

粉末冶金态铍 在北京谱仪束流管中的应用

郑莉芳^{1,2}, 纪全², 王立¹, 李勋锋^{1,2}, 刘建平^{3,1}

(1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
3. 天津大学, 天津 300072)

摘要:根据北京谱仪(BESⅢ)束流管对材料物理性能的要求,对几种材料的物理性能进行比较后,选择粉末冶金态铍作为 BESⅢ束流管的中心管材料。采用失重法对粉末冶金态铍在1号电火花加工油中的耐腐蚀性能进行研究,结果表明:粉末冶金态铍在1号电火花加工油中具有较好的耐蚀性,其腐蚀速率由初始的 $4.18 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 逐渐变小,并稳定为 $1.54 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;在束流管 10 a 的设计寿命内,粉末冶金态铍的最大腐蚀深度估算值为 $19.9 \mu\text{m}$,该值是 BESⅢ束流管中心管最小厚度 $600 \mu\text{m}$ 的 3.32%,满足 BESⅢ的工程运行要求。

关键词:铍;腐蚀;束流管;北京谱仪 BESⅢ

中图分类号: TG146.24; TG113.231 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2008)01-0087-05

Application of Powder Metallurgy Beryllium in Beijing Spectrometer Ⅲ Beam Pipe

ZHENG Li-fang^{1,2}, JI Quan², WANG Li¹, LI Xun-feng^{1,2}, LIU Jian-ping^{3,1}

(1. Mechanical Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: According to the requirements of Beijing Spectrometer Ⅲ (BESⅢ) beam pipe, the physical properties of several materials were compared and powder metallurgy beryllium was chosen as the material for the central pipe of the BESⅢ beam pipe. Weight-loss method was used to study the corrosion of powder metallurgy beryllium in No. 1 oil for electron discharge machining (EDM-1). The result shows that the anticorrosive property of powder metallurgy beryllium in EDM-1 is high. The corrosion rate, $4.18 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ in initial stage, becomes small with the lapse of the time and stabilizes at $1.54 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ at last. It can be estimated that the powder metallurgy beryllium will be corroded $19.9 \mu\text{m}$ in the depth in 10 years and it accounts for 3.32% of the smallest thickness

of the central pipe, which satisfies the requirements of the BES III.

Key words: beryllium; corrosion; beam pipe; Beijing Spectrometer III

新一代的北京正负电子对撞机(Beijing Electron Positron Collider II, 简称 BEPC II^[1])及其探测器——北京谱仪(Beijing Spectrometer III, 简称 BES III^[2])正在建造中。正负电子经加速聚焦后,在束流管中进行对撞,对撞中产生的次级粒子穿出束流管的中心管,利用 BES III 进行粒子探测,以探索新的物理现象。束流管的设计寿命为 10 a,由 1 根中心管和 2 根外延管焊接而成。

图 1 为束流管的中心管结构示意图。中心管为薄壁夹层结构,由放大腔、内管和外外套管焊接而成,内管内径为 $\phi 63$ mm,壁厚为 0.8 mm,外管壁厚为 0.6 mm,内外管之间形成间隙为 0.8 mm 的冷却腔。冷却介质为 1 号电火花加工油(EDM-1)。EDM-1 流过冷却腔对中心管进行冷却,以带走正负电子对撞时产生的大量热量。图 1 中阴影部分为冷却介质流过的区域,箭头所指为冷却液流动方向。

中心管的特殊位置和作用使中心管材料必须满足各种要求,其材料的选择至关重要。根据对撞机的工作要求,日本 KEK 和美国 Cornell 选择铍作为其束流管中心管材料^[3-4]。但在 BEPC II 中, BES III 要求束流管中心管材料具有低的探测本底,同时具有较好的导热性、高强度、低磁导率、耐腐蚀等性能,因此,必须根据 BES III 的实际工作环境,对中心管的材料做相关分析和试验,以保证束流管在 BES III 中的安全运行。



