

聚变反应堆钨基等离子体材料研究进展

赵乙楞¹, 雷鸣¹, 张旭¹, 冯勇², 赵勇^{1,3}

(1. 西南交通大学 材料先进技术教育部重点实验室 超导与新能源研究开发中心, 四川 成都 610031)

(2. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

(3. 福建师范大学 物理与能源学院, 福建 福州 350117)

摘要: 钨基材料具有高熔点、高热导率、蒸气压低、氚滞留量低等优良性能, 成为具有广阔应用前景的面向等离子体材料。由于其低温脆性、再结晶脆性和辐照损伤等方面的不足, 限制了其在工程上的应用, 成为国际核聚变材料界的研究热点。本文综述了钨基面向等离子体材料的研究现状, 阐述了钨材料在 4 类粒子辐照下所引起的损伤和当前钨材料改善性能常用的 4 类手段, 并对当下钨材料还需解决的问题进行探讨。

关键词: 聚变反应堆; 钨基等离子体材料; 钝化机制; 掺杂改性

中图分类号: TG146.4⁺11; TL34

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)09-3399-09

为了解决能源枯竭、资源短缺, 寻找可再生清洁能源迫在眉睫。核聚变堆反应所产生的核能由于具有可再生、污染小等优点而吸引了人们的注意。开发受控核聚变能是解决人类未来能源问题的重要途径, 而重中之重是解决聚变堆面向等离子体材料的研发问题。

面向等离子体材料(plasma facing materials, PFMs)是直接面向聚变反应堆高温等离子体, 用来保护聚变反应装置、保证聚变堆安全运行的材料, 主要应用于聚变堆的第一壁和偏滤器^[1,2]。在核聚变堆运行工作时, 其内部不断发生聚变反应并伴随产生高热粒子冲击和中子辐照, 因此直接面向等离子体的材料其表面需要承受极高的热冲击, 并在此过程中获得反应堆所产生的能量^[2,3]。面向等离子体材料在承受一定通量的等离子体流冲击后, 表面不仅会起泡、刻蚀, 产生熔化、开裂、蒸发等损伤现象^[2,4], 而且材料长时间承受高温冲击和辐照容易发生再结晶, 一旦再结晶行为发生, 材料的韧性降低、脆性大大增加, 等离子体部件的连接或者焊接界面产生裂纹并扩展的几率增大, 严重时甚至引起部件开裂, 影响聚变堆的安全运行^[4,5]。因此, 为了更好地利用这种核能, 保证聚变堆反应运行的安全性, 提高聚变反应堆面向等离子体材料的低温脆性和热稳定性是研发重点。

钨基材料的优缺点除摘要中所提到外, 还存在几点问题: 一是在瞬态热冲击作用下容易开裂^[6]; 二是抗热震性相对于其他面向等离子体材料较差^[7]; 三是等离子体

对钨杂质的容忍度较低, 容易引起物理溅射, 导致等离子体受到污染^[8]。钨基材料中的氚滞留量尽管是当前所有候选材料中最低的, 但仍不能满足于此, 还需对钨材料的氚滞留性能继续改善, 以便更好地控制反应堆中的氚吸收。此外, 钨材料受辐照所引起的表面损伤, 如破裂和熔化等, 会影响钨的使用年限。针对上述问题, 继续深入研究钨材料、解决其脆性和辐照损伤问题, 对未来核聚变反应堆装置材料的研发具有重要的科学意义。

1 国内外研究现状

1958 年, 我国开始了磁约束聚变的研究。2003 年, 我国加入了 ITER (国际热核聚变实验堆) 计划。2020 年 12 月 4 日, 中国环流器二号 M 装置(HL-2M)在成都建成并实现首次放电, 这标志着我国自主掌握了大型先进托卡马克装置的设计、建造和运行技术。

国内目前研究等离子体材料的机构及团队主要如下: 核工业西南物理研究院进行了大量研究并取得丰硕成果^[9-11]。中国科学院等离子体物理研究所王岩、庄清等^[12,13]主要对边界等离子体与第一壁材料相互作用进行实验和模拟研究, 研发用于未来聚变装置的第一壁材料/部件。

北京航空航天大学王占雷等^[14]采用沉积技术方法制备钨涂层取得积极进展。北京科技大学马昌纯团队^[15,16]研究聚变堆面向等离子体的钨涂层, 并在其热应力模拟、界面与涂层的结合强度等方面取得积极成

收稿日期: 2020-09-15

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(2019G010013); 国家重点研发计划(2017YFE0301306)

作者简介: 赵乙楞, 女, 1997 年生, 硕士生, 西南交通大学, 四川 成都 610031, E-mail: 1719593623@qq.com

果;周张健等^[17-19]在先进反应堆材料、纳米氧化物弥散强化合金及核聚变第一壁材料方面成果卓越。四川大学唐军等采用粉末冶金法研发出了具有纳米钾泡结构的钨钾合金块材,该材料在抗热冲击、耐等离子体辐照等方面表现出优异性能^[9,11,14]。合肥工业大学吴玉程等^[20-22]在钨材料的辐照损伤行为、钨中掺杂其他物质改性等方面成果显著;罗来马课题组^[23,24]研究核聚变钨材料与阻氙涂层,在钨材料辐照损伤与强韧化方面令人瞩目。徐州工程学院种法力等^[25-28]在核聚变用钨基复合材料抗瞬态高热负荷方面取得创新性成果。

国外研究等离子体材料的机构及团队主要在俄罗斯、美国、法国、德国和日本等国家。其中,俄罗斯的库尔恰托夫研究院、ITER DA、叶夫列莫夫电物理装备研究所及布德克核物理研究所等单位在国际热核聚变领域占有重要地位^[29-31],其核聚变能及聚变等离子体材料研究世界一流。

20 世纪 80 年代,美、法等国^[32-46]发起了国际热核实验反应堆(ITER)计划。其中,法国 CEA 聚变能研究所的 Richou、Diez 和 Missirlian 等人^[47-49]在 ITER 用钨分流器和 ITER 等离子体面向器件的疲劳寿命方面有可观进展。

