

特约专栏

金属铍的应用进展

钟景明^{1,2}, 许德美², 李春光², 王战宏², 李峰², 王莉¹, 李志年²

(1. 国家钽铌特种金属材料工程技术研究中心, 宁夏 石嘴山 753000)

(2. 西北稀有金属材料研究院 宁夏特种材料重点实验室, 宁夏 石嘴山 753000)

摘要: 综述了近20年来金属Be在核能、惯性导航系统、红外光学系统、热学、结构件、高能物理学和商业等领域的最新应用进展, 以及金属Be优异的性能在促进其应用领域技术进步和改进产品性能和质量中所起的重要作用。从金属Be的应用范围和效果, 说明金属Be作为“战略性、关键性”工程材料, 对一个国家国防、航空航天和战略核能发展所起的关键支撑作用。并简要介绍了我国金属Be的应用现状, 指出我国必须大幅度提高Be在惯性导航系统和红外光学系统的应用水平, 以增强我国空间争夺和对抗能力。最后, 总结了世界范围内金属Be的应用市场格局, 预计未来金属Be市场仍以国防、航空航天和战略核能为主, 且在民用工业中也将占据重要地位。

关键词: 金属Be; 惯性导航系统; 红外光学系统

中图分类号: TG146.2⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2014)09-0568-08

Progress in Application of Metallic Beryllium

ZHONG Jingming^{1,2}, XU Demei², LI Chunguang², WANG Zhanhong²,
LI Feng², WANG Li¹, LI Zhinian²

(1. China National Engineering Research Center for Tantalum and Niobium Special Metal Materials, Shizuishan 753000, China)

(2. Northwest Rare Metal Materials Research Institute, Ningxia Key Laboratory for Rare Materials, Shizuishan 753000, China)

Abstract: This paper mainly reviews the up-to-date progress of metallic beryllium applications in nuclear reactors, inertial navigation system, optics, thermotics, structure parts, high-energy physics and typical commercial use in the recent 20 years, as well as gives brief introduction that excellent performances of metallic beryllium play an important role in promoting technology development of its application field and improving product performance and quality. Based on the range and effect of metallic beryllium application, the paper details that metallic beryllium as key strategic engineering material has given strong support to national defense, aerospace and strategic nuclear energy development. Moreover, the paper briefly introduces status of metallic beryllium applications in China, and points out that China should greatly improve the level of beryllium application in inertial navigation system and the infrared optical system, so as to enhance China's space fighting and confrontations ability. Finally, the paper summarizes pattern of metallic beryllium market. It can be expected that metallic beryllium market is still defense, aerospace and strategic nuclear, and metallic beryllium will consistently play an important role in civil industry in future.

Key words: metallic beryllium; inertial navigation system; infrared optical system

1 前言

金属Be作为一种特殊的功能和结构材料, 早期的应用集中在核领域和X射线领域, 20世纪七八十年代开始转向国防和航天航空领域, 在惯性导航系统、红外

光学系统和航空航天飞行器结构件上得到了持续而广泛的应用, 这使金属Be成为一种引人瞩目的“战略性、关键性”工程材料。

国外, 特别是美国十分重视金属Be的应用, 金属Be也为美国国防、航空航天和核能发展起到了关键的支撑作用。我国金属Be的应用水平与美国差距较大, 且在某种程度上影响到其应用领域的技术进步, 特别是惯性导航系统表现尤为突出。因此, 本文简介了金属Be在核能、惯性导航系统、红外光学系统、结构件、热学、高能物理学和商业等领域的最新应用进展, 以及

收稿日期: 2014-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474177)

第一作者及通讯作者: 钟景明, 男, 1963年4月生, 教授,

Email: zhongjm@cnmnc.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.09.05

金属 Be 优异的性能在促进其应用领域技术进步和改进产品性能和质量中所起的重要作用, 结合应用实例说明金属 Be 作为“战略性、关键性”工程材料, 对国防、航空航天和战略核能发展所起的关键支撑作用, 旨在引起我国工业界的设计者和工程人员对金属 Be 应用的重视, 加快我国金属 Be 的应用步伐, 为金属 Be 在国防、航空航天和战略核能等应用领域发挥应有的积极作用做出贡献。

2 金属 Be 应用进展

2.1 金属 Be 在核能中的应用

金属 Be 的核性质十分优异, 具有所有金属中最大的热中子散射截面(6.1barn), 且 Be 原子核质量小, 能降低中子速度而不损失中子能量, 是很好的中子反射材料和减速剂。Be 中子在核中的结合能小(1.666 MeV), 在能量粒子(中子、质子、 γ 射线)的轰击下, 很容易释放出中子, 可以用 Be 来做中子源、增殖剂^[1]。另外, Be 密度低(1.842 g/cm³), 对于需要考虑体积/质量的反应堆, Be 是首选材料。

Be 的核应用始于二战期间, 并在 20 世纪 50 年代末期得到了较大的发展, 特别是在小型核动力反应堆中。1956 年, 美国原子能委员会就与布拉什威尔曼工程材料(现 Meterion 公司)和卡韦基(Kawecki Chemical Co.)两家公司签约 5 年期合同, 要求每家每年生产约 45 t 金属 Be。最近美国核动力木星卫星探测器(Jupiter Icy Moons Orbiter, JIMO)的核反应堆使用了 Be 组件, Be 组件设计由洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)完成。预计金属 Be 还会用在美国计划建造的月球核反应堆上。

