



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116153532 B

(45) 授权公告日 2023. 07. 25

(21) 申请号 202310436716.5

(22) 申请日 2023.04.23

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 116153532 A

(43) 申请公布日 2023.05.23

(73) 专利权人 中国科学院合肥物质科学研究院  
地址 230031 安徽省合肥市庐阳区三十岗  
乡古城路181号

(72) 发明人 宋云涛 胡建生 左桂忠 曹斌  
吴金华 侯吉磊 元京升 陈跃  
余耀伟 黄明 龚先祖

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责  
任公司 11251  
专利代理师 江亚平

(51) Int. Cl.

G21B 1/15 (2006.01)

G21B 1/11 (2006.01)

G21B 1/13 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 113035378 A, 2021.06.25

胡建生 等. 磁约束核聚变装置等离子体与  
壁相互作用研究简述. 中国科学技术大学学报  
. 2020, 第50卷(第9期), 第1193-1217页.

郑永真 等. 托卡马克等离子体破裂的缓解  
和预报研究. 核聚变与等离子体物理. 2009, (第  
02期), 第104-110页.

审查员 贺云鹏

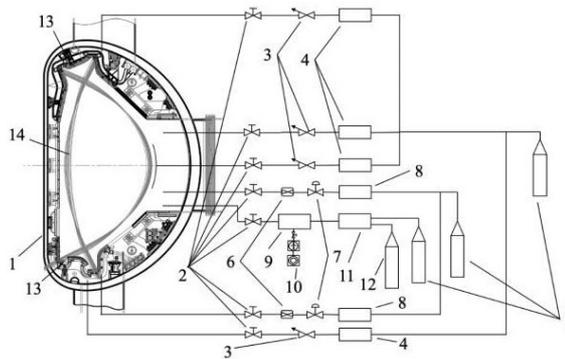
权利要求书1页 说明书4页 附图1页

## (54) 发明名称

一种满足千秒长脉冲等离子体放电的协同  
加料系统及方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种满足千秒长脉冲等离子体放电的协同加料系统及方法, 包括有普通充气系统、超声分子束注入系统、弹丸注入系统、聚变装置、波天线充气口、偏滤器、等离子体。本发明利用布置于聚变装置不同位置的普通充气系统、超声分子束注入系统、弹丸注入系统, 在磁约束聚变装置内进行氘氘等离子体放电, 通过在聚变装置等离子体建立及维持阶段不同时刻、不同位置、不同加料方式的协同作用, 满足聚变装置千秒量级稳定的密度控制、波耦合所需的边界等离子体参数调节、偏滤器热流的有效控制的需求。



1. 一种满足千秒长脉冲等离子体放电的协同加料方法,其特征在于:采用的满足千秒长脉冲等离子体放电的协同加料系统包括普通充气系统、超声分子束注入系统、冰弹丸注入系统、聚变装置、偏滤器和等离子体;所述普通充气系统布置于聚变装置的中平面位置、波天线附近、偏滤器靶板位置,利用压电阀进行充气流量调节;所述超声分子束注入系统布置于聚变装置的中平面及偏滤器区域,利用拉瓦尔喷嘴进行快速充气;所述冰弹丸注入系统布置于聚变装置的中平面,用于冰弹丸的制备和加速推动;所述聚变装置为磁约束聚变反应装置,所述波天线充气口为低杂波与离子回旋波天线附近的充气口,所述偏滤器用于排出聚变炉灰,所述等离子体整体呈电中性;

在聚变装置千秒长脉冲等离子体放电过程中,利用中平面的普通充气系统建立起等离子体,利用在低杂波及离子回旋波天线附近的普通充气系统调节天线附近刮削层的等离子体的参数,进而提高低杂波和离子回旋波的耦合效率,通过超声分子束注入系统对等离子体密度进行反馈控制,通过高速的冰弹丸注入系统对等离子体进行芯部加料,利用偏滤器位置的普通充气系统及超声分子束注入系统进行偏滤器热流的反馈控制;通过不同位置、不同种类、不同时刻加料方式的协同工作形成协同加料,实现聚变装置千秒量级稳定的密度控制、低杂波和离子回旋波的有效耦合和偏滤器热流的有效控制;