德国马克斯·普朗克等离子体物理学研究所 Neu 等^[50-52]研究钨用作等离子体表面组件的高级散热材料、全钨分流器中的氙滞留以及升级主室第一壁钨的侵蚀和迁移;Greuner 等^[53-56]在新型高热流密度组件模型材料、喷射器样壁的等离子体表面材料、固体钨分流器等方面成绩斐然。德国尤利希能源和气候研究中心 Pintsuk 等^[57-60]研究了钨等离子体表面部件、氘等离子体和瞬态热载荷对钨等离子体表面材料性能的影响、钨等离子体表面材料工作温度极限的热机械计算、钨在高周期瞬态和稳态热负荷联合作用下的降解;Litnovsky 等^[61-63]在钨用作等离子体表面组件和等离子体表面钨合金的抗氧化性能等方面取得重要进展。

日本大阪大学的 Ueda 团队^[64-68]研究了钨等离子体材料表面的碳杂质行为、钨纤维增强钨复合材料的微观/宏观弹性性能和高 Z 材料用作等离子体表面组件,在聚变用钨材料领域占有一定地位。

尽管国内外在聚变用钨材料方面取得显著成就,但钨材料的韧脆转变温度高、再结晶脆性大、抗热冲击和抗辐照能力不足等问题仍需深入研究,下面将探讨钨材料受不同类型粒子的辐照机理和损伤行为。

2 辐照损伤

2.1 氦离子辐照

在聚变堆的运行过程中不断发生着氘氘聚变反

应,其中氦以百分之几到百分之十的浓度存在于聚变等离子体中,一旦氦原子撞击到面向等离子体的材料上,氦原子就会被强行俘获在材料的空位、位错及间隙原子等缺陷处,并随辐照时长聚集得越来越多,形成氦泡和间隙环^[69],改变材料表面形貌,导致材料表面起泡、局部剥落或熔化;而氦原子进入面向等离子体材料的晶粒内部后会引晶格畸变,使材料微观结构发生改变,严重时会产生独特的纳米丝状结构(fuzz),并以灰尘的形式释放出来,污染等离子体,使 PFMs 受到更强的侵蚀,从而使聚变堆的运行安全产生隐患^[70]。

Yu 等^[71,72]发现氦辐照后的钨薄膜表面存在高密度、大塑性变形的气泡,且材料的起泡主要受微观结构的影响。杨杞等^[73]发现钨材料经氦离子辐照后表面会生成纳米丝状结构(fuzz),该结构的尺寸、密度及分布与 He 离子的辐照能量、辐照剂量和温度有关。

2.2 氦离子辐照

钨基面向等离子体材料在聚变堆运行过程中会直接暴露在高通量的氢同位素(氢、氘和氚)离子辐照下,而氢原子在移动过程中被钨材料中的晶格缺陷所捕获会形成氦泡或缺陷团簇,尽管氦泡很难在空位之间自发聚集长大,但氢在钨空位中的捕获能很高,单个钨空位可容纳 12 个氢原子^[74]。随辐照时长的累积,大量氦泡聚集长大、向外推挤扩展,形成明显的鼓泡,引起材料的脆化和硬化^[70,75]。

钨中氢的扩散性质与低温下的氢扩散和缺陷有关,因为缺陷处捕获氢会阻滞氢的扩散,降低氢的扩散系数,而不同位置的杂质也会通过影响其复合速率或溶质扩散速率影响其氢滞留含量^[69]。大量的氢滞留将导致材料中高放射性库存,形成氘释放/扩散通道,使氘扩散至材料表面,对聚变反应堆的安全运行和关闭产生消极影响,但氦辐照所产生的氦灰和杂质元素能抑制钨表面缺陷的形成并降低氢同位素滞留总量^[76]。

2.3 中子辐照

高能量的聚变中子在聚变堆运行过程中会轰击面向等离子体材料的表面,并与其晶格原子产生级联碰撞、移位损伤和元素嬗变,导致孔洞、Frankel 对位错环等缺陷的产生,而缺陷引入会导致大量氢同位素被捕获,并形成氦泡、增加材料的氘(氚)滞留量^[70,73]。

经中子辐照后的钨基材料具有原子位移和核嬗变的特性,其显微结构和热机械性能均有所变化,会影响其使用寿命。因此,改善钨基材料抗中子辐照能力,可从其制备加工方法着手,如细化晶粒、调整晶向、控制显微组织、添加合金元素或第二相等。针对钨材料的辐照脆性问题,可考虑降低 DBTT 以抑制低温脆

化、提高再结晶温度以抑制再结晶脆化或提高高温强度以抑制高温区域的裂纹。解玉栋等^[76]发现钨材料经中子辐照产生损伤和氢同位素原子的注入是同时发生的, 2个物理过程有可能相互影响, 且中子辐照则在材料中引入大量缺陷导致氢同位素滞留量增多。Makoto等^[77]发现钨铼合金经中子辐照后会产生低密度的Os脆性析出相, 这些脆性析出相相对材料性能有着消极的影响。

2.4 重离子辐照

与氦离子、氢离子和中子辐照相比, 经重离子辐照后的钨基材料, 同样会产生位错环、孔洞和析出相等缺陷, 其损伤程度与其它离子辐照后相比更大^[78], 但优点在于重离子辐照注入的能量更高、辐照时间更短、辐照参数的控制更灵活、在辐照区域可原位观察^[79]。研究发现重离子辐照损伤程度越大, 材料内部捕获阱数量越多, 氦滞留量也随之增加^[80]。

3 改性手段

3.1 掺杂单质元素

钨基材料中钨含量越高, 脆性越大, 其抗热冲击与抗震性较差, 因此在钨基材料中添加一定量的单质合金元素不仅可以降低钨的含量, 改善其脆性、强度及热稳定性, 而且还能结合掺杂单质元素的不同特性来改善钨基材料抗辐照和抗热冲击等性能。目前, 国内外针对掺杂不同单质元素的钨基面向等离子体材料进行了大量的研究并取得积极的成果, 其中研究常用的单质元素有: K、Y、Ti、Cr、Zr、Fe、Ta、Re、Cu等^[81-101]。

