



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111511087 B

(45) 授权公告日 2023.08.11

(21) 申请号 202010259302.6

H05H 1/14 (2006.01)

(22) 申请日 2015.10.30

H05H 3/00 (2006.01)

G21B 1/05 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 111511087 A

(43) 申请公布日 2020.08.07

(30) 优先权数据
62/072611 2014.10.30 US

(62) 分案原申请数据
201580059262.8 2015.10.30

(73) 专利权人 阿尔法能源技术公司
地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 M. 宾德鲍尔 E. 加拉特
S. 普特文斯基 H. 戈塔

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
72001
专利代理师 刘茜

(56) 对比文件

CN 102483959 A, 2012.05.30

CN 103918034 A, 2014.07.09

JP 2007198649 A, 2007.08.09

US 2011142185 A1, 2011.06.16

US 2012155591 A1, 2012.06.21

US 4601871 A, 1986.07.22

WO 2006096772 A2, 2006.09.14

CN 104067349 A, 2014.09.24

CN 101018444 A, 2007.08.15

吴宜灿, 邱励俭, 孔明辉, 黄群英. 紧凑 Tokamak (球形环) 聚变堆第一壁及中心导体柱上中子负荷及核热计算与分析. 核科学与工程. 1997, (第02期), 全文.

审查员 石锐

(51) Int. Cl.

H05H 1/08 (2006.01)

权利要求书4页 说明书16页 附图24页

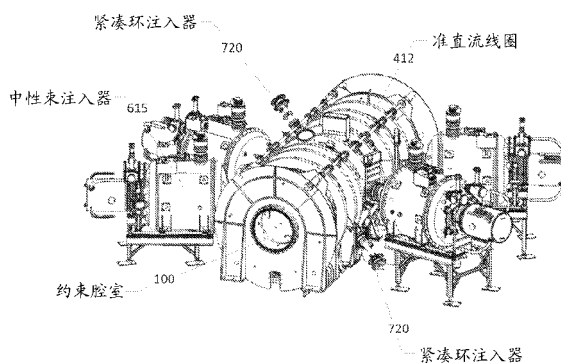
(54) 发明名称

用于形成和保持高性能FRC的系统和方法

(57) 摘要

本发明涉及形成和保持高性能FRC的系统和方法。高性能场反向位形(FRC)系统包括中央约束容器、联接到容器的两个直径相对的反场角向箍缩形成部段,以及联接到形成部段的两个偏滤器腔室。磁性系统包括沿FRC系统部件轴向定位的准直流线圈、约束腔室和形成部段之间的准直流镜线圈以及形成部段和偏滤器之间的镜堵漏部。形成部段包括模块化脉冲式功率形成系统。FRC系统还包括中性原子束注入器、弹丸或CT注入器、吸杂系统、轴向等离子体枪和通量表面偏压电极。束注入器有角度地朝向腔室的中间平面。在操作中,包括等离子体热能、总粒子数、半径和俘获磁通量的FRC等离子体参数在中性束注入期间能够维持在恒定值或恒定值附近而不衰

变。



1. 一种用于生成和保持具有场反向位形的磁场的系统,其包括:
约束腔室,
相对的第一和第二场反向位形形成部段,其联接到所述约束腔室,
联接到所述第一和第二形成部段的第一和第二偏滤器;
能够操作地联接到所述第一和第二偏滤器、所述第一和第二形成部段以及所述约束腔室的第一和第二轴向等离子体枪;
多个中性原子束注入器,其联接到所述约束腔室并且被定向成朝向所述约束腔室的中间平面;
磁性系统,其联接到所述约束腔室、所述第一和第二形成部段、以及所述第一和第二偏滤器,所述磁性系统包括定位在所述第一和第二形成部段与所述第一和第二偏滤器之间的第一和第二镜堵漏部,以及
第一和第二紧凑环注入器,其以一角度朝向所述约束腔室的所述中间平面联接到所述约束腔室,其中所述第一和第二紧凑环注入器相对地设置在所述约束腔室的所述中间平面的相对侧上。
2. 根据权利要求1所述的系统,所述磁性系统包括多个准直流线圈,其沿着所述约束腔室、所述第一和第二形成部段、以及所述第一和第二偏滤器轴向间隔开定位。
3. 根据权利要求2所述的系统,所述磁性系统还包括第一组镜线圈,其定位在所述约束腔室的端部与所述第一和第二形成部段之间。
4. 根据权利要求3所述的系统,其中,所述镜堵漏部包括第二组镜线圈,其在所述第一和第二形成部段中的每一个与所述第一和第二偏滤器之间。
5. 根据权利要求4所述的系统,其中,所述镜堵漏部还包括围绕所述第一和第二形成部段中的每一个与所述第一和第二偏滤器之间的通路中的收缩部缠绕的一组镜堵漏部线圈。
6. 根据权利要求5所述的系统,其中,所述镜堵漏部线圈是紧凑的脉冲镜线圈。
7. 根据权利要求1所述的系统,还包括联接到所述约束腔室以及所述第一和第二偏滤器的吸杂系统。
8. 根据权利要求1所述的系统,还包括用于电偏压生成的场反向位形的开放通量表面的一个或多个偏压电极,所述一个或多个偏压电极定位在所述约束腔室、所述第一和第二形成部段以及所述第一和第二偏滤器中的一个或多个内。
9. 根据权利要求1所述的系统,还包括联接到所述约束腔室的两个或更多个鞍形线圈。
10. 根据权利要求1所述的系统,还包括联接到所述约束腔室的离子弹丸注入器。
11. 根据权利要求1所述的系统,所述形成部段包括模块化形成系统,用于生成场反向位形并使所述场反向位形朝向所述约束腔室的中间平面平移。
12. 一种用于生成和保持具有场反向位形的磁场的系统,其包括:
约束腔室,
相对的第一和第二场反向位形形成部段,其联接到所述约束腔室,
联接到所述第一和第二形成部段的第一和第二偏滤器;
多个中性原子束注入器,其联接到所述约束腔室并且被定向成朝向所述约束腔室的中间平面;
磁性系统,其联接到所述约束腔室、所述第一和第二形成部段、以及所述第一和第二偏

滤器，

用于电偏压生成的场反向位形的开放通量表面的一个或多个偏压电极，所述一个或多个偏压电极定位在所述约束腔室、所述第一和第二形成部段以及所述第一和第二偏滤器中的一个或多个内，以及

第一和第二紧凑环注入器，其以一角度朝向所述约束腔室的所述中间平面联接到所述约束腔室，其中所述第一和第二紧凑环注入器相对地设置在所述约束腔室的所述中间平面的相对侧上。

13. 根据权利要求12所述的系统，其中，偏压电极包括以下电极中的一个或多个：定位在所述约束腔室内的一个或多个点电极，以接触开放场力线；一组环形电极，其在所述约束腔室与所述第一和第二形成部段之间以便以方位角对称方式对远离边缘通量层充电；定位在所述第一和第二偏滤器中的多个同心堆叠的电极，以对多个同心通量层充电；以及拦截开放通量的等离子体枪的阳极。

14. 根据权利要求12所述的系统，其中，所述磁性系统包括多个准直流线圈，其沿着所述约束腔室、所述第一和第二形成部段、以及所述第一和第二偏滤器轴向间隔开定位。

15. 根据权利要求14所述的系统，其中，所述磁性系统还包括第一组镜线圈，其定位在所述约束腔室的端部与所述第一和第二形成部段之间。

16. 根据权利要求15所述的系统，其中，所述磁性系统还包括第一和第二镜堵漏部，其中，所述第一和第二组镜堵漏部包括在所述第一和第二形成部段中的每一个与所述第一和第二偏滤器之间的第二组镜线圈。

17. 根据权利要求16所述的系统，其中，所述第一和第二镜堵漏部还包括围绕所述第一和第二形成部段中的每一个与所述第一和第二偏滤器之间的通路中的收缩部缠绕的一组镜堵漏部线圈。

18. 根据权利要求17所述的系统，其中，所述镜堵漏部线圈是紧凑的脉冲镜线圈。

19. 根据权利要求12所述的系统，其中，所述第一和第二形成部段包括细长的石英管。

20. 根据权利要求19所述的系统，其中，所述形成部段包括联接到所述石英管的脉冲式功率形成系统。

21. 根据权利要求20所述的系统，其中，所述形成系统包括多个功率和控制单元，其联接到多个条带组件中的各个条带组件，以激励围绕所述第一和第二形成部段的所述细长的管缠绕的所述多个条带组件中的所述各个条带组件的一组线圈。

22. 根据权利要求21所述的系统，其中，所述多个功率和控制单元中的各个单元包括触发和控制系统。

23. 根据权利要求22所述的系统，其中，所述多个功率和控制单元中的所述各个单元的所述触发和控制系统能够同步以使得能够实现静态场反向位形形成或动态场反向位形形成，其中在所述静态场反向位形形成中场反向位形被形成并且然后被注入，在所述动态场反向位形形成中场反向位形同时被形成和平移。

