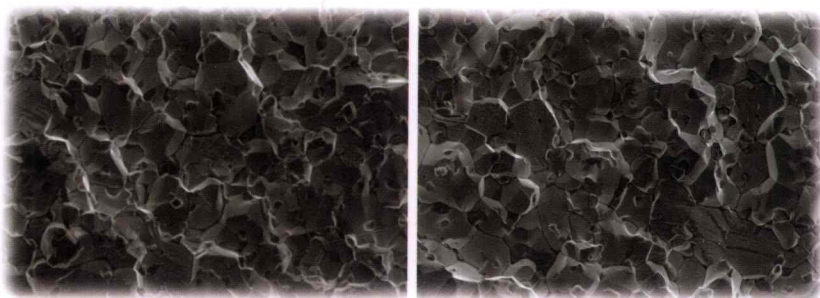


◎陈 勇 吴玉程 著

MIANDUI DENGGLIZITI WUJI FUHE CAILIAO
DE ZHIBEI JIQI XINGNENG YANJIU

面对等离子体钨基复合材料的 制备及其性能研究



合肥工业大学出版社

面对等离子体钨基复合 材料的制备及其性能研究

陈 勇 吴玉程 著

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

面对等离子体钨基复合材料的制备及其性能研究/陈勇,吴玉程著. —合肥:合肥工业大学出版社,2009.10

ISBN 978-7-5650-0113-0

I. 面… II. ①陈…②吴… III. ①钨基合金—复合材料—材料制备—研究②钨基合金—复合材料—性能分析 IV. TG146.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 189883 号

面对等离子体钨基复合材料的制备及其性能研究

陈 勇 吴玉程 著 责任编辑 权 怡 王方志 责任校对 方 丹

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2009 年 10 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2009 年 10 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	720 毫米×1000 毫米 1/16
电 话	总编室:0551—2903038	印 张	11
	发行部:0551—2903198	字 数	167 千字
网 址	www.hfutpress.com.cn	印 刷	中国科学技术大学印刷厂
E-mail	press@hfutpress.com.cn	发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-0113-0

定价:28.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

前 言

陈勇博士学位论文研究工作是在吴玉程教授指导下完成的,并且得到与中国科学院等离子体物理研究所合作项目(103-413361)和合肥工业大学中青年创新群体基金(103-037016)的支持。针对面对等离子第一壁材料的需求背景,旨在通过机械合金化及粉末冶金技术制备出高性能的钨基复合材料,并对钨基复合材料的制备及强化理论做一些有益的探索,为提高钨基复合材料性能、扩大钨基复合材料用途和发展第一壁材料的应用奠定基础。

衷心感谢中国科学院等离子体物理研究所陈俊凌研究员在研究与实验方面给予的指导。感谢合肥工业大学材料学院黄新民老师、程继贵老师、王文芳老师、李云老师、郑玉春老师、程娟文老师、舒霞老师、唐述培老师、朱绍峰老师等在课题实验方面提供的帮助。中国科学院固体物理研究所孔明光老师在扫描电镜分析、中南大学杨海林博士在烧结实验、中国科学院等离子所李化博士和种法力博士在电子束热负荷实验中给予了帮助,哈尔滨工业大学王玉金教授在解析方面给予了帮助,本实验室一起工作学习的成员也给予很大帮助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,写作过程中难免出现错误,敬请批评指正。

作者

2008 年 12 月于合肥

摘 要

钨具有高熔点、导电导热性好、低溅射腐蚀速率、热膨胀系数小、低蒸汽压以及优良的高温强度等特性,已在航空航天、冶金、汽车、电子、国防等众多领域得到广泛应用。随着现代科学技术的发展,钨和钨合金的应用领域正在不断扩大。目前,钨已被选为 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)偏转器中的等离子壁材料。等离子壁材料对钨材料的高温性能特别是综合性能提出了较高的要求,纯钨已不适合如此苛刻的工作条件。为此,研究人员采取不同的方法来提高钨材料的性能。本书介绍了钨基材料的研究现状及进展,以提高钨基材料的性能为出发点,采用高能球磨的方法制备出 TiC/W 、 $\text{TiC}-\text{La}_2\text{O}_3/\text{W}$ 、 $\text{W}-\text{Cu}$ 系列钨基复合材料,对它们的组织结构及力学性能进行了研究,并在中国科学院等离子体物理研究所的热负荷实验平台上进行高能电子束真空热负荷实验,对所制备试样的热负荷性能进行了研究分析,为钨基复合材料在聚变堆装置中的应用提供了理论和数据参考。主要包括以下内容:

介绍了钨基材料的主要分类、制备方法以及强韧化研究的现状。介绍了采用高能球磨方法制备 TiC/W 复合粉体,使 TiC 颗粒能够均匀混合于钨粉中,并且能够显著细化粉体,提高复合材料的相对密度。讨论分析球磨参数对 TiC/W 复合粉体的制备的影响,其中液体介质比、球磨转速、球料比、球磨时间等对粉体的性能有较大影响。

在 TiC/W 复合材料的基础上添加一定含量的稀土 La_2O_3 。结果表明, La_2O_3 和 TiC 在一定成分配比共同作用时的强化效果强于 La_2O_3 和 TiC 单独作用的强化效果。 $\text{TiC}-\text{La}_2\text{O}_3/\text{W}$ 复合材料的强化机制主要为载荷传递、细晶强化,韧化机制为细晶韧化和裂纹偏转。

介绍了高能球磨法制备 $\text{W}-\text{Cu}$ 复合粉体。高能球磨过程中产生的大

量纳米晶界和高密度的缺陷(位错、层错等)促进 Cu 在 W 晶格中的固溶,促使 W、Cu 的合金化,有助于 W-Cu 烧结体组织的均匀化和致密化。烧结温度、球磨时间和 Cu 含量对 W-Cu 复合材料的相对密度影响较大,进而影响复合材料的强度等力学性能。

对几种钨基复合材料进行电子束热负荷冲击试验和电子束热负荷循环试验,考察其在电子束作用下的性能。电子束热流密度为 $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ 时,电子束热冲击后,各试样表面损伤并不十分严重,几种材料热冲击前后质量减损不大。电子束热流密度为 $5\text{MW}/\text{m}^2$ 时,热冲击后材料出现起皮鼓泡现象,扭曲破坏严重,表面呈黑灰色,已完全损坏,材料表面有点状烧蚀坑和表皮脱落现象,电子束热冲击作用较为明显,烧蚀较为严重,质量减损率均超过 1%。电子束热负荷循环后,样品表面出现腐蚀现象,在钨晶粒晶界间萌生,微裂纹仅存在于试样表面,未向基体内部扩展。

关键词:钨基复合材料;高能球磨;TiC;La₂O₃;W-Cu;组织性能;电子束热负荷

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 引 言	(1)
1.1.1 解决世界能源问题的新途径——受控热核聚变	(1)
1.1.2 核聚变装置	(3)
1.1.3 等离子体与第一壁的相互作用(PMI)	(4)
1.1.4 托卡马克装置中面对等离子体第一壁材料	(6)
1.2 W基面对等离子体第一壁材料	(10)
1.3 钨基材料的现状	(11)
1.3.1 W-Ni-Me系合金	(13)
1.3.2 W-Cu复合材料	(14)
1.3.3 W-稀土氧化物合金	(15)
1.3.4 TiC和ZrC增强钨基复合材料	(16)
1.3.5 W-Re合金	(17)
1.3.6 W-Mo合金	(18)
1.3.7 钨涂层	(18)
1.3.8 W基面对等离子体材料的选择	(19)
1.4 钨基材料的制备方法	(19)
1.4.1 粉体制备方法	(19)
1.4.2 主要烧结方法	(22)
1.4.3 钨基材料制备新技术	(24)
1.5 钨基材料的强化研究	(25)
1.5.1 复合强韧化	(25)
1.5.2 钨基材料的强化机制	(26)
参考文献	(27)
第2章 钨基复合材料制备工艺设计及性能测试表征	(35)
2.1 钨基复合材料制备影响因素	(36)