K是聚变堆良好的导热剂。钾的延展性良好, 能抑制钨的再结晶, 改善低温脆化, 同时不影响纯钨的热扩散率和电导率等热力学性能。掺钾钨中的钾在烧结过程中挥发, 产生纳米级的钾原子气泡, 分散在晶粒间和晶界处, 钾泡弥散会增加晶粒间的钉扎力、阻碍晶界和位错的运动、抑制再结晶^[81]。与纯钨相比, 钾泡抑制了晶界迁移, 使得晶粒细化、韧性增强^[82], 掺钾钨抗中子辐照能力也更好。Wang等^[83]证实了钾泡的存在促进了独特燕尾拼接再结晶形貌的形成, 这是保证良好高温性能的关键。Guan等^[84]研究发现K-W棒材晶粒结构更细、更致密、晶粒尺寸更均匀分布, 其显微组织、拉伸性能、疲劳寿命和抗再结晶能力均比纯W材料更优良。

Y元素在钨晶粒内部容易生成氧化物, 其氧化物颗粒分布弥散、阻碍位错运动, 使得钨晶粒细化, 从而改善钨材料的强度、硬度及抗热冲击性能; Huang等^[85]研究发现钨材料的维氏硬度会随掺钇量的增加

而增加, 当掺Y量在0.05%~0.5%(质量分数)之间时, 材料的抗热冲击能力大幅度增强, 但超过1%时, 材料表面则会产生裂纹。Wegener等人^[86]证实了钇能抑制混合氧化物和孔隙, 并通过改变氧扩散来改善钨基合金的自钝化性能。

Ti密度小, 机械强度大, 有延展性, 易加工, 抗腐蚀性能良好, 在钨基材料中掺杂Ti不仅有助于改善材料的高温稳定性, 还能防止晶粒长大、改善材料抗He⁺辐照性能; 张玉翠等^[87]发现掺Ti不仅能改善钨基材料的烧结特性, 使得其致密度显著提高, 而且随掺Ti量的增加, 钨材料的抗氧化性、高温强度和韧性均有所改善。Chen等^[88]证实适量的钛掺杂使钨晶粒显著细化, 钨基合金的抗压强度提高了1倍。但过量的钛掺杂则会导致钨合金中反常的晶粒生长, 由于局部游离钛的缺乏还会引起钨晶界的熔化。Cao等^[89]基于第一性原理计算发现, 在钨晶格中引入低浓度的钛可增强氧原子的聚集, 提高钨材料的抗辐射性能。钛离子注入钨不会显著改变其表面微观结构, Catarino等^[90]发现W-Ti合金辐照后, 氦浓度会随Ti注入量的增加而增加, 在500℃时注入Ti的样品显示出约50%的氦保留率。制备纳米晶结构的钨材料能改善其氦滞留能力, Buzi等^[91]发现纳米晶粒结构的钨钛比非纳米晶钨钛具有更少的氦诱导气泡。

Re熔点高、机械性能优良, 掺入钨基材料, 与钨的间隙原子易于结合, 由于“铼效应”的存在, 还会形成固溶体改善钨的延展性。由于高温固溶强化和低温固溶软化效应, Re元素会降低其韧脆转变温度、提高再结晶温度和高温强度。由于增强了间隙原子和空位的复合能力, 还能抑制钨的辐照硬化。因此, Re是一种有研究前景的钨材料掺杂元素。Shotaro等^[92]证实了在钨中掺入3%的Re, 由于细晶强化和固溶强化效应, 其晶粒尺寸细化、强度和延伸率明显增加, 钨的拉伸和夏比冲击性能明显改善, 对再结晶的抑制也表现出积极作用。Makoto等^[93]在钨中添加3%的Re, 增加了纯钨的可变形性, 抑制了辐射硬化, 晶粒结构的稳定性和再结晶温度均有所提高。Re的掺入量在一定程度上将影响钨材料的抗再结晶性、热机械性能和抗中子辐照性。

Cu是面心立方结构, 熔点为1083℃, 热导率高、化学稳定性强、抗张强度大, 抗蚀性、可塑性、延展性良好。Autissier等^[94]发现钨材料的相对密度随温度和铜浓度的增加而增加。Chaubey等^[95]采用放电等离子烧结(SPS)制备W-Cu复合材料, 其梯度结构和层间界面清晰可见, 相对密度和硬度均随烧结温度的升高而增加, 且在1050℃烧结的样品在500MPa的压缩

载荷下没有形成任何裂纹。

Ta 的硬度适中, 富有延展性, 热膨胀系数低, 抗腐蚀性强, 掺入钨基材料有利于改善其致密度、抗拉强度及硬度。在较高温度下, 掺杂 Ta 元素的钨样品以晶界断裂为主, 存在“分层”机制, 裂纹会从样品缺口底部开始, 然后沿垂直于弯曲方向的试样长度扩展。杜靖元等^[96]制备研究了具有“钨-扩散层-钽”结构的钨钽复合材料, 由于位错在钽或扩散层中会扩展, 使得钨基材料中钨的失效方式从晶界脱粘转变为了解理断裂。

高温下的 Zr 能形成高熔点化合物, 降低杂质原子在钨晶界处的偏聚, 掺入钨基材料能使其强度和高温抗氧化性得到明显改善。谢卓明等^[97,98]研究发现 Zr 元素的掺杂会阻碍钨晶粒间的位错运动, 使材料的密度降低、硬度提高, 但随 Zr 掺杂量的增加, 钨基材料的强度和韧性会逐渐降低。

V 是体心立方结构的金属, 熔点很高, 延展性好, 在钨中掺入钒可提高其相对密度, 并增强其承受中子辐射的能力。Palacios 等^[99,100]研究发现掺入 V 的钨压坯, 晶粒细化明显、致密化程度随钒的加入而增加。由于钨钒固溶体形成填充了晶粒之间的孔隙, 使孔隙率显著降低。Jiang 等^[101]发现钨钒合金仍保持 bcc 结构, 其机械强度随钒原子浓度的增加而降低, 钒的掺杂能有效提高纯钨的延展性。