24. 根据权利要求12所述的系统，其中，所述多个中性原子束注入器以切向于所述场反向位形的注入路径定向，其中目标俘获区在所述场反向位形的分界面内。

25. 根据权利要求12所述的系统，其还包括联接到所述约束腔室的离子弹丸注入器。

26. 根据权利要求12所述的系统，其还包括联接到所述约束腔室的两个或更多个鞍形

线圈。

27. 根据权利要求12所述的系统,其还包括联接到所述约束腔室以及所述第一和第二偏滤器的吸杂系统。

28. 根据权利要求12所述的系统,其还包括能够操作地联接到所述第一和第二偏滤器、所述第一和第二形成部段以及所述约束腔室的第一和第二轴向等离子体枪。

29. 一种用于生成和保持具有场反向位形的磁场的系统,其包括:

约束腔室,

相对的第一和第二场反向位形形成部段,其联接到所述约束腔室,

联接到所述第一和第二形成部段的第一和第二偏滤器;

第一和第二轴向等离子体枪,其能够操作地联接到所述第一和第二偏滤器、所述第一和第二形成部段以及所述约束腔室;

多个中性原子束注入器,其联接到所述约束腔室并且被定向成朝向所述约束腔室的中间平面;

磁性系统,其联接到所述约束腔室、所述第一和第二形成部段、以及所述第一和第二偏滤器,以及

第一和第二紧凑环注入器,其以一角度朝向所述约束腔室的所述中间平面联接到所述约束腔室,其中所述第一和第二紧凑环注入器相对地设置在所述约束腔室的所述中间平面的相对侧上。

30. 根据权利要求29所述的系统,其中,所述第一和第二形成部段中的各个部段包括细长的管和联接到所述细长的管的脉冲式功率形成系统。

31. 根据权利要求30所述的系统,其中,所述形成系统包括多个功率和控制单元,其联接到多个条带组件中的各个条带组件,以激励围绕所述第一和第二形成部段的所述细长的管缠绕的所述多个条带组件中的所述各个条带组件的一组线圈。

32. 根据权利要求31所述的系统,其中,所述多个功率和控制单元中的各个单元包括触发和控制系统。

33. 根据权利要求32所述的系统,其中,所述多个功率和控制单元中的所述各个单元的所述触发和控制系统能够同步以使得能够实现静态场反向位形形成或动态场反向位形形成,其中在所述静态场反向位形形成中场反向位形被形成并且然后被注入,在所述动态场反向位形形成中场反向位形同时被形成和平移。

34. 根据权利要求29所述的系统,其还包括用于电偏压生成的场反向位形的开放通量表面的一个或多个偏压电极。

35. 根据权利要求34所述的系统,其中,所述一个或多个偏压电极包括以下电极中的一个或多个:定位在所述约束腔室内的一个或多个点电极,以接触开放场力线;一组环形电极,其在所述约束腔室与所述第一和第二形成部段之间以便以方位角对称方式对远离边缘通量层充电;定位在所述第一和第二偏滤器中的多个同心堆叠的电极,以对多个同心通量层充电;以及拦截开放通量的等离子体枪的阳极。

36. 根据权利要求29所述的系统,其中,所述磁性系统包括:多个准直流线圈,其沿着所述约束腔室、所述第一和第二形成部段、以及所述第一和第二偏滤器轴向间隔开定位;以及第一组镜线圈,其定位在所述约束腔室的端部与所述第一和第二形成部段之间。

37. 根据权利要求36所述的系统,其中,所述磁性系统还包括第一和第二镜堵漏部,其中包括在所述第一和第二形成部段中的每一个与所述第一和第二偏滤器之间的第二组镜线圈。

38. 根据权利要求37所述的系统,其中,所述镜堵漏部还包括围绕所述第一和第二形成部段中的每一个与所述第一和第二偏滤器之间的通路中的收缩部缠绕的一组紧凑的脉冲镜线圈。

39. 根据权利要求29所述的系统,其中,所述多个中性原子束注入器以切向于所述场反向位形的注入路径定向,其中目标俘获区在所述场反向位形的分界面内。

40. 根据权利要求29所述的系统,还包括联接到所述约束腔室的离子弹丸注入器。

41. 根据权利要求29所述的系统,还包括联接到所述约束腔室的两个或更多个鞍形线圈。

42. 根据权利要求29所述的系统,还包括吸杂系统,其构造成利用一层吸杂材料涂覆所述约束腔室以及所述第一和第二偏滤器的面向等离子体的表面。

43. 根据权利要求1或12或29中任一项所述的系统,其中,所述第一和第二紧凑环注入器相对于所述约束腔室的纵向轴线以 15° 至 25° 的角度并且朝向所述约束腔室的中间平面定向。

44. 根据权利要求1或12或29中任一项所述的系统,其中,所述第一和第二紧凑环注入器被配置成以重复频率模式将紧凑环等离子体注入到场反向位形等离子体。

用于形成和保持高性能FRC的系统和方法

技术领域

[0001] 本文所描述的实施例总体上涉及磁等离子体约束系统,并且更具体地,涉及便于形成和维持具有优异的稳定性以及粒子、能量和通量约束的场反向位形的系统和方法。本申请是分案申请,其母案申请号为201580059262.8,申请日为2015年10月30日,发明名称为“用于形成和保持高性能FRC的系统和方法”。

背景技术

[0002] 场反向位形(FRC)属于被称作紧凑环(CT)的磁等离子体约束拓扑结构的类别。其主要表现出极向磁场并且具有零或小的自生成等离子体环形场(参看M. Tuszewski, Nucl. Fusion 28, 2033(1988))。这种位形的吸引力在于其简单的几何形状以便简化构造和维护,便于能量提取和除灰的自然不受限制的偏滤器,和很高的 β (β 是平均等离子体压力与FRC内的平均磁场压力之比),即高功率密度。高 β 性质有利于经济的操作和使用先进的无中子核燃料(诸如D-He³和p-B¹¹)。

[0003] 形成FRC的传统方法使用场反向 θ -箍缩技术,从而产生热的、高密度的等离子体(参看A. L. Hoffman and J. T. Slough, Nucl. Fusion 33, 27(1993))。其一种变型是平移-俘获方法,其中,在角向箍缩“源”中形成的等离子或多或少地立即从一端出射到约束腔室内。然后平移的等离子粒团被俘获在腔室的端部处的两个强镜之间(参看,例如,H. Himura, S. Okada, S. Sugimoto and S. Goto, Phys. Plasmas 2, 191(1995))。一旦处于约束腔室中,可以采用各种加热和电流驱动方法,诸如束注入(中性或中性的)、旋转磁场、RF或欧姆加热等。这种源和约束功能的分离为可能的未来聚变反应堆提供关键的工程优点。已证明FRC极为稳固,适应于动态形成、平移和暴力捕获事件。此外,它们表现出呈现优选等离子体状态的倾向(参看例如H. Y. Guo, A. L. Hoffman, K. E. Miller and L. C. Steinhauer, Phys. Rev. Lett. 92, 245001(2004))。在过去的数十年中,研发其它FRC形成方法已取得了重大进展:合并具有反向螺旋性的球马克(参看,例如,Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama and T. Okazaki, Nucl. Fusion 39, 2001(1999))和通过用旋转磁场(RMF)来驱动电流(参看,例如,I. R. Jones, Phys. Plasmas 6, 1950(1999)),这也提供额外的稳定性。

[0004] 近来,已显著地进一步研发了很久以前提出的碰撞-合并技术(参看,例如D. R. Wells, Phys. Fluids 9, 1010(1966)):在约束腔室的相对端处的两个单独的角向箍缩同时生成两个等离子粒团并且使等离子粒团朝向彼此以高速加速;它们然后在约束腔室中心处碰撞并且合并以形成复合FRC。在目前为止最大的FRC实验之一的构造和成功操作中,常规的碰撞-合并方法被示出为产生稳定、长寿命、高通量、高温FRC(参看例如M. Binderbauer, H.Y. Guo, M. Tuszewski et al., Phys. Rev. Lett. 105, 045003(2010))。

[0005] FRC由分界面内侧的闭合场力线环和分界面外侧附近的开放场力线上的环形边缘层的环构成。边缘层聚结成超过FRC长度的射流,提供自然偏滤器。FRC拓扑结构与场反向镜

等离子体的拓扑结构相符。但是,显著差别在于FRC等离子体具有约10的 β 。固有的低内部磁场提供某些固有运动粒子群体,即,具有可相比于FRC小半径的大拉莫半径(larmor radii)的粒子。正是这些强动力学作用表现为至少部分地造成过去和当前FRC(诸如在碰撞-合并实验中所产生的那些)的总体稳定性。

[0006] 典型的过去的FRC实验已受制于对流损失,其中能量约束很大程度上由粒子输运决定。粒子主要径向地从分界面体积扩散出来,并且然后轴向地损失在边缘层中。因此,FRC约束取决于闭合场力线和开放场力线区域二者的性质。从分界面扩散出来的粒子扩散时间定标为 $\tau_{\perp} \sim a^2/D_{\perp}$ ($a \sim r_s/4$, 其中 r_s 为中央分界面半径),并且 D_{\perp} 为特性FRC扩散率,诸如 $D_{\perp} \sim 12.5 \rho_{ie}$, 其中 ρ_{ie} 表示离子回旋半径,在外部施加的磁场下评估。边缘层粒子约束时间 τ_{\parallel} 在过去的FRC实验中基本上是轴向通过时间。在稳态中,径向粒子损失与轴向粒子损失之间的平衡产生分界面密度梯度长度 $\delta \sim (D_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2}$ 。对于在分界面处具有大的密度的过去FRC,FRC粒子约束时间定标为 $(\tau_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2}$ (参看例如,M. TUSZEWSKI, "Field Reversed Configurations," Nucl. Fusion 28, 2033(1988))。