2.1.1 粉体的影响	(36)
2.1.2 烧结的影响	(38)
2.2 工艺路线设计	(40)
2.3 实验材料	(40)
2.4 材料的制备	(41)
2.4.1 复合粉体制备工艺	(41)
2.4.2 烧结工艺	(42)
2.5 粉体的表征	(43)
2.5.1 粉体相组成及晶粒度的测定	(43)
2.5.2 复合粉体的形貌观察	(44)
2.5.3 复合粉体的中值粒径及比表面测试	(44)
2.6 材料组织结构观察与性能测试	(44)
2.6.1 复合材料密度测试	(44)
2.6.2 复合材料弯曲性能测试	(45)
2.6.3 复合材料显微硬度测试	(46)
2.6.4 复合材料显微组织结构分析	(46)
2.7 高能电子束真空热负荷实验	(47)
2.7.1 实验装置	(47)
2.7.2 实验过程	(47)
2.8 主要仪器设备	(49)
参考文献	(50)
第3章 高能球磨制备 TiC/W 复合粉体及其表征	(52)
3.1 球磨机的粉碎机理	(57)
3.2 液体介质比	(60)
3.3 球磨转速	(62)
3.4 球料比	(63)
3.5 球磨时间	(64)
3.6 小 结	(70)
参考文献	(71)
第4章 高能球磨 TiC/W 复合粉体的烧结致密化	(73)
4.1 烧 结	(73)
4.1.1 粉末烧结基本过程	(75)
4.1.2 粉末烧结动力学	(75)
4.1.3 W-TiC 复合材料的烧结特点	(77)

4.2	TiC/W 复合材料的相对密度	(78)
4.2.1	TiC 含量对 TiC/W 复合材料相对密度的影响	(78)
4.2.2	烧结工艺对 TiC/W 复合材料相对密度的影响	(79)
4.2.3	球磨时间对 TiC/W 复合材料相对密度的影响	(80)
4.2	高能球磨对 TiC/W 复合材料组织性能的影响	(81)
4.3	高能球磨制备 TiC/W 复合材料的改进	(85)
4.3.1	TiC/W 复合粉体的分布	(85)
4.3.2	TiC/W 复合材料的性能	(85)
4.4	TiC/W 复合材料的烧结	(87)
4.4.1	TiC/W 复合材料烧结特点	(87)
4.4.2	高能球磨 TiC/W 复合材料烧结机理讨论	(88)
4.5	小 结	(90)
	参考文献	(91)
第 5 章	颗粒增强复合材料的制备与力学性能	(92)
5.1	TiC-La ₂ O ₃ /W 复合材料成分设计与制备	(95)
5.2	TiC-La ₂ O ₃ /W 复合材料的力学性能	(96)
5.2.1	TiC-La ₂ O ₃ /W 复合材料的密度和相对密度	(96)
5.2.2	TiC-La ₂ O ₃ /W 复合材料的硬度和弹性模量	(98)
5.2.3	TiC-La ₂ O ₃ /W 复合材料的抗弯强度和断裂韧性	(99)
5.3	TiC-La ₂ O ₃ /W 复合材料的组织结构	(100)
5.3.1	TiC-La ₂ O ₃ /W 复合材料的金相显微组织	(100)
5.3.2	TiC-La ₂ O ₃ /W 复合材料的 TEM 照片	(101)
5.4	TiC-La ₂ O ₃ /W 复合材料的断口形貌及裂纹路径分析	(103)
5.5	强韧化机制	(106)
5.6	小 结	(109)
	参考文献	(110)
第 6 章	W-Cu 复合材料的制备与性能	(114)
6.1	FGM 的设计	(116)
6.2	FGM 的制备方法	(117)
6.2.1	粉末冶金法	(117)
6.2.2	等离子喷涂法	(118)
6.2.3	气相沉积法	(119)
6.2.4	自蔓延高温燃烧合成法(SHS)	(120)
6.3	梯度功能材料的应用	(120)