3.2 掺杂化合物

化合物掺杂钨基材料改性的原理主要是利用掺杂物质在钨晶粒或晶间的弥散强化效应来细化晶粒、抑制再结晶、阻碍位错运动和稳定晶界, 从而改善钨基材料的高温热力学性能^[102]。对于已掺杂研究的化合物主要是碳化物和氧化物。其中, 研究较多的碳化物包括: TiC、CNTs、ZrC、SiC、HfC、TaC 等^[103-131], 研究发现: TiC 能够提高合金的相对密度和维氏硬度, 阻碍钨晶粒的再结晶, 使合金的再结晶温度升高。当前国内外的研究人员对于掺杂 TiC 的钨基材料已进行了大量研究^[103-109], 研究发现随 TiC 掺杂量的增加, 钨基材料的晶粒尺寸变小, 热导率、导热系数和抗拉强度得到显著提高, 但在高温等离子体暴露期间, 随入射离子通量的增加, 碳化物沉淀物中捕获的氦浓度会随着溶质氦浓度的增加而增加。碳纳米管 (CNTs) 具有很高的化学活性, 机械强度高、导热性能优异。微量 CNTs 掺入钨合金可以充当有效的烧结添加剂, 促进钨原子沿晶界的扩散^[110]。张玉翠等^[87]研究发现同时掺杂 Ti 和 CNTs 能改善材料的烧结特性, 抑制钨晶粒长大, 显著提高材料的力学性能。掺杂 ZrC 的 W 合金具有高强度、高塑性、低韧脆转变温度、良好的高

温稳定性、优异的抗热震性和低 H/He 等离子体刻蚀性能。因为 ZrC 颗粒能抑制钨晶界的迁移, 细化晶粒尺寸^[112], ZrC 颗粒的掺杂能在不损失钨的强度和其他有利特性的情况下降低钨的非辐照韧脆转变温度^[111]。Liu 等^[113]证实了钨中掺入纳米级碳化钨颗粒会分布在钨晶粒内部, 不会在晶界处引起应力集中, 并通过钉扎和累积位错来提高钨的强度和延展性。

SiC 具有优异的强度、韧性、抗氧化性、抗热震性、耐高应力和高温性能, 是聚变反应堆中第一层包层和分流器的候选结构材料。由于碳化硅的热膨胀系数非常接近钨的热膨胀系数, 2 种材料成功连接的可能性非常大, 碳化硅已成为钨基复合材料的常用掺杂剂。目前国内外的研究团队针对掺 SiC 的 W 材料的研究已取得积极进展^[114-120]。HfC 具有很高的熔点 (3900 °C) 和较低的热导率, 它被认为是在高温下强化钨的最有效的第二相粒子之一, 国际上对于掺杂 HfC 的钨材料的研究已取得一批创新性成果^[121-128]。当 HfC 作为增强相掺入钨材料时, 既能提高高温强度, 又不降低延展性, 这种独特的性能使得 HfC 成为钨材料的热门掺杂相。TaC 熔点高、热稳定性良好, 纳米级 TaC 掺入钨材料时, 由于弥散强化效应, 能有效改善钨合金的机械强度和抗侵蚀性等。针对掺杂 TaC 改善钨材料性能的研究, 国内外已有部分研究团队率先取得优异成绩^[108,118,129,130]。

目前国内对于掺杂氮化物的钨基材料的研究较少, 主要是掺杂 TiN。合肥工业大学王爽^[131]通过机械球磨和 SPS 结合制备研究了 W-Ti-TiN 合金, 发现 Ti 和 TiN 同时掺入钨基材料, 其晶粒尺寸明显减小, 致密度、显微硬度和抗 He⁺辐照性能有所提高, 当 Ti 掺杂量为 4% (质量分数) 时, 材料的综合性能表现最优。

国内外掺杂研究较多的氧化物包括: Y₂O₃、La₂O₃、Lu₂O₃、Al₂O₃、CeO₂、SiO₂、ZrO₂ 等^[132-141], 研究发现: Y₂O₃ 掺杂于钨基材料时, 其作用与单质 Y 相差不多, 但区别在于掺杂 Y₂O₃ 对钨基材料的强化效果更为显著, 有利于抑制裂纹扩展, 但不能改变钨基材料中的杂质分布。Yar 等^[132]证实了 Y₂O₃ 颗粒的分散增强了钨材料的烧结性能。Zhao 等^[133]研究发现 W-Y₂O₃ 经热轧变形后具有较好的机械强度和韧性, 在抑制裂纹形成、抗熔化和抗再结晶方面表现优异。La₂O₃ 掺杂于钨基材料时会起到活化烧结、降低杂质偏析的作用, 晶粒生长在烧结过程中会受到抑制、晶粒细化, 强度有所提高, 材料的断裂方式有所改变, 由穿晶和沿晶混合断裂代替原来的穿晶解理断裂; 范景莲等^[134]研究发现, La₂O₃ 颗粒掺入钨材料后均匀弥散地分布在钨晶界与晶内, 阻碍钨晶粒的长大, 使钨合金的断

裂形式由原来的沿晶断裂转变为穿晶、沿晶共存的复合断裂形式; 钨材料的晶粒细化和强度会随 La_2O_3 掺杂量的增加而改善。

Lu_2O_3 粒子的掺杂在钨基材料抗热震性方面表现出良好的增强效果, 对氘的保留有良好的影响。Wang 等^[135]采用机械合金化结合 SPS 制备了掺杂 Lu_2O_3 的钨合金, 随掺杂量的增加, 钨合金的相对密度、显微硬度和强度随之增加, 热导率则逐渐降低。李洲等^[136]对掺杂 ZrO_2 的钨合金进行研究, 发现分布于钨晶界处的 ZrO_2 颗粒能细化钨晶粒、抑制晶粒长大。因此, 随 ZrO_2 掺杂量的增加, 钨晶粒尺寸减小, 绝对密度也随之下降, 但硬度和抗压强度不断提高。 CeO_2 对钨基材料的抗弯强度有积极影响, Lu 等^[137]研究发现当 CeO_2 掺杂量分别为 0, 0.25% 和 0.5% (质量分数) 时, 对材料抗弯强度和显微硬度的影响不明显, 但对抗弯强度有明显影响; 当掺 CeO_2 量增加到 1% 和 2% 时, 材料中则会存在大量气孔, 使其密度降低, 性能容易被破坏。