[0007] 现有FRC系统设计的另一缺陷在于需要使用外部多极来控制旋转不稳定性,诸如快速增长 $n=2$ 交换不稳定性。以此方式,典型的外部施加四极场提供所需的磁恢复压力来抑制这些不稳定模式的增长。虽然这种技术足以用于对热体等离子体(thermal bulk plasma)进行稳定性控制,但是对于动能更高的FRC或先进的混合FRC(其中高动能大轨道粒子群体与通常的热等离子体组合),这呈现出严重问题。在这些系统中,由于这种多极场造成的轴对称磁场的畸变经由无碰撞随机扩散导致显著的快速粒子损失,这是失去正则角动量守恒的结果。因此,用以提供稳定性控制而不增强任何粒子的扩散的新颖技术方案对于利用这些之前从未探究过的先进的FRC构思的更高性能的潜力而言是重要的。

[0008] 鉴于前文所述,因此,期望的是改进FRC的约束和稳定性,以便使用稳态FRC作为多种应用的途径,所述应用包括紧凑型中子源(用于医用同位素生产、核废料整治、材料研究、中子射线照相法和断层摄影术)、紧凑型光子源(用于化学生产和加工)、质量分离和富集系统,以及用于未来一代能源的轻核聚变的反应堆芯。

发明内容

[0009] 本文所提供的本实施例涉及便于形成和维持新型高性能场反向位形(FRC)的系统和方法。根据这种新型高性能FRC范例,本系统组合了大量新颖构思和技术手段以显著地改进粒子、能量和通量的FRC约束,以及提供稳定性控制而不产生不良的副作用。

[0010] 本文所提供的一种FRC系统包括由两个直径上相对的反场角向箍缩形成部段包围的中央约束容器,以及超出这两个形成部段的两个偏滤器腔室,以控制中性密度和杂质污染。磁性系统包括:沿着FRC系统的部件位于轴向位置处的一系列准直流线圈;约束腔室的任一端与相邻形成部段之间的准直流镜线圈;以及镜堵漏部(plug),其包括形成部段中的每一个与偏滤器之间的紧凑型准直流镜线圈,紧凑型准直流镜线圈产生额外的引导场以使得磁通量表面朝向偏滤器集中。形成部段包括模块式脉冲功率形成系统,其使得FRC能够在原位形成并且然后加速和注入(=静态形成)或者同时地形成和加速(=动态形成)。

[0011] FRC系统包括中性原子束注入器和弹丸(pellet)注入器。在一个实施例中,束注入

器成角度以朝向中间平面注入中性粒子。束注入器朝向中间平面成角度并且轴向束位置靠近中间平面改进了束-等离子体耦合,即使在注入期间FRC等离子体收缩或以其他方式轴向地紧缩也是如此。也包括吸杂系统(gettering system)以及轴向等离子体枪。也提供偏压电极(biasing electrode)以便对开放的通量表面进行电偏压。

[0012] 在操作中,当中性束被注入等离子体并且弹丸提供适当的粒子加料(particle refuel)时,包括等离子体热能、总粒子数、等离子体半径和长度以及磁通量的FRC全局等离子体参数实质上能够维持而没有衰变。

[0013] 在替代性实施例中,代替弹丸注入器设置紧凑环(CT)注入器,以通过注入球马克状等离子体来提供适当的粒子加料。

[0014] 对于本领域技术人员而言,通过查阅下文的附图和详细描述,本发明的系统、方法、特征和优点将是或将成为显而易见。所有这样的额外方法、特征和优点旨在包括在本描述中,在本发明的范围内,并且由所附权利要求保护。也旨在本发明不限于需要示例实施例的细节。

附图说明

[0015] 作为本说明书的一部分而包括的附图示出了本发明的优选实施例,并且与上文给出的一般性描述和下文给出的优选实施例的详细描述一起,用来解释和教导本发明的原理。

[0016] 图1示出高性能FRC状态(regime)(HPC)下对比常规FRC状态(CR)下,和对比其它常规FRC实验下,本FRC系统中的粒子约束。

[0017] 图2示出本FRC系统的部件和能够在本FRC系统中产生的FRC的磁性拓扑结构。

[0018] 图3A示出如从顶部观察的本FRC系统的基本布局,包括中性束、电极、等离子体枪、镜堵漏部和弹丸注入器的优选布置。

[0019] 图3B示出如从顶部观察的中央约束容器,并且示出在中央约束容器中以垂直于主要对称轴线的角度设置的中性束。

[0020] 图3C示出如从顶部观察的中央约束容器,并且示出在中央约束容器中以不足以垂直于主要对称轴线的角度设置的中性束,并且该中性束指向朝向中央约束容器的中间平面的注入粒子。

[0021] 图4示出用于形成部段的脉冲功率系统的部件的示意图。

[0022] 图5示出单个脉冲功率形成橇(skid)的等距视图。

[0023] 图6示出形成管组件的等距视图。

[0024] 图7示出中性束系统和关键部件的局部截面等距视图。

[0025] 图8示出约束腔室上的中性束布置的等距视图。

[0026] 图9示出Ti和Li吸杂系统的优选布置的局部截面等距视图。

[0027] 图10示出安装在偏滤器腔室中的等离子体枪的局部截面等距视图。还示出了相关联的磁镜堵漏部和偏滤器电极组件。

[0028] 图11示出约束腔室的轴向端处的环形偏压电极的优选布局。

[0029] 图12示出从在两个场反向角向箍缩形成部段处的一系列外部抗磁圈和嵌入中央金属约束腔室内的磁性探头所获得的FRC系统中的排斥通量半径的演变。时间从形成源中

的同步场反向的瞬间测量,并且给出相对于机器的轴向中间平面的距离 z 。

[0030] 图13(a)至图13(d)示出来自本FRC系统上的代表性非HPF、非持续放电的数据。(a)中间平面处的排斥通量半径,(b)来自中间平面 CO_2 干涉仪的线积分密度的6个弦(chord),(c)来自 CO_2 干涉仪数据的Abe1反演的密度径向分布,以及(d)来自压力平衡的总等离子体温度被示出为随时间而变。

[0031] 图14示出对于与图13中所示的本FRC系统相同的放电的选定时间的排斥通量轴向分布。

[0032] 图15示出安装于约束腔室外侧的鞍形线圈的等距视图。

[0033] 图16示出FRC寿命与注入的中性束的脉冲长度之间的相互关系。如图所示,更长的束脉冲产生更长寿命的FRC。

[0034] 图17示出FRC系统的不同部件对于FRC性能和HPF状态的实现的单个的和组合的作用。

[0035] 图18(a)至图18(d)示出来自本FRC系统上的代表性HPF、非持续的放电的数据。(a)中间平面处的排斥通量半径,(b)来自中间平面 CO_2 干涉仪的线积分密度的6个弦,(c)来自 CO_2 干涉仪数据的Abe1反演的密度径向分布,以及(d)来自压力平衡的总等离子体温度被示出为随时间而变。

[0036] 图19示出随电子温度(T_e)而变的通量约束。其表示HPF放电的新确立的优异定标状态的图形表示。

[0037] 图20示出对应于无角度和有角度注入的中性束的脉冲长度的FRC寿命。

[0038] 图21A和21B示出紧凑环(CT)注入器的基本布局。

[0039] 图22A和22B示出中央约束容器,其图示安装于其的CT注入器。

[0040] 图23A和23B示出具有联接于其的漂移管的CT注入器的替代性实施例的基本布局。

[0041] 应当指出的是,附图不必须按照比例绘制,并且贯穿附图,出于说明性目的,类似结构或功能的元件总体上以同样的附图标记表示。还应当指出的是,附图仅旨在便于描述本文所描述的各种实施例。附图不必须描述本文所公开的教导的每个方面并且并不限制权利要求的范围。

具体实施方式

[0042] 本文所提供的本实施例涉及便于形成和维持高性能场反向位形(FRC)的系统和方法,与常规FRC相比,这种高性能场反向位形(FRC)具有优异的稳定性以及优异的粒子、能量和通量约束。这样的高性能FRC为多种应用提供途径,包括紧凑型中子源用于医用同位素生产、核废料整治、材料研究、中子射线照相法和断层摄影术)、紧凑型光子源(用于化学生产和加工)、质量分离和富集系统,以及用于未来一代能源的轻核聚变的反应堆芯。

[0043] 已探究了各种辅助系统和操作模式来评估在FRC中是否存在优异的约束状态。这些努力已得到了突破性发现和本文所描述的高性能FRC范例的发展。根据这种新范例,本系统和方法结合了大量的新颖构思和技术手段以显著地改进FRC约束(如图1所示)以及提供稳定性控制而没有不利的副作用。如在下文更详细地讨论的那样,图1描绘了下文所描述的FRC系统10(参看图2和图3)中的粒子约束,示出根据用于形成和维持FRC的高性能FRC状态(HPF)操作的FRC系统10中的粒子约束相对于根据用于形成和维持FRC的常规状态CR操作的

