在密閉爐中鍛造
主箱、“阿波罗”导航用	CI	布拉士, 斯皮德林	生产	粉冶	无压力烧结, 机械加工
控制棒	C	布拉士, 賴迪士	試驗阶段	S-200	薄板鍛造, 机械加工
控制棒	CI	錠公司	生产	HP-20	挤压管、銅焊末端配件
錠体	CI	布拉士錠公司	生产	S-200	夹心錠体、用銀銅炉焊、鍍涂层和鋁蒸着 涂层

续表 4

产 品	状况	生 产 厂	计划状态	产 品 状 态	特 征
扫描头	C	布拉士	少量生产	S-200	空间骨架, 挤压棒构成炉焊于热压环上
蜂窝结构	I	布拉士	试验阶段	S-200	用箔和板制成, 粘着胶结
圆筒	CI	布拉士	试验阶段	S-200	用板制成, 粘着胶结
压缩叶片	CI	赖迪士	试验阶段	I-400	三轴向锻造
压缩机盘	CI	赖迪士	试验阶段	I-400	三轴向锻造
预试验反应堆元件	C	布拉士	生产	S-200	S-200热压锭机械加工, 成板再热成型

注: C—完成的; I—在加工中; CI—已交货, 但仍继续加工。

表 5 金属材料在目前和将来的应用 (主要利用金属的机械性质) [21]

应 用	状 态		材 料 型 态	最 重 要 的 机 械 特 性					其 它
	生产	发展		低密度	高比强度	高比刚度	高温持久强度	良好疲劳寿命	
“民兵”导弹弹壳体 卫星结构 太阳能电池板 阿吉纳导弹结构 卫星天线	△		板材,纵梁、环轧壳体	△	△	△	△	△	可容的热膨胀
	△		板材	△	△	△	△	△	
	△		板材和棒	△	△	△	△	△	
	△		板材	△	△	△	△	△	
	△	△	线材和板材	△	△	△	△	△	

续表 5

应 用	状 态		材 料 型 态	最 重 要 的 机 械 特 性				其 它
	生产	发展		低密度	高比刚度	高比强度	高温持久强度	良好疲劳寿命
导弹结构:包括级间转接壳体、导航与控制室、舱壁、梁等传动装置、梁等系固零件	△	△	板材和挤压产品	△	△	△	△	
喷气引擎元件(轴、盘、叶片)	△	△	棒材	△	△	△	△	△
F-4 飞机操纵面	△	△	锻造、挤压、复合材料	△	△	△	△	△
卫星结构、桁架等	△	△	板材	△	△	△	△	△
线材复合材料	△	△	挤压产品, 板材	△	△	△	△	
蜂窝结构芯	△	△	线材	△	△	△	△	
飞机用控制棒、直角杠杆、装配件、舱壁、纵梁、环、蒙皮、整流罩、起落齿轮元件等	△	△	板材和锻件	△	△	△	△	
飞机用直角杠杆、零件、舱壁、纵梁、环、蒙皮、整流罩、起落齿轮部件等	△	△	板材、锻件、热压锭、挤压	△	△	△	△	
齿轮和泵等(空间工程用)	△	△	板材、锻件、挤压、热压锭	△	△	△	△	
穿透辅助设备	△	△	锻件	△	△	△	△	△
精密仪器	△	△	箔材和线材	△	△	△	△	
			块	△	△	△	△	

表 6 铍材料在目前和将来的应用 (主要利用铍的热性能和机械性能) [21]

应 用	状 态		材 料 型 态	最 重 要 的 材 料 特 性										其 它
	生产	发展		远景	低密度	高刚度	高比强度	高温持久强度	高保持度	高比热	高导热	良尺寸稳定性	良好弹性极限	
飞机制动器圆盘	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	良好的疲劳寿命
导航系统元件	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	可容的热膨胀
铍体和其它光学系统部件	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	良好的疲劳寿命
火箭喷嘴和推进室	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	良好的疲劳寿命
辐射器和聚光器	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	良好的疲劳寿命
宇宙飞船操纵面	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	良好的疲劳寿命
宇宙飞船舱壁、纵梁、环等	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	良好的疲劳寿命
宇宙飞船蒙皮和整流罩	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	良好的疲劳寿命
商业上	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	良好的疲劳寿命

表 7 铍材料在目前和将来的应用 (主要利用铍的热性能) [21]

应 用	状 况			材料形态	最 重 要 的 材 料 特 性					其 它
	生 产	发 展	远 景		低密度	高温持久强度	高比热	高热导		
导弹结构	△	△	△	热压铍	△		△	△		
重返大气层卫星盖屋板	△			厚板和热压铍	△	△	△	△		
重返大气层用的热屏蔽	△			热压铍	△	△	△	△		
推进剂		△		粉 末	△		△	△		高的比推力