图 1 束流管的中心管结构示意图

Fig. 1 Scheme of central pipe of BES III beam pipe
1——放大腔;2——内管;3——外管

1 BES III 对束流管中心管的材料要求

根据束流管的中心管在 BES III 中的工作环境,其材料必须满足以下几项要求^[2]。

1) 低物质质量

为降低探测本底,使信号粒子的多次散射最小,提高对粒子的动量分辨率,物理学要求 BES III 探测区内材料的物质质量越小越好,即中心管在壁厚一定的条件下,材料密度越小越好。

2) 大比热容、大热导率

正负电子对撞后将有热量作用于中心管,这些热量主要来自同步辐射光和高次模光,根据物理学的模拟,作用于中心管的总热功率不超过 250 W。过高的热量会影响粒子的正常探测,必须将中心管上的热量带走。这要求中心管材料具有较大的比热容和热导率,以保证在同样热功率作用下,热量尽快被导出,同时使中心管外壁温度最低。

3) 高强度

为满足物理学上降低探测本底的要求,中心管内腔为真空状态。因此,中心管所用材料需具有较高强度,以避免发生真空失稳。

4) 低磁导率

正负电子在对撞之前要利用多级磁铁进行聚焦,为避免对聚焦磁场的干扰,以保证正负电子的正常聚焦,中心管的材料必须具有低磁性,磁导率小于 1.05。

5) 耐腐蚀性

中心管的冷却介质为 EDM-1,在 BES III 10 a 的运行中,中心管材料对 EDM-1 必须具有较好的耐蚀性。

2 铍与其他材料的物理性能比较

根据 BES III 对束流管中心管材料的低密度、大比热容、大热导率、高强度、低磁导率、耐腐蚀等性能要求,初步选择了 4 种可行性材料,分别为铍(Be)、镁(Mg)、防锈铝(5A06)、钛(Ti)。表 1 列出了这 4 种材料的密度 ρ 、抗拉强度 σ_b 、屈服强度 σ_s 、弹性模量 E 、比定压热容 c_p 及热导率 λ 等物性参数。

表1 几种材料的物性参数

Table 1 Physical properties of several materials

材料	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	σ_b/MPa	σ_s/MPa	E/GPa	$c_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
铍 ^[5]	1 844	370	240	303	1 925	216
镁 ^[6]	1 740	90	21	44	1 025	159
防锈铝(5A06) ^[7]	2 640	370	205	68.6	921	117
钛 ^[8]	4 500	220	140	116	528	17

从表1可看出,与铝、镁以及钛相比,铍具有密度小、比强度(强度与密度的比值)大、比热容大、导热性好、弹性模量大等特性。密度小恰好满足 BESⅢ对探测区的低物质质量要求;比强度是表示材料特性的一个指标,即在保证一定强度情况下,用铍做结构材料,其质量最少,即物理量最少;比热容大,热量吸收能力强,对热膨胀的适应性好,在温度升高或降低时,机械性质变化慢;热导率大,可将热量快速带走,使铍温升小;铍的弹性模量约为镁的7倍,约为铝的4倍,约为钛的3倍,弹性模量大,说明引起单位面积应变所需的应力大,即在同样应力下,铍材料的应变相对最小。

采用 Severn Engineering Co., INC 生产的低磁导率检测仪对铍的磁导率进行测量,其值小于1.05,满足低磁导率的要求。因此,铍成为中心管的最佳选择材料。