所述的协同加料为不同时刻等离子体加料的协同,利用普通充气系统注入等离子体放电所需的第一口气,建立千秒量级等离子体密度;在等离子体密度建立以后,利用加料效率更高的超声分子束注入系统进行加料,维持等离子体密度,同时利用冰弹丸注入系统,实现芯部加料,建立并维持更高的等离子体密度。

2. 根据权利要求1所述的一种满足千秒长脉冲等离子体放电的协同加料方法,其特征在于:所述普通充气系统包括燃料钢瓶、稳压罐、压电阀、隔断阀;普通充气系统实现等离子体的预充气、等离子体边界参数调节以改善波耦合效率、偏滤器的热流控制。

3. 根据权利要求1所述的一种满足千秒长脉冲等离子体放电的协同加料方法,其特征在于:所述超声分子束注入系统包括燃料钢瓶、配气箱、电磁阀、拉瓦尔喷嘴、隔断阀;所述的超声分子束注入系统分别实现等离子体的密度的反馈控制以及偏滤器的热流快速缓解。

4. 根据权利要求1所述的一种满足千秒长脉冲等离子体放电的协同加料方法,其特征在于:所述冰弹丸注入系统包括燃料钢瓶、弹丸注入器、推进气体钢瓶、扩散室、抽气机组、经过隔断阀。

5. 根据权利要求1所述的一种满足千秒长脉冲等离子体放电的协同加料方法,其特征在于:所述的协同加料为边界与芯部等离子体加料方法的协同,利用普通充气系统实现边界的加料,调节等离子体刮削层区域、波天线附近等离子体的密度及温度,改善低杂波和离子回旋波的耦合效率;利用超声分子束注入系统注入气体反馈控制等离子体的密度,并实现千秒量级等离子体密度台基区域附近的加料需求;利用冰弹丸注入系统实现千秒量级等离子体台基区域以内的芯部加料需求。

## 一种满足千秒长脉冲等离子体放电的协同加料系统及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及聚变反应堆领域,主要涉及一种满足千秒长脉冲等离子体放电的协同加料系统及方法。

### 背景技术

[0002] 由于在资源、安全和清洁等方面的突出优点,核聚变能源是人类社会未来的理想能源。托卡马克类型磁约束聚变装置具有实现聚变能利用的科学可行性,是有可能首先实现聚变能商业化的途径。

[0003] 对未来聚变堆而言,聚变能的产出正比于等离子体的密度、燃烧时间等参量,因此获得长时间尺度高密度运行等离子体对于聚变堆商业化运行至关重要,其核心的关键科学技术问题包括:1)高密度等离子体的获得集成方法与稳态维持;2)磁约束聚变装置与稳态高密度等离子体兼容的边界热流控制解决方案。当前及未来的聚变装置主要的加料方法包括:普通充气、超声分子束注入及弹丸注入。其中普通充气利用稳压罐、充气管道、隔断阀、压电阀及规管等,实现对聚变装置的充气和充气流量的监测;充气位置可以布置于聚变装置的高场侧、低场侧及偏滤器区域,满足不同位置的等离子体加料和偏滤器热流控制需求。普通充气的方式是一种传统的加料方式,由于压电阀响应时间约2ms,背压低、充气管道长导致的延时时间一般在20-100ms,且随着装置尺寸的增加,延时时间进一步延长。超声分子束注入是利用高压的亚声速气体通过拉瓦尔喷嘴膨胀后注入真空区,形成注入速度在400~1200m/s之间的超声分子束流,由于电磁阀响应时间约160微秒,注入速度快,其延时时间一般较短,约2-20ms。超声分子束注入是一种良好的加料及密度维持方法,加料效率是普通充气的大约2倍,是一种有效的加料方式,但是对未来聚变堆高参数运行,其加料深度相对较浅,使用也大大受限。弹丸注入系统将聚变燃料氘、氚等制成冰丸,并通过气体推进或离心加速的方式注入到等离子体,具有响应时间快,注入速度可达到每秒数千米。相比而言,弹丸注入是理想的芯部加料方式,但是对聚变装置稳态运行而言,弹丸加料引起的密度扰动较大,难以单独实现等离子体密度的稳态维持。