6.3.1	航空航天领域	(120)
6.3.2	机械工程领域	(121)
6.3.3	光电领域	(121)
6.3.4	能源领域	(121)
6.3.5	生物工程领域	(122)
6.4	W-Cu 复合粉体的制备与表征	(124)
6.4.1	W-Cu 复合粉体的 XRD 图谱	(124)
6.4.2	W-Cu 复合粉体的晶格常数和晶粒尺寸	(127)
6.4.3	W-Cu 复合粉体的形貌	(130)
6.5	W-Cu 复合材料的显微组织	(131)
6.6	W-Cu 复合材料的力学性能	(133)
6.6.1	W-Cu 复合材料的密度和相对密度	(133)
6.6.2	W-Cu 复合材料的显微硬度	(135)
6.6.3	W-Cu 复合材料的抗弯强度	(136)
6.7	小 结	(138)
	参考文献	(139)
第 7 章 高能电子束真空热负荷实验研究		(145)
7.1	传热学基本理论	(147)
7.1.1	温度与热量	(147)
7.1.2	传热基本方式	(147)
7.1.3	热应力	(149)
7.2	电子束热冲击模拟实验	(150)
7.2.1	电子束热冲击对表面温度的影响	(150)
7.2.2	电子束热冲击对表面形貌的影响	(151)
7.2.3	电子束热冲击引起的质量烧蚀率	(155)
7.2.4	电子束热冲击破坏机制分析	(155)
7.3	电子束热负荷循环实验	(157)
7.3.1	电子束热负荷循环对材料组织结构的影响	(157)
7.3.2	电子束热负荷循环对显微硬度的影响	(159)
7.3.3	电子束热负荷循环对抗弯强度的影响	(160)
7.4	小 结	(161)
	参考文献	(162)

第1章 绪论

1.1 引言

利用轻原子核聚变反应产生聚变能是解决人类能源问题的重要途径,而聚变材料尤其是面对等离子体第一壁材料制约了聚变能的发展,是聚变装置研究的重点之一。在聚变装置中,等离子体与第一壁材料发生的相互作用会导致材料损伤,产生杂质,降低等离子体的品质。因此,第一壁材料必须要具有良好的导热率和抗热冲击性、低溅射产额、低放射性、低蒸气压及高熔点等性能。第一壁材料可分为高 Z 材料和低 Z 材料两种,高 Z 材料中的 W 及 W 基材料由于较其他材料能更好地满足第一壁的要求,因此成为聚变装置最有前途的面对等离子体第一壁材料。目前, W 基面对等离子体第一壁材料主要包括 $W-Re$ 合金、碳化物和氧化物颗粒增强 W 基复合材料、 $W-Cu$ 合金和等离子体喷涂 $W-Cu$ 功能梯度材料。然而, W 基材料存在低温脆性、重结晶脆性及辐射脆性等缺点,使得 W 基第一壁材料的寿命大大缩短,限制了其应用。因此,有必要通过提高材料的相对密度及控制材料的杂质含量和显微结构进一步提高 W 基材料的性能。

本章介绍了聚变装置第一壁材料与等离子体的相互作用、第一壁材料的总体要求、钨基材料的研究现状。

1.1.1 解决世界能源问题的新途径——受控热核聚变

能源是人类文明得以维持和发展的物质基础。当前人们所使用的能源主要来自煤、石油和天然气等不可再生资源,使用这些能源所生产的燃料会

产生大量的氮氧化物、碳氧化物和硫氧化物,对环境造成严重污染,使人类的生存条件严重恶化,而且这些资源在可预见的未来即将枯竭。除了化石燃料外,目前人类所使用的能源还有裂变能和再生能源。裂变能是一种较为洁净的能源,尽管不会产生大量的 CO_2 、 SO_2 等污染物,但它存在着安全性、高放射性核废料处理、裂变资源有限和核扩散等问题,在裂变过程中会产生大量长寿命、高毒性的放射性裂变产物和超铀元素,对环境造成长期性污染。因此,它只能作为一种相对清洁的过渡型能源。而再生能源包括风能、太阳能、潮汐能和生物能等,尽管使用起来不会产生污染物,但它们受地域和储能环节的限制,也不能成为人类的主要能源,只能作为对主要能源的补充^[1]。

近年来,人们逐渐认识到利用轻原子核聚变反应所产生的聚变能是解决新能源问题的重要途径之一。它具有消耗燃料少、资源丰富、无污染、规模大等优势。因此,发展聚变能受到世界各国的广泛重视,引起了科学界的极大兴趣。

核聚变的物理原理是爱因斯坦质能方程式 $E=mc^2$,它是利用轻核聚变为重核时所释放的能量。由于质子与质子之间的反应截面非常小,所以在实验室条件下,要想实现能量的输出,只能利用氢的同位素氚(T)和氘(D)之间的聚变反应(如图 1-1 所示),其基本的反应方程式为: $\text{D}+\text{T}\rightarrow{}^4\text{He}$ (3.5MeV)+n(14.1MeV)。到目前为止,其科学可行性已在磁约束聚变装置托卡马克上得到证实^[2]。

