

中国散裂中子源 (CSNS) ——多学科应用的大科学平台

张 杰*

(中国科学院基础科学局 北京 100864)

关键词 散裂中子源(CSNS)

中国散裂中子源(CSNS)是由 1.6GeV 的高能质子轰击重金属靶而产生强流中子,并利用中子研究物质微观结构和运动的重要科学设施,主要由质子加速器、中子靶站和中子散射谱仪等三大部分组成,其质子束流功率为 100kW,有效脉冲中子通量达 $2.0 \times 10^{16} \text{n/cm}^2\text{s}$,脉冲重复频率为 25Hz。CSNS 的方案设计吸取了当今国际科技最新成果,技术指标具有国际先进性,将在世界上占有重要地位。经过论证,中科院相继启动了 CSNS 的概念设计和前期预制研究,目前概念设计已经完成,预制研究正在紧张进行之中,工程建设有望在近期启动。CSNS 的建成将在物理学、化学、生命科学、材料科学、生物学、纳米科学、医药、国防科研、工业应用和新型能源开发等诸多重要学科前沿领域内,为我国提供一个先进的基础研究和高新技术研究的科研平台。

物质微观结构和运动是揭示物质特性的基础和出发点。作为一种散射技术,中子与同步辐射,各具特点,相辅相成,成为探测物质微观结构和原子运动的强有力的工具。中子波长与物质中原子间距相近,是度量物质微观结构最适合的标尺。热中子能量与物质中动态过程的激发能量相当,适合研究包

括从原子、小分子到生物大分子的振动和转动及蛋白质的折叠等动态特征。中子散射对轻元素(特别是氢)十分敏感,适合研究含大量 H、C、O、N 等轻元素有机物、生物大分子、蛋白质等的细致结构。中子本身具有磁矩,与物质中电子和原子核的磁矩发生相互作用,可直接探测各种磁性功能材料和超导材料中的磁特性。中子具有强的穿透能力,研究中可方便加载各种极端的样品环境条件(如高温、低温、高压、强场等)和无损检测工业生产的大部件。中子散射技术的应用,极大地促进了物性的研究。磁性物质磁结构尤其是反铁磁结构的中子衍射测定,直接验证了磁性相互作用的基本理论,极大地推动了多体凝聚态理论和实验的发展。传统超导体中声子态变化的中子散射研究结果,催生了解释常规超导体中超导机理——电声相互作用的 BCS 理论。有“磁王”美誉的第三代稀土永磁材料 Nd-Fe-B 的晶体结构和磁结构,液氮温区的高温超导体 Y-Ba-Cu-O 的结构和自旋关联等,都由中子散射实验最终测定。

随着中子散射技术应用的不断深入和发展,对中子通量的要求日益提高。能提供高通量中子的中子源主要有两类:反应堆和散裂源。核反应堆是一种稳定连续的中子源。因为堆芯散热条件的限制,中子通量在

* 中国科学院院士、中国科学院基础科学局局长、中国散裂中子源(CSNS)项目负责人
收稿日期:2006年9月7日

上世纪中叶就已饱和。在当前热点研究领域中,研究对象如薄膜、纳米、生物大分子和蛋白质等,它们的尺度分布更广,获得质量在克量级的样品更为困难。因此,小样品的快速、高分辨的中子散射测量迫切需要新一代通量更高、波段更宽的中子源。散裂中子源应运而生,其中子通量突破了反应堆中子源的上限,正快速向前发展。散裂中子源不使用核燃料,没有核临界问题,仅产生少量放射性核废料,被公认为是新一代高效安全的强流中子源。

目前世界上运行的脉冲式散裂中子源主要有美国的 IPNS 和 LANSCE、英国的 ISIS 等。英国的 ISIS 是目前世界上最亮的散裂源,它利用直线加速器将负氢离子加速到 70 MeV,通过剥离注入,把负氢离子剥离成质子注入到快循环同步加速器,质子束在同步加速器中累积并加速到 800 MeV,然后引出轰击钨靶,产生的脉冲中子通量将可达 $8 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$,其脉冲中子通量已高出反应堆近一个量级。进入 21 世纪,美、日、欧等发达国家相继推出新的散裂中子源计划,作为提高科技创新能力的重要举措。英国 ISIS 在已良好运行 20 年的第一靶站基础上,积极建设第二靶站。特殊的慢化器设计使其冷中子通量超过 $1.0 \times 10^{11} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$,目标直指与纳米技术相关的纳米材料、生命科学等。在美国,以 ORNL 实验室为主的 5 大核科学国家实验室目前正携手建造一台束流功率为 1.0MW 的散裂中子源 SNS,中子通量将高达 $10^{17} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$,总投资 14 亿美元。通过近 7 年的紧张建设,SNS 第一束中子于 2006 年 4 月 28 日成功出束。日本原子能研究机构与高能加速器研究机构共同承担的工程总投资为 1 890 亿日元的强流质子加速器研究联合体 J-PARC,目前正加紧施工,计划 2008 年建成。

