

核聚变反应堆关键材料及研究进展

原创 材易通 材易通 2021-03-01 20:58

收录于合集

#材料介绍及应用

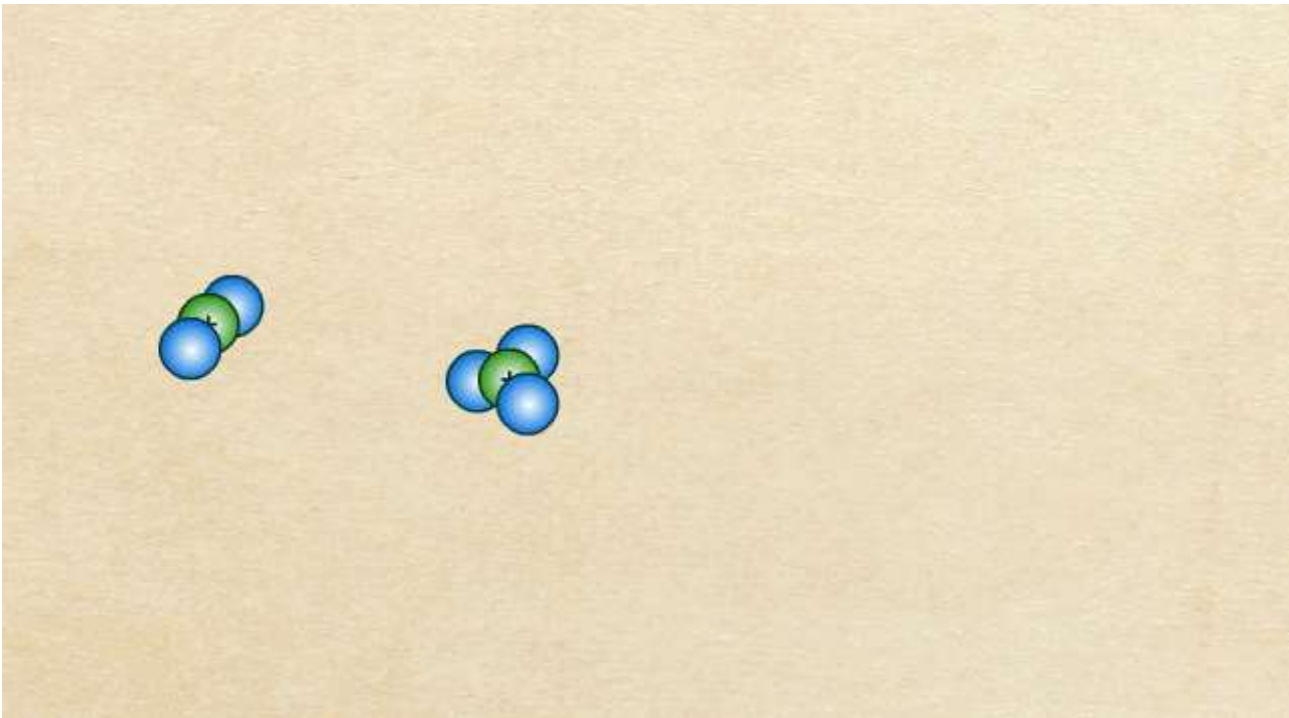
59个

 点击“材易通”关注我们

获取海量材料数据免费查询服务！

核聚变 (nuclear fusion)

又称核融合、融合反应、聚变反应或热核反应。核是指由质量小的原子，主要是指氘，在一定条件下（如超高温和高压），只有在极高的温度和压力下才能让核外电子摆脱原子核的束缚，让两个原子核能够互相吸引而碰撞到一起，发生原子核互相聚合作用，生成新的质量更重的原子核（如氦），中子虽然质量比较大，但是由于中子不带电，因此也能够在这个碰撞过程中逃离原子核的束缚而释放出来，大量电子和中子的释放所表现出来的就是巨大的能量释放。



D-T反应

核聚变的燃料，氢的同位素氘在海水中储量极为丰富，从一升海水中提出的氘，在完全的聚变反应中可释放相当于燃烧300升汽油的能量。核聚变反应堆不会产生污染环境的硫、氮氧化物，更不会释放温室效应气体，而且核聚变反应堆具有绝对的安全性。可以说它是一种无污染，无核废料，资源近乎无限的理想能源。受控核聚变发电的实现将**从根本上解决人类的能源问题。**