[0004] 对于聚变装置千秒量级稳态等离子体运行,难以采用单一的方式解决包括高密度等离子体的建立与稳态维持、芯部与边界加料协同控制的难题,无法同时满足边界等离子体参数调节改善波耦合效率及偏滤器热流协同控制的需求,因此,亟需探索一种适用于聚变装置千秒量级高参数等离子体运行的协同加料方法,解决高密度等离子体获得与稳态维持、等离子体芯部与边界加料共同控制的难题。

### 发明内容

[0005] 为了弥补长脉冲高参数等离子体放电已有加料技术的缺陷,本发明提供一种满足超导托卡马克千秒量级长脉冲等离子体放电的协同加料系统及方法,以解决磁约束聚变装置内高密度等离子体获得与稳态维持、芯部与边界加料协同控制的问题。

[0006] 本发明是通过以下技术方案实现的:

[0007] 一种满足千秒长脉冲等离子体放电的协同加料系统,包括普通充气系统、超声分子束注入系统、冰弹丸注入系统、聚变装置、波天线充气口、偏滤器、等离子体。普通充气系统是利用压电阀作为充气流量调节的系统,布置于聚变装置的中平面位置、波天线附近、偏滤器靶板位置,作为等离子体密度建立、改善边界等离子体参数、提高波耦合效率以及偏滤器热流缓解的手段;超声分子束注入系统是利用拉瓦尔喷嘴进行快速充气的系统,布置于聚变装置的中平面及偏滤器区域,用于等离子体密度的维持与偏滤器热流快速缓解;冰弹丸注入系统是弹丸的制备、加速推动系统,布置于聚变装置的中平面,用于芯部等离子体加料获得高密度等离子体;聚变装置为磁约束聚变反应装置,偏滤器为聚变装置的核心部件,在磁约束聚变装置内进行氘氦等离子体放电,其中偏滤器为等离子与器壁强相互作用区域,承受极高的热负荷。

[0008] 满足托卡马克聚变装置千秒量级长脉冲加料方式主要包括三种:普通充气的方式是一种传统的加料方式,气体注入到聚变装置内的速度小,延时时间长,一般在20-100ms,随着装置尺寸的增加,延时时间进一步延长;超声分子束注入是利用高压的亚声速气体通过拉瓦尔喷嘴形成注入速度在400~1200m/s之间的超声分子束流,注入速度快,延迟时间为2-20ms,加料效率是普通充气的大约2倍,是一种有效的加料方式;冰弹丸注入是将聚变燃料氘、氦等制成冰丸,并通过气体推进或离心加速的方式注入到等离子体,具有响应时间快,注入速度可达到每秒数千米。

[0009] 所述的协同加料方法为边界与芯部等离子体加料方法的协同,利用普通充气方式实现边界的加料,调节等离子体刮削层区域、波天线附近等离子体密度及温度,改善波的耦合效率;利用超声分子束注入气体的速度快、扰动小的特点,反馈控制等离子体的密度,并实现等离子体台基区域附近的加料需求;利用冰弹丸注入实现等离子体台基区以内芯部加料的需求。

[0010] 所述的协同加料方法为不同时刻等离子体加料的协同,利用普通充气注入等离子体放电所需的第一口气,实现等离子体击穿、建立千秒量级等离子体密度;在密度建立以后,利用加料效率更高的超声分子束注入进行加料,维持等离子体密度,同时利用弹丸加料的方式,实现千秒量级等离子体芯部加料及进一步建立更高的等离子体密度。

[0011] 所述的协同加料方法为同时满足等离子体密度控制及偏滤器热流控制需求的加料方式,利用聚变装置中平面位置的普通充气、超声分子束注入及冰弹丸注入,实现密度控制的需求;利用偏滤器位置的普通充气及超声分子束注入的方式,满足不同时间尺度偏滤器极高热负荷控制的需求,实现密度及热流可控的长脉冲等离子体放电。

