中国科学(A 辑)
第 30 卷 第 6 期 SCIENCE IN CHINA (Series A) 2000 年 6 月

阿尔法磁谱仪永磁体系统*

陈和生
(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘要 阿尔法磁谱仪是人类送入宇宙空间的第 1 个大型磁谱仪,于 1998 年 6 月成功地进行了首次飞行. 中国科学院电工研究所,中国科学院高能物理研究所和中国运载火箭技术研究院成功地研制出阿尔法磁谱仪最关键的永磁体系统,包括用高性能钕铁硼材料制成的永磁体和支撑整个磁谱仪的主结构. 独特的魔环设计满足了空间实验对漏磁和磁二极矩的严格要求. 永磁体总重量约为 2 t,接收度为 0.6 $m^2 \cdot sr$,磁偏转能力 BL^2 为 0.135 $T \cdot m^2$,并在 40℃以下不出现退磁. 主结构采用双层薄壳系统,能经受永磁体强大的磁力和扭矩,以及起飞、着陆时的巨大载荷. 永磁体系统通过了严格的空间环境模拟试验,满足了阿尔法磁谱仪的要求,并达到了美国宇航局严格的安全可靠标准.

关键词 空间粒子物理实验 磁谱仪 永磁体 魔环 航天机械结构

阿尔法磁谱仪(Alpha Magnetic Spectrometer,简称 AMS)[1,2]是人类送入宇宙空间的第 1 个大型磁谱仪,于 1998 年 6 月 2 ~ 12 日由美国发现号航天飞机 STS-91 航班搭载,成功地进行了首次飞行[3],并将于 2003 年 5 月送到国际空间站上运行 3 年. AMS 的物理目标是寻找宇宙中的反物质和暗物质,并精确测量宇宙中各种同位素的成分和能量高达几百吉咖电子伏的 γ 光子,对解决天体物理、粒子物理和宇宙论当前面临的若干重大疑难问题具有十分重要的意义[4]. 实现上述物理目标的关键是能在宇宙空间中运行的大型磁体,以精确测量带电粒子. 中国科学院电工研究所、中国运载火箭技术研究院和中国科学院高能物理研究所成功地为阿尔法磁谱仪研制出大型永磁体系统. 它完全满足了 AMS 实验的要求,符合美国宇航局(NASA)严格的安全可靠标准,成功地经受了首次飞行的考验.

1 阿尔法磁谱仪的科学目标和永磁体系统

AMS 实验是由丁肇中教授领导的大型国际合作科学实验计划. 来自美国、中国、瑞士、意大利等 11 个国家和地区的 30 多个研究机构的科学家和工程师参加了这个计划. 这是第 1 个在宇宙空间进行探测的粒子物理实验的精密磁谱仪(见图 1). AMS 实验的物理目标主要包括:

2000-01-14 收稿,2000-03-28 收修改稿
* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 19755001,1977550B)