我国有关设计与研制机构成功开发了用于中子照射分析检测用微型反应堆, 所用的反射体包括一个内径 $\phi 220$ mm、外径 $\phi 420$ mm、高 240 mm 的短圆筒和上下端盖等, 共 60 个 Be 部件。我国首座大功率高通量试验反应堆, 用 Be 做反射层, 共使用 230 套精密 Be 组件^[2]。这些 Be 组件系由西北稀有金属材料研究院提供。

托克马克聚变反应堆(Tokamak Fusion Reactor, TFR), 俗称“人造太阳”, 是未来战略能源发展的目标之一。Be 除了具有优异的核性质以外, Be 原子序数低, 对等离子体不造成明显的污染, 对 O 的亲合力和吸气作用提高了等离子体的纯度, 而且 Be 也没有明显的化学溅射作用, 其蚀损寿命也可接受。因此, 大多数 TFR 选择了 Be 作为约束等离子体的内壁材料。从 1988 年起, Be 替代氟氯化碳(CFC)用于“欧洲联合环”聚变反应堆(Joint European Torus reactor, JET), 主要用做面对

等离子体内壁的 Be 瓦和蒸汽器, 每 1 次的用量均超过 3 t^[3], 图 1 所示是 2006 ~ 2007 年第 4 次等离子体内壁更换 Be 板(4.4 t)^[4]。国际热核聚变试验反应堆项目(International Thermonuclear Experimental reactor, ITER)是全球规模最大、影响最深远的未来战略核能源项目, 其等离子体的 Be 瓦预计需要 13 t 金属 Be^[5], 这些 Be 瓦分别由美国 S65C、中国 CN-G01、俄罗斯 TGP-S6FW 热压 Be 材制作。

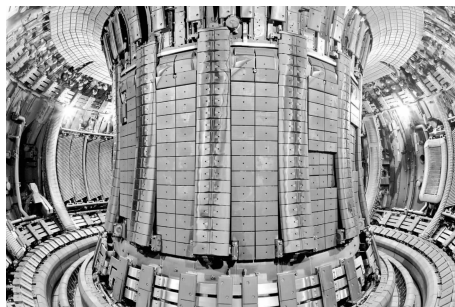


图1 “欧洲联合环”于 2006 ~ 2007 年第 4 次更换 Be 瓦的照片^[4]

Fig. 1 Photo of beryllium bush of JET replaced 4th time in 2006 ~ 2007^[4]

美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)是世界上最大的、输出功率最强的激光核聚变装置, 装置的核心部件是包含放射性氢同位素氘和氚的燃烧球。由于 Be 具有高强度、高导热的优点, 比其它材料更能承受氘氚扰动, 包裹聚变反应氘原子和氚原子的燃烧球最终选择由 Be 制作。该 Be 制燃烧球设计和制作由洛斯阿拉莫斯国家实验室完成^[6]。

Be 制作的中子源有 Be-Sb、Be-Am、Be-Po 等, 其中 Be-Sb 中子源应用最为广泛。Be 还经常用于在核物理研究中产生中子的靶材。我国 Be-Sb 中子源的生产已实现国产化, 1997 年西北稀有金属材料研究院自主研发的 Be-Sb 芯块产品, 达到了国际先进水平, 稳定供应我国核电站二次中子源点火控制装置^[7]。

2.2 金属 Be 在惯性导航系统中的应用

Be 的微屈服强度很高, 这一特性保证了惯性导航器件所要求的尺寸稳定性, 还没有任何一种其它材料能达到 Be 导航时达到的精度。另外, 铍密度低、刚度合适于惯性导航仪表向小型化和高稳定性发展的要求, 解决了通常用硬 Al 制作惯性器件时存在转子卡死、运行稳定性差、寿命短等问题^[2,8-9]。

20 世纪 60 年代, 美国和前苏联实现了惯性导航器件用材从硬 Al 向 Be 的转变, 导航精度提高了至少一个数量级, 并实现了惯性器件向小型化发展的要求。惯性器件平均故障时间间隔也大幅度提高, 美国 Be 制液浮

陀螺仪 G8 的平均故障时间间隔达到了 28 000 h^[8]。从那以后, Be 在精密导航仪表和惯性平台中得到了广泛的应用, 特别是在路基和海基战略导弹、核潜艇和军用飞机等导航系统的应用上具有不可替代的地位。美国大力神(Titan)、民兵(Minuteman)、和平卫士(Peacekeeper)路基战略导弹, 北极星(Polaris)、海神(Poseidon)、三叉戟(Trident)海基战略导弹, F-15, F-22 战斗机等等的陀螺组件和惯性平台均由 Be 制作。

1978 年洛克韦尔公司完成静电陀螺导航仪工程(ESGN)样机(军用型号 AN/WSN-3), 采用 $\phi 10$ mm 实心 Be 转子。该静电陀螺监控器自 1979 年陆续装备了美国三叉戟弹道导弹核潜艇和拉菲特级(La Fayette Class)核潜艇, 1985 年开始装备攻击型核潜艇和水面潜艇。B-52 战略轰炸机和 F-111 隐形战斗轰炸机装备 SPN/GEANS 惯性导航系统(军用型号 AN/ASN-136 系统)后, 使轰炸机投弹圆概率误差和导弹系统的初始对准误差大大减小。该惯性系统是霍尼韦尔(Honeywell)公司用 $\phi 38$ mm 空心 Be 转子制作, 每个 $\phi 38$ mm 空心 Be 转子重 10 g。20 世纪 80 年代, 该系统改进成为精密惯性测量系统 GEO/SPIN, 广泛用于海、陆、空大地测量^[10]。