不同工艺流程所生产的铍的机械性能不同,含微量杂质(特别是混杂有氧)以及金属各向异性的程度对铍机械性能均有显著影响。挤压的铍是各向异性的^[9],因此,轧制态铍不能作为中心管的材料;粉末冶金和铸造的金属铍中未出现机械性质各向异性的迹象,但铸造的铍因铸锭晶粒粗大而较易发生内部破裂和其它缺陷,故加工困难,即使不采用普通熔铸而在真空熔铸条件下得到的真空熔铸铍晶粒依然异常粗大,机械性能差,杂质元素易引起热脆和向心裂纹^[10],很难得到较理想的金属制品。铍通常采用粉末冶金法成形,即铍粉经真空热压得到完整的热压坯料,该坯料具有较好的机械性能。因此,粉末冶金态铍成为束流管中心管的最佳材料。

3 铍的真空失稳校核

薄壁管在外压达到临界压力时会出现失稳

现象而不能正常工作,甚至会引起破坏。因此,必须选用高强度材料,以保证设备的正常工作。束流管中心管的内外管壁厚分别为0.8和0.6 mm。束流管工作时,内腔为真空,中心管内外管之间冷却介质的实际工作压力最大为 5×10^4 Pa。为保证束流管在工作过程中不发生真空失稳,必须对铍的真空失稳情况进行校核。

外压容器的临界失稳载荷^[11]表示为:

$$P_{cr} = \frac{2Et^3}{(1-\mu^2)(R_1+R_2)^3} \quad (1)$$

其中: P_{cr} 为外压容器的临界失稳压力,Pa; t 为薄壁管壁厚,m; E 为弹性模量,Pa; μ 为泊松比,无量纲; R_1 为薄壁管内半径,m; R_2 为薄壁管外半径,m。

对于中心管的内管, $E=3.03 \times 10^{11}$ Pa, $t=0.0008$ m, $\mu=0.1$, $R_1=0.315$ m, $R_2=0.323$ m,则根据式(1)计算出中心管内管的真空临界压力值 $P_{cr}=1.21 \times 10^6$ Pa。

在工程运行中,要求工作压力比临界压力小 m 倍^[12],即:

$$P_1 = \frac{P_{cr}}{m} \quad (2)$$

其中: P_1 为工作压力,Pa; m 为稳定系数,对圆筒壳取 $m=3$ 。

由式(2)计算出中心管冷却介质工作压力 P_1 最大可达 4×10^5 Pa,而实际束流管中心管冷却介质的最大工作压力仅为 5×10^4 Pa,远小于 P_1 。因此,作为中心管的材料,铍具有较高的强度,不会发生真空失稳。

4 粉末冶金态铍的耐腐蚀性研究

在束流管10年的工作时间内,持续的冷却介质流过中心管以带走正负电子对撞时产生的热量,因此,必须考察冷却介质对铍的腐蚀性能,以保证束流管的安全运行。考虑到水对铍

具有一定的腐蚀性^[13],而 EDM-1 具有较高的比热容和导热系数,在机械加工中常被用作冷却液。因此,中心管的冷却介质选为 EDM-1。但 EDM-1 对铍的腐蚀性尚未见公开报道。日本 KEK 研究人员根据其在对撞机中的应用需要,就物性与 EDM-1 相近的石蜡油 PF200 对铍的腐蚀行为进行了试验,他们将 13 g 铍浸泡在 PF200 中,经 1.5 a 浸泡后,铍的质量下降了约 2 mg。这说明,PF200 对铍具有一定的腐蚀性。因此,必须结合 BEPCII 的实际工程应用环境,研究粉末冶金态铍在 EDM-1 中的腐蚀行为,为粉末冶金态铍在 BESIII 中的安全应用提供参考依据。

4.1 试验材料

试验材料为粉末冶金态铍片,试样尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$,试样中铍含量达 99.99%。腐蚀介质为 EDM-1,经石油化工科学研究院采用 SH/T 0253-1992 方法检验,EDM-1 中 S 的含量为 40 mg/L;用电量法测量出 EDM-1 中 Cl 的含量为 0.37 mg/L;经长城润滑油应用研究中心有限公司采用 SH/T 0296-1992 方法标准检验,EDM-1 中 P 的含量为 0.002%。