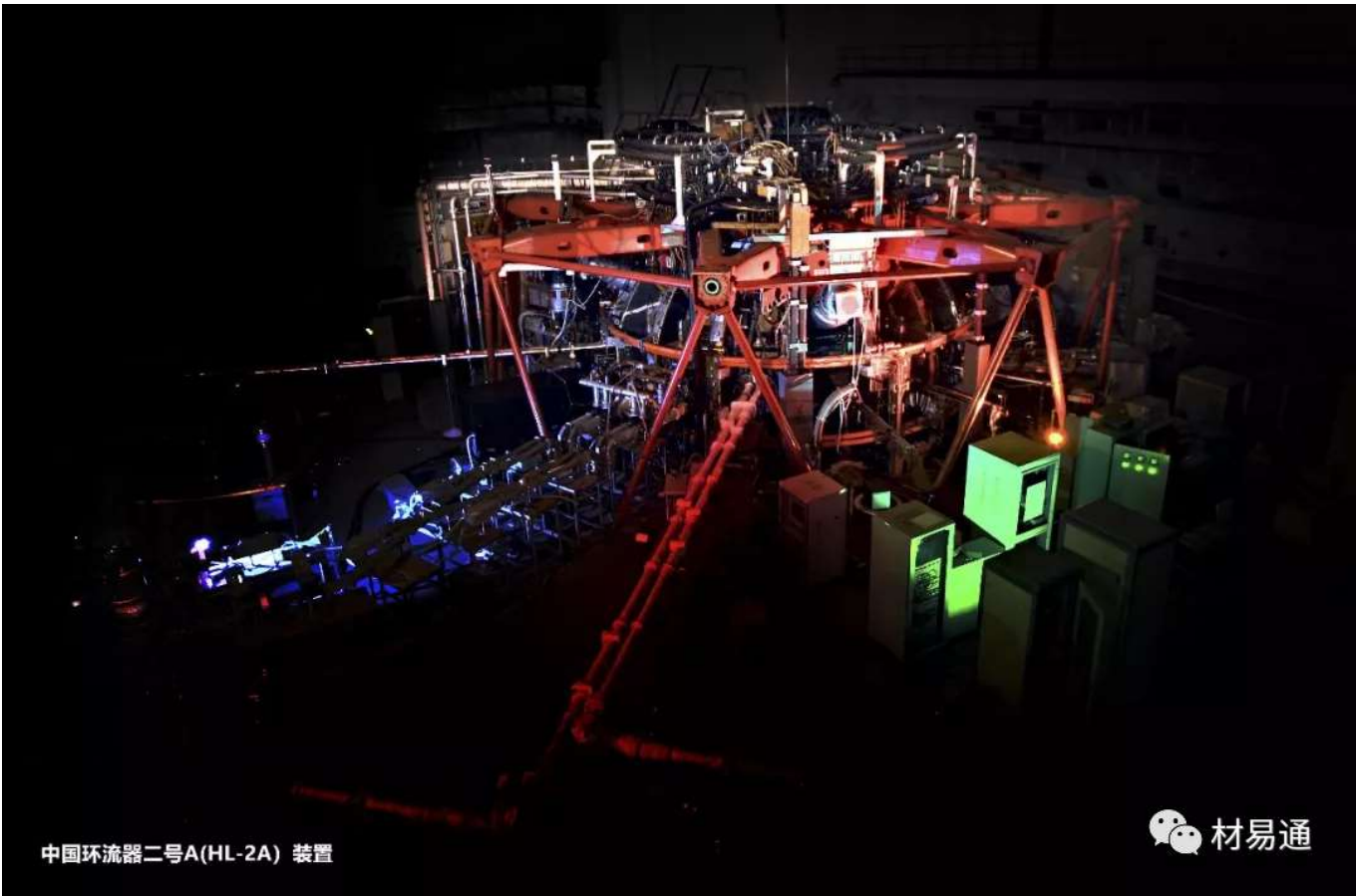


核聚变反应堆装置

磁约束核聚变（托卡马克）目前被认为是最有前途的可控核聚变方式。目前国际上已经有许多托卡马克装置，例如我国的EAST（先进超导托卡马克实验装置）、欧盟的JET、美国的DIII-D，均实现了对聚变等离子体的稳定约束，证实了受控聚变反应的可行性。

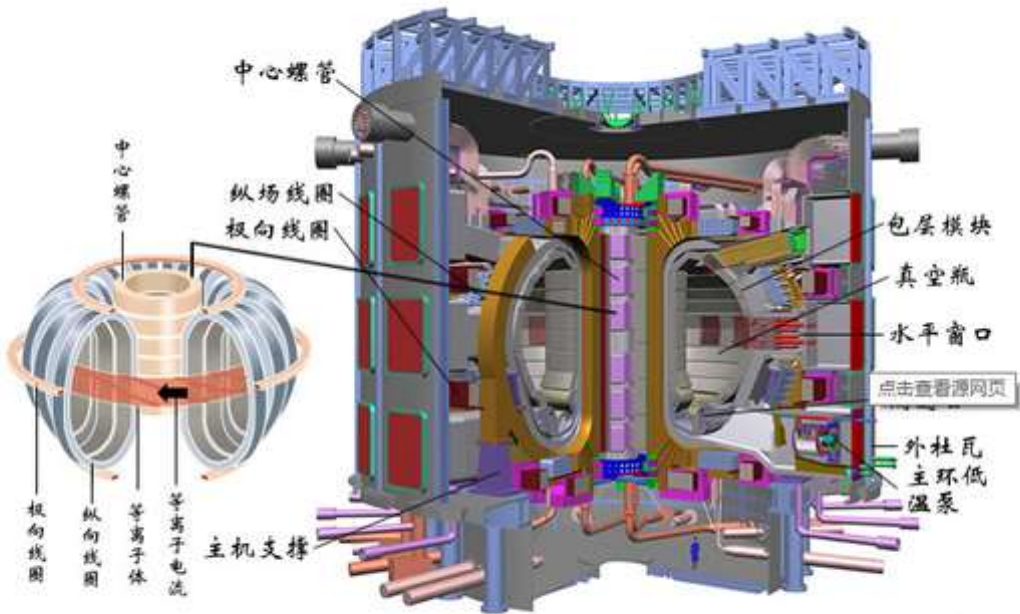
“国际热核聚变实验堆（ITER）计划”是为解决未来能源问题而开展的重大国际合作计划。ITER装置是一个能产生大规模核聚变反应的超导托卡马克，由欧盟、中国、美国、俄罗斯、日本、韩国以及印度七方共同参与建设。ITER计划将集成目前国际上受控磁约束核聚变的主要科技成果，首次建造可实现大规模聚变反应的聚变实验堆，为下一步建设聚变能示范电站DEMO奠定理论与技术基础。