20 世纪 90 年代中期, 美国开始了路基战略导弹民兵 III(Minuteman III)和海基战略导弹三叉戟 II(Trident II)改进项目, Be 制惯导系统是项目改进的重点之一, 更新后的制导装置使民兵 III 导弹精度提高, 达到和平卫士战略导弹的精度^[11-14]。图 2 所示是和平卫士导弹用先进惯性参考球(Advanced Inertial Reference Sphere, AIRS), 打开后展示出一个陀螺仪和加速度计, 该球约耗用了 9 kg 金属 Be^[15-16]。

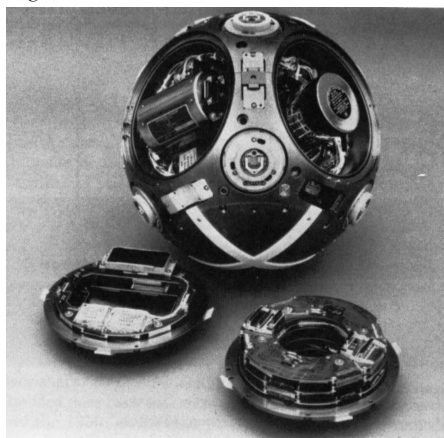


图 2 和平卫士导弹用 Be 制先进惯性参考球照片^[16]
Fig. 2 Photo of beryllium advanced inertial reference sphere used in peacekeeper, AIRS opened to show a gyroscope and accelerometer^[16]

在美国国家导弹防御系统(National Missile Defense, NMD)中, 金属 Be 除了做惯性器件, 还被用于很多领域, 如地基雷达的电子系统和导弹部件等。路基拦截器(Ground-Based Interceptor, GBI)系统所要求的高敏捷性也要求使用 Be 或 Be-Al 合金。外大气层猎杀装置(Exoatmospheric Kill Vehicle, EKV)也用 Be 制作遮光罩和光学系统^[12-14, 17]。

Be 制惯性陀螺仪不仅能测量经纬度、高程以实现导航, 还可以精确测量重力, 也用于重力测量卫星上^[10]。美国的重力探测卫星 B(Gravity Probe B Satellite)使用了 4 个 Be 制参考球^[14], 用来精确测量重力异常, 该卫星是用来证明爱因斯坦的广义相对论。

20 世纪 90 年代初, 我国已成功研制全 Be 结构的静压液浮陀螺仪, 见图 3a, 图 3b 是其部分 Be 零件, 该陀螺仪的主要性能指标接近或达到国际上同类先进陀螺仪的水平。我国静压气浮陀螺仪、静电陀螺仪和激光陀螺仪中也不同程度地应用了 Be 材, 国产陀螺仪的导航精度大幅度提升^[8]。但在惯性导航系统中, Be 的应用并没有获得推广, 可以说几乎没有得到应用。目前我国惯性器件仍普遍使用硬 Al。在惯性导航系统中, Be 的应用推广问题已经存在 20~30 年了, 应用水平与国外差距越拉越大, 成为我国惯性导航技术落后于美国和前苏联的重要原因之一^[9]。因此, 我国要想获得惯性仪器高精度, 满足缩小体积, 减轻重量, 适应航天高精度惯导系统的要求, 关键措施之一是使用 Be 材, 实现惯性导航系统用材从硬 Al 向 Be 的转变。Be 材在惯性导航系统中应用的扩大, 必将推动我国惯性导航技术的大幅度提升, 对我国航天事业发展起到关键的促进作用。

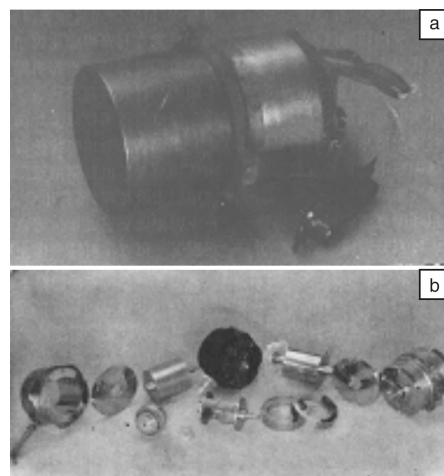


图 3 国产全 Be 静压液浮陀螺仪(a)和部分 Be 零件(b)照片^[8]
Fig. 3 Photos of domestic all beryllium hydro-static bearing gyroscope (a) and a part of beryllium elements (b)^[8]

2.3 金属 Be 在光学系统的应用

抛光后的金属 Be 对红外线 ($10.6\ \mu\text{m}$) 的反射率高达 99%, 特别适合于做光学镜体^[18]。对于在动态(振荡或旋转)系统中工作的镜体, 要求材料具有很高的变形能力, Be 的刚性很好地满足了这一要求, 成为首选材料。玻璃光学转镜的最高转速为 $10 \times 10^{-4}\ \text{rpm}$, Be 转镜的转速可达到 $35 \times 10^{-4}\ \text{rpm}$ 以上, Be 制扫描镜的振荡频率可以在 1 kHz 以上^[2]。另外, 在几种常用的镜体材料(RB SiC, Zerodur, ULE, Fused Silica)中, Be 成形性和机加工性最好, 易制成大尺寸镜体。近年来, 随着镜体尺寸要求越来越大, Be 在精密光学系统中的应用明显增加。