[0012] 本发明的有益效果是:采用普通充气、超声分子束注入、弹丸注入三种加料方式的优点,在长脉冲等离子体放电的不同时刻、不同位置采用不同种类的加料方式,利用普通充气的方式建立起等离子体,同时调节波天线附近刮削层等离子的参数,提高波的耦合效率;通过超声分子束注入对等离子体密度进行反馈控制,通过高速的冰弹丸注入对等离子体进行芯部加料,满足高密度等离子体运行的需求。利用偏滤器位置的普通充气及超声分子束注入进行偏滤器热流的反馈控制;通过不同加料方式的协同作用,实现聚变装置千秒量级稳定的密度控制、边界等离子体参数调节、偏滤器热流的有效控制等。

[0013] 本发明提供了一种有效地解决聚变装置长脉冲稳态运行条件下加料的方法,通过不同种类加料方式协同作用,为未来聚变堆中稳态高参数运行提供一种新方法。

## 附图说明

[0014] 图1是本发明的一种满足千秒长脉冲等离子体放电的协同加料系统结构示意图。

[0015] 图2是本发明的一种满足千秒长脉冲等离子体放电的协同加料方法示意图。

[0016] 图中:聚变装置1、隔断阀2、压电阀3、稳压罐4、燃料钢瓶5、拉瓦尔喷嘴6、电磁阀7、配气箱8、扩散室9、抽气机组10、弹丸注入器11、推进气体钢瓶12、偏滤器13、等离子体14、千秒量级等离子体密度15、普通充气系统16、超声分子束注入系统17、冰弹丸注入系统18。

## 具体实施方式

[0017] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整的描述,显然,所描述的实施例仅为本发明的一部分实施例,而不是全部的实施例,基于本发明中的实施例,本领域的普通技术人员在不付出创造性劳动的前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明的保护范围。

[0018] 如图1,图2所示,本发明的一种满足千秒长脉冲等离子体放电的协同加料系统包括普通充气系统、超声分子束注入系统、弹丸注入系统、聚变装置1、波天线充气口、偏滤器13、等离子体14。

[0019] 所述的普通充气系统是利用压电阀3作为充气流量调节的系统,所述的超声分子束注入系统是利用拉瓦尔喷嘴6进行快速充气的系统,所述的弹丸注入系统是弹丸的制备、加速推动系统,所述的聚变装置1为磁约束聚变反应装置,所述的波天线充气口为低杂波与离子回旋波天线附近的充气口,所述的偏滤器13为排出聚变炉灰的部件,所述的等离子体14为整体呈电中性的物质状态。所述的偏滤器13为聚变装置1真空室内的关键部件,所述的等离子体14是在聚变装置1内进行的,偏滤器13是与等离子体14强相互作用部件,所述的隔断阀2是普通充气系统16、超声分子束注入系统17、冰弹丸注入系统18与聚变装置1的隔离阀门。所述的压电阀3位于普通充气系统16的管路上,控制注入气体的脉冲时间和注入速率;所述的稳压罐4布置于普通充气系统16管路中;所述的燃料钢瓶5布置于普通充气系统16、超声分子束注入系统17、冰弹丸注入系统18上,提供燃料气体;所述的拉瓦尔喷嘴6、电磁阀7、配气箱8是超声分子束注入系统17主要组成部分,布置于其管路上;所述的扩散室9、抽气机组10、弹丸注入器11、推进气体钢瓶12是冰弹丸注入系统18主要组成部分,布置于其管路中。

[0020] 在聚变装置千秒长脉冲等离子体放电过程中,利用中平面的普通充气系统16建立起等离子体14,利用在低杂波及离子回旋天线附近的普通充气系统16调节天线附近刮削层的等离子体14的参数,进而提高波的耦合效率,通过超声分子束注入系统17对等离子体14密度进行反馈控制,通过高速的冰弹丸注入系统18对等离子体14进行芯部加料,利用偏滤器位置的普通充气系统16及超声分子束注入系统17进行偏滤器13热流的反馈控制;通过不同位置、不同种类、不同时刻加料方式的协同工作,实现聚变装置千秒量级稳定的密度控制、波的有效耦合、偏滤器热流的有效控制等。

[0021] 如图2所示,本发明的一种满足千秒长脉冲等离子体放电的协同加料方法包括获得千秒量级等离子体密度15,普通充气系统16进行普通充气、超声分子束注入系统17进行超声分子束注入和冰弹丸注入系统18进行冰弹丸注入。所述的千秒量级等离子体密度15由普通充气系统16在等离子体14放电前预充气击穿获得,然后由超声分子束注入系统17对等