中国环流器二号M装置是我国目前规模最大、参数最高的先进托卡马克装置，是我国新一代先进磁约束核聚变实验研究装置，由中核集团核工业西南物理研究院自主设计建造。该设备是实现我国核聚变能开发事业跨越式发展的重要依托装置，也是我国消化吸收ITER技术不可或缺的重要平台。



核聚变堆关键材料介绍

ITER结构如下图所示



材易通

01 包层结构材料

聚变堆的中子辐照强度高达14MeV，高能中子流冲击再结构材料内部能产生高达200dpa原子离位损伤，产生大量空位、间隙原子。这些空位和间隙原子的进一步扩散会使结构材料出现微结构、微化学变化，导致辐照相变、偏析、硬化、肿胀等现象的产生。因此堆聚变堆结构材料必须具备以下要求：

(1) 中子截面小、低活化性能

即材料中的主要合金元素具有较短的半衰期，经过中子辐照后，其放射性能能够快速衰变。多种常见的结构材料的中子活化情况如下图所示

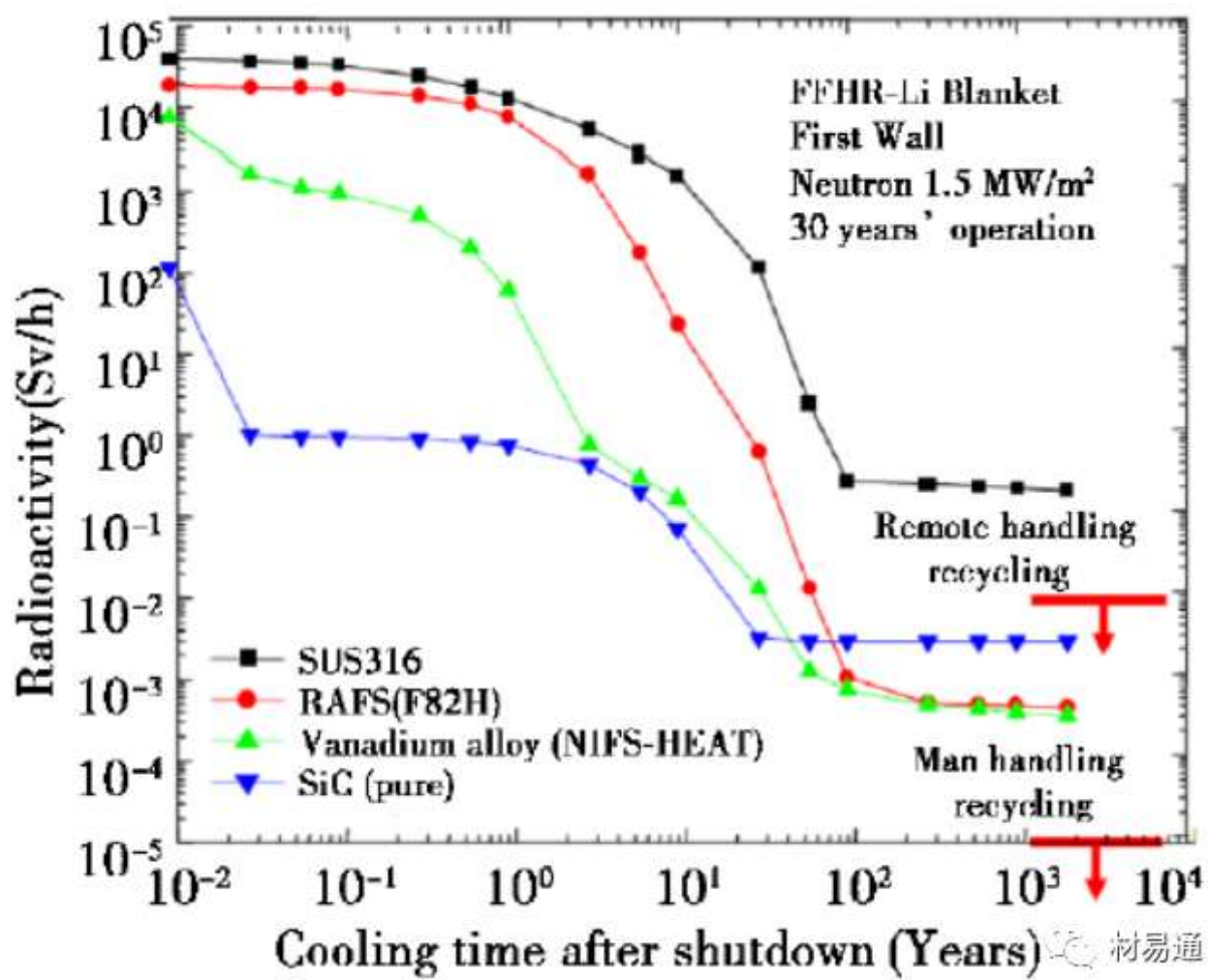


图 多种材料中子辐照活化计算结果

包层结构材料可选用的元素如下图所示

Reduce activation elements

Periodic table																B	C	N	O	F	Ne
Li	Be											Al	Si	P	S	Cl	Ar				
Na	Mg																				
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Cs	Ba	*1	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
Fr	Ra	*2																			
*1	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						
*2	Ac	Th	Pa	U																	

材易通

基于“极限条件下”

浅蓝：无限制；黄色：一些%

粉色：尽可能低；红色：需要PPM等级控制

- (2) 优异的抗辐照性能，辐照下组织结构稳定，辐照肿胀小，辐照催化和硬化程度低。
- (3) 力学性能稳定，且具有足够的韧性、塑性、强度及高温蠕变强度。
- (4) 良好的加工性能，材料制备成本相对低廉
- (5) 与冷却剂有良好的兼容性等。