Be 的光学应用主要分军用和民用两方面。在军事领域, Be 最初的应用是夜视系统和红外照相机, 后来在定位、预警、侦察、通讯卫星的红外光学系统、无人驾驶飞行器的光学系统、核爆探测器、战斗机战略光学系统和坦克射击系统得到了普遍应用。在这些应用领域, Be 往往是唯一能够满足性能要求的材料。Be 的光学军用市场较大, 仅 1990 年, 美国 Materion 公司, 就完成了用于改善“西德豹”坦克性能的 650 个 Be 镜毛坯的制作, 同时接受了美国 M1A2 坦克用 250 块和韩国的 K-1 主战坦克控制系统用 280 块 Be 镜毛坯的订货^[19], 图 4 为坦克设计系统用 Be 镜坯。Be 也被用于 F-15, F-16, F-22, F-35 和联合打击战斗机 (Joint Strike Fighter, JSF) 等战机上瞄准舱的光学部件^[2,14]。

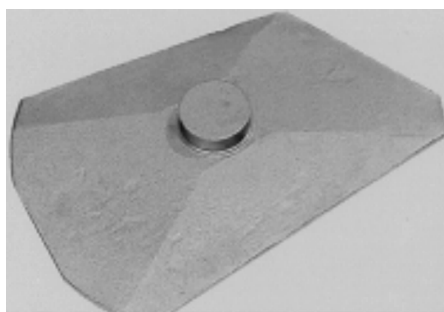


图 4 坦克射击系统使用的 Be 镜的照片^[19]

Fig. 4 Photo of beryllium mirror blank used in shooting system of the tank^[19]

图 5 是美国陆军 OH-58D 侦察直升机桅杆瞄准器 Be 制光具座, 激光、电视和红外传感器都安装在这个光具座上。该光具座每个质量仅 2.7 kg, 但刚性的 Be 框架有效消除了飞机马达运行时产生的振动, 保持了精密定位, 保证了传感器很好的成像, 确保了目标探测和选择系统的工作可靠性。直升机靠这个光学电子系统, 即使在黑暗的低空飞行也能发现目标。美国和台湾军队所购 OH-58D 型直升机中, 总共用 Be 1 260 kg^[20]。在

F-15E 等飞机上装备的称之为“Lantirn”(用于夜间作战的低空导航和捕获与跟踪目标的综合系统)的红外光学系统中使用了 Be, 据说借助于该系统, 战斗机能在漆黑的夜间躲过敌人的雷达, 并以 800 km/h 的速度飞行^[15]。

在俄罗斯, 预报地球同步轨道导弹预警卫星的一个内置大型望远镜筒中, 载有重约 600 kg、由多个 Be 镜组成的光学成套设备。该卫星用于导弹发射监测, 每 7 min 对地球表面扫描一次, 4 星组网模式可以形成横贯美国东海岸至中国东部的导弹发射监测^[21]。

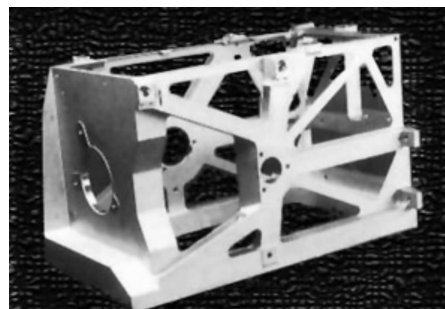


图 5 OH-58D 侦察直升机桅杆瞄准器 Be 制光具座照片^[20]

Fig. 5 Photo of beryllium optical bench for supporting the mast aiming device on the OH-58D scout helicopter^[20]

在民用领域, Be 扫描镜、摆镜和转镜在资源和气象卫星中有着广阔的市场, 在红外天文望远镜中的应用也非常普遍, 这个市场也很大, 如美国地球观测卫星 (Earth Observation Satellite, EOS) 使用了 Be 扫描镜, 国家海洋和大气局先进超高分辨率辐射计 (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR) 使用的扫描镜和镜体基座均用金属 Be 制作。

最近, 美国航空航天局 (NASA) 制造的詹姆斯韦伯太空望远镜 (James Webb Space Telescope's Mirror, JWST), 它是替代哈勃 (Hubble) 的新一代太空望远镜。在主镜材料竞选过程中, Be 优异的物理、机械、抛光工艺性能, 特别是 Be 可以在低于 30 K 的温度下工作, 使它击败了众多优选材料 (与 Be 有竞争力的主要是 ULE、Zerodur), 成为詹姆斯韦伯太空望远镜的主镜材料。詹姆斯韦伯太空望远镜共使用了 18 块对角直径达 1.52 m 的六边形 Be 镜, 图 6 是 NASA 测试 6 块 Be 镜单元的低温性能的照片。詹姆斯韦伯太空望远镜的红外照相机光具座也由 Be 制作^[22,23]。另外, 詹姆斯韦伯太空望远镜虽然比哈勃大, 但因使用 Be 镜, 质量只有 6.2 t, 约是哈勃的一半, 哈勃主镜尺寸为 2.5 m, 材料是 ULE, 质量为 11 t。