FRC系统10中的粒子约束,以及相对于根据其它实验中所使用的用于形成和维持FRC的常规状态的粒子约束。本公开将概括和详细描述FRC系统10的创新性单个部件和方法以及它们的总体效果。

[0044] FRC系统的描述

[0045] 真空系统

[0046] 图2和图3描绘了本FRC系统10的示意图。FRC系统10包括由两个直径相对的反场角向箍缩形成部段200包围的中央约束容器100,和用以控制中性密度和杂质污染的超过形成部段200的两个偏滤器300。本FRC系统10被构建为适应超高真空并且在 10^{-8} 托的典型基准压力下操作。这样的真空压力需要使用配合部件之间的双抽运(double-pumped)配合凸缘、金属O形环、高纯度内壁以及组装之前所有零件的谨慎的初始表面调节(诸如物理和化学清洁,继之以24小时250°C的真空烘烤和氢辉光放电清洁)。

[0047] 反场角向箍缩形成部段200是标准的场反向角向箍缩(FRTP),但其具有下文详细讨论的先进的脉冲功率形成系统(参看图4至图6)。每个形成部段200由标准不透明工业级石英管制成,其以具有2毫米的超纯石英内衬为特征。约束腔室100由不锈钢制成,以允许许多径向和切向端口;其也用作下文所描述的实验的时间尺度的通量保存器并且限制快速磁暂态。利用一组干式涡旋低真空泵(roughing pump)、涡轮分子泵和低温泵来在FRC系统10内形成和维持真空。

[0048] 磁性系统

[0049] 图2和图3中示出磁性系统400。图2示出有关能够由FRC系统10产生的FRC 450的FRC磁通量和等密度线(随径向和轴向坐标而变)以及其它特征。使用被研发为用以模拟与FRC系统10对应的系统和方法的代码通过2-D电阻Hall-MHD数值模拟来获得这些等密度线,并且该等密度线与测量的实验数据良好地吻合。如图2中可见,FRC 450由分界面451内侧的FRC 450的内部453处的闭合场力线环和分界面451的恰好外侧的开放场力线452上的环形边缘层456的环构成。边缘层456聚结为超过FRC长度的射流454,从而提供自然偏滤器。

[0050] 主磁性系统410包括一系列准直流线圈412、414和416,它们位于沿FRC系统10的部件,即沿约束腔室100、形成部段200和偏滤器300的特定轴向位置处。准直流线圈412、414和416由准直流开关电源供电并且在约束腔室100、形成部段200和偏滤器300中产生约0.1T的基本磁性偏压场。除了准直流线圈412、414和416之外,主磁性系统410包括约束腔室100的任一端与相邻形成部段200之间的准直流镜线圈420(由开关电源供电)。准直流镜线圈420提供高达5的磁镜比,并且能够被独立地激励以便平衡的成形控制。此外,镜堵漏部440定位在每一个形成部段200和偏滤器300之间。镜堵漏部440包括紧凑型准直流镜线圈430和镜堵漏部线圈444。准直流镜线圈430包括三个线圈432、434和436(由开关电源供电),其产生额外的引导场以使磁通量表面455朝向穿过镜堵漏部线圈444的小直径通路集中。围绕小直径通路缠绕并且由LC脉冲功率电路供电的镜堵漏部线圈444产生高达4T的强磁镜场。这整个线圈布置的目的是为了将磁通量表面455和端部流动的等离子体射流454紧密地束集并引导到偏滤器300的边远腔室内。最后,一组鞍形线圈“天线”460(参看图15)位于约束腔室100外侧,在中间平面的每一侧上两个,并且由直流电源供电。鞍形线圈天线460可以被配置成提供约0.01T的准静态磁偶极或者四极场,以便控制旋转不稳定性和/或电子电流控制。取决于所施加的电流的方向,鞍形线圈天线460可以灵活地提供绕机器中间平面对称或不对

称的磁场。

[0051] 脉冲功率形成系统

[0052] 脉冲功率形成系统210根据修正的角向箍缩原理操作。存在两个系统,每一个系统向形成部段200之一供电。图4至图6示出形成系统210的主要构建件和布置。形成系统210由模块式脉冲功率布置构成,该模块式脉冲功率布置由各自激励围绕形成石英管240缠绕的条带组件230(=条带)的线圈232的子集的各个单元(=橇)220构成。每个橇220由电容器221、感应器223、快速高电流开关225和相关联的触发器222和转储(dump)电路224构成。总之,每个形成系统210储存介于350-400 KJ之间的电容能量,其提供高达35 GW的功率以形成FRC和使其加速。经由现有技术的触发器和控制系统222和224实现了这些部件的协调操作,现有技术的触发器和控制系统222和224允许每个形成部段200上的形成系统210之间的同步正时并且使开关抖动最小化为数十纳秒。这种模块式设计的优点在于其灵活的操作:能够原位形成FRC并且然后使其加速并对其注入(=静态形成),或者同时形成和加速(=动态形成)。

[0053] 中性束注入器

[0054] 在FRC系统10上运用中性原子束600以提供加热和电流驱动以及形成快速粒子压力。如图3A、3B和图8中所示,包括中性原子束注入器系统610和640的各个束线位于中央约束腔室100周围并且以一定冲击参数向FRC等离子体切向地注入快速粒子(并且垂直于约束腔室100中的主要对称轴线,或相对于该轴线呈正交角度),使得目标俘获区位于分界面451内(参看图2)。每个注入器系统610和640能够向FRC等离子体内注入高达1 MW的中性束功率,并且其中粒子能量在20与40 KeV之间。系统610和640基于正离子多孔口提取源并且利用离子提取栅的几何集中、惯性冷却和差动泵浦。除了使用不同的等离子体源之外,系统610和640的主要由它们的物理设计来区别,以满足它们的相应安装位置,得到侧部和顶部注入能力。对于侧部注入器系统610,这些中性束注入器的典型部件具体地在图7中示出。如图7所示,每个单个中性束系统610包括输入端处的RF等离子体源612(这在系统640中由电弧源替代),并且具有覆盖该端的磁屏614。离子光源和加速栅616联接到等离子体源612并且闸阀620定位于离子光源和加速栅616与中和器622之间。偏转磁体624和离子转储部628位于中和器622与出口端处的瞄准装置630之间。冷却系统包括两个低温制冷器634、两个低温板636和LN₂护罩638。这种灵活的设计允许在广泛的FRC参数范围上操作。

[0055] 中性原子束注入器600的替代性构造是向FRC等离子体切向地、但是相对于中央约束腔室100的主要对称轴线成小于90°的角A注入快速粒子。束注入器615的这些类型的取向示于图3C中。此外,束注入器615可以被定向成使得在中央约束腔室100的中间平面的每侧上的束注入器615朝向中间平面注入其粒子。最后,这些束系统600的轴向位置可以被选择成更靠近中间平面。这些替代性注射实施例有助于更加在中央加料的选项,这提供了束的更好的联接和所注入的快速粒子的更高的俘获效率。此外,取决于角度和轴向位置,束注入器615的布置允许更加直接且独立地控制FRC 450的轴向伸长和其它特性。比如,相对于容器的主要对称轴线以浅角度A注入束将形成具有更长轴向延伸和更低温度的FRC等离子体,而选择更垂直的角度A将导致轴向更短但是更热的等离子体。在这种方式中,能够针对不同目的优化束注入器615的注入角度A和位置。此外,束注入器615的这种定角度和定位能够允许将更高能量的束(其通常对于以较小束发散沉积更大功率而言更为有利)注入更低磁场

内(相比于以其它方式俘获这种束所必须的磁场)。这是由于如下事实:是能量的方向角分量确定快速离子轨道尺度(随着在恒定束能量下相对于容器的主要对称轴线的注入角度减小,该尺度逐渐变小)。此外,朝向中间平面成角度的注入并且轴向束位置靠近中间平面能够改善束-等离子体耦合,即使在注入期间FRC等离子体收缩或以其它方式轴向紧缩。

[0056] 弹丸注入器

[0057] 为了提供注入新粒子并且更好地控制FRC粒子存量的技术手段,在FRC系统10上利用一种12-管筒弹丸注入器700(参看,例如I.Vinyar et al.,“Pellet Injectors Developed at PELIN for JET, TAE, and HL-2A,” Proceedings of the 26th Fusion Science and Technology Symposium, 09/27 to 10/01(2010)(2010年9月27日至10月1日第26届聚变科学与技术研讨会的会议录))。图3示出FRC系统10上弹丸注入器700的布局。圆筒形弹丸(D~1 mm,L~1-2 mm)以150-250 km/s范围中的速度被注入FRC内。每个单个弹丸包含约 5×10^{19} 个氢原子,其与FRC粒子存量相当。

[0058] 吸杂系统

[0059] 公知的是,中性光晕气体(halo gas)在所有约束系统中是严重问题。电荷交换和再循环(从壁释放冷杂质材料)过程能够对能量和粒子约束产生毁灭性影响。此外,在边缘处或边缘附近处中性气体的任何显著密度将导致促使所注入的大轨道(高能)粒子(大轨道指具有FRC拓扑结构的尺度的轨道或者至少具有远大于特性磁场梯度长度尺度的轨道半径的粒子)的寿命的损失或至少严重地缩减所注入的大轨道(高能)粒子的寿命,这一事实不利于所有高能等离子体应用,包括经由辅助束加热的聚变。