目前正在使用和研究的包层结构材料主要有奥氏体不锈钢、低活化铁素体/马氏体钢（RAFM）、氧化物弥散强化钢（ODS）、钒合金、SiCf/SiC复合材料。如下表所示。

钢种	优点	缺点
奥氏体不锈钢	具有完备的数据库、良好的焊接与加工性能	热导率低、不抗辐照肿胀、非低活化和屈服强度较低，很难用于未来聚变堆
低活化铁素体/马氏体钢 (RAFM)	低活化、低 DBTT，良好的抗辐照肿胀性能，机械性能、热物理性能以及与液态金属相容性较好，较好的抗辐照蠕变与抗疲劳性能，工业基础以及技术比较成熟，具有很强的现实可行性	使用温度限制在 550℃ 以下，高温机械性能还需进一步提高
钒合金 SiCf/SiC 复合材料	在耐高温以及抗辐照性能方面有明显的优势	发展时间较短，工业基础弱，加工工艺相对较难，价格昂贵
氧化物弥散强化钢 (ODS)	优异的抗辐照性能、良好的高温蠕变性能和高温强度	脆性大、加工难度增加

ODS钢因其优异的高温性能和抗辐照性能被认为是未来核能系统最佳备选结构材料之一。其优异的性能主要归功于大量细小稳定的氧化物，如 $Y_2Ti_2O_7$ 、 Y_2TiO_5 和 $(Ti, Y)_2O_3$ 纳米团簇，它们在高温和辐照条件下拥有比碳化物和氮化物析出物高得多的稳定性。这些氧化物析出物能有效地钉扎晶界、空位和错位，元素的扩散也被抑制，因此能有效抑制晶界滑移，使ODS钢具备优异的抗蠕变性能。同时，这些高密度稳定的细小氧化物弥散颗粒可以作为有效陷阱捕获点缺陷和辐照嬗变产物（如氢氦等气泡），阻碍点缺陷重组和气泡的聚集长大，因此ODS钢也具有优异的抗辐照性能。

02 核聚变堆面向等离子体材料

在极端的核聚变环境中，面向等离子体材料直接面对高剂量的氢同位素和氦离子作用、高强中子辐照以及高强度热冲击的同时作用，使得面向等离子体材料的研究极具挑战。例如等离子体会与材料表面相互作用，造成材料损伤，比如物理溅射、化学溅射、表面起泡和剥落等；

温度的急剧变化一方面会导致材料状态的改变，如发生再结晶或熔化，另一方面会引起巨大的机械应力，周期性的高热负荷作用还会产生疲劳载荷，容易引起材料的脆性

开裂及破损。高束流的D、T、He和高强中子会在材料表面和内部产生大量缺陷，并产生气泡、空洞和肿胀。这些条件相互作用时，会严重影响面向等离子体材料的机械性能、热传递性能等。这种损伤反过来又会污染等离子体，材料表面吸附的工作气体、杂质气体和材料本身的元素进入等离子体约束区后，会影响等离子体的稳定性。面向等离子体材料的总体要求如下：