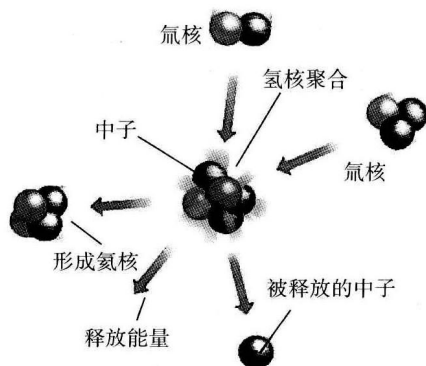


图 1-1 核聚变反应示意图

1.1.2 核聚变装置

将聚变燃料加热至可以发生聚变反应的温度,并控制其能量输出,是受控热核聚变研究的主要内容。受控热核反应的主要途径有两种。

1. 惯性约束聚变^[3] (ICF, Inertial Confinement Fusion)

利用物质的惯性达到的约束称为惯性约束。ICF 是用下述方式实现受控聚变的:在极短时间内将高功率的能量倾注到少量聚变燃料靶丸(靶丸是直径约 1 mm 的空心小球,小球内装着几毫克的氘和氚的混合气体或固体)中去,燃料被急剧加热并迅速转变成高温等离子体,其中的粒子必将高速向四面八方飞散。然而,关键在于加热时间非常短暂,由于粒子惯性飞行一定范围必须有一定时间,就在它们没有飞出反应区之前热核聚变反应已经完成了。要实现这类聚变反应,技术关键在于需要极高的功率和高度方向性的束流。利用 20 世纪 60 年代后出现的激光束驱动器和粒子束驱动器获得高功率和高方向性束流,是目前惯性约束核聚变研究的主要途径。

2. 磁约束聚变^[4] (MCF, Magnetic Confinement Fusion)

磁约束聚变是最有希望获得稳定能量输出的途径。其原理是:利用磁场将氘氚等离子体约束起来,通过各种加热方式将氘氚等离子体加热至可以发生聚变反应的水平,最终实现以准稳态直至稳态的方式发生聚变反应。目前,研究最多的磁约束装置是托卡马克(Tokamak)和仿星器(Stellarator)。托卡马克装置是 20 世纪 60 年代后期在原苏联生产设备的基础上发展起来的,很快成为磁约束聚变研究的主攻方向。仿星器是磁约束聚变研究最早进行探索的途径之一,是由美国学者 L. Spitzer 提出的。其基本原理是,通过磁力线旋转变换使带电粒子在环形区域中的漂移轨道封闭而得到长期约束。

近年来,我国聚变研究取得了较大成果。2002 年,西南物理研究院成功建成了我国第一个带有偏滤器位形的托卡马克装置——中国环流二号 A 装置。2006 年,中科院等离子体物理研究所春季实验中又获得超过 300s 的放电时间,处于世界领先地位。目前,该所正在实施 EAST(HT-7U)超导托卡马克计划,新装置将在高功率、长脉冲下运行,并有偏滤器结构,将为

ITER 提供非常有益的帮助,同时也标志着我国已跻身于世界受控核聚变大国的行列^[5]。

1.1.3 等离子体与第一壁的相互作用(PMI)

等离子体与材料的相互作用(PMI, Plasma-Material Interaction)是指:由于磁场对等离子体约束的不完全性,一些带电粒子会由于碰撞、反常输送等机制在垂直于磁面方向上作漂移和扩散运动,直至接触器面并与其发生作用;另外,中性粒子、中子、光子不受磁场约束,直接作用到器壁上。PMI 是不可避免的,同时,它也是实现聚变能与氦灰排出的必要条件。PMI 大致分为两个方面。一方面粒子流(离子、电子、中性粒子、中子、高能逃逸电子、光子和射线等)和伴随的能量流轰击器壁,造成第一壁材料损伤;另一方面,粒子流和能量流轰击器壁产生杂质,杂质进入主约束区,对等离子体约束和其品质产生不利影响^[6]。在托卡马克装置中,为了防止等离子体与器壁直接接触,抑制其相互作用,通常在装置中设置限制器(Limiter)或偏滤器(Divertor)将两者隔开。限制器或偏滤器把等离子体约束在一定体积之内,因此存在一个等离子体边界——最后闭合通量面(LCFS, the Last Closed Flux Surface)。LCFS 向内是芯等离子体区域,向外则是刮削层(Scraped-off Layer),再向外就是包括真空室壁、限制器和偏滤器靶板在内的与等离子体直接接触的部分,总称第一壁(First Wall)。第一壁表面的材料称为面对等离子体第一壁(PFM, Plasma Facing Materials)。