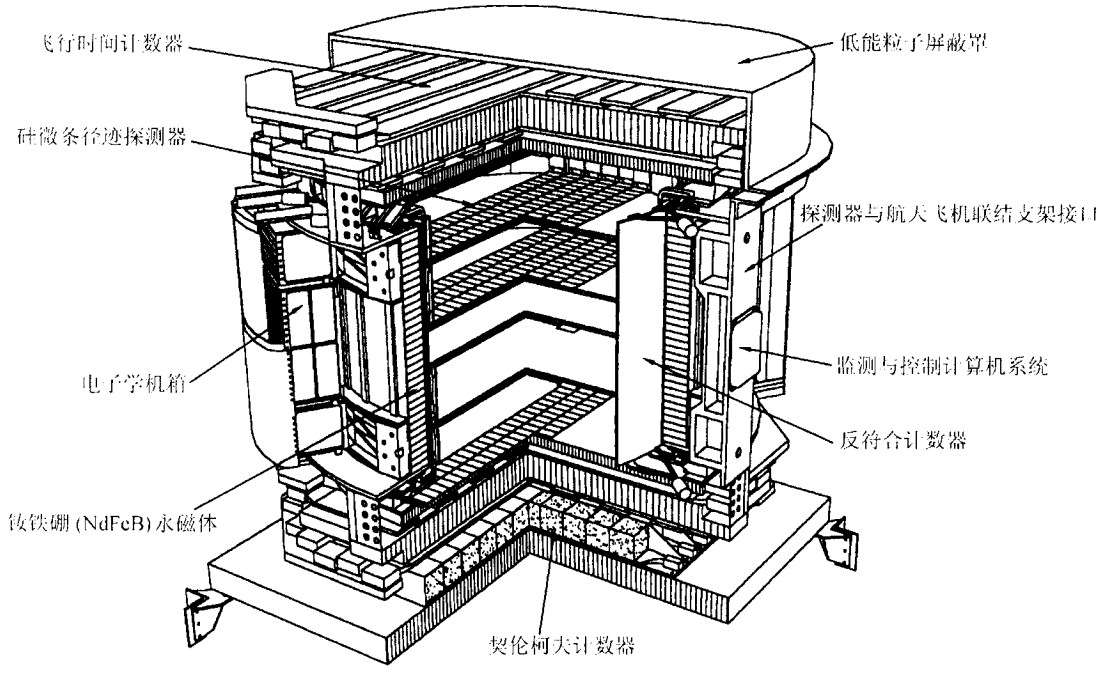

图 1　阿尔法磁谱仪示意图

1.1　寻找宇宙中的反物质

宇宙中是否存在反物质是科学的一大难题.根据目前公认的大爆炸理论,宇宙是由大约在150亿年前的大爆炸产生的. 大爆炸后,宇宙不断地膨胀和冷却. 大量的天文学观测和天体物理实验结果支持这个理论. 然而根据粒子物理理论,大爆炸理应产生同样数量的物质和反物质. 组成我们周围世界的物质的原子核带正电荷, 由质子和中子组成. 所谓反物质,它的原子核带负电荷, 由反质子和反中子组成. 迄今为止,所有的实验都没有在宇宙中观测到反物质的存在. 宇宙中究竟是否存在反物质? 这是目前粒子物理和天体物理面临的重大疑难问题之一. 粒子物理学家提出各种可能的理论模型,如强的 CP 破坏,或重子数不守恒等假设,试图论证宇宙现在不存在反物质. 然而迄今为止的粒子物理实验结果不支持这些模型. 人类几千年来观测宇宙使用的光学的方法是无法区分物质和反物质的,因为它们发出的光是完全相同的. 现有的观测结果不能排除宇宙的某些遥远的区域存在反物质构成的星系的可能性. 如果宇宙的某些区域存在反物质构成的星系, 探测它们的惟一方法是在宇宙空间寻找它们泄露出来的反原子核. 这个测量的关键是能区分电荷的磁谱仪.

AMS 寻找宇宙空间中的反氦核、反碳核等反原子核,其灵敏度将从现有气球实验的 10^{-4} 至少提高到 10^{-8}左右,从实验上对宇宙中是否存在反物质作出回答, 这对反物质的研究具有十分重要的意义.

1.2　寻找宇宙中的暗物质

天文学把宇宙中用光学方法看不到(即没有电磁相互作用)的物质称为暗物质. 最近,天文学的观测和研究发现: 暗物质在银河系和宇宙中都占 90%以上. 粒子物理和宇宙论还无法

对暗物质作出解释. 探索这些暗物质是物理学面临的巨大挑战,寻找这些暗物质则成为当前粒子物理实验的又一难题. 暗物质的粒子和反粒子湮灭形成的质子、反质子对,正负电子对或光子对,可能在宇宙空间中的反质子、正电子或光子的能谱中形成某种峰的分布. 阿尔法磁谱仪能精确测量在太空中反质子、正电子或光子的能谱分布,进而有可能给出这一极富挑战的重大疑难问题的答案.

1.3 测量宇宙空间各种同位素的相对丰度和高能光子谱

精确测量宇宙空间中 D,^{3}He 和^{4}He,^{9}Be 和^{10}Be 等同位素的相对丰度对天体物理和宇宙论研究中的许多关键课题有重大意义. 高能光子谱的测量对宇宙线观测有重大意义. 现有的卫星实验对高能光子谱仅测量到 30 GeV,AMS 可达到 500 GeV 以上.

因此,实现 AMS 科学目标的关键是一个能在宇宙空间条件下运行的强磁体,以区分带电粒子的电荷的符号,精确测量它们的动量,并配合其他测量,识别粒子种类. 能在空间条件下运行的大型磁体必须满足以下基本条件:

(1) 功率消耗低,不能高于数百瓦.

(2) 电磁环境要求高, 漏磁在离磁体周向 2.1 m 处要小于 0.006 T,不影响航天飞机和空间站上各种仪器设备的正常运行.

(3) 磁二极矩必须小于 5.4×10^4 A·m^2,在地球磁场作用下不产生转动.

(4) 能经受航天飞机起飞和着陆时的剧烈振动和巨大的加速度.

过去数十年来,物理学家一直期望能将磁谱仪送入宇宙空间,提出过多种方案,但由于无法造出满足上述条件的磁体而无法实现,其中最著名的方案是 Astromag[5].

中国科学院高能物理研究所承担了 AMS 的永磁体系统的设计、研制、测试和空间环境模拟实验,成功地研制出了人类送入宇宙空间的第 1 个大型磁体系统,完全符合美国宇航局的各项要求. 这个大型磁体系统包括永磁体和主结构两大部分. 永磁体为圆筒形,内径 1 114 mm,外径 1 296 mm,高 800 mm,中心磁场强度为 0.134 T. 机械结构支撑总重量为 3.2 t 的 AMS 磁体和所有探测仪器.