- (1) 低活化性、与等离子良好的兼容性、低氚滞留等基本性能
- (2) 高熔点，高热导率
- (3) 低物理溅射和化学溅射
- (4) 优异的高温性能，以及抗热冲击性能

面向等离子体材料可大致分为低Z材料和高Z材料。低Z材料主要有石墨、碳纤维复合材料（CFC）、铍（Be）等，高Z材料主要是钨和钨合金等。其各自的优缺点如下表所示。

面向等离子体材料	优点	缺点
碳材料（石墨和C/C复合材料）	极好的抗热冲击能力、与等离子体具有良好的相容性、高热导率，耐高温	具有较高的化学溅射率和辐照升华率。吸气性，特别是对氚的存储量高。机械强度低，耐高温氧化性能差
铍材料	对等离子体的污染最低、低氚滞留、吸氧能力强、无化学溅射和热导率较高	熔点很低，约1284℃，无法承受等离子体的高温，而且其蒸汽压高、物理溅射较强而且本身有毒，抗热冲击性能有限
钨材料	高熔点（3683K）、高热导率（173W/m/k）、高溅射阈值、低氚滞留、低腐蚀速率、与等离子体具有良好的兼容性	脆性大、抗热冲击性能差、加工困难

材易通

钨因以上优点被公认为是核聚变反应堆最具有前途的一类面向等离子体材料（PFMs）。钨不仅被选作ITER偏滤器用材料，同时也被选作DEMO及未来聚变反应堆中第一壁及偏滤器部位的主要备选材料。

但钨作为面向等离子体材料的最大缺点就是其高脆性。钨的韧脆转变温度（DBTT）约为150~400℃；辐照脆性和再结晶脆性会进一步提高其DBTT，使其在服役过程中因温

度频繁跨越DBTT，极易发生脆性断裂。

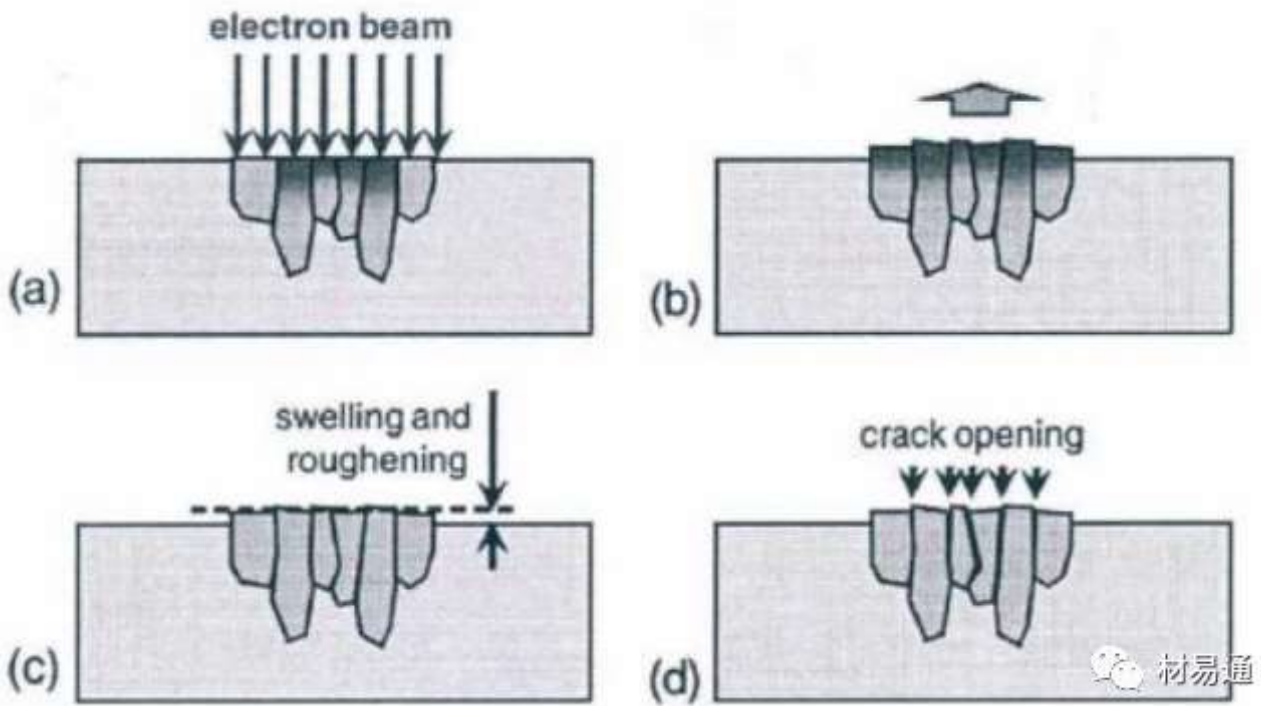


图 拥有各向异性组织的钨在瞬时电子束冲击下的反应示意图

03 新型结构材料

目前ODS钢、钒合金、碳化硅材料都存在一些局限，另外从更高辐照水平的示范堆（21世纪40年代）或商用原型电站（21世纪50年代）的要求看，ODS钢也不能满足需求。因此，聚变能长远的发展需求还需要研发其他先进的结构材料。复合块状非晶材料以及高熵合金在多个方面展现了优良的性能，是有潜力的候选材料。