[0060] 表面修整是能够在约束系统中控制或减少中性气体和杂质的不利作用的技术手段。为此目的,本发明所提供的FRC系统10采用钛和锂沉积系统810和820,钛和锂沉积系统810和820用Ti和/或Li薄膜(数十微米厚)涂覆约束腔室(或容器)100和偏滤器300的面向等离子体的表面。经由气相沉积技术来实现涂层。固体Li和/或Ti被蒸发和/或升华并且喷涂到附近表面上以形成涂层。源为原子炉,其具有引导喷嘴(在Li的情况下)822或者带引导护罩的受热固体球812(在Ti的情况下)。Li蒸发器系统通常以连续模式操作,而Ti升华器主要在等离子体操作之间间歇地操作。这些系统的操作温度高于600°C以获得快速沉积速率。为了实现良好的壁覆盖,需要多个策略性定位的蒸发器/升华器系统。图9详细描述了FRC系统10中的吸杂沉积系统810和820的优选布置。涂层用作吸杂表面并且有效地泵吸氢类原子和分子物质(H和D)。涂层也将其它通常的杂质(诸如碳和氧)减少到无关紧要的水平。

[0061] 镜堵漏部

[0062] 如上文所述,FRC系统10采用如图2和图3所示的成组镜线圈420、430和444。第一组镜线圈420位于约束腔室100的两个轴向端处并且由主要磁性系统410的约束线圈412、414和416独立地激励。第一组镜线圈420主要帮助在合并期间操纵并轴向地包含FRC 450并且在持续期间提供平衡成形控制。第一组镜线圈420产生名义上比由中央约束线圈412产生的中央约束场更大的磁场(大约0.4至0.5 T)。包括三个紧凑型准直流镜线圈432、434和436的第二组镜线圈430位于形成部段200和偏滤器300之间,并且由共同的开关电源驱动。镜线圈432、434和436与更紧凑的脉冲镜堵漏部线圈444(由电容电源供电)和物理收缩部442一起形成镜堵漏部440,其提供具有非常大的磁场(在2至4 T之间且上升时间是大约10至20 ms)的狭窄的低气体传导路径。与约束线圈412、414和416的一米以上尺度(meter-plus-scale)

的孔和煎饼形设计相比,最紧凑的脉冲镜线圈444具有紧凑的径向尺寸,20 cm的孔和类似的长度。镜堵漏部440的目的是多元的:(1)线圈432、434、436和444紧密地束集磁通量表面455和端部流动的等离子体射流454并且将其引导至边远的偏滤器300内。这保证了排出的粒子恰当地到达偏滤器300并且存在连续的通量表面455,连续的通量表面455可从中央FRC 450的开放场力线452区域循迹直到偏滤器300。(2)FRC系统10中的物理收缩部442对来自安放于偏滤器300中的等离子体枪350的中性气体流提供阻碍,其中线圈432、434、436和444通过收缩部442能够实现磁通量表面455和等离子体射流454的通路。同样,收缩部442防止来自形成部段200的气体返流到偏滤器300,从而减少当开始启动FRC时必须引入整个FRC系统10内的中性粒子的数量。(3)由线圈432、434、436和444所产生的强轴向镜减少了轴向粒子损失并且因此减少了开放场力线上的平行粒子扩散性。

[0063] 轴向等离子体枪

[0064] 来自安装于偏滤器300的偏滤器腔室310中的枪350的等离子体流旨在改进稳定性和中性束性能。枪350安装在偏滤器300的腔室310内侧的轴线上,如图3和图10所示,并且产生在偏滤器300中沿开放场力线452并且朝向约束腔室100的中心流动的等离子体。枪350在垫圈-堆叠通道中在高密度气体放电下操作并且被设计成在5至10 ms内生成数千安培的完全电离的等离子体。枪350包括脉冲式磁线圈,其使输出等离子体流与约束腔室100中等离子体的期望大小匹配。枪350的技术参数的特征在于,具有5至13 cm的外径和高达约10 cm的内径的通道,并且以介于0.5至2.3 T之间的枪内磁场在400至600 V下提供10至15 kA的放电电流。

[0065] 枪等离子体流能够渗透镜堵漏部440的磁场并且流入形成部段200和约束腔室100内。等离子体通过镜堵漏部440转移的效率随着枪350与堵漏部440之间的距离减小和使堵漏部440更宽和更短而增加。在合理条件下,枪350能够分别在约150至300 eV和约40至50 eV的高离子和电子温度的情况下各自递送近似 10^{22} 个质子通过该2至4 T的镜堵漏部440。枪350提供FRC边缘层456的大量加料,并且改进了整体的FRC粒子约束。

[0066] 为了进一步增加等离子体密度,可以利用气箱来将额外气体从枪350充入等离子体流内。这种技术允许所注入的等离子体密度数倍的增加。在FRC系统10中,安装于镜堵漏部440的偏滤器300侧上的气箱改进了FRC边缘层456的加料、FRC 450形成和等离子体线捆(line-tying)。

[0067] 已知上文所讨论的所有调整参数并且也考虑仅利用一个或利用两个枪操作都是可行的,容易地显而易见的是,可获得广泛范围的操作模式。

[0068] 偏压电极

[0069] 开放通量表面的电偏压能够提供径向电势,该径向电势引起方位角 $E \times B$ 运动,方位角 $E \times B$ 运动,其提供一种类似于转动旋钮的控制机制,以经由速度剪切来控制开放场力线等离子体以及实际FRC芯450的旋转。为了实现这种控制,FRC系统10采用策略性地放置于机器的各种部分中的各种电极。图3描绘了定位在FRC系统10内的优选位置处的偏压电极。

[0070] 原则上,存在4类电极:(1)约束腔室100中的点电极905,其与FRC 450的边缘中的特定开放场力线452接触以提供局部充电;(2)约束腔室100与形成部段200之间的环形电极900,以便以方位角对称方式向远边缘层456充电;(3)偏滤器300中的同心电极910堆,以向多个同心通量层充电(由此,可以通过调整线圈416来调整偏滤器磁场以便在恰当电极910

上终止期望的边缘层456来控制层的选择);以及最后,(4)等离子体枪350本身的阳极920(参看图10)(其拦截FRC 450的分界面附近的内部开放通量表面455)。图10和图11示出了针对这些电极中的一些的一些典型设计。

[0071] 在所有情况下,这些电极由脉冲式电源或直流电源以高达约800 V的电压驱动。取决于电极大小和与何通量表面相交,电流能够被带入千安培范围中。

[0072] FRC系统的非持续操作-常规状态

[0073] FRC系统10上的标准等离子体形成遵循良好地发展了的反场角向箍缩技术。用于启动FRC的典型过程始于将准直流线圈412、414、416、420、432、434和436驱动成稳态操作。然后脉冲功率形成系统210的RFTP脉冲功率电路驱动脉冲式快速反向磁场线圈232以在形成部段200中形成约-0.05 T的临时反向偏压。此时,在9-20 psi下的预定量的中性气体经由一组位于形成部段200外端上的凸缘处的方位角定向的充入谷(puff -vale)被注入由(北和南)形成部段200的石英管腔室240限定的两个形成容积内。接下来,从石英管240的表面上的一组天线生成小RF(~数百千赫兹)场,以在中性气体柱内以局部种子电离区域(seed ionization region)的形式形成预电离。这之后是对驱动所述脉冲式快速反向磁场线圈232的电流施加角向振铃(theta-ringing)调制,这导致气体柱的更加全面的预电离。最后,激励脉冲功率形成系统210的主脉冲功率组以驱动脉冲式快速反向磁场线圈232,以形成高达0.4 T的前向偏置场。这个步骤可以是按时间顺序的,使得贯穿形成管240的长度均匀地生成前向偏置场(静态形成)或者使得沿形成管240的轴线实现连续的蠕动场调制(动态形成)。

[0074] 这整个形成过程中,在约5 μ s内快速地发生等离子体中的实际场反向。被递送到正形成的等离子体的数千兆瓦特的脉冲功率容易地产生热FRC,热FRC然后经由前向磁场(磁蠕动)的时序调制或者形成管210的轴向外端附近的线圈组232的最后的线圈中的临时增加的电流(形成轴向地指向约束腔室100的轴向磁场梯度)中的任一者的应用从形成部段200出射。然后如此形成并加速的两个(北和南)形成FRC扩张到更大直径的约束腔室100内,其中准直流线圈412产生前向偏置场以控制径向扩张并且提供平衡的外磁通量。

[0075] 一旦北和南形成FRC到达约束腔室100的中间平面附近,FRC就碰撞。在碰撞期间,当FRC最终合并为单个FRC 450时,北和南形成FRC的轴向动能很大程度上被热化。约束腔室100中一大组等离子体诊断都是可用的,以研究FRC 450的平衡。FRC系统10中典型的操作条件产生复合FRC,并且具有约0.4 m的分界面半径和约3 m的轴向延伸。进一步的特性是约0.1 T的外部磁场、大约 $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 的等离子体密度和高达1 keV的总等离子体温度。在没有任何维持,即,没有经由中性束注入或其它辅助技术手段的加热和/或电流驱动的情况中,这些FRC的寿命限于约1 ms,这是本征特性位形衰减时间。