除上述化合物外, 研究人员还对掺杂 Al_2O_3 、 SiO_2 及 TiO_2 的钨基材料进行研究。掺杂 Al_2O_3 颗粒能细化钨晶粒的尺寸^[138], 且随 Al_2O_3 粒径的减小, 钨晶粒的平均粒径随之减小, 材料的静态抗拉强度和延伸率有所下降, 但抗拉强度和延伸率会增加。Sassi 等^[139]研究发现 SiO_2 纳米颗粒在钨基材料中分散均匀, SiO_2 的掺杂能改善 W 基合金的物理化学性能。而在钨中掺杂 TiO_2 , 钨晶粒同样有所细化, 材料的显微硬度明显提高^[140]。

针对多种化合物同时掺杂的钨基材料的研究, 合肥工业大学陈勇等^[141]研究发现 La_2O_3 和 TiC 同时掺入钨基材料, 改善了其硬度和弹性模量, 抗弯强度和断裂韧性得到提高。

3.3 添加纤维

上述已提到通过掺杂单质合金元素和化合物来改善聚变用钨材料的性能, 除此之外, 添加纤维制备纤维增韧钨基复合材料的研究也引起了科学学者的关注。常见的纤维主要包括碳纤维、陶瓷纤维和金属纤维 3 类, 而钨基材料中添加的纤维主要是由掺钾钨丝制成的钨纤维, 属于金属纤维, 具有熔点高、强度高、延展性和稳定性好的优点, 是钨基材料的理想增韧基体。

纤维增韧钨基复合材料, 其增韧机制主要是外源增韧, 它是依靠纤维与钨基体之间良好的浸润性与基体紧密结合, 钨纤维的存在能够克服钨在低温下的脆性行为, 通过晶粒细化和弥散强化等手段, 结合纤维的断裂、脱粘、拔出及桥接等机制来消耗冲击能、影响裂纹扩展途径, 从而使材料的脆性降低、韧性提高^[142,143]。

Riesch 等发现^[144]钨纤维在室温下的韧性变形会导致断裂能增加, 在脆化条件下钨纤维会表现出主动增韧

机制。Jasper 等^[145]发现钨纤维复合材料在室温下韧性和损伤容限很高, 其外在增韧机制能积极、稳定地抑制裂纹扩展。Neu 等^[152]发现钨纤维钨块十分致密, 虽然纤维变形, 但界面层仍完整。Tanure 等^[146]发现纯 W 材料的纤维织构随退火温度的升高会变得更加不均匀。

3.4 加工变形

加工变形主要通过轧制、锻造、扭转、挤压等手段, 改变钨晶粒尺寸、增加有利位向的织构取向和可动位错密度, 影响材料的变形比, 从而改善钨基材料的组织结构和断裂韧性等性能。经夏比冲击试验发现钨材料中分层撕裂状断口形貌具有层状增韧效果, 断裂表面能增加, 韧性得到明显改善^[147,148]。因此, 在钨基材料的制备过程中选择适合的加工变形工艺, 对于改善钨基材料的脆性、提高其韧性, 效果十分显著。

余明等^[149]发现原始轧制态组织对纯钨再结晶影响很大, 当退火温度相同时, 纯钨的变形量将决定再结晶的速度, 变形量越大则速度越快。宋鹏等^[150]证实了轧制过程中钨的变形量在很大程度上与其密度、维氏硬度和高温抗拉强度有关; 钨的维氏硬度和高温抗拉强度会随回复、再结晶和晶粒长大过程的发生而降低。

4 未来仍需解决的问题

低温脆性、再结晶脆性、DBTT 高、抗辐照能力不够是聚变用钨材料当前仍然需要解决的问题。通常, 体心立方结构的金属在温度低于韧脆转变温度的下临界值时, 会由韧性转变为脆性状态。钨作为体心立方结构的金属, 其 DBTT 高, 材料处于脆性状态的几率大。而长时间处于高温、高热载荷的钨, 晶粒长大、杂质富集, 容易发生再结晶, 增加材料的脆性。但目前国内外的研究还未能找到一种既有效改善韧性, 又不附加消极影响的方法, 未来对于改善钨韧性的研究可从细化晶粒、降低屈服强度、提高位错可动性和断裂表面能等方面入手。

本文在之前已提到不同高能粒子辐照所引起的损伤机理, 其中, 钨材料经氘氦辐照和中子辐照时, 高能粒子直接冲击到钨的表面, 既容易把钨打散, 又容易使钨表面起泡, 影响钨在聚变装置中的使用。因此, 改善钨材料抗辐照性能在很大程度上是推动聚变材料发展的关键一步。未来对于其抗辐照性能的改善, 可在不影响钨力学性能的情况下, 掺杂合适成分比的短衰期元素。

未来对于面向等离子体材料的研究可从热沉材料、结构材料与面向等离子体材料的连接问题出发, 考虑不同工艺及添加不同梯度过渡层对材料连接的影响, 并在此基础上制备达到聚变堆要求的厚钨涂层。