1 非晶材料

非晶材料由于原子排列长程无序，短程有序，其物理、化学性能与晶体合金存在较大差异，在多方面存在优势，包括：

- ① 非晶材料没有韧脆转变温度，其动态断裂韧性随载荷速率增加而提高；
- ② 非晶合金原子无序排列，其抗辐照性能优于晶体合金；
- ③ 非晶合金具有极好的耐腐蚀性能；
- ④ 非晶材料与玻璃类似，存在超塑区间，可加热软化且易成型，从而解决了加工问题。

目前块状非晶材料的制备方法主要是铜模铸造法。然而，非晶材料也存在一些劣势，主要包括室温脆性以及应变软化，从而限制了其在结构材料中的应用。

2 高熵合金

多主元的特点导致高熵合金晶格畸变严重、高混合熵、高温相稳定，通过适当的合金成分调配，可获得高温蠕变性能好、抗腐蚀、抗氧化、高强度的适合于高温结构材料的高熵合金。2014年Science杂志报道了一种FeCoNiCrMn高熵合金，其断裂韧性优于大多数传统金属材料，断裂韧性在温度下降到液氮温度时仍保持稳定。美国橡树岭国家实验室Kiran Kumar等认为优良的力学性能及抗腐蚀性能使得高熵合金成为了极具潜力的裂变堆和聚变堆候选结构材料。他们还借助离子束对FeNiMnCr高熵合金进行了离子辐照，发现其具有特别好的抗辐照性能，超过了奥氏体不锈钢材料，进一步为高熵合金在聚变堆包层结构材料的应用提供了依据。

高熵合金作为日趋饱和的传统合金领域的一个突破方向，其种类之丰富、性能之优异，已吸引各国科研工作者为之努力。根据以前对高熵合金的研究成果，在此对其未来聚变堆结构材料领域的研究方向加以概述：

- ① 高熵合金普遍脆性较大，未来希望在合金的研制上实现在保证强度的基础上提高材料韧性。
- ② 当前，主要研究高熵合金的断裂韧性，其冲击韧性方面研究成果少见。
- ③ 由于高熵合金研究过程时间长，花费大，目前所涉及的模拟主要是热力学建模，所采用的方法大致有：第一性计算、分子动力学模拟和蒙特卡洛模拟，理论模拟方面也没有大的突破。所以也要重视在模拟仿真方面的研究，为试验的开展和研究方向提供更充分的理论依据。
- ④ 为了更好的开展研究，未来希望能丰富各种高熵合金体系的相图。



核聚变反应堆用结构材料研究进展

奥氏体不锈钢

奥氏体钢是一种常规的多相合金，其中无序固溶体奥氏体相为其主要相，镍和碳的存在使这种相结构更稳定。奥氏体不锈钢具有价格便宜，加工、焊接性能良好以及优异的韧塑性能和抗腐蚀性能等特点，工业生产和日常生活中用的是304不锈钢以及添加少量Mo元素，含Cr和Ni的量适当调整的316不锈钢。

对于聚变堆结构材料的研究一开始是关注于具有优良高温强度性能的奥氏体钢。后来发现奥氏体钢有很多不足，如热导率低、抗辐照肿胀性能差、不满足低活化要求，并且屈服强度较低，可能需要通过工艺优化和添加元素来提高，同时也对未来聚变堆新材料的开发提出了更高的要求。

RAFM钢

RAFM钢，简称低活化钢，是中国聚变工程实验堆（Chinese fusion engineering testing reactor，CFETR）和将来更高功率的商用聚变堆首选的第一壁/包层结构材料。经过几十年的发展，欧洲、日本、美国和中国等在内的很多国家开展了很多RAFM钢的研究，例如欧洲的EUROFER97，日本的F82H和JLF-1，美国的9Cr2WVTa，中国低活化马氏体（Chinalow activation martensitic，CLAM）钢。下表给出了各种RAFM钢的热处理工艺及组织特点，这是在基于优先满足低活化的前提下，并且考虑多种综合力学性能因素得出的结果。

表 多种RAFM钢热处理工艺及组织特点

材料	热处理	回火	微观组织
CLF-1	980 ℃, 45 min	740 ℃, 90 min	马氏体
F82H	1 040 ℃, 40 min	750 ℃, 60 min	马氏体
JLF-1	1 050 ℃, 60 min	780 ℃, 60 min	铁素体
EUROFER 97	980 ℃, 30 min	760 ℃, 90 min	马氏体
9Cr-2WVTa	1 050 ℃, 30 min	750 ℃, 60 min	马氏体