4.2 试验方法

材料的腐蚀试验研究一般有 3 种,即试验室试验、现场试验、实物试验^[14]。在 BEPCII 工程运行中,束流管的设计寿命为 10 a,因此,对束流管的中心管进行现场试验和实物试验是不现实的。试验室试验中金属的腐蚀试验分为直接浸泡法和电化学法。电化学法可加速金属的腐蚀速度,节省试验时间,但 EDM-1 为非电介质,无法进行电化学法试验。因此,对于铍在 EDM-1 中的腐蚀试验,采取直接浸泡法。为了准确模拟铍在 BEPCII 中的受腐蚀情况,采用动态腐蚀法,即将铍片浸泡于 EDM-1 中,使 EDM-1 从铍片上持续流过。

铍片的动态腐蚀试验装置示于图 2。其中,干燥皿中盛放 EDM-1,并有孔状支撑架,用来支撑铍片,同时保证铍与 EDM-1 充分接触;采用恒温磁力搅拌器,保证干燥皿中的 EDM-1 温度恒定,磁珠搅拌液体流动,使液体冲刷过铍片表面,调节磁珠转速可以调节液体流速;用电子天平(精度为 0.001 g)对铍片质量进行测量。

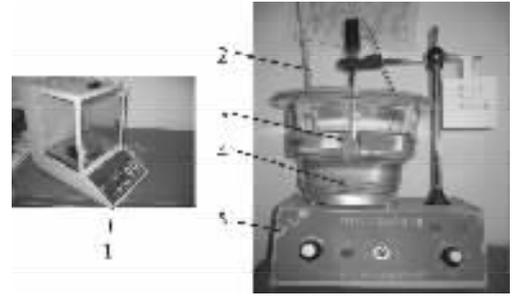


图 2 铍片的腐蚀试验装置

Fig. 2 Test equipment of beryllium corrosion

1——电子天平;2——温度计;3——干燥皿;
4——磁珠;5——恒温磁力搅拌器

在干燥皿中放好试样,加入腐蚀介质 EDM-1,用凡士林密封,通入高纯氮气,除去其中的氧气,内置硅胶以除去其中的水分;升温至预定温度 32 °C,调节速度旋钮,使 EDM-1 相对于铍片的流速约为 1 m/s,开始计时,腐蚀时间共计 11 184 h(约 466 d)。定期取出铍片试样,用丙酮冲去腐蚀介质 EDM-1,用无水乙醇脱水干燥,用失重法计算腐蚀速率。再次将铍片放回试验装置中时,均需对 EDM-1 进行吹氮气,并用凡士林对干燥皿进行密封。

4.3 试验结果及其分析

采用失重法,即通过腐蚀前后的质量变化来评定腐蚀结果。腐蚀速率^[14]表示为:

$$V_{-m} = \frac{m_1 - m_0}{At} \quad (3)$$

其中: V_{-m} 为腐蚀速率, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; m_0 为试样腐蚀前质量,kg; m_1 为试样腐蚀后质量,kg; A 为试样总面积, m^2 ; t 为试验时间,h。

表 2 列出了粉末冶金态铍在 EDM-1 中的腐蚀速率。

表 2 粉末冶金态铍在 EDM-1 中的腐蚀速率

Table 2 Corrosion rate of beryllium in EDM-1

时间间隔/h	质量/g	腐蚀速率/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	10 a 的腐蚀 深度/m
0	2.961		
2 362(98 d)	2.957	4.18×10^{-7}	1.99×10^{-5}
9 846(410 d)	2.954	1.75×10^{-7}	8.29×10^{-6}
11 184(466 d)	2.954	1.54×10^{-7}	7.34×10^{-6}