[0076] 非持续操作的实验数据-常规状态

[0077] 图12示出排斥通量半径 $r_{\Delta\Phi}$ 的典型时间演变,排斥通量半径 $r_{\Delta\Phi}$ 近似分界面半径 r_s ,以示出FRC 450的角向箍缩合并过程的动态。两个(北和南)单个等离子体粒团同时产生并且以超音速 $V_z \sim 250 \text{ km/s}$ 从相应的形成部段200加速出来,并且在 $z=0$ 处的中间平面附近碰撞。在碰撞期间,在最终合并以形成FRC 450之前,等离子体粒团轴向地压缩,继之以快速的径向和轴向膨胀。合并FRC 450的径向和轴向动态两者都由详细的密度分布测量和基于测辐射热仪的断层摄影术表明。

[0078] 在图13中,来自FRC系统10的代表性非持续放电的数据被示出为随时间而变化。FRC起始于 $t=0$ 。在图13(a)中示出在机器的轴向中间平面处的排斥通量半径。从位于约束腔室的不锈钢壁恰好内侧的磁性探头阵列获得这些数据,磁性探头测量轴向磁场。钢壁在该放电的时间尺度上是良好的通量保存器。

[0079] 图13(b)中示出线积分密度,来自位于 $z=0$ 处的6-弦 $\text{CO}_2/\text{He-Ne}$ 干涉仪。考虑到如由测辐射热断层摄影术所测量的竖直(y)FRC位移,Abel反演得到图13(c)的等密度线。在第一0.1 ms期间进行一些轴向和径向晃动之后,FRC以中空密度分布稳定。这种分布相当地平坦,并且在轴线上具有显著的密度,如典型2-D FRC平衡所需要的那样。

[0080] 图13(d)中示出总等离子体温度,其从压力均衡得到并且与汤姆森散射和光谱学测量完全一致。

[0081] 来自整个排斥通量阵列的分析表明,FRC分界面的形状(由排斥通量轴向分布近似)从跑道形逐渐地演变为椭圆形。图14中示出的这种演变与从两个FRC到单个FRC的渐进式磁重联一致。实际上,粗略估计表明在这种特定情形中,两个初始FRC磁通量的约10%在碰撞期间重联。

[0082] 在FRC寿命期间,FRC长度从3 m平稳地缩减至约1 m。图4中可见的这种收缩表明对能量损失主要地支配了FRC约束。由于分界面内侧的等离子体压力比外部磁压力更快速地减小,端部区域中的磁场线张力轴向地压缩所述FRC,恢复轴向和径向平衡。对于图13和图14中所讨论的放电,当FRC平衡似乎将消退时,FRC磁通量、粒子存量和热能(分别为约10 mWb、 7×10^{19} 个粒子和7 kJ)在第一毫秒中减小大致一个数量级。

[0083] 持续操作-HPF状态

[0084] 图12至图14中的示例是无任何维持的情况下的衰减FRC的特性。但是,FRC系统10上运用了若干技术以根据HPF状态进一步改进FRC约束(内芯和边缘层)并且维持这种位形。

[0085] 中性束

[0086] 首先,快速(H)中性粒子(neutral)在来自八个中性束注入器600的束中垂直于 B_z 注入。从北和南形成FRC在约束腔室100中合并为一个FRC 450的时刻开始,注入快速中性粒子的束。主要由电荷交换形成的快速离子具有添加到FRC 450的方位角电流的电子感应加速器轨道(具有FRC拓扑结构的尺度上或者至少远大于特性磁场梯度长度尺度的主要半径)。在放电的一些部分之后(在进入注射0.5至0.8 ms之后),足够大的快速离子群体显著地改进了内FRC的稳定性和约束性质(参看例如M. W. Binderbauer and N. Rostoker, Plasma Phys. 56, part 3, 451(1996))。此外,从维持的角度,来自中性束注入器600的束也是用以驱动电流和加热FRC等离子体的主要技术手段。

[0087] 在FRC系统10的等离子体状态中,快速离子主要在等离子体电子上减缓。在放电的早期部分期间,快速离子的典型轨道平均减缓时间为0.3至0.5 ms,这导致显著的FRC加热(主要是电子的)。快速离子在分界面外侧进行大的径向漂移,原因在于内部FRC磁场是固有地低(对于0.1 T的外部轴向场而言平均为约0.03 T)。如果在分界面外侧中性气体密度过高,那么快速离子将易遭受电荷交换损失。因此,运用在FRC系统10上的壁吸杂和其它技术(诸如除其它之外还有助于气体控制的等离子体枪350和镜堵漏部440)倾向于使边缘中性粒子最小化并且使得能够建立所需要的快速离子电流。

[0088] 弹丸注入

[0089] 当在FRC 450内建立显著的快速粒子群体,并且有更高的电子温度和更长的FRC寿命时,冷冻的H或D弹丸从弹丸注入器700注入FRC 450内,以维持FRC 450的FRC粒子存量。预期的消融时间尺度足够短以提供显著的FRC粒子源。当在弹丸注入器700的管筒或注入管中时并且在进入约束腔室100之前,可以通过将单个弹丸破碎为更小的碎片来扩大注入件的表面积能够增加这个速率,可以通过在即将进入约束腔室100内之前张紧所述注入管的最后区段的弯曲半径来增加弹丸与注入管的壁之间的摩擦来实现这个步骤。通过改变12个管筒(注入管)的发射顺序和速率以及分裂,调和弹丸注入系统700以提供粒子存量维持恰好期望的水平是可行的。相应地,这帮助保持FRC 450中的内部动压和FRC 450的持续操作和寿命。

[0090] 一旦消融的原子在FRC 450中遇到大量等离子体,它们就变得被完全电离。然后由固有FRC等离子体碰撞加热所得的冷等离子体部件。保持期望的FRC温度所必需的能量最终由束注入器600供应。在这个意义上,弹丸注入器700与中性束注入器600一起形成保持稳态和维持FRC 450的系统。

[0091] CT注入器

[0092] 作为弹丸注入器的替代性实施例,设置一种紧凑环(CT)注入器,其主要用于用场反向位形(FRC)等离子体加料。CT注入器720包括磁化同轴等离子体枪(MCPG),其如图21中所示,包括同轴的圆筒形内电极722和外电极724;定位在内电极722内部的偏置线圈和CT注入器720的放电的相对端部上的电断路器(break)728。气体通过气体注入端口730注入内电极722和外电极724之间的空间内,并且通过放电从其中生成球马克(Spheromak)状等离子体并由洛伦兹力从枪中将其推出。如图22A和22B中所示,一对CT注入器720在容器100的中间平面附近且在相对侧上联接到约束容器100,以将CT注入约束容器100内的中央FRC等离子体内。CT注入器720的放电端以与约束容器100的纵向轴线成一角度(与中性束注入器615类似)的方式指向约束容器100的中间平面。

[0093] 在替代性实施例中,如图23A和23B中所示,CT注入器720包括漂移管740,其包括联接到CT注入器720的放电端的细长圆筒形管。如图所示,漂移管740包括漂移管线圈742,其围绕管定位并沿管轴向间隔开。沿管的长度绘出多个诊断端口744。

[0094] CT注入器720的优点是:(1)每个注入的CT的粒子存量的控制和可调整性;(2)沉积温热的等离子体(而不是低温弹丸);(3)能够以重复频率(rep-rate)模式重新操作系统,以便允许连续加料;(4)由于注入的CT携带嵌入式磁场,系统也能够恢复一些磁通量。在用于实验使用的实施例中,外电极的内径为83.1 mm,内电极的外径为54.0 mm。内电极722的表面优选地涂覆有钨,以便减少从电极722放出的杂质。如图所示,偏置线圈726安装在内电极722的内侧。

[0095] 在最近的实验中,实现了高达 ~ 100 km/s的超音速CT平移速度。其它典型的等离子体参数如下:电子密度 $\sim 5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$,电子温度 $\sim 30\text{-}50$ eV,以及粒子存量为 $\sim 0.5\text{-}1.0 \times 10^{19}$ 。CT的高动压允许注入的等离子体深入地渗透FRC内并将粒子沉积在分界面内侧。在最近的实验中,FRC粒子加料导致由CT注入器提供的FRC粒子存量的 $\sim 10\text{-}20\%$ 成功地展示能够容易地进行加料而不会扰乱FRC等离子体。

[0096] 鞍形线圈

[0097] 为了实现稳态电流驱动并且保持所需的离子电流,期望防止或显著地减小由于电

子-离子摩擦力(由于碰撞的离子电子动量转移造成)所造成的电子加快自旋。FRC系统10利用创新性技术来经由外部施加的静态磁偶极或四极场来提供电子破碎(electron breaking)。这经由图15中所描绘的外部鞍形线圈460来实现。从鞍形线圈460横向施加的径向磁场在旋转FRC等离子体中感应轴向电场。所得到的轴向电子电流与径向磁场相互作用以在电子上产生方位角破碎力, $F_{\theta} = -\sigma V_{e0} \langle |B_r|^2 \rangle$ 。对于FRC系统10中的典型条件,在等离子体内侧所需要施加的磁偶极(或四极)场需要为仅0.001 T的量级,以提供充分的电子破碎。约0.015T的对应的外场足够小以不引起明显的快速粒子损失或以其它方式不利地影响约束。实际上,所施加的磁偶极(或四极)场有助于抑制不稳定性。与切向中性束注入和轴向等离子体注入相结合,鞍形线圈460提供关于电流维持和稳定性的额外水平的控制。