根据已有的研究结论可知，传统RAFM钢的理论工作温度范围在325~550℃，其中辐照诱导的硬化和脆化因素影响了其低温环境中使用，而热蠕变强度影响了其高温环境中的使用。经过更多后续深入的研究发现，传统的 RAFM 钢具有这些缺点：

550℃以上，材料的长时热时效问题及低蠕变强度的问题开始变的明显；在聚变中子辐照超过1~10dpa会出现非常严重的低温辐照脆化现象；辐照在25~50dpa上时，辐照肿胀程度会非常严重；与焊接相关的很多问题，焊接工艺苛刻，对热机械处理十分敏感。

总之RAFM钢高温强辐照环境下具有组织稳定性不足的缺点，力学性能急剧下降。除此之外，对于在控制 RAFM 钢中杂质含量方面也是一个很大的问题，所以在与之相关的很多中间环节都必须要做好保障，这些都需要后续研究者们的持续深入研究。

钒合金

对钒合金中主要合金元素和某些微量的杂质元素含量进行控制，通过优化钒合金的组成而得到期望的综合性能。反应堆中应用的钒合金中含有Nb和Mo这2种元素，会影响其低活化特性，因此，新型钒合金中应避免添加Nb和Mo。因此，同种原因Ag和Al的含量也应该被严格控制。已知添加 Cr 元素有利于钒合金高温强度的提高，且添加 Ti 可以用来吸收钒合金中的间隙杂质（主要是O）来变相增强材料的韧性。因此，需要准确控

制V_xCr-yTi 三系合金中Cr 和Ti 的含量。当Cr 和Ti 质量分数之和大于10%时，合金的脆性增加。下图是钒合金不同退火温度下DBTT。经过多年研究发现，V-4Cr-4Ti和V-5Cr-5Ti合金被认为是V-xCr-yTi3系合金中综合性能最好的材料。