1. 杂质的产生

在托卡马克装置中,PMI 过程中杂质的产生主要有以下几种机制:

(1)物理溅射(Physical Sputtering)^[7~9]

物理溅射在聚变装置中是不可避免的。中心电子温度为 $1\text{keV}\sim 20\text{keV}$ 的等离子体,在其边缘处不可避免地会有几十 eV 能量的粒子,这些入射粒子通过与第一壁表面原子的弹性碰撞将一部分能量传递给表面原子,表面原子直接通过级联(Cascade)过程获得足够的能量克服表面的束缚而逸出,这个过程称为物理溅射。溅射产额与入射粒子和表面原子的质量比、入射粒子的能量、表面温度以及入射角等有关。物理溅射有阈值存在,只有在入射粒子的能量超过其相应的阈值时,溅射才会发生。物理溅射是杂质产生

的主要机制之一,不能靠附加的操作来消除。

(2)蒸发(Evaporation)^[10]

严重的蒸发现象主要发生在局部过热处。当放电突然中止,等离子体能量和部分等离子体电流感应能,将会在毫秒级的时间内冲击到壁面的小面积上,从而产生严重的蒸发。在托卡马克装置中,蒸发也是不可避免。

(3)解吸(Desorption)^[11]

器壁表面通常吸附有一些杂质,如氧、氮等粒子,还有一些工作气体如氧、氟等。这些粒子与材料原子的结合能有高有低,在离子、电子、光子的照射下都可能释放出来,形成杂质。因此,在实验前,一般要先对器壁进行清洗或壁处理,如烘烤、辉光放电等。

(4)起弧(Arcing)^[12]

带电的等离子体自放电,殃及壁面,形成电弧。形成这些弧的趋势取决于壁面形状、表面性质(材料、光滑度)。合适的设计(边缘和端头采用圆形设计)、适当的选材和处理将有助于避免这些弧的出现。

(5)化学溅射(Chemical Sputtering)^[13]

化学溅射主要针对碳基第一壁材料而言。入射氢粒子与碳材料形成挥发性的碳氢化合物,入射氧粒子与其作用产生挥发性的CO与CO₂。化学溅射甚至在低能粒子辐射下也能发生,在某些情况下,是一种比物理溅射更重要的材料腐蚀机制。

此外还有背散射^[14]、反扩散^[15]、表面起泡^[16]、氢在晶界处析出^[17]等机制。

2. 材料的损伤

等离子体与第一壁相互作用过程中,第一壁在承受高热负荷和粒子通量产生杂质的同时,将会发生一系列材料损伤,主要表现为以下两个方面。

(1)面对等离子体材料(PFM)的溅射腐蚀和热腐蚀

面对等离子体材料的测射腐蚀和热腐蚀,如局部烧蚀、融化、开裂和热疲劳等,以及带电粒子、中性粒子、中子和光子轰击引起的表面起泡和表面的喷射等现象。溅射腐蚀将会使得PFM发生减薄,这是面对等离子体部件(PFC)的使用寿命受到限制的主要因素之一。而蒸发和熔化(金属类PFM在重力和电磁力作用下会使熔融层流失)将会进一步缩短PFC的使用寿命。

(2) 辐照损伤

辐照损伤分为表面损伤和体损伤两种。表面损伤主要由带电粒子、中性原子和光子轰击引起,其主要形式有表面溅射、表面起泡和蒸发等现象。从聚变装置的角度来看,表面损伤的主要危害是造成对等离子体的杂质污染。体损伤主要是中子引起的。中子在材料中引起的两种基本物理过程是原子位移和核反应。主要损伤形式有材料活化、肿胀、力学性质和物理性质变化等^[18]。这种损伤对材料整体产生损害,使其性能退化,并缩短了 PFC 的使用寿命,是造成材料本身损害、缩短其使用寿命的主要因素。