我国 Be 镜已成功用于气象卫星、资源卫星和神舟号飞船上, 截止 2004 年, 西北稀有金属材料研究院共

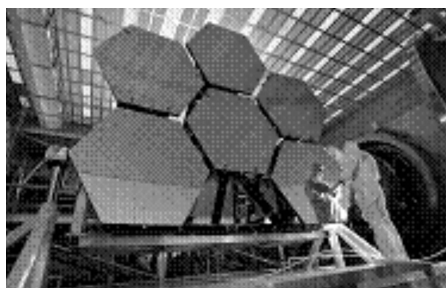


图 6 NASA 测试太空望远镜 6 块 Be 镜单元的低温性能的现场照片

Fig. 6 Photo of cryogenic properties testing in scene by NASA for six beryllium mirror used in the James Webb Space Telescope [23]

计给风云卫星提供了 6 块 Be 扫描反射镜, 为资源卫星和“神州”号飞船的研制提供了 Be 双面扫描镜 7 块和 Be 扫描反射镜 8 块, 还研制了 20 余套高速摄像机用平行平面 Be 转镜和三棱 Be 转镜供客户使用^[2]。2004 年以后, 西北稀有金属材料研究院又为有关设计与研制机构提供了多块 Be 制扫描镜、摆镜和转镜。图 7 是西北稀有金属材料研究院为 ZY-1 卫星制作的 Be 双面扫描镜。

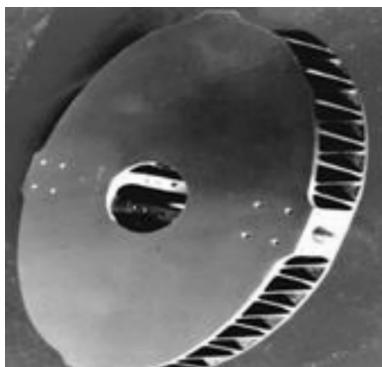


图 7 西北稀有金属材料研究院生产的 ZY-1 卫星 Be 双面扫描镜的照片

Fig. 7 Photo of beryllium double-sided scanning mirror used in ZY-1 satellite and produced by Northwest Rare Metal Materials Research Institute

但与国外相比, 我国 Be 镜在红外光学系统的应用较少, 且集中在民用领域, 在军事领域尚未获得应用, 特别是在预警、定位、侦察、通讯卫星, 飞机瞄准舱和坦克射击系统中没有获得应用, 这非常不利于空间竞争力的提高。因此, 我国必须迅速加快 Be 在精密光学系统的应用步伐, 以大力增强我国空间争夺和对抗能力。

2.4 金属 Be 作为飞行器结构材料的应用

Be 密度低, 弹性模量高 (303 GPa), 能使构件的质量/体积比达到最优化, 并保证结构件自然频率高, 避免共振^[2], 同时 Be 刚度高, 零件可以做得很薄而不变

形。但 Be 昂贵, 在地面上单纯作结构件不占优势, 主要的优势在航空航天领域。表 1 是 1995 年美国对几种结构材料制作某一太空零件时的轨道成本 (发射成本 + 零件成本) 的比较^[24], 从中可以看出, 虽然 Be 的零件成本较高, 但 Be 零件轻, 发射成本低, 最终用 Be 制作的太空零件轨道成本比其它材料低得多。因此, 且不说 Be 优异的物理性能, 单使用 Be 作为结构部件所带来的益处也是巨大的。另外, 大多数空间结构件工作时都处于压应力状态, 对材料刚度要求高, Be 的高刚度恰好满足这一要求。

表 1 几种材料制作某一太空零件的轨道成本比较^[24]

Table 1 Comparison on orbit cost of different candidate materials^[24]

| Cost element | 6061 T6Al | Ti6Al4V | Be | 304SST |
|-------------------------|-----------|---------|---------|---------|
| Part cost/ \$ | 3 500 | 14 500 | 30 500 | 9 500 |
| Weight of part/lb | 80.55 | 79.3 | 11.4 | 77.5 |
| Cost to launch/ \$ | 805 500 | 793 000 | 114 000 | 775 000 |
| Total on orbit cost/ \$ | 809 000 | 807 500 | 144 500 | 784 500 |

1960 年以来, 美国在多种飞行器中使用了 Be 制部件以获得减重效果, 在军用飞机上应用 Be 做结构件更重要的是利用 Be 的刚性满足提高飞行速度的要求。包括水星和双子座飞船的热屏蔽板, 战术通信卫星的构架和蒙皮, 战略洲际导弹助推器和有效载荷之间转接壳体, 轨道地球物理观察卫星所用的太阳能电池板的基座和基板, 航天轨道飞行器驾驶舱挡风板的构架, 处置容器的脐门, 军用飞机上的方向舵、侧翼前缘、仪器支承件和阀门等^[2]。海神号海基发射战略导弹的弹头圆锥形顶端部分转接壳体, 总计耗用金属 Be 约 181 t (5 年耗用总量)^[15]。美国新近的车西尼土星探测器 (Cassini Orbiter) 和火星漫游者 (Mars Rovers) 两个太空项目中为了减轻重量, 也大量使用金属 Be 部件^[14]。

在美国, Be 作为航空航天结构件得到了普遍应用, 但我国长期以来认为 Be 零件价格昂贵, 没有考虑到用 Be 制作零件可大幅度降低发射成本, 更没有考虑到零件减重后, 可提高飞行器的有效载荷、航程半径、飞行速度、飞行寿命, 以及增加射程等等好处。因此, 我国没有单纯将 Be 用做结构材料。