参考文献 References

- [1] Liu Feng(刘 凤), Luo Guangnan(罗广南), Li Qiang(李 强) *et al.* *China Tungsten Industry*(中国钨业)[J], 2017, 32(2): 41
- [2] Liu D G, Zheng L, Luo L M *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 765: 299
- [3] Ding Wenyi(丁文艺), He Haiyan(何海燕), Pan Bicai(潘必才). *Journal of Anhui Normal University, Natural Science*(安徽师范大学学报, 自然科学版)[J], 2014, 37(4): 314
- [4] Wu Yucheng(吴玉程), Yao Gang(姚 刚), Luo Laima(罗来马) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2018, 28(4): 719
- [5] Zhong Fali(种法力), Chen Yong(陈 勇), Yu Fuwen(于福文) *et al.* *Journal of Materials Science and Engineering*(材料科学与工程学报)[J], 2019, 37(6): 986
- [6] Qi Yanfei(齐艳飞), Wang Bo(王 波), Zhou Jingyi(周景一) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(6): 1945
- [7] Zhu Lingxu(朱玲旭), Yan Qingzhi(燕青芝), Lang Shaoting(郎少庭) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2012, 22(12): 3522
- [8] Huang Bo(黄 波), Yang Jijun(杨吉军), Tang Jun(唐 军) *et al.* *Nuclear Power Engineering*(核动力工程)[J], 2012, 33(S2): 101
- [9] Huang B, Chen L Q, Qiu W B *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2019, 520: 6
- [10] Lian Y Y, Feng F, Wang J B *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2019, 513: 241
- [11] Chen L Q, Huang B, Yang X L *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 780: 388
- [12] Wang Yan(王 岩), Zhang Xiyang(张西洋), Zhou Zili(周自波) *et al.* *Nuclear Fusion and Plasma Physics*(核聚变与等离子体物理)[J], 2021, 41(1): 85
- [13] Zhuang Qing(庄 清), Ming Tingfeng(明廷凤), Yu Yaowei(余耀伟) *et al.* *Nuclear Fusion and Plasma Physics*(核聚变与等离子体物理)[J], 2020, 40(3): 222
- [14] Wang Zhanlei(王占雷), Chen Changan(陈长安), Zhu Kaigui(朱开贵) *et al.* *Materials Protection*(材料保护)[J], 2018, 51(3): 93
- [15] Chen Anqi(陈安琦), Huo Wangtu(霍望图), Dong Longlong(董龙龙) *et al.* *Materials China*(中国材料进展)[J], 2021, 40(2): 152
- [16] Zhu Lingxu(朱玲旭), Guo Shuangquan(郭双全), Zhang Yu(张 宇) *et al.* *Materials Review*(材料导报)[J], 2011, 25(15): 42
- [17] Tan Jun(谈 军), Zhou Zhangjian(周张健), Qu Dandan(屈丹丹) *et al.* *Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2012, 22(03): 56
- [18] Tan Jun(谈 军), Zhou Zhangjian(周张健), Zhong Ming(钟 铭) *et al.* *China Tungsten Industry*(中国钨业)[J], 2012, 27(1): 40
- [19] Guo Shuangquan(郭双全), Ge Chanchun(葛昌纯), Feng Yunbiao(冯云彪) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(12): 2167
- [20] Wu Yucheng(吴玉程). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2019, 55(8): 939
- [21] Li Ping(李 萍), Lin Quan(林 泉), Zhou Yufeng(周玉峰) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2019, 55(4): 521
- [22] Wang Shuang(王 爽), Luo Laima(罗来马), Zhao Meiling(赵美玲) *et al.* *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2015, 39(8): 741
- [23] Liu Dongguang(刘东光), Zhang Li(张 力), Zheng Liang(郑亮) *et al.* *Metallic Functional Materials*(金属功能材料)[J], 2020, 27(3): 1
- [24] Yan Jun(严 俊), Liu Qingyuan(刘清元), Ye Xiaoqiu(叶小球) *et al.* *Transactions of Metals And Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2019, 40(11): 85
- [25] Zhong Fali(种法力), Zhou Zhangjian(周张健), Chen Junling(陈俊凌) *et al.* *Journal of Functional Materials*(功能材料)[J], 2018, 49(3): 3109
- [26] Zhong Fali(种法力). *Materials Review*(材料导报)[J], 2016, 30(7): 39
- [27] Zhong Fali(种法力). *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2012, 35(4): 12
- [28] Zhong Fali(种法力). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2010, 39(16): 82
- [29] Wang Bo(王 波). *Energy Research and Information*(能源研究与信息)[J], 2016, 32(4): 194
- [30] Xin Wen(辛 文). *Foreign Nuclear News*(国外核新闻)[J], 2003(9): 2
- [31] He Yi(何 译). *Foreign Nuclear News*(国外核新闻)[J], 1999(4): 27
- [32] Spencer A. *International Atomic Energy Agency*[J], 2005(2): 41
- [33] John G. *International Atomic Energy Agency*[J], 2001(1): 7
- [34] Abe K, Kohyama A, Namba C *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 1998, 258: 2075
- [35] Zinkle S J, Ghoniem N M. *Fusion Engineering and Design*[J], 2000, 51-52: 55
- [36] Garrison L M, Katoh Y, Geringer J W *et al.* *Fusion Science and Technology* [J], 2019, 75(6): 1
- [37] Hora H, Korn G, Eliezer S *et al.* *High Power Laser Science*