离子体密度进行反馈控制,通过冰弹丸注入系统18进行芯部加料,提升加料效率和等离子体密度,建立更高的密度。所述的等离子体14是在聚变装置1内进行的,所述的偏滤器13是聚变装置1与等离子体14作用的关键部件;所述的普通充气系统16包括聚变装置1中平面位置的等离子体14放电预充气系统、波天线充气口充气系统、上下偏滤器充气系统,主要由隔断阀2、压电阀3、稳压罐4、燃料钢瓶5组成;所述的超声分子束注入系统17包括两部分,分别位于聚变装置1中平面位置和偏滤器13区域,主要由隔断阀2、燃料钢瓶5、拉瓦尔喷嘴6、电磁阀7、配气箱8组成;所述的冰弹丸注入系统18布置于聚变装置1中平面位置,由隔断阀2、燃料钢瓶5、扩散室9、抽气机组10、弹丸注入器11、推进气体钢瓶12组成。

[0022] 所述的关键加料方式之一的普通充气系统16的工作过程为:注入气体从燃料钢瓶5进入到稳压罐4,通过压电阀3控制注入气体的脉冲时间和注入速率,经过开启的隔断阀2进入到聚变装置1,完成供气;实现普通充气系统16的系统分别布置于聚变装置1的中平面位置、波天线附近、上下偏滤器等区域,实现等离子体14的建立预充气、等离子体14边界参数调节改善波耦合效率、偏滤器13的热流控制等。

[0023] 所述的关键加料方式之二的超声分子束注入系统17的工作过程为:高压的注入气体通过燃料钢瓶5进入到配气箱8,通过响应时间较快的电磁阀7进行脉冲时间和注入频率的调控,气体通过拉瓦尔喷嘴6进行加速,高速通过隔断阀2进入到聚变装置1内部的等离子体14;所述的超声分子束注入系统17包括两部分,分别位于聚变装置1的中平面位置和偏滤器13的区域,分别满足等离子体14密度的反馈控制以及偏滤器13的热流快速缓解的需求。

[0024] 所述的关键加料方式之三的冰弹丸注入系统18的工作过程为:燃料气体通过燃料钢瓶5进入到弹丸注入器11,在此冷凝成冰完成切割,形成圆柱形冰弹丸;冰弹丸通过推进气体钢瓶12供气加速进入到扩散室9,在扩散室9通过抽气机组10抽除推进气体,经过隔断阀进入等离子体14,实现芯部加料并建立高密度等离子体。

[0025] 所述的偏滤器13位于聚变装置1的顶部和底部,是等离子体14的粒子与热流强相互作用的区域,易引起偏滤器13烧蚀,同时烧蚀材料进入等离子体14,退化等离子体14性能。在偏滤器区域布置普通充气系统16和超声分子束注入系统17,可以缓解等离子体14与偏滤器13之间的作用,降低偏滤器13的热流,有助于实现长脉冲等离子体放电的维持。

[0026] 利用不同位置、不同方式的加料技术实现千秒量级等离子体放电的协同加料,具体的工作流程如下:首先利用普通充气的方式建立起等离子体,同时调节波天线附近刮削层等离子体的参数,提高波的耦合效率;在等离子体建立后,通过超声分子束注入对等离子体密度进行反馈控制,通过高速的冰弹丸注入等离子体进行芯部加料,满足高密度等离子体运行的需求。利用偏滤器位置的普通充气及超声分子束注入进行偏滤器热流的反馈控制;通过不同加料方式的协同作用,实现聚变装置千秒量级稳定的密度控制、波耦合所需的边界等离子体参数调节、偏滤器热流的有效控制等。

[0027] 尽管上面对本发明说明性的具体实施方式进行了描述,以便于本技术领域的技术人员理解本发明,且应该清楚,本发明不限于具体实施方式的范围,对本技术领域的普通技术人员来讲,只要各种变化在所附的权利要求限定和确定的本发明的精神和范围内,这些变化是显而易见的,一切利用本发明构思的发明创造均在保护之列。