2.5 金属 Be 在热学领域的应用

Be 的比热为 1.926 kJ/kg · K (20 ℃), 是所有金属中比热最大的, 热导率为 216 W/m · K (25 ℃), 与质量相同的其它金属相比, 导热性最高, 熔点 (1 285 ℃) 也是比较高的^[2]。因此, Be 在热学领域也获得了大量应用。

Be 的热学应用主要分为两类: 一类是利用 Be 吸热

性好这一特点,将Be作为轻质、高效的吸热材料,主要包括吸热器、热屏蔽零件、散热器、开关部件、火箭发动机喷嘴和控制推进器、电子“黑盒”,以及宇宙飞船的吸热外盖板等。第2类不但要求热性能,也要能在高温下承受一定的载荷,这类应用引出了热学品级的Be材SR-200。目前,交叠轧制的SR-200热学级Be薄板经常在军用电子和航空电子系统作为复动冷源及结构支柱使用^[25-26]。

我国金属Be在热学方面尚未获得应用,存在的问题与Be作为结构件使用时相同。

2.6 金属Be在高能物理学领域的应用

Be具有低密度、高强度、热容量大和导热性好、无磁性、以及耐蚀性,使Be成为制作同步加速器束流管/窗口材料的最佳选择^[27]。目前,世界各国著名的高能物理学研究实验室,加速器上的束流管/窗口几乎全部使用Be和Be-Al合金,如德国电子同步加速器(Deutsches Elektronen Synchrotron, DESY),欧洲核子研究中心(European Organization for Nuclear Research, CERN)大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC),美国能源部布鲁克海文国家重点实验室(Brookhaven National laboratory)相对论重离子对撞机(Relativity Heavy Ion Collider, RHIC)等。

北京正负电子对撞机中升级时使用了由西北稀有金属材料研究院研制的细长薄壁Be管,该管壁厚0.6 mm、长300 mm,见图8,实现了我国Be材在高能物理学应用领域的突破^[7]。



图8 西北稀有金属材料研究院生产的用于北京正负电子对撞机中谱仪的薄壁Be管照片^[7]

Fig. 8 Photo of thin-wall beryllium beam pipe used in spectrometer III in Beijing Electron-Positron Collider and produced by Northwest Rare Metal Materials Research Institute^[7]

2.7 金属Be的商业用途

Be对X射线几乎是完全透过的,且Be制窗口不易损坏,故在X射线窗口/管等得到了广泛的应用,这是Be最早、也是最重要的应用市场之一。其中主要有两个市场,一是在医学成像诊断设备中,Be在高分辨率

医疗射线摄影装置作为X射线窗口材料具有垄断性,目前还没有那一种材料能够替代Be,如骨X射线照相术、计算机层析X射线扫描器(CT),乳房X射线照相术、超声诊断监视仪等。另一个是在工业分析设备上,如电子显微镜、工业X射线探伤仪、X光衍射、X射线荧光分析,行李的X射线检查仪、原位分析、计数管等。

Be最新的商业应用是高级扬声器的音响放大器,这源于在综合音质评价上,Be比钻石和碳质纤维还要优良。音响扬声器的振动膜由Ti振膜改成Be振膜后,高频上限由原来的23 kHz延伸至40 kHz,频率响应也更平滑,这是音箱质的提升。很多大型音响公司,如雅马哈(Yamaha)、先锋(Pioneer)等,早在20世纪70年代就开始使用Be制作扬声器振膜,但由于Be振膜制作复杂,很少真正投放市场。直到2003年,法国劲浪(JMLAB)与Be材料供应厂商一起合作,才掌握了Be振膜生产工艺。现在,Be振膜已应用于各大音响公司旗舰产品中,可以预计Be振动膜是一个正在不断扩大的市场^[28]。

航空用优质Al合金铸件,常加入少量的Be,用以提高铸件的表面光洁度、强度、塑性和成品率。Mg合金中添加0.001%的Be,其着火温度提高200℃^[12,29]。在Ti合金中,Be是最有效的晶粒细化剂,加入0.05%(质量分数)的Be,就能将Ti铸件的晶粒度从几百微米细化到几十微米^[30]。

我国Be的商业应用主要集中在X射线窗口上,近几年,西北稀有金属材料研究院开始研制Be振动音膜产品,目前正在努力推向市场。

3 金属Be的应用市场格局

美国是最大的Be市场,主要是由于军事需求对Be工业的刺激。Be作为特殊的功能和结构材料,广泛用于国防部的武器系统、能源部的战略核设施以及几种关键的民用设施,并为美国航空航天技术发展起到了关键的支撑作用^[12,31]。1991年美国用于国防和航空航天领域的Be为57 t^[12],冷战结束后的十几年里,金属Be的用量大幅减少,一直维持在每年10~20 t之间。近几年有所回升,2010年约45 t,接近冷战前的水平,2011年约33 t(由表观消费量计算)^[32]。美国Materion公司是世界上最大的Be综合制造厂商,在世界Be市场上处于垄断地位,该公司是ITER项目Be瓦的主要供货商。

在前苏联几乎所有的金属Be都用于军事领域,用量与美国相当,1991年约为45 t^[12]。2001年俄罗斯JSC. TVEL公司通过股票交换的方式,获得了前苏联唯一的金属Be生产厂家乌尔巴冶金厂(Ulba Metallurgical