为了确保 AMS 飞行磁体的设计和研制能完全达到 AMS 实验和美国宇航局的要求,本项目组先后共为 AMS 研制了 4 个永磁体:

1) 1:3 模型磁体: 检验设计原理是否正确,测量漏磁和磁二极矩. 1995 年 8 月完成,表明设计原理正确,漏磁和磁二极矩与计算结果一致.

2) 初样: 通过全尺寸初样设计、制造、安装的全过程以及对磁场进行精确测量,积累经验,检验设计、制造及安装工艺,并进行振动试验和离心试验. 初样于 1996 年 6 月完成,11 月完成空间环境模拟试验,完全达到设计要求,运往苏黎世联邦理工学院进行探测器试装.

3) 飞行磁体: 1997 年 3 月完成. 运往瑞士苏黎世联邦理工学院进行探测器总装. 1998 年 6 月首次飞行中工作正常,取得了圆满成功.

4) 试验磁体: 高度为 300 mm,直径与飞行磁体相同,用无粘性的环氧树脂片代替胶,进行静力试验,以检验在粘结胶失效时结构的可靠性. 1997 年 7 月完成,8 月进行了静力试验,结果表明: 即使在胶失效的情况下, AMS 永磁体系统仍然符合 NASA 的安全可靠要求.

2 阿尔法磁谱仪永磁体

稀土永磁材料技术的巨大进步和永磁体应用技术的发展,使永磁体进入空间探测实验成

为可能．AMS 永磁体使用高性能钕铁硼(NdFeB,最大磁能积为 3.74×10^5 J/m^3)永磁材料,采用独特的魔环磁路设计和先进的安装工艺,制造出完全符合 AMS 实验要求和美国宇航局安全可靠标准的大型永磁体．

分配给磁体的总重量(包括钕铁硼和粘结胶)为 2 000 kg,要求达到的基本性能指标为

1) $BL^2\geqslant0.13$ T·m^2．其中 B 为磁场,单位为 T,L 为长度,单位为 m．磁谱仪的动量测量精度取决于它对带电粒子的偏转能力,而偏转能力正比于 BL^2．这相当于中心磁场为 0.134 T．

2) 接收度为 0.6 m^2·sr．它决定了磁谱仪的接收效率．AMS 要求尽可能大的接收度,以提高实验结果的统计性．

3) 使用永磁材料,不消耗任何电力．

4) 工作温度范围在 0～40℃,不出现不可逆退磁现象．AMS 在航天飞机上飞行,每 90 min 绕地球一圈,其中 30 min 为黑夜,温度变化大,且为被动式温控系统．这对钕铁硼材料和磁体设计的要求十分苛刻．

2.1　AMS 磁体的技术方案及其电磁和结构设计

我们利用多年从事 MRI 永磁磁体设计和研制的经验,比较了国际上采用的多种 MRI 永磁磁体的结构和特点,经反复计算分析和实验验证,最终确定 AMS 永磁磁体采用永磁魔环结构．磁体设计遵循的原则是:不使用铁;不允许有明显漏磁(窗口附近除外);磁场尽可能均匀．按照此三原则设计磁体,重量必然最轻．为了验证设计计算方法,摸索结构设计和制造经验,我们首先设计制造了 1/3 小模型,并进行了二极矩和漏磁测量．结果表明磁体设计计算方法正确,二极矩和漏磁情况与理论分析一致．

经过多次磋商和多方面考虑,永磁魔环被确定为 AMS 磁体的正式方案．设计中主要的技术问题有以下 3 个方面．

2.1.1　永磁材料的选择　钕铁硼材料具有负的温度系数,B 的温度系数约为 −1‰～2‰,H 的温度系数约为 −6‰．这样,温度低时第 2 象限为直线的退磁曲线,在温度升高时便出现弯曲的膝部．磁体设计计算表明,单独使用德国 VAC 公司提供的 VACODYM 510HR 材料制作魔环磁体时,磁体部分区域内的磁钢会出现不可逆温度退磁．为了解决这一问题,经过大量计算,我们提出 3 种牌号的钕铁硼材料混用的方案,即在工作点高处,使用磁能积非常高的 VACODYM510HR 材料;在工作点低处,使用磁能积稍低的 VACODYM344HR 和 VACODYM362HR．由于后两种材料在温度低于 40℃情况下,第 2 象限退磁曲线膝点很低或没有弯曲．这样温度退磁问题就得到了解决．

2.1.2　磁作用力的计算　用于 AMS 的永磁魔环由 64 根磁条组成,它们之间有强大的磁力存在,精确计算这些力对结构设计十分重要．我们采用的基本算法是首先计算出紧贴每一磁条的封闭六面体 6 个面上指定(Gauss 积分点)处的磁密矢量,然后根据 Maxwell 应力法近似地算出作用在每一磁条 6 个表面上的机械力．作为验证,也使用了虚功原理进行计算,结果与 Maxwell 应力法一致．