[0098] 镜堵漏部

[0099] 镜堵漏部440内的脉冲式线圈444的设计允许以适度(约100 kJ)的电容能量局部生成高磁场(2至4 T)。为了形成FRC系统10的本操作的典型的磁场,形成容积内的所有场力线穿过镜堵漏部440处的收缩部442,如图2中的磁场线所示,并且未发生等离子体壁接触。此外,与准直流偏滤器磁体416串联的镜堵漏部440可以被调整为将场力线引导至偏滤器电极910上,或者使场力线以端部会切(cusp)位形张开(未图示)。端部会切位形改进了稳定性并且抑制平行电子热传导。

[0100] 镜堵漏部440本身也有助于中性气体控制。镜堵漏部440允许在FRC形成期间更好地利用充入石英管内的氩气,这是因为堵漏部的小的气体传导(极小的500 L/s)显著地减小了进入偏滤器300内的气体返流。形成管210内侧的大部分残留的充入气体被迅速电离。此外,流动通过镜堵漏部440的高密度等离子体提供高效的中性电离,因此提供有效的气体屏障。因此,来自FRC边缘层456的在偏滤器300中再循环的大部分中性粒子并不返回约束腔室100。此外,与等离子体枪350的操作相关联的中性粒子(如在下文讨论)将通常约束于偏滤器300。

[0101] 最后,镜堵漏部440倾向于改进FRC边缘层约束。利用在20至40范围中的镜比(堵漏部/约束磁场)和北和南镜堵漏部440之间的15 m的长度,边缘层粒子约束时间 τ_{\parallel} 增加高达一个数量级。改进 τ_{\parallel} 易于增加FRC粒子约束。

[0102] 假定源自分界面容积453的径向扩散性(D)粒子损失由源自边缘层456的轴向损失(τ_{\parallel})均衡,则获得 $(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta) = (2\pi r_s L_s \delta)(n_s/\tau_{\parallel})$,从此式,分界面密度梯度长度能够被重写为 $\delta = (D\tau_{\parallel})^{1/2}$ 。此处, r_s 、 L_s 和 n_s 分别为分界面半径、分界面长度和分界面密度。FRC粒子约束时间为 $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta)] = (\langle n \rangle / n_s)(\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$,其中 $\tau_{\perp} = a^2/D$ 并且 $a = r_s/4$ 。物理地,改进 τ_{\parallel} 导致增加的 δ (减小的分界面密度梯度和漂移参数),并且因此,导致减小的FRC粒子损失。FRC粒子约束的总体改进通常略小于二次方(quadratic),因为 n_s 随着 τ_{\parallel} 增加。

[0103] τ_{\parallel} 的显著改进也需要边缘层456保持大体稳定(即,无n=1槽型(flute)、消防水龙带型(firehose),或者开放系统的典型的其它MHD不稳定性)。使用等离子体枪350提供这种优选的边缘稳定性。就此而言,镜堵漏部440和等离子体枪350形成有效的边缘控制系统。

[0104] 等离子体枪

[0105] 等离子体枪350通过线捆(line-tying)改进了FRC排放射流454的稳定性。来自等离子体枪350的枪等离子体在无方位角动量的情况下生成,这证明适用于控制FRC旋转不稳定性。如此,枪350是控制FRC稳定性而无需更旧的四极稳定技术的有效技术手段。因此,等离子体枪350使得能够利用快速粒子的有益效果或者获得如在本公开中所概述的先进的混合动力学FRC状态。因此,等离子体枪350使得在鞍形线圈电流仅足以用于电子破碎但低于将造成FRC不稳定和/或导致显著快速粒子扩散的阈值的情况下FRC系统10能够操作。

[0106] 如在上文的镜堵漏部讨论中所提到的那样,如果能够显著地改进 τ_{\parallel} ,则所供应的枪等离子体将与边缘层粒子损失率($\sim 10^{22}/s$)相当。FRC系统10中枪产生的等离子体的寿命在毫秒范围中。实际上,认为具有 $n_e \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 的密度和约200 eV的离子温度的枪等离子体约束于端部镜堵漏部440之间。俘获长度L和镜比R分别为约15 m和20。由于库仑碰撞所造成的离子平均自由程为 $\lambda_{ii} \sim 6 \times 10^3 \text{ cm}$,并且由于 $\lambda_{ii} \ln R/R < L$,离子被约束于气体动力学状态中。在此状态中等离子体约束时间为 $\tau_{gd} \sim RL/2V_s \sim 2 \text{ ms}$,其中 V_s 为离子声速。为了比较,这些等离子体参数的传统离子约束时间将为 $\tau_c \sim 0.5\tau_{ii}(\ln R + (\ln R)^{0.5}) \sim 0.7 \text{ ms}$ 。异常横向扩散可以在原则上缩短等离子体约束时间。但是,在FRC系统10中,如果假定波姆(Bohm)扩散率,则枪等离子体的估计的横向约束时间为 $\tau_{\perp} > \tau_{gd} \sim 2 \text{ ms}$ 。因此,枪将提供FRC边缘层456的显著加料和改进的总FRC粒子约束。

[0107] 此外,枪等离子体流可以在约150至200微秒内开启,其允许用于FRC启动、平移和合并入约束腔室100。如果在约 $t \sim 0$ (FRC主要组起始)开启,则枪等离子体帮助维持目前动态地形成和合并的FRC 450。来自形成FRC和来自枪的组合的粒子存量足以用于中性束捕获、等离子体加热和长持续。如果在-1至0 ms的范围内的 t 处开启,则枪等离子体可以用等离子体填充石英管或者将充入石英管内的气体电离,因此允许具有减少的或甚至可能为零的充入气体的FRC形成。具有零充入气体的FRC形成可能需要足够冷的形成等离子体以允许反向偏压磁场的快速扩散。如果在 $t < -2 \text{ ms}$ 处开启,则等离子体流可以以若干 10^{13} cm^{-3} 的目标等离子体密度填充形成部段200和约束腔室100的形成和约束区域的约1至3 m^3 场力线容积,这足以允许中性束在FRC到达之前建立。形成FRC然后能够被形成并且平移到所得到的约束容器等离子体内。以此方式,等离子体枪350使得能够实现很多种操作条件和参数状态。

[0108] 电偏压

[0109] 边缘层456中的径向电场分布的控制以各种方式有益于FRC稳定性和约束。由于在FRC系统10中运用的创新性偏压部件,可能将多种周密计划的电势分配施加于一组贯穿机器来自约束腔室100中的中央约束区域完全外侧的区域的开放通量表面。以此方式,横穿FRC 450恰好外侧的边缘层456可生成径向电场。然后,这些径向电场修正边缘层456的方位角旋转并且经由 $E \times B$ 速度剪切实现其约束。然后,边缘层456与FRC芯453之间的任何差异旋转可通过剪切传输到FRC等离子体内侧。因此,控制边缘层456直接地影响了FRC芯453。此外,由于在等离子体旋转中的自由能也能够造成不稳定性,这种技术提供用以控制不稳定性的产生和生长的直接技术手段。在FRC系统10中,恰当的边缘偏压对于开放场力线输运和旋转以及FRC芯旋转提供有效控制。各种所提供的电极900、905、910和920的位置和形状允许控制通量表面455的不同组并且处于不同和独立的电势。以此方式,可以实现大量组合的不同的电场位形和强度,其中的每一个对于等离子体性能具有不同的特性影响。

[0110] 所有这些创新性偏压技术的关键优点在于芯和边缘等离子体行为能够从FRC等离

子体完全外侧实现,即,无需使任何物理部件触及中央热等离子体(这将具有针对能量、通量和粒子损失的严重牵涉)。这对于HPF构思的性能和所有潜在应用具有重大有益影响。

[0111] 实验数据- HPF操作

[0112] 经由来自中性束枪600的束注入快速粒子在使HPF状态能够实现的方面起到重要作用。图16示出该事实。所描绘的是一组曲线,其示出FRC的寿命如何与束脉冲的长度相关。对于构成这次研究的所有放电,所有其它操作条件保持恒定。将多次发射(shot)的数据平均,并且因此代表典型的行为。显而易见的是,更长的束持续时间产生更长寿命的FRC。考虑到这个证据以及这次研究期间的其它诊断,显示出束增加了稳定性并且减少了损失。束脉冲长度与FRC寿命之间的相关并非完美的,因为束俘获在低于某一等离子体大小的情况下变得低效,即,因为FRC 450的物理大小缩减,并非所有注入束被拦截和俘获。FRC的收缩主要是由于对于特定实验设置而言,在放电期间来自FRC等离子体的净能量损失(在放电中间~4 MW)略微大于经由中性束馈送到FRC内的总功率(-2.5MW)。将束定位于更靠近容器100的中间平面的位置处将倾向于降低这些损失并且延长FRC寿命。