从表 2 可以看出,粉末冶金态铍的腐蚀速

率随腐蚀时间的延长逐渐变小,由初始的 $4.18 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 趋于稳定为 $1.54 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。试验开始时,呈淡灰色的致密铍片被 EDM-1 中的 O、S、P、Cl 等有害物质氧化,表面生成氧化物薄膜,颜色发暗,氧化物受到 EDM-1 的不断冲蚀,从单质铍上脱离,铍片质量变小,腐蚀速度较大;随着时间的推移,氧化物薄膜被破坏,腐蚀液中的有害粒子浓度逐渐变小,氧化反应越来越缓慢,腐蚀速度越来越小,直至趋于稳定。

试样的腐蚀深度^[14]可表示为:

$$h = \frac{V_m T}{\rho} \quad (4)$$

式中: h 为腐蚀深度, m ; ρ 为试样密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; T 为预计腐蚀时间, h 。

束流管的设计寿命为 10 a, 这里的预计腐蚀时间 T 取为 10 a。对应不同的腐蚀速率, 根据式(4)计算得到 10 a 时间内粉末冶金态铍的腐蚀深度, 结果列于表 2。取腐蚀速率趋于稳定时的 $1.54 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 计算, 推算出 10 a 内粉末冶金态铍的腐蚀深度将为 $7.34 \mu\text{m}$, 占中心管最小厚度 ($600 \mu\text{m}$) 的 1.22%; 取腐蚀速率试验初始阶段的最大值 $4.18 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 10 a 内粉末冶金态铍的腐蚀深度将为 $19.9 \mu\text{m}$, 占中心管最小厚度 ($600 \mu\text{m}$) 的 3.32%。束流管中心管的设计安全系数大于 3, 因此, 这一腐蚀深度对束流管整体安全性能没有明显影响。

5 结论

综合考虑 BES III 束流管的具体工作环境和材料的物理性能, 对几种材料的物理性能进行比较后, 将粉末冶金态铍作为束流管中心管的最佳选择材料。该材料在真空条件下能够满足强度要求。经腐蚀试验验证, 该材料在 EDM-1 中 10 a 时间内的最大腐蚀深度为 $19.9 \mu\text{m}$, 仅为 BES III 束流管中心管最小厚度 ($600 \mu\text{m}$) 的 3.32%。粉末冶金态铍能够满足 BES III 的实际工程运行要求。目前, 粉末冶金

态铍已被用作 BES III 束流管的中心管材料。

参考文献:

- [1] BEPC II Collaboration. BEPC II preliminary design report[EB/OL]. 2002[2005-06-01]. http://acc-center.ihep.ac.cn/download/pdr_download.htm.
- [2] BES III Collaboration. BES III preliminary design report[EB/OL]. 2004 [2005-06-01]. <http://bes.ihep.ac.cn/bes3./desigho5/design/design1.htm>.
- [3] ABE R, ABE T, AIHARA H, et al. BELLE/SVD2 status and performance[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2004, A535(1): 379-383.
- [4] KASS R, ALAM M S, ALEXANDER J P. The CLEOIII silicon vertex detector[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003, A501(1): 32-38.
- [5] <http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=AMEBe00>. [2005-06-01].
- [6] <http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=AMEMg00>. [2005-06-01].
- [7] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]: 第 3 卷. 北京: 中国标准出版社, 2002: 223-229.
- [8] <http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=AMETi00>. [2005-06-01].
- [9] [苏]斯皮钦 В И. 铍的化学工艺学和冶金学[M]. 田冰, 译. 北京: 中国工业出版社, 1965: 15.
- [10] 吴源道. 铍: 性质、生产和应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986: 5-72.
- [11] 李建国. 压力容器设计的力学基础及其标准应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 146.
- [12] 徐灏. 机械设计手册: 第 4 卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991: 32-93.
- [13] [苏]叶夫斯秋欣 А И. 稀有金属译文集: 第二集(铍)[M]. 刘崇志, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1959: 10.
- [14] 中国腐蚀与防护学会. 腐蚀试验方法与防腐蚀检测技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996: 1-36.