2.1.3　磁体设计的优化　AMS对磁体设计既要求有大的 BL^2,又要求尽可能大的几何接受度．对于给定的重量限制,两者是互相矛盾的:前者要求细长的磁体,后者要求短粗的磁体．因此必须依据 AMS 的物理目标进行优化设计．我们利用欧洲核子研究中心的超级计算机对

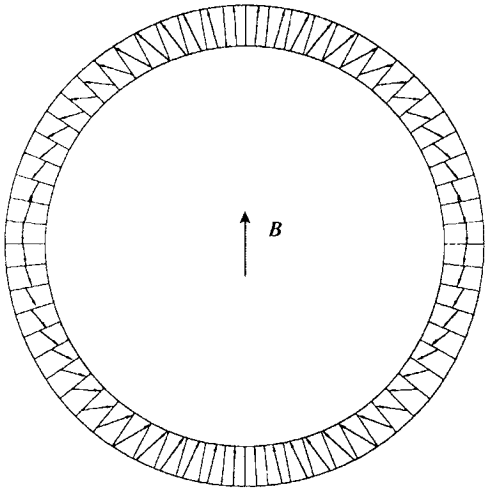

图 2 AMS 磁体各磁块磁化方向图

磁体的内径、长度等参数和硅微条径迹探测器平面在磁体内的位置进行了大范围的搜索和优化,比较了数千种设计方案,最终选定了磁体的形状:内径 1 122 mm,外径 1 298 mm,高 800 mm 的圆筒,磁性材料重 1 856 kg. 最上和最下的两硅微条探测器平面都放在磁体外,以获得最大的 BL^2.

经过反复论证,确定了 AMS 磁体的设计. AMS 磁体是一个圆筒形二极磁体,由铝合金壳体和钕铁硼(NdFeB)磁钢组成. 钕铁硼磁钢被安放在壳体的 32 个空格中. 从垂直于其轴线的横截面看,它是由 64 种磁化方向连续变化的磁块组成的圆环, 如图 2 所示. 这个设计完全满足了前述 AMS 和 NASA 对磁体系统的要求.

2.2 AMS 磁体的制造

2.2.1 磁体磁块的制造 从图 2 可以看出,AMS 磁体的磁场方向垂直于圆筒的轴线. 64 种磁化方向的磁块,每种磁化方向角度依次相差 11.25°. 由于磁块几何尺寸和磁化方向的对称性,这 64 种磁块在制造时可简化为 16 种. 每种磁块的形状为环扇形,由于一条 800 mm 长的磁条难以整块制造,于是把它分为 16 个 50 mm 单元磁块.

制造钕铁硼的厂家无法压制出这样大块的、磁化方向如此多变的钕铁硼磁钢. 厂家提供的仅是 50 mm × 50 mm × 25 mm 标准磁块. 要得到磁化方向如此多变的单元磁块,目前只有采用粘接的方法. 我们将 50 mm × 50 mm × 25 mm 标准磁块粘成 16 种尺寸为 175 mm × 240 mm × 50 mm 的方阵磁块,每种方阵 8 大块,每一方阵再切成 8 个 50 mm 磁化单元. 方阵磁块的粘接采用专用模具. 粘好之后,50 mm 方向的上下面应磨平,用线切割方法切出 50 mm 单元磁块. 然后对 50 mm 单元磁块进行充磁. 最后用模具将充磁后的 50 mm 单元粘成 200 mm 单元磁块. 磁块粘接是 AMS 磁体制造的核心工艺,胶粘剂的粘接强度大于 200 kg/cm^2, 并符合 NASA 的空间环境要求.

2.2.2 磁体安装 AMS 磁体结构件是一个铝合金制的双层薄壳结构圆筒,其内壁 3 mm 厚,外壁 4 mm 厚,内外壁之间由 32 个 2.5 mm 厚的 Z 字形铝板条与内外壁铆接形成 32 个空格,用以放置 64 条 800 mm 长的磁条,每个空格放两条. AMS 磁体本身的磁力迫使壳体结构变形,磁体有变成椭圆的趋势. 磁块安装后,壳体一旦变形超过允许公差 0.2 mm,端盖就扣不上去. 为了防止这种情况的发生,采用铝制鼓形芯筒加铁制的锥形弧片的胀胎结构支撑壳体的内壁,使壳体不变形,并可固定已安装的磁条. 同时,鼓形芯筒又作为通道的基座. 端盖固定在芯筒上,通道装在端盖上,通道与壳体的 32 个空格一一对应. 为了防止壳体空格变形的第 2 个措施是在 32 个空格中分别放置 32 个铁模块,同时构成磁路,便于安装. AMS 磁体安装分 3 个阶段:工装就位、安装磁块和灌胶.