- and Engineering*[J], 2016(4): 1
- [38] Miley G H, Hora H, Kirchhoff G. *Journal of Physics: Conference Series*[J], 2016, 717(1): 012 095
- [39] Isaac P R, Mojtaba F F, Ahmadreza B *et al. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*[J], 2020, 36(9): 1
- [40] Meyer B J, Hsiao Y T, Che W C. *Biophysical Journal*[J], 2020, 119(1): 219
- [41] Dubiel K, Henry C, Spengelink L M *et al. Nucleic Acids Research* [J], 2020(11): 48
- [42] Abe Y, Johzaki T, Sunahara A *et al. High Energy Density Physics* [J], 2020, 36: 100 803
- [43] Christopher K, Yung C S. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2020, 153: 119 663
- [44] Sun X Y, Chen Z X, Sun S Y *et al. BioMed Research International*[J], 2020, 2020(22): 1
- [45] Thio Y, Hsu S, Witherspoon F *et al. Fusion Science and Technology*[J], 2019, 75(7): 581
- [46] Rolison L, Fensin M, Thio Y *et al. Fusion Science and Technology* [J], 2019, 75(6): 438
- [47] Richou M, Gallay F, Bösowirth B *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2019, 146: 858
- [48] Diez M, Firdaouss M, Richou M *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2019, 146: 800
- [49] Missirlian M, Bucalossi J, Corre Y *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2014, 89(7-8): 1048
- [50] Neu R, Maier H, Balden M *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2018, 511: 567
- [51] Neu R, Maier H, Balden M *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2017, 124: 450
- [52] Neu R, Riesch J, Müller A V *et al. Nuclear Materials and Energy*[J], 2017, 12(8): 1308
- [53] Adomas L, Barrett T R, Fursdon M *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2019, 146: 1657
- [54] You J H, Visca E, Barrett T *et al. Nuclear Materials and Energy*[J], 2018, 16: 1
- [55] Greuner H, Maier H, Balden M *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2013(1-3): 442
- [56] Greuner H, Maier H, Balden M *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2011(1-3): 417
- [57] Terra A, Sergienko G, Kreter A *et al. Nuclear Materials and Energy*[J], 2020, 25: 100 789
- [58] Pintsuk G, Antusch S, Weingaertner T *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2018, 72: 97
- [59] Pintsuk G, Blagoeva D, Opschoor J. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2013(1-3): 442
- [60] Pintsuk G, Loewenhoff T. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2013, 438: 945
- [61] Litnovsky A, Klein F, Schmitz J *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2018, 136: 878
- [62] Litnovsky A, Philipps V, Wienhold P *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2011, 415(1): 289
- [63] Litnovsky A, Wienhold P, Philipps V *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2009, 390(1): 556
- [64] Ueda Y, Fukumoto M, Yamawaki A *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2009, 390(1): 44
- [65] Ueda Y, Fukumoto M, Yoshida J *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2008, 386: 725
- [66] Ueda Y, Fukumoto M, Nishikawa M *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2007, 363(1-3): 66
- [67] Ueda Y, Funabiki T, Shimada T *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2005, 337(1-3): 1010
- [68] Ueda Y, Schmid K, Balden M *et al. Nuclear Fusion*[J], 2017, 57(9): 1
- [69] Liu Xiao(刘 晓), Ma Jimin(马纪敏), Guo Haibing(郭海兵). *High Power Laser and Particle Beams(强度光与粒子束)*[J], 2015, 27(1): 250
- [70] Ding Xiaoyu(丁孝禹), Luo Laima(罗来马), Huang Limei(黄丽枚) *et al. Chinese Journal of Rare Metals(稀有金属)*[J], 2015, 39(12): 1139
- [71] Yu J G, Han W J, Chen Z *et al. Fusion Engineering and Design* [J], 2018, 129: 230
- [72] Yu J G, Han W J, Chen Z *et al. Nuclear Materials and Energy* [J], 2017, 12: 588
- [73] Yang Qi(杨 杞). *Thesis for Master(硕士学位论文)*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016
- [74] Liu Changsong(刘长松), Wu Xuebang(吴学邦), You Yuwei(尤玉伟) *et al. Journal of Anhui Normal University, Natural Science(安徽师范大学学报, 自然科学版)*[J], 2016, 39(4): 3707
- [75] Luo Laimai(罗来马), Xu Mengyao(徐梦瑶), Zan Xiang(曾祥) *et al. Materials Review(材料导报)*[J], 2018, 32(1): 41
- [76] Xie Yudong(解玉栋), Yang Zhongshi(杨钟时), Pu Yangshouan(濮阳寿安) *et al. Transactions of Metals And Heat Treatment(材料热处理学报)*[J], 2019, 40(11): 30
- [77] Makoto F, Kiyohiro Y, Shuhei N *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2014(1-3): 455
- [78] Zhao Meiling(赵美玲). *Thesis for Master(硕士学位论文)*[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017

- [79] Li Junhong(李峻宏), Du Aibing(杜爱兵), Su Xiping(苏喜平) *et al. Annual Report of China Institute of Atomic Energy*(中国原子能科学研究院年报)[J], 2018 (1): 114
- [80] Tynan G R, Doerner R P, Barton J *et al. Nuclear Materials and Energy*[J], 2017, 12: 164
- [81] Nogami S, Akira H, Makoto F *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2020, 152: 111 445
- [82] Nogami S, Shotaro W, Reiser J *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2019,140: 48
- [83] Wang Y J, Yan Q Z. *Nuclear Materials and Energy*[J], 2020, 23: 100 744
- [84] Guan W H, Nogami S, Fukuda M *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2016, 109: 1538
- [85] He B, Huang B, Xiao Y *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016, 686: 298
- [86] Wegener T, Klein F, Litnovsky A *et al. Nuclear Materials & Energy*[J], 2016, 9: 394
- [87] Zhang Yucui(张玉翠). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015
- [88] Chen L Q, Qiu W B, Deng H *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2020, 90: 105 193
- [89] Cao Z L, Pan M, Hu K G *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2020, 158: 111 673
- [90] Catarino N, Dias M, Lopes J *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2018, 355: 143
- [91] Buzi L, Yeh M, Yeh Y W *et al. Nuclear Materials and Energy*[J], 2019, 21: 100 713
- [92] Shotaro W, Nogami S, Reiser J *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2019, 148: 111 323
- [93] Makoto F, Nogami S, Kiyohiro Y *et al. Fusion Science and Technology*[J], 2015, 68(3): 690
- [94] Autissier E, Richou M, Minier L *et al. Fusion Engineering & Design*[J], 2015, 98-99: 1929
- [95] Chaubey A K, Rajat G, Rohit K *et al. Fusion Engineering and Design*[J],2018,135:24-30
- [96] Du Jingyuan(杜靖元). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Wuhan: Huazhong University of Technology, 2017
- [97] Xie Zhuoming(谢卓明). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017
- [98] Xie Z M, Liu R, Fang Q F *et al. Plasma Science and Technology*[J], 2015, 17(12): 1066
- [99] Palacios T, Monge M A, Pastor J Y. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2016, 54: 433
- [100] Palacios T, Pastor J Y. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*[J], 2016, 54: 159
- [101] Jiang D Y, Zhou Q, Liu W H *et al. Physica B Condensed Matter*[J], 2019, 552: 165
- [102] Zhang Tao(张涛), Yan Wei(严玮), Xie Zhuoming(谢卓明) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2018, 54(6): 831
- [103] Shi K, Huang B, He B *et al. Nuclear Engineering and Technology*[J], 2019, 51(1):190
- [104] Shi K, Huang B, He B *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2017, 122: 223
- [105] Luo L M, Chen J B, Chen H Y *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2015, 90: 62
- [106] Liu X, Chen J M, Lian Y Y *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2013, 442(1-3): S309
- [107] Hou Q Y, Ma X Y, Lu R C *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2018, 358: 796
- [108] Mikhail Z, Kirill B, Matej M *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2017, 494: 211
- [109] Tejado E, Martin A, Pastor J Y. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2019, 514: 238
- [110] Sha J J, Hao X N, Li J *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2014, 455(1-3): 573
- [111] Yin C, Terentyev D, Zhang T *et al. Journal of Nuclear Materials*[J],2020,537:152226
- [112] Zhang T, Wang Y K, Xie Z M *et al. Nuclear Materials and Energy*[J], 2019, 19: 225
- [113] Liu R, Xie Z M, Yao X *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2018, 76: 33
- [114] Zhang C C, Shen Q, Zhang J *et al. Ceramics International*[J], 2020, 46(7): 9714
- [115] Zhuo L C, Zhang Q Q, Zhang Y H *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2020, 538: 152 220
- [116] Kang K J, Tu R, Luo G Q *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 767: 1064
- [117] Li H X, Takaaki K, Hu X X *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2019, 367: 1
- [118] Wang Z T, Steven D C, Tsai D S *et al. Ceramics International*[J], 2019, 45(17): 22292
- [119] Lee D J, Heesub P, Ryu H J *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2011, 509(37): 9060
- [120] Kishimoto H, Shibayama T, Shimoda K *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2011, 417(1-3): 387
- [121] Wang Y K, Xie Z M, Wang M M *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2019, 81: 42
- [122] Wang Y K, Miao S, Xie Z M *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2017, 492: 260