Plant, UMP) 约 34% 的股份, 乌尔巴冶金厂目前位于哈萨克斯坦, 估计俄罗斯目前 Be 的应用水平仅略次于美国^[12,30]。俄罗斯是 ITER 项目 Be 瓦的供货商之一。

中国具有金属 Be 的生产能力, 但用量少, 且应用主要集中在核能、Be 镜和 X 射线窗口上。西北稀有金属材料研究院是我国唯一的 Be 材生产和研制基地, 其产品主要满足中国市场的需求, 该院也是 ITER 项目 Be 瓦的供货商之一。

英、法、德等西欧国家和日本不具备 Be 的生产能力, 但这些国家是金属 Be 主要的消费国。除了直接进口 Be 零件以外, 这些国家金属 Be 加工能力均很强, 主要进口 Be 的半成品进行二次加工满足其 Be 市场的需求, 这些 Be 原料大多数来自于美国。英国公司是首先把 Be 材用于军事用途特别是光学应用的机构之一, 其中英国 Avimo 公司生产的 Be 镜在一些市场中占有强势地位, 主要用于军事车辆观测系统、热图仪和前视红外系统等。与美国相比, 西欧和日本的军工部门消费的 Be 要少得多^[12,31]。

值得注意的是, 关于金属 Be 这种材料的应用数据, 除美国的“部分”信息以外, 其它国家的数据无从获得。

近十几年来, 随着美国工业界的设计和工程人员对 Be 的了解程度的提高, 以及部件对性能要求的提高, 美国金属 Be 的商业应用一直持续增长, 可以预计, 未来 Be 在民用领域同样占有重要的地位。但短期内金属 Be 的主要应用市场仍将是国防、航空航天和战略核能等领域。未来 Be 市场可能不会有大幅度扩展从而促使新的综合生产厂家出现, 因此, 短期内美国 Materion 公司支配世界 Be 工业的地位不会改变, 美国仍将是 Be 应用水平最高的国家。

4 结 语

金属 Be 的应用水平在某种程度上反映出一个国家综合实力和国防军工技术水平的高低, 金属 Be 对一个国家发展航空航天事业、增强空间竞争力能起到关键的支撑作用。在战略核能源、高新技术领域与重大科学工程建设中, 金属 Be 同样占有重要地位。

我国金属 Be 的应用水平与国际先进水平差距较大, 特别是美国已在常规武器系统中大量使用了金属 Be, 而我国金属 Be 的应用还仅限于战略武器中, 同样的问题也存在于航空航天领域, 金属 Be 的应用现状影响着我国武器装备的先进性和空天技术水平的提高。因此, 我国需要大幅度提高 Be 的应用水平, 重点在两个应用领域, 一是惯性导航系统, 以实现我国惯性导航系统向高精度、长寿命、高可靠、小型化发展的要求, 二是红

外光学系统, 特别是卫星、战机、坦克的红外光学系统中应着力推广 Be 的应用, 以增强我国空间竞争和对抗能力。进而带动整个 Be 产业的技术进步, 建立健全的 Be 产业创新体系, 切实增强我国战略金属 Be 材料的自主保障供给能力。用大约 10~15 年的时间使我国 Be 的应用水平进入世界先进行列。

另外, 我国急需提高科技和工业各界的设计者对金属 Be 的认识和接受程度。目前我国在设计和工程应用中往往没有考虑, 或者不了解 Be 优异的综合性能可使构件性能大幅度提高收获更多利益, 而过多的考虑了 Be 的价格。有的则认为 Be 有毒, 恐 Be 不敢用 Be。实际上在很多应用领域, 综合考虑后 Be 成本是最低的, 而 Be 的毒性仅存在于制备过程的粉、尘、烟、雾状态, 最终使用的 Be 零件是无毒的。这种对 Be 的错误认识或者误解必须加以改变, 提高认识和消除误解实现 Be 材的推广应用, 才能使 Be 释放出巨大的潜力和发挥其独特的作用。

参考文献 References

- [1] Tomberlin T A. *Beryllium-A Unique Material in Nuclear Applications, Ineel/Con-04-01869* [R]. Idaho Falls, Idaho: Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2004.
- [2] Nie Dajun (聂大钧), Fu Xiaoxu (付晓旭), Xia Hongxian (夏洪先), et al. 铍及铍合金 [C]//Huang Boyun (黄伯云), Li Chenggong (李成功), Shi Likai (石力开), et al. *China Materials Engineering Canon*, Vol. 5 (中国工程材料大典, 第五卷). Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 267-283.
- [3] Patel B, Parsons W. Operational Beryllium Handling Experience at JET [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2003, 69(1): 689-694.
- [4] Collingwood M. Beryllium [J]. *Metal Bulletin Monthly*, 2007, (6): 42-43.
- [5] Raffray A R, Federicia G, Barabasha V, et al. Beryllium Application in ITER Plasma Facing Components [J]. *Fusion Engineering and Design*, 1997, 37(2): 261-286.
- [6] Alexander D J, Cooley J C, Cameron B J, et al. Progress in the Production of Materials and Fabrication of NIF Beryllium-Copper Ignition Capsules at Los Alamos National Laboratory [J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, 49(4): 796-801.
- [7] Zhong Jingming (钟景明), Xu Demei (许德美), Li Feng (李峰), et al. 铍及铍合金技术进展 [C]//Chinese Academy of Engineering (中国工程院). *The Power Metallurgy Science and Technology Forum* (粉末冶金科学与技术发展前沿论坛). Beijing: High Education Press, 2013: 97-106.
- [8] Sun Shuqi (孙书祺). 惯性仪器结构的理想材料-铍 [J]. *Aerospace China* (中国航天), 1999(1): 44-47.
- [9] Ma Jinchun (马晋辰). 加快 Be 材应用步伐 [J]. *Aerospace*