2.2.3 磁场测量 1/3模型磁体和地面对照磁体的磁场分布都进行了仔细测量,与设计是吻合的. 飞行磁体磁场测量由苏黎世联邦理工学院负责,测试结论如下:

(ⅰ) AMS 飞行磁体的磁场定位准确;

（ⅱ）磁场强度在预期范围(概念设计的 0.9 以上)；

（ⅲ）磁场形态与预期相同,所有磁块安装正确；

（ⅳ）独特的磁路优化设计使由 64 条磁化方向连续变化的钕铁硼磁条组成的 AMS 永磁体磁场约束在 AMS 磁体内部,而它的漏磁和磁二极矩比 NASA 的要求约小了 1 个数量级以上.

因此，它完全满足了 AMS 的要求，可以在航天飞机和空间站上使用.

2.3 试验磁体的设计与制造

AMS 地面对照磁体组装成功后,进行了机械振动实验和离心实验,证明结构强度是合格的. 但是,美国宇航局提出要考虑 AMS 在空间站工作多年后，胶失效的情况下由航天飞机运回地面着陆时结构强度的安全同题. 这一点无法用现有实验结果证明. 由于难以正确估计结构、磁体和失效后的胶之间的摩擦力,因此无法进行结构强度的精确计算. 另外,由于飞行磁体选用了高性能的磁性材料,而结构比初样有改善,因而应再制造一台磁体供结构强度模拟试验使用. 它用干环氧树脂片代替灌胶. 该试验磁体的设计和制造工作,于 1997 年 7 月完成.

综前所述,AMS 永磁体的研制工作有如下创新特点：

(1) 永磁魔环在前苏联、美国和我国都有高水平研究. 但是,从“三无”的角度来揭示它的特点,制成能在宇宙空间工作的特轻型磁体,本项研究属于首次；

(2) 首次提出用数种永磁材料混合使用的方法解决魔环的工作点问题,本项研究的成功是对魔环理论的重大贡献；

(3) 大型永磁体的磁力分布计算是尚未很好解决的问题,本项目在这方面取得的结果是意义很大的；

(4) 磁体在满足各项技术要求的前提下,钕铁硼总重小于 2 t,达到预先设计的指标,集中体现了磁体有很高的总体水平.

3 阿尔法磁谱仪主结构及空间环境模拟实验

主结构是安装永磁体和各种探测器的基体,如图 3 所示,自重 300 kg,必须有足够的强度和刚度以支撑永磁体产生的巨大的排斥力和剪切力,以及飞行环境中各种力和热载荷. 主结构采用双层薄壳结构,为高 800 mm 的内、外蒙皮空心高强度的铝制圆柱体,内径为(1 115 ± 1) mm,外径为 1 306 mm,内蒙皮厚度 3 mm,外蒙皮厚度 4 mm. 内外蒙皮之间均匀分布有 32 根 Z 形桁条,形成 32 个扇形空间,每个空间放入 2 个钕铁硼磁条. 圆柱体上下各有直径为 1 650 mm、厚度为 15 mm 的法兰盘以增加强度,并各钻有 252 个孔,用于安装支撑 AMS 各种探测仪器,并在侧面支持电子仪器机箱. 沿象限线的 8 个支座将通过 4 根 I 型梁与航天飞机的承载支架连接. AMS 对主结构的主要要求是：

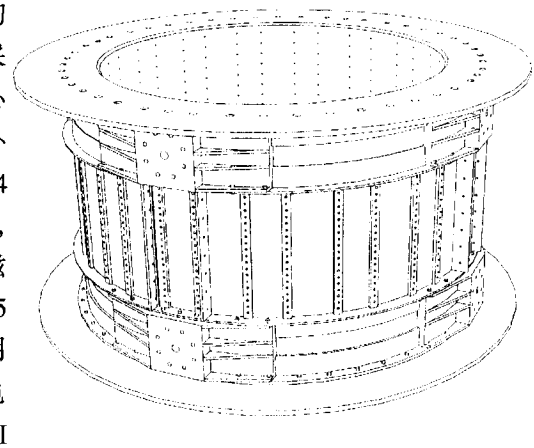

图 3　AMS 主结构系统

(1) AMS 永磁体在支撑结构上的最大作用力达 20 kg/cm^2,作用力方向取决于每个扇形空

间中磁条的磁化方向；单个磁条最大的转矩为 240 kg·m. 这对机械结构设计提出了十分苛刻的要求.

(2) AMS 的各个子探测器和电子仪器机箱都通过各种方式固定在主结构系统上,支撑总重量达 3.2 t.