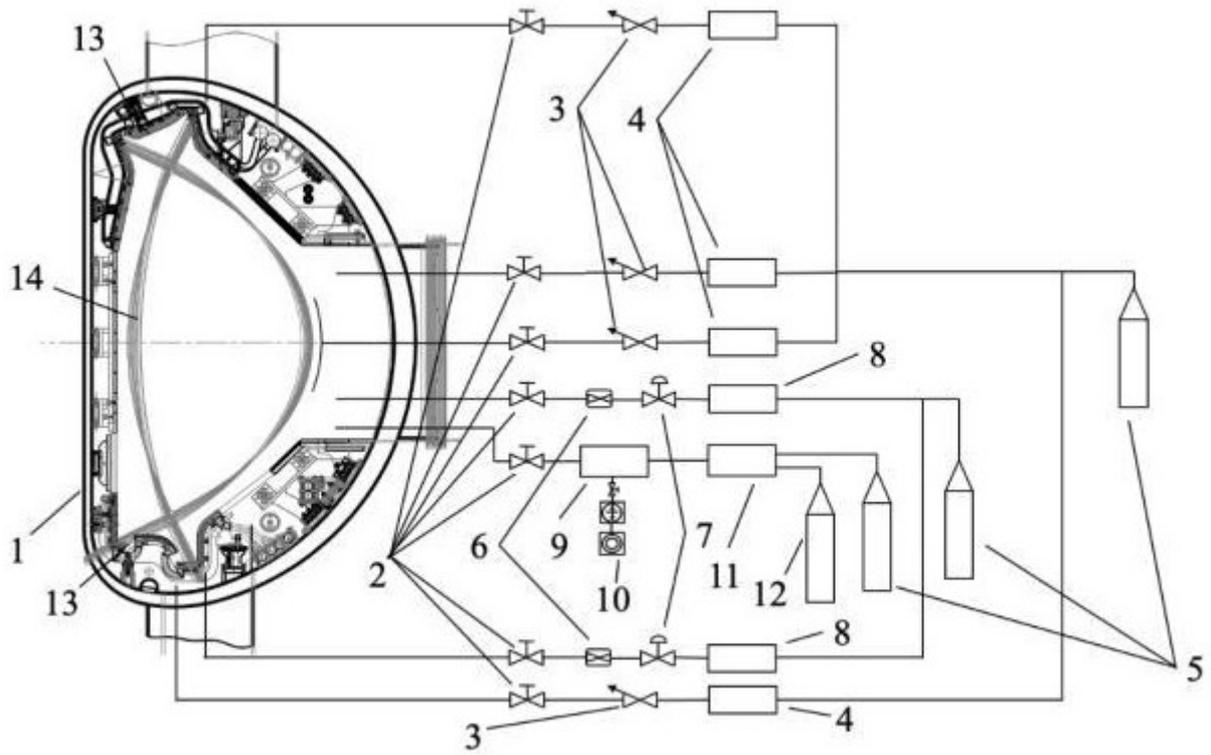


图 1

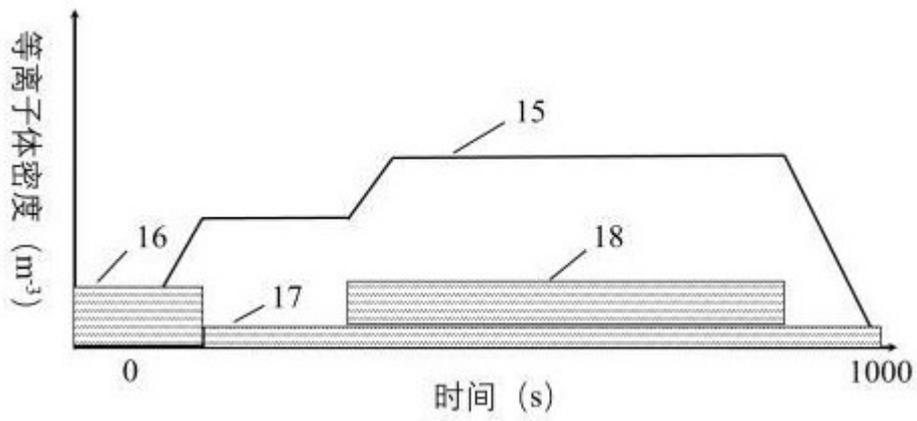


图 2