1.1.4 托卡马克装置中面对等离子体第一壁材料

目前各国建造的聚变实验堆基本都为 Tokamak 装置。Tokamak 是实现磁场约束等离子体的主要装置。ITER 是 Tokamak 装置中的典型代表,如图 1-2 所示。ITER 的内部构造包括:构成等离子体室的第一壁;偏滤器系统,功能是从 D-T(氘-氚)反应中取出氦;包壳系统,作用是将聚变能转化为热能,同时增殖燃料循环中所需的氚;其他还有如磁场屏蔽、容器结构及燃料和等离子体辅助热源系统等。ITER 系统第一壁结构材料和包层(Blanket)材料为 316 号不锈钢,传热部件用铜合金,面对等离子体第一壁材料(PFM)主要使用钨,偏滤器高热负荷材料用碳基材料和钨,最大场强达 11.2 T 的超导线圈用 NbSn 做成。现有的聚变材料很难满足未来聚变堆高温、高压和强中子辐照的苛刻条件,因此,聚变材料研究面临的任务是探索提高现有材料性能的途径和开发高性能的新型材料。ITER 的一项重要任务就是借助其运行来研究相关的聚变材料^[19~21]。

1. 面对等离子体第一壁材料的总体要求

在热核聚变装置中,聚变等离子体的边缘与 PFM 有着强烈的冲刷作用,因此,PFM 必须达到以下几个方面的设计要求,才能从材料上保证聚变装置的正常运行。

(1) PFM 要有良好的导热性、抗热冲击性和高熔点。这是由于聚变反应堆在正常运行过程中,PFM 要受到高温等离子体的直接冲刷,承受一个很大的热负荷(正常工作时大约 5 MW/m^2 ,不稳定时达到 20 MW/m^2 以上)。所以为了防止 PFM 熔化及保证可靠运行,就要求 PFM 具有良好的导热性、

抗热冲击性和高熔点。

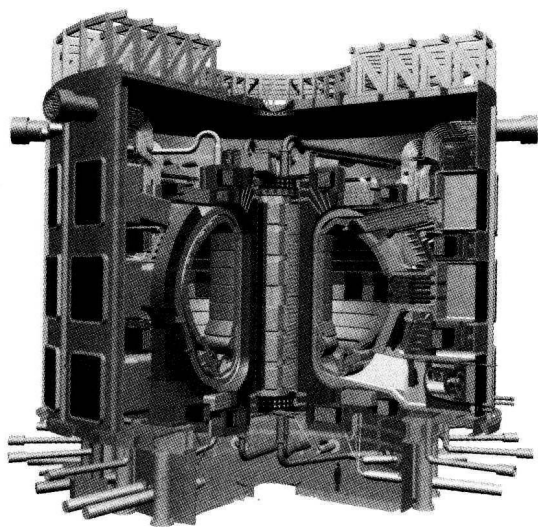


图 1-2 ITER 系统的内部构造示意图

(2)要求 PFM 有低的溅射产额,以保证等离子体的品质。要控制由物理溅射、化学溅射和辐照增强升华所产生的杂质数量。高原子序数(Z)的杂质主要是金属,如 W、Mo 等。它们因有较强的向中心约束区聚集的倾向而成为主要的功率损失源,结果使中心约束区的加热功率低于其辐射功率,形成电子温度的中空分布。对于反应堆,重杂质不能超过万分之几,否则不能自持燃烧。低原子序数(Z)的杂质主要是氧、氮、碳、硼等。这些杂质很难控制,如果过多也会使等离子体不能燃烧。

(3)较低的氢(氘、氚)再循环作用,也就是对氢(氘、氚)较低的吸放气性。如果 PFM 保留大量的氢,那么这些氢就会在等离子体放电过程中进入等离子体,造成氢循环并逐渐加强。这种现象对聚变反应很不利,是要避免的。因此,在选择 PFM 时必须考虑到这种材料对氢(氘、氚)的吸放性。

(4)PFM 应是低放射性材料。所谓低放射性材料是指被放射化后的放射能可以尽快地降低到安全水平的材料。核聚变不同于核裂变,由于其没有裂变产物而被称为是干净反应或干净能源,但是由于 D-T 反应产生的高能中子使 PFM 材料在被辐照损伤的同时也被放射化了,因此 PFM 要具有低的放射性^[22~24]。