(3) 机械公差要求十分严格,例如主结构在装配磁铁前应保证内径尺寸为 1 115 mm,安装磁铁后在巨大的磁力作用下内径不允许小于 1 114 mm,并对形位公差有严格要求. 这对于一个薄壳结构来说十分困难,比对通常航天飞行器的要求还要苛刻得多. 对 8 个支座平面之间的平行度及垂直度等的要求也极高,在装配后需要再一次的精加工. 为保持各子探测器系统的位置精度,对法兰盘上的 252 个孔的公差要求达 0.2 mm,且上下两法兰盘对应孔位的相对的移动小于 0.2 mm.

(4) 分配给 AMS 主结构的重量不大于 350 kg,实际仅用 300 kg.

(5) 主结构必须在粘结钕铁硼的环氧树脂失效的情况下也能保证 AMS 在航天飞机返回地面着陆时的安全.

主结构的研制主要有 3 部分工作:(ⅰ) 设计、工艺、生产、装配;(ⅱ) 结构力学的有限元分析;(ⅲ) 地面力学环境模拟试验.

3.1 AMS 主结构的研制

根据 AMS 探测器任务的需要,主结构应该是双层薄壳结构,32 个空间中装有 64 根永磁磁条(总重量为 1 865 kg),要求在强大非均匀磁力的作用下内径仍能满足(1 115 ± 1) mm,在壁厚分别为 3 和 4 mm 的双面埋头铆钉除承受磁力外,还须承受 18 g 的惯性力. 这是我国航天史的结构设计中从未遇到过的难题.

为了保证结构设计、工艺、生产能一次成功,采用了方案设计→结构力学分析→修改设计→再进行分析→工艺审查→生产与装配→静、动力学的环境模拟试验→飞行件设计、生产交付这一过程. 研制过程中采用先进的有效技术措施,保证结构设计、生产、装配一次成功,从而满足 AMS 研制各个阶段的技术指标,取得了搭载航天飞机飞行的成功.

我们针对结构设计中存在的主要难点,将技术攻关与结构分析紧密配合,反复进行强度与变形分析,设计中以结构分析结果为依据,采取了一系列技术措施解决了以下难点:

(1) 主结构的内壁为高 800 mm, 板厚 3 mm, 内径为 Ø(1 115 ± 1) mm 筒形焊接件,它与 4 mm 厚的外壁通过 32 根"Z"型桁条铆接成双层薄壳结构,铆接 640 个双面埋头铆钉,铆接工艺必须提高公差等级,这种铆接结构同时能承受巨大非均匀磁力和 19 g 的惯性力,以保证主结构内径在装入磁铁后不小于 Ø1 114 mm;

(2) 32 个扇形空间要均匀分隔,以保证 32 对高精度扇形磁条顺畅装入,且要求扇形空间与扇形磁条间的间隙要尽可能小,以便尽可能增大磁体尺寸保证试验所需的强大磁场;

(3) 上、下法兰盘两端面的平行度为 0.2 mm,盘(Ø 1 650 mm)上供安装精密测量仪器用的 252 个孔相对坐标原点形位公差为 ± 0.1 mm;组合加工一次成形是保证 ± 0.1 mm 形位公差的最好办法;

(4) 8 个支撑块上的 8 个销孔与销子的配合间隙为 0.025 ~ 0.100 mm,销孔的形位公差相对于主结构的 X 轴线、Y 轴线及下法兰盘的下端面为 ± 0.25 mm,以保证 AMS 主结构与航天飞机货舱的准确联接.

通过精心设计、严格控制工艺，结构设计与结构分析、地面试验紧密相结合，从而突破了种种设计、生产难关．尺寸公差达到设计要求．飞行件在 1997 年 3 月运往瑞士 ETH，进行各系统设备安装工作，直至与航天飞机对接以及飞行考核，均未发现 AMS 结构上存在任何问题．

3.2　结构强度和应力分析

AMS 主结构的方案设计利用了先进的有限元程序建立分析模型，对其进行了静、动力特性分析；同时也考虑磁场载荷进行了结构整体刚度分析，为合理的设计公差要求提供了技术依据，并保证主结构在粘胶完全失效情况下也能满足全部强度要求．分析模型分别用两种不同的程序（NASTRAN 和 MARC）和不同的非线性有限元方法进行了核算．AMS 主结构顺利通过了由美国宇航局规定的各项静动力试验考核，特别是高质量地通过了美国宇航局针对这一改进方案提出的考虑粘胶完全失效的补充试验（达到试验准备的最大载荷仍未破坏）．

在以下几个问题的处理上，目前国内尚未有先例：

(1) 在有限元分析中使用短梁单元和短杆单元来表示受剪销和抗拉螺栓、以确定这些连接件中的作用力，并有离心试验验证．

(2) 在采用多达 2 000 个间隙单元的有限元非线性迭代计算中，使用自编的修改 NASTRAN 输入数据的前处理程序帮助解决收敛问题．其计算结果可由相应的静力试验应力测量验证．