CSNS 将是我国自主建设的第一台散裂中子源。由离子源(IS)产生的负氢离子(H^-)束流,通过射频四极加速器(RFQ)聚束和加速后,由漂移管加速器(DTL)把束流能量进一步提高到 80MeV,负氢离子经剥离注入到一台快循环同步加速器(RCS)中,加速束流到引出能量 1.6GeV。从 RCS 引出后,质子束流经传输线轰击钨靶,散裂出中子。中子经过慢化,通过中子导管引向谱仪,供用户开展实验研究。为使这台装置保持国际先进水平,满足日益增加的多学科用户的研究和应用的需求,因此在设计阶段就留有进一步提升束流功率的余地。首先,建成一台重复频率 25Hz、束流功率 100kW 的加速器。运行一段时间后,通过提高流强,使束流功率和中子通量加倍。同时,谱仪的台数也随用户的需求和功率的提高由第一阶段的 7 台逐步增加到最终的 18 台。

加速器是散裂中子源的基本组成部分之一,它对装置的整体性能指标起重要作用,也是投资的主体,其运行稳定性决定了用户使用率。因此,在加速器设计中,必须保证装置的先进性,运行可靠性,经费合理性以及具有升级余地。在加速器构架选择上,采用低能量直线加速器与快循环同步加速器的组合结构。DTL 部分采用较高频率的射频功率源,有利于加速较高峰值电流的束流,同时缩短直线加速器的长度和减少造价。RCS 采用大的注入引出能量跨度有利于工程未来的升级,CSNS-II 只需要将直线加速器的能量提高而 RCS 本身不必进行大的改造。

CSNS 靶站是高能质子脉冲轰击靶体,发生散裂效应产生高能中子,并用慢化器将其慢化成适合中子散射应用的慢中子脉冲的设施,由高能质子入射窗口,多片钨片叠成的靶体,高能中子慢化器,铍钢反射体和

铁/混凝土生物防护屏蔽体五个部分组成。扁平截面的靶型使慢化器更贴近靶体的中子通量最强的中心部位,可以提高慢化器的慢化效率和为谱仪提供增强慢中子通量。采用截面尺寸为 $40 \times 120 \text{ mm}$ 的钨靶时,脉冲中子通量达 $2.0 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。三个不同特征的慢化器:水(300K, decoupled), 液态甲烷(100K, decoupled + positioned) 和液氢(20K, coupled)满足中子谱仪对中子的波长和脉冲形状的不同要求。

中子散射谱仪是用于中子散射实验的装置,是散裂中子源多学科应用的主要部分,也是整个工程成败的关键之一。根据我国用户的要求和建议,CSNS 计划第一期设计建造高通量粉末衍射、高分辨粉末衍射、宽 Q 值小角散射、多功能反射、直接几何非弹性、工程材料和高压应用等 7 台典型的中子散射谱仪,以覆盖大部分的中子散射研究领域。高分辨粉末衍射、工程材料和高压应用等谱仪将从内置低能中子吸收体的退耦合液态甲烷慢化器中取出通量高、脉冲时间短的中子,以满足高通量和高分辨率的要求。小角散射仪和多功能反射仪的分辨率要求不高,选择耦合的液氢慢化器提供的高通量的长波中子。高通量粉末衍射仪和直接几何非弹性散射仪则要求适中的分辨率、宽的波长分布和相对高的高能中子通量,退耦合的室温水慢化器是其合适的选择。

CSNS 束流功率虽仅为 100kW,但要用国际同类装置约 1/10 的投入,建造综合性能位居世界前列的 CSNS,设计和技术上必然存在挑战,必须创新。与兆瓦级的 SNS 和 J-PARC 相比,只有极小部分课题如超薄膜、快速反应和快速相变过程等不能在 CSNS 开展。CSNS 设计的最小样品量在毫克量级,最短测量时间在分钟量级,能满足各学科 90% 以上的中子散射研究需求。

CSNS 是一个多学科应用的平台型大科学装置,用户优先是 CSNS 建设所遵循的基本原则。我国中子散射研究相对落后西方发达国家,如何发展和壮大用户队伍是当前另一重大任务。自 2004 年来,CSNS 项目组每年夏天组织“散裂中子源多学科应用研讨会”,相继邀请几十位国内外专家学者,讲授有关中子源的知识和谱仪的特点,特别是在物理、化学、生物、材料、能源等多学科的应用。同时,CSNS 组织成立中子散射用户联盟,明确了用户联盟的任务和日常工作的原则和重点,为组织中子散射用户委员会打下了良好的基础。目前,落实的首批 CSNS 用户至少在 500 个以上,覆盖百余个不同研究课题。据对用户的需求调查表明,首期 7 台谱仪所提供的机时,已不能完全满足用户的需求。根据我国各相关学科专业的分布情况预测,散裂中子源 CSNS 国内的潜在用户将在 1 900 个以上。

具有高效中子通量、少量放射性核废料等特征的中国散裂中子源 CSNS,集成了加速器物理、中子物理和中子散射等 20 世纪物理学 3 大领域的科技成果,将在众多基础学科中,如凝聚态物理、化学、生物工程、材料科学、核物理、核医学、核化学等,被广泛应用。借助 CSNS,有望在一些重要研究领域获得突破,如高温超导机理的全面认识和新的超导材料的探索,适合氢离子行为的凝聚态物理新理论,量子调控与自旋霍尔现象, DNA 分子识别的纳米自组装,膜蛋白与细胞新陈代谢,蛋白质相互作用等。相对反应堆中子源,散裂中子源各项技术更复杂,也正在发展,但还不十分成熟。技术上的挑战,也正是我们的机遇。抓住这一机遇,可使我国加速器、中子科学、凝聚态物理和化学、材料科学、生命科学等领域的研究和开发水平得到大幅度的提升。