- [123] Lee D J, Malik A U, Ryu H J *et al.* *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2014, 43: 89
- [124] Lee D J, Umer M A, Ryu H J *et al.* *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*[J], 2014, 44: 49
- [125] Zhang J, Tian Y, Zhu J W *et al.* *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2020, 86: 105 096
- [126] Zafar I, Nesar M, Saheb N *et al.* *Tribology International*[J], 2017, 116: 129
- [127] Fujitsuka M, Mutoh I, Tanabe T *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2002, 307-311(1): 426
- [128] Akeem Y A, Zafar I, Fadi A *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2019, 8(1): 436
- [129] Xie M, Miao S, Zhang T *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2018, 501: 282
- [130] Miao S, Xie Z M, Zeng L F *et al.* *Nuclear Materials and Energy*[J], 2017, 13: 12
- [131] Wang Shuang(王爽). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017
- [132] Yar M A, Wahlberg S, Bergqvist H *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2011, 412(2): 227
- [133] Zhao M Y, Zhou Z Z, Zhong M *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2016, 470: 236-243
- [134] Fan Jinglian(范景莲), Zhou Qiang(周强), Han Yong(韩勇) *et al.* *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程)[J], 2014, 19(3): 439
- [135] Wang S, Zhang J, Luo L M *et al.* *Powder Technology*[J], 2016, 301: 65
- [136] Li Zhou(李洲). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017
- [137] Lu Z L, Luo L M, Chen J B *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 626: 61
- [138] Wang Xing(王星), Li Shukui(李树奎), Wang Yingchun(王迎春) *et al.* *Journal of Nanjing University*(南京大学学报)[J]. 2009, 45(2): 304
- [139] Sassi W, Dhouibi L, Berçot P *et al.* *Applied Surface Science*[J], 2015, 324: 369
- [140] Karunakaran M, Pugazh V M. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2019, 475: 359
- [141] Chen Yong(陈勇), Wu Yucheng(吴玉程), Yu Fuwen(于福文) *et al.* *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2008, 31(1): 47
- [142] Liu L X, Li X C, Chen Y C *et al.* *Tungsten*[J], 2020, 2(1): 3
- [143] Chen Hongyu(陈泓谕), Luo Laima(罗来马), Tan Xiaoyue(谭晓月) *et al.* *Mechanical Engineering Materials*(机械工程材料)[J], 2015, 39(8): 10
- [144] Riesch J, Aumann M, Coenen J W *et al.* *Nuclear Materials and Energy*[J], 2016, 9: 75
- [145] Jasper B, Schoenen S, Du J *et al.* *Nuclear Materials and Energy*[J], 2016, 9: 416
- [146] Tanure L, Terentyev D, Nikolić V *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2020, 537: 152 201
- [147] Wu Yucheng(吴玉程). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2019, 55(2): 171
- [148] He Pei(何培), Yao Weizhi(姚伟志), Lv Jianming(吕建明) *et al.* *Journal of Functional Materials* (功能材料)[J], 2016, 47(8): 8064
- [149] Yu Ming(余明), Wang Kang(王康), Zan Xiang(竺祥) *et al.* *Transactions of Metals And Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2017, 38(7): 50
- [150] Song Peng(宋鹏), Liu Guohui(刘国辉), Wu Cheng(吴诚) *et al.* *Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2016, 34(5): 323

Research Progress of Tungsten-Based Plasma Materials in Fusion Reactors

Zhao Yiluo¹, Lei Ming¹, Zhang Xu¹, Feng Yong², Zhao Yong^{1,3}

(1. Key Laboratory of Advanced Technology of Materials, Superconductivity and New Energy R&D Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(2. Western Superconducting Materials Technology Co., Ltd, Xi'an 710018, China)

(3. College of Physics and Energy, Fuzhou Normal University, Fuzhou 350117, China)

Abstract: Tungsten-based materials with high melting point, high thermal conductivity, low vapor pressure and low tritium retention have become plasma oriented materials with broad application prospects. Due to its shortcomings in low temperature brittleness, recrystallization brittleness and irradiation damage, its application in engineering is limited, and it has become a research hotspot in the field of nuclear fusion materials. In this paper, the research status of tungsten-oriented plasma-oriented materials was reviewed, the damage caused by four kinds of particle irradiation and four kinds of commonly used methods to improve the properties of tungsten materials were described, and the problems that need to be solved were also discussed.

Key words: fusion reactor; tungsten-based plasma material; toughening mechanism; doping modified

Corresponding author: Lei Ming, Associate Researcher, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China, E-mail: mlei@home.swjtu.edu.cn