(3) 在采用 MARC 程序进行的带摩擦接触非线性分析中，考虑不同摩擦系数和间隙，成功地解决了迭代收敛困难，得到可靠的更为合理的分析结果，并在相应的静力试验应力和位移测量结果得到验证．

(4) 对于由多个磁铁块组成的磁环，采用剪切力得到局部自身平衡的合理结构方案，满足了 AMS 主结构中粘胶失效情况下的强度要求．

3.3　离心试验转接支架的设计

离心试验是 AMS 计划中地面考核的关键试验之一．离心试验转接支架及辅助试验装置是离心试验计划的一个重要组成部分．这套试验装置的作用是将具有强磁场重达 3 930 kg 的 AMS 磁体及辅助设备与离心试验机转臂安全可靠地连接起来，设计载荷为 280 t，载荷形式复杂．在 18 g 离心加速度作用下，试件随离心机高速转动，线速度高达约 120 km/h．离心试验必须保证精确的加速度矢量方向，对参试系统有严格的静、动力矩平衡要求，并要求试验装置能真实地模拟 AMS 在航天飞机上的安装固定工况和结构受力变形情况．这种试件带有强磁场的大吨位离心试验在我国尚属首次，在国外也未见报道．

AMS 离心试验是一项难度很高，风险性很大的试验任务．而参与试验的转接支架及辅助试验装置又是完成此项试验任务的关键，在设计、生产、安装及调试周期短促的情况下，最终仍按计划顺利完成．

3.4　地面环境模拟试验

地面力学试验条件分为静力学试验条件和动力学试验条件．试验条件由 NASA 根据航天飞机特定的起飞、飞行及着落的环境而确定．静力学试验条件按惯性载荷形式表示，即同时受到 3 个主轴方向的加速度．动力学试验条件按随机振动的形式表示，即 3 个主轴方向的加速度功率谱密度．

主结构的力学环境模拟试验按照 NASA 的以下静、动力学条件和技术要求进行：

(a) 合成加速度 12.91 g,鉴定试验加速度 18.07 g;

(b) 对随机振动试验有严格要求,先后进行了 20 多项次试验;

(c) 在离心试验和每项随机振动试验前后进行小振幅的正弦扫描,检查内部结构有无破坏.

3.4.1 动力学环模试验 1996年 4 月第 1 台供地面试验的 AMS 主结构顺利完成,安装好磁体后,运至北京卫星环境工程研究所进行振动试验. 安装在 AMS 上测点数量共 128 个,以检测各典型部位的振动响应. 振动试验分别按 3 个方向进行. 每一方向首先进行低量级的正弦扫描,然后实施验收级的随机振动,再重复前一次低量级的正弦扫描,比较两者的响应频率及幅值,以便了解结构是否损伤、连接是否松动. 试验取得了满意的结果:紧固件未松动,结构也未受到任何损伤,结构强度完全满足 NASA 的技术要求.

试验中采用多项技术措施解决了以下关键问题:

(a) 采用了振动检验法,比较随机振动前后两次正弦扫描试验结果,检测封闭结构中磁体与结构、磁体内部的胶粘强度以及双面埋头铆钉连接情况.

(b) 解决强磁场对振动设备的影响,特别是对振动台的磁效应,以保证振动输入和响应数据采集的正确有效.

(c) 证明试验采用的加速度传感器对磁场不敏感,对测量结果无影响.

(d) 试验夹具满足刚度要求,其最低频率高于试件试验方向的最低频率的 3 倍,并保证对接面边界条件的真实性.

(e) 对大试件采用 4 点均衡输入,避免出现欠试验或过试验的现象.

3.4.2 静力学环模试验 试验的目的是考核 AMS 主结构是否能承受航天飞机起飞及着陆过程中的最大惯性载荷. 对经受准静态载荷的大型航天产品结构强度的考核,一般通过加力器在结构的受力部位加载来实现. AMS 磁体非常特殊:带强磁场的磁铁块安装在封闭的高强度铝合金的结构中,磁铁本身受到各磁块之间的作用力和惯性力,结构也受到磁场作用力和惯性力,且是不均匀的体积力,采用一般的静力试验方法(加载)不可能对磁体和结构的强度进行正确的考核. 为此,我们采用在离心机上进行离心试验来实现 AMS 永磁体结构静力试验.

离心力模拟惯性力的加载在原理上是正确的,但实现起来遇到很多困难. 此项静力试验考核工作在北京水利水电科学院离心实验室进行. 该实验室的设备负载能力很大,达 400 t,但供试件安装的空间太小,对具有强磁场的试件试验更没有经验. 通过离心试验对强永磁体及结构实施强度考核,在世界上亦属首次,有很高的风险,我们与北京水利水电科学院、北京卫星环境工程研究所等单位一起,认真分析计算,精心设计、严格把好质量关,做好预试检验、确保万无一失、一次成功. 加载方向按加速度合成矢量方向,验收级为 12.9 g,鉴定级为 18 g. 试验过程中测量应变及变形,通过应变测量,检测被测部位的结构状态是否良好. 离心试验的前、后,都对试件进行同样的低量级的正弦扫描,以便检测试件内部是否被破坏. 检测结果证明 AMS 主结构状态良好,未受任何破坏.