- Technology(航天工艺), 1997(4): 46-47.
- [10] Gao Zhongyu(高钟毓). *Electrostatic Gyroscope Technology* (静电陀螺仪技术) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 2-6.
- [11] Wang Yixiao(王宜晓), Liu Xiaoen(刘晓恩). “民兵”Ⅲ和“三叉戟”Ⅱ导弹改进计划综述[J]. *Aerospace China*(中国航天), 2011(6): 35-37.
- [12] Roskill Information Services Ltd. *The Economics of Beryllium* [M]. London: Roskill Information Services Ltd, 2001: 111-117.
- [13] Materion Corporation. *EX-99 U.S. Securities and Exchange Commission* [EB/OL]. (2012-3-29) [2012-3-29]. <http://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1104657/000119312512139303/d325970dex991.htm>.
- [14] Kennedy D. *No Matter Where You Look, Beryllium Improves the Way We Live* [EB/OL]. (2010-6-9) [2010-6-9]. <http://www.Beryllium.com/sites/default/files/pdfs/PDF%20for%20Uses%20&%20Apps.pdf>.
- [15] Yoshizaka Shoji(吉阪昭治). 金属ベリリウムの用途について[J]. *New Materials Press*(金属時評), 1989, 9(1384): 302-306.
- [16] Nuclear Weapon Archive. *Advanced Inertial Reference Sphere* [EB/OL]. (1997-10-22) [1997-10-22]. <http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Weapons/Airs.html>.
- [17] Wang Yan(王燕), Zhu Song(朱松). 美国国家导弹防御系统发展研究[J]. *Aviation Weapon*(航空兵器), 2003(4): 31-34.
- [18] Goldberg A. *Atomic, Crystal, Elastic, Thermal, Nuclear, and Other Properties of Beryllium*, UCRL-TR-224850 [R]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2006.
- [19] Clement P. How the Beryllium Industry is Building New Markets by Applying Isostatic Processing Technologies [C]// *Proceedings of the 4th International Conference on Isostatic Pressing*. Shrewsbury, UK: Metal Powder Report Publishing Services Ltd., 1990: 18.1-18.11.
- [20] Skillern G G, R Hollman R, KulKarni K M. Near-Net-Shape Beryllium Structural Helicopter Parts [J]. *Metal Power Report*, 1992, 47(10): 36-39.
- [21] Wei Chenxi(魏晨曦). 俄罗斯的空间目标监视、识别、探测与跟踪系统[J]. *Aerospace China*(中国航天), 2006(8): 39-41.
- [22] Parsonage T. JWST Beryllium Telescope: Material and Substrate Fabrication [C]//Atad-Ettdgui E, Dierickx P. *Proceedings of SPIE Vol. 5494, Optical Fabrication, Metrology, and Material Advancements for Telescopes*. Bellingham, Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2004: 39-48.
- [23] Lee B. The Telescope That ate astronomy [J]. *Nature*, 2010, 467: 1028-1030.
- [24] Hardesty R E, Decker T A. Design and Producibility of Precision Beryllium Structures for Spacecraft Applications [C]//Ealey M A. *Proc SPIE Vol. 2543, Silicon Carbide Materials for Optics and Precision Structures*. Bellingham, Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1995: 104-126.
- [25] Fullerton-Batten R C, Hawk J A. A Review of Present and Future Applications of Beryllium [C]//*Beryllium 1977, Fourth International Conference on Beryllium*. London: Metals Society, 1977: 49/1-49/29.
- [26] Materion Corporation. *Product Forms Uses and Descriptions* [EB/OL]. (2013-9-19) [2013-9-19]. <http://materion.com/~media/Files/PDFs/Beryllium/Engineering%20Design%20Product%20Uses%20and%20Descriptions.pdf>.
- [27] Zheng Lifang(郑莉芳), Ji Quan(纪全), Wang Li(王立), et al. 粉末冶金态铍在北京谱仪束流管中的应用[J]. *Atomic Energy Science and Technology*(原子能科学技术), 2008, 42(1): 87-90.
- [28] Mowry S. *The Whole Truth about Beryllium Diaphragms* [EB/OL]. (2009-06-14) [2009-06-14]. http://www.goodsoundclub.com/Docs/Truth_beryllium_diaphragms.doc.
- [29] Houska C. Beryllium in Aluminum and Magnesium Alloys [J]. *Metals and Materials Magazine*, 1988, 4(2): 100-103.
- [30] Bermingham M J, McDonald S D, StJohn D H, et al. Beryllium as a Grain Refiner in Titanium Alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 481(1-2): L20-L23.
- [31] Committee on Assessing the Need for a Defense Stockpile. *Managing Materials for a Twenty-first Century Military* [M]. Washington: National Academies Press, 2004: 170-175.
- [32] Geological Survey U.S. *Beryllium* [EB/OL]. (2014-3-7) [2014-3-7]. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/beryllium>.