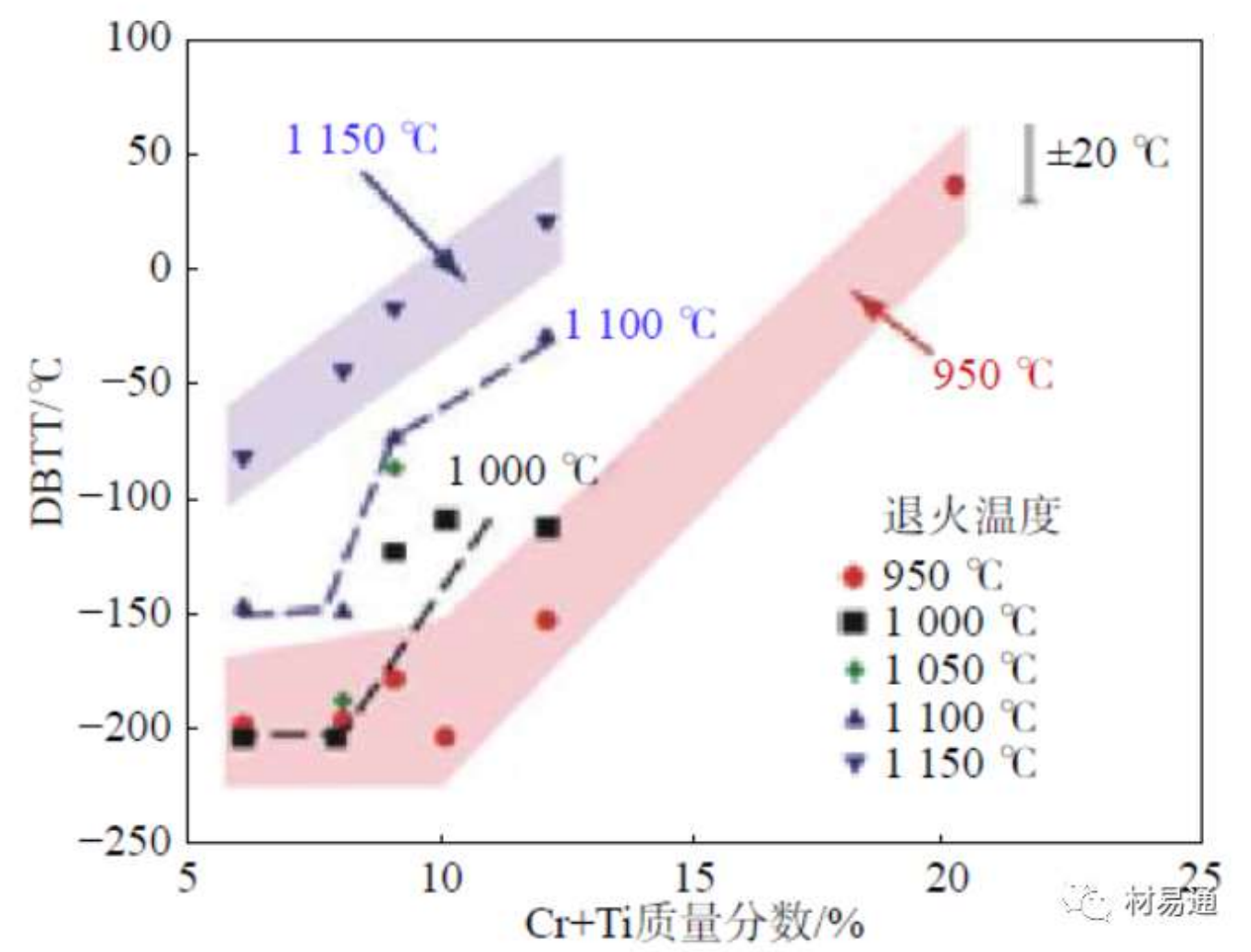


图 V-xCr-yTi合金不同退火温度下的DBTT

将钒合金作为聚变堆结构材料在应用方面存在以下缺点：不完善的工程实验数据；更高温度如750℃以上时出现材料性能迅速下降；嬗变产生的氦影响材料的力学性能以及抗辐照性能稳定性；辐照影响合金的断裂性能；工作环境下钒合金嬗变产生的高氢同位素具有滞留和渗透的特点，这会严重影响材料的力学性能表现。所以未来需要在高温力学、辐照和焊接性能等方面重点关注，来为合金后续的持续优化提供更多数据。

碳化硅复合材料

SiC纤维增强的SiC基陶瓷复合材料 (SiCf/SiC) 在核反应堆中的应用研究已持续了数十年，其最初的应用是在高温气冷反应堆中。尽管在300℃时辐照后样品的强度有所降

低，但是基底的断裂强度（由比例极限应力所测）在500℃和800℃辐照后变化不大。研究发现，当纯SiC和SiCf/SiC复合材料处于500 ~ 1 000℃这个温度范围，辐照剂量达到70dpa时仍然具有高的强度和良好的尺寸稳定性，甚至在1100℃时在液态 Pb-Li 中仍然具备优异的相容性。近些年的许多研究成果为SiC复合材料的后续发展解决了一些重要的可行性问题，这些都为接下来SiC复合材料的进一步发展提供了良好的理论和实践基础。

目前，SiCf/Si复合材料的制备工艺包括以下几种形式：先驱体浸渍裂解(polymer impregnation and pyrolysis, PIP)；化学气相渗透(chemical vapor infiltration, CVI)；纳米浸渍与瞬时共晶 (nanoinfiltrated transient eutectoid, NITE) 和反应浸渗 (reaction infiltration, RI)等。

经过大量研究发现，对于SiCf/SiC复合材料抗辐照性能的好坏主要是由材料的纯度和结晶度决定的。如果材料的纯度越低，结晶度越低，那么辐照越易出现结构缺陷，材料的抗辐照性能也越低；反之，纯度和结晶度越高，在辐照下的结构和性能的稳定性的就越好。下表为SiCf/SiC复合材料的几种制备工艺的优缺点比较。

表 SiCf/SiC复合材料制备工艺的优缺点		
制备工艺	优点	缺点
NITE	高致密度,高结晶度,高热导率,化学稳定性好,成本低	残余烧结助剂不可避免,在中子辐照下不稳定
CVI	能够得到高纯度、高结晶度的SiC基体	孔隙率高、致密度不均匀、制备周期长和成本高
PIP	SiC基体呈无定形结构,组成上非化学计量比,而且孔隙率高,适于制备大型异形构件以及低成本	采用聚碳硅烷作为先驱体,工艺存在孔隙率较高、生产周期较长
RI	复合材料致密度高,构件变形量小,易实现近净成型	基体中不可避免地存在有游离硅,使得材料的耐高温性能有一定程度的损失

通过对PIP、CVI、NITE和RI等这4种主要制备工艺进行分析可知，每种工艺均存在各自的优缺点。尤其针对核反应堆环境对SiC基体高结晶度、高纯度和高致密度的要求，迫切需要对传统制备工艺进行优化改进，使其制备SiCf/SiC复合材料各项性能指标达到核用标准。同时一定要加快研制发展新的制备工艺手段如NITE/PIP结合CVI工艺等，通过不断探索新的制备工艺方法来进一步提高SiCf/SiC复合材料的性能。

参考文献：

[1]张颖.《核聚变堆关键材料的强韧化研究》
[2]徐玉平.《核聚变堆包层结构材料研究进展及展望》
[3]徐杰.《核聚变堆用结构材料的研究进展》





材易通特色专辑

材料基因组	材料前沿时事动态	材料标准体系
金属材料的处理方法	材料试验与材料测试	金属的热处理
材料介绍及应用	各元素对金属材料的影响	金相专辑

声明：【未经许可，严禁公众号转载】。



www.mat.ai

材料数字化解决方案的领导者

更多详情 (点击)

收录于合集 #材料介绍及应用 59

上一篇

一文了解核裂变反应堆材料

下一篇

一文读懂高熵合金