3.4.3 试验磁体的静力学环模试验 为进一步了解 AMS 主结构在胶失效时的最大承载能力,应 NASA 的要求于 1997 年 4 月又追加生产了一件 0.3 m 高的试验件. 同年 8 月进行了静力试验. 横向 4 点对称加载及两点对称加载均达到了预期的 50 kN,结构状态仍然良好,证明强度及刚度均满足并超过设计要求. 结果表明:在胶失效的情况下,AMS 磁体系统仍然符合

NASA 安全要求，这样能确保 AMS 在空间站运行 3～5 a 后由航天飞机运回地面着陆时的安全.

永磁体和主结构设计先进，工艺严谨，有严格的质量控制，并按美国宇航局的标准全面系统地进行了各项空间环境模拟试验，完全达到了设计要求. 美国宇航局的安全评审一般要进行三阶段，但对 AMS 的安全评审仅进行了二阶段就"用测试结果而不是计算或猜测"圆满地回答了所有问题而提前结束. 这在美国宇航局的历史上还是第 1 次.

4　结束语

几千年来，人类一直使用光学方法观测宇宙. 二次世界大战后，这种观测从可见光扩展到了射电和 γ 射线，覆盖了电磁波的大部分范围，取得了许多重大的发现. 1998 年 6 月，美国发现号航天飞机搭载阿尔法磁谱仪，成功地进行了首次飞行. 这是人类第 1 次将大型磁谱仪送入宇宙空间，直接测量带电粒子，具有十分重要的科学意义，实现了物理学家几十年来的梦想，是人类探测宇宙的又一个里程碑. 阿尔法磁谱仪将寻找宇宙中的反物质和暗物质，精确测量宇宙中各种同位素的丰度和高能 γ 光子. 我们成功地为阿尔法磁谱仪建造了最关键的永磁体系统，这是世界上第 1 个能够在宇宙中运行的大型磁体. 该永磁体系统的研制成功开辟了一个全新的探索领域，对于粒子物理、天体物理和宇宙论的研究具有重大的科学价值.

AMS 首次飞行收集了 1 亿多个事例，其中 80% 为质子，20% 为各种原子核. 此次飞行中 AMS 各子探测器工作正常，性能达到了设计目标，能正确区分各种原子核及其电荷. 首次飞行的数据分析已经得到许多重要的物理结果，并有若干意外的发现. 主要物理成果包括：

(1) 首次发现在地球赤道上空正电子与负电子的比例为 4:1. 这是现有的物理理论所无法解释的.

(2) 首次发现在地球赤道上空在地球磁刚度切割下有丰富的 ^{3}He. 在宇宙空间中 ^{4}He 的含量比 ^{3}He 高得多. 然而 AMS 的数据表明这个结论只对地球磁刚度切割以上的氦核正确. 在地球磁刚度切割以下的氦核主要是 ^{3}He，其来源不明.

(3) 首次发现在航天飞机的飞行区域除通常的原初宇宙线质子谱外还存在第 2 个质子谱，动量在地球磁刚度切割以下. 在赤道上空区域，这个质子谱的流强是 70 $m^{-2}\cdot s^{-1}sr^{-1}$. 初步分析表明，这些质子轨迹复杂，来自特定的地理区域[6].

(4) 在寻找反物质方面，首次飞行得到反氦核存在的上限小于 1.1×10^{-6}(95% C.L.)[7].

预期这次飞行还有更多的重要物理结果将要发表.

参　考　文　献

1 Ahlen S, Balebanov V M, Battiston R, et al. ALPHA magnetic spectrometer. Nuclear Instruments & Methods A, 1994, 350: 351～367

2 Balebanov V M, Chernenko A M, Galeev A A, et al. Proposal: ALPHA magnetic spectrometer (AMS) for extraterrestrial study of antimatter, matter and missing matter on the international space station ALPHA, MIT, Lab for Nuclear Sceince. 1995

3 AMS Collaboration. Design and performance of a magnetic spectrometer for antimatter search in space. IEEE Trans Nucl Sci, 1999, 46: 401～406

4 AMS Collaboration. Antimatter and dark matter search with Alpha Magnetic Spectrometer(AMS). Surveys High Energ Phys, 1998, 13: 177～201

5 Astromocg Collaboration. Astromag Phase. A Study Report. Maryland: NASA and Goddard Space Flight Center, Dec 1989

6 AMS Collaboration. Protons in near earth orbit. Phys Lett B, 2000, 472: 215～226

7 AMS Collaboration. Search for antimatter in space with alpha magnetic spectrometer. Phys Lett B, 1999, 461: 387～396