[0113] 图17示出不同部件对于实现HPF状态的作用。其示出一系列典型曲线,这些曲线描绘了随时间而变的FRC450的寿命。在所有情况下,恒定、适量的束功率(约2.5 MW)每次放电的整个持续时间内持续注入。每个曲线表示部件的不同组合。例如,在无任何镜堵漏部440、等离子体枪350或者从吸杂系统800吸杂的情况下操作FRC系统10导致旋转不稳定性和FRC拓扑结构损失的快速发作。仅添加镜堵漏部440延迟了不稳定性的发作并且增加了约束。利用镜堵漏部440与等离子体枪350的组合进一步降低了不稳定性并且增加了FRC寿命。最后,除了枪350和堵漏部440之外再加上吸杂(在此情况下是Ti)得到最佳的结果—所得到的FRC不存在不稳定性并且表现出最长的寿命。从这个实验示范可清楚看到的是,部件的完全组合产生最佳效果并且提供具有最佳目标条件的束。

[0114] 如图1所示,新发现的HPF状态表现出显著改进的输运行为。图1示出在常规状态与HPF状态之间FRC系统10中的粒子约束时间的改变。如可以看出的,在HPF状态中,其已改进超过5倍。此外,图1相对于现有常规FRC实验中的粒子约束时间详细描述了FRC系统10中的粒子约束时间。关于这些其它机器,FRC系统10的HPF状态已经以介于5与接近20之间的倍数改进了约束。最后并且最重要地,HPF状态中FRC系统10的约束定标的本质与所有现有测量显著不同。在FRC系统10中确立HPF状态之前,在现有FRC实验中,从数据得出各种经验定标律来预测约束时间。所有那些定标规则通常取决于比例 R^2/ρ_i ,其中R为零位(null)磁场的半径(机器的物理尺度的粗测)并且 ρ_i 为在外部施加的场中评估的离子拉莫半径(施加磁场的粗测)。从图1中显而易见的是,常规FRC中的长约束仅在大的机器大小和/或高磁场的情况中是可能的。以常规FRC状态CR操作FRC系统10倾向于遵循那些定标规则,如图1所示。但是,HPF状态极其优越并且示出可以实现更好的约束而无需大的机器大小或高磁场。更重要的是,从图1也显而易见的是,与CR状态相比,HPF状态以减小的等离子体大小产生改进的约束时间。如下文所描述,对于通量和能量约束时间也可以看到类似的趋势,在FRC系统10中,这已增加大于3-8倍。HPF状态的突破因此使得能够使用适度的束功率、更低的磁场和更小的大小来维持和保持FRC系统10和未来的更高能量的机器中的FRC平衡。与这些改进并存的是更低的操作和构造成本以及降低的工程复杂性。

[0115] 为了进一步比较,图18示出随时间而变的源自FRC系统10中的代表性HPF状态放电

的数据。图18(a)描绘了中间平面处的排斥通量半径。对于这些更长的时间尺度,传导钢壁不再是良好的通量保存器并且壁内部的磁性探头随着壁外侧的探头扩充以适当考虑通过钢的磁通量扩散。与常规状态CR中的典型性能相比,如图13所示,HPF状态操作模式表现出超过400%的更长的寿命。

[0116] 图18(b)中示出了线积分密度迹线的代表性弦,并且在图18(c)中示出其Abel反演补体(inverted complement)、等密度线。与常规FRC状态CR相比,如图13所示,等离子体贯穿脉冲更为平静,指示非常稳定的操作。峰值密度在HPF发射中也略微更低—这是更热的总等离子体温度的结果(高达2的倍数),如图18(d)所示。

[0117] 对于图18中所示的相应放电,能量、粒子和通量约束时间分别为0.5 ms、1 ms和1 ms。在进入放电1 ms的参考时间下,储存的等离子体能量为2 kJ,同时损失为约4 MW,使得这个目标非常适合于中性束持续。

[0118] 图19总结了呈新确立的实验HPF通量约束定标形式的HPF状态的所有优点。如图19中可以看出,基于在 $t=0.5$ ms之前和之后进行的测量,即 $t \leq 0.5$ ms和 $t > 0.5$ ms,对于给定的分界面半径(r_s),该通量约束(以及类似地,粒子约束和能量约束)以电子温度(T_e)的大致平方定标。具有 T_e 的正幂(和非负幂)的这个强定标与常规托卡马克所表现的定标完全相反,其中约束通常与电子温度的某次幂成反比。这种定标的表现形式是HPF状态和大轨道(即,FRC拓扑结构的尺度和/或至少特性磁场梯度长度尺度上的轨道)离子群体的直接结果。根本地,这个新定标实质上有利于高操作温度并且使得能够实现相对适度大小的反应堆。

[0119] 在存在HPF状态的优点的情况下,能够实现由中性束驱动并且使用恰当弹丸注入的FRC维持或稳态,这意味着诸如等离子体热能、总粒子数、等离子体半径和长度以及磁通量的全局等离子体参数能够维持在合理水平而不无实质上的衰变。为了比较,图20在曲线A中示出随时间而变的来自FRC系统10中的代表性HPF状态放电的数据,和在曲线B中示出随时间而变的FRC系统10中所投射的代表性HPF状态放电的数据,其中在中性束脉冲的持续时间期间维持FRC 450而没有衰变。对于曲线A,具有在约2.5-2.9 MW范围内的总功率的中性束在约6 ms的主动束脉冲长度中被注入FRC 450。曲线A中所描绘的等离子体抗磁寿命是约5.2 ms。更多的近期数据表明使用约7 ms的主动束脉冲长度可获得约7.2 ms的等离子体抗磁寿命。

[0120] 如参考图16在上文所述,束脉冲长度和FRC寿命之间的关联并不完美,原因在于束俘获在低于某一等离子体大小时变得低效,即,由于FRC 450的物理大小收缩,并非所有注入的束被拦截和俘获。FRC的收缩或衰变主要是由于对于特定实验设置而言,在放电期间来自FRC等离子体的净能量损失(在放电中间~4 MW)略微大于经由中性束馈送到FRC内的总功率(-2.5MW)。如参考图3C所述,从中性束枪600朝向中间平面的有角度的束注入改进了束-等离子体耦合,即使在注入期间FRC等离子体收缩或以其它方式轴向紧缩也是如此。此外,恰当的弹丸加料将保持必需的等离子体密度。

[0121] 曲线B是使用约6 ms的主动束脉冲长度和略微大于约10 MW的中性束枪600的总束功率模拟运算的结果,其中中性束应注入具有约15 keV的粒子能量的H(或D)中性粒子。由每个束注入的等价电流是约110 A。对于曲线B,相对于装置轴线的束注入角度是约 20° ,目标半径是0.19 m。注入角度能够在 15° - 25° 的范围内改变。束将沿方向角沿并流方向注入。

来自中性束动量注入的净侧向力以及净轴向力应被最小化。在曲线A的情况中,从北和南形成FRC在约束腔室100中合并成一个FRC 450的时刻开始从中性束注入器600注入快速(H)中性粒子。

[0122] 作为曲线B的基础的模拟中,使用多维霍尔-MHD解算器用于背景等离子体和平衡,基于完全动力学蒙特-卡罗的解算器用于能量束分量和所有散射过程,以及耦合的输运方程组用于所有等离子体种类来模型化交互损失过程。输运分量被经验地校准并广泛地以实验数据库测试。

[0123] 如曲线B所示,FRC 450的稳态抗磁寿命将是束脉冲的长度。然而,重要的是注意到关键关联曲线B示出束何时关断,等离子体或者FRC在该时刻开始衰变,而不是之前。衰变将类似于在非束辅助的放电—可能超出束关断时间1 ms的数量级—中所观察到的那样,并且简单地是由本征损失过程驱动的等离子体的特性衰变时间的反映。

[0124] 虽然本发明易于做出各种修改和替代形式,在附图中已示出并且在本文中已详细地描述了本发明的具体示例。但应了解本发明并不限于所公开的特定形式或方法,而是相反地,本发明将涵盖落入所附权利要求的精神和范围内的所有修改、等效物和替代物。

[0125] 在上文的描述中,仅出于解释说明的目的,陈述了具体命名以提供对于本公开的透彻理解。但是对于本领域技术人员显而易见的是,无需这些具体的细节来实践本公开的教导。

[0126] 代表性示例和附属权利要求的各种特征可以以并未具体地和明确地列举的方式组合以便提供本发明的教导的额外的有用的实施例。还应清楚地指出,出于原始公开的目的以及出于限制所要求保护的的主题的目的,所有值范围或实体的集合的指示公开了每个可能的中间值或中间实体。

[0127] 已公开了用于生成和维持HPF状态FRC的系统和方法。应了解本文所描述的实施例是出于阐明目的并且不应被理解为限制本公开的主题。不偏离本发明的范围或精神的各种修改、用途、替代、组合、改进、生产方法将对于本领域技术人员而言显而易见。例如,读者将了解本文所描述的过程动作的具体次序和组合只是说明性的,除非以其它方式陈述,并且可以使用不同的或额外的过程动作或者过程动作的不同组合或次序来执行本发明。作为另一示例,一个实施例的每个特征可以与其它实施例中示出的其它特征混合和匹配。本领域技术人员已知的特征和过程可类似地根据需要并入。此外并且显然地,可以根据需要来增减特征。因此,除了按照所附权利要求和其等效物之外,本发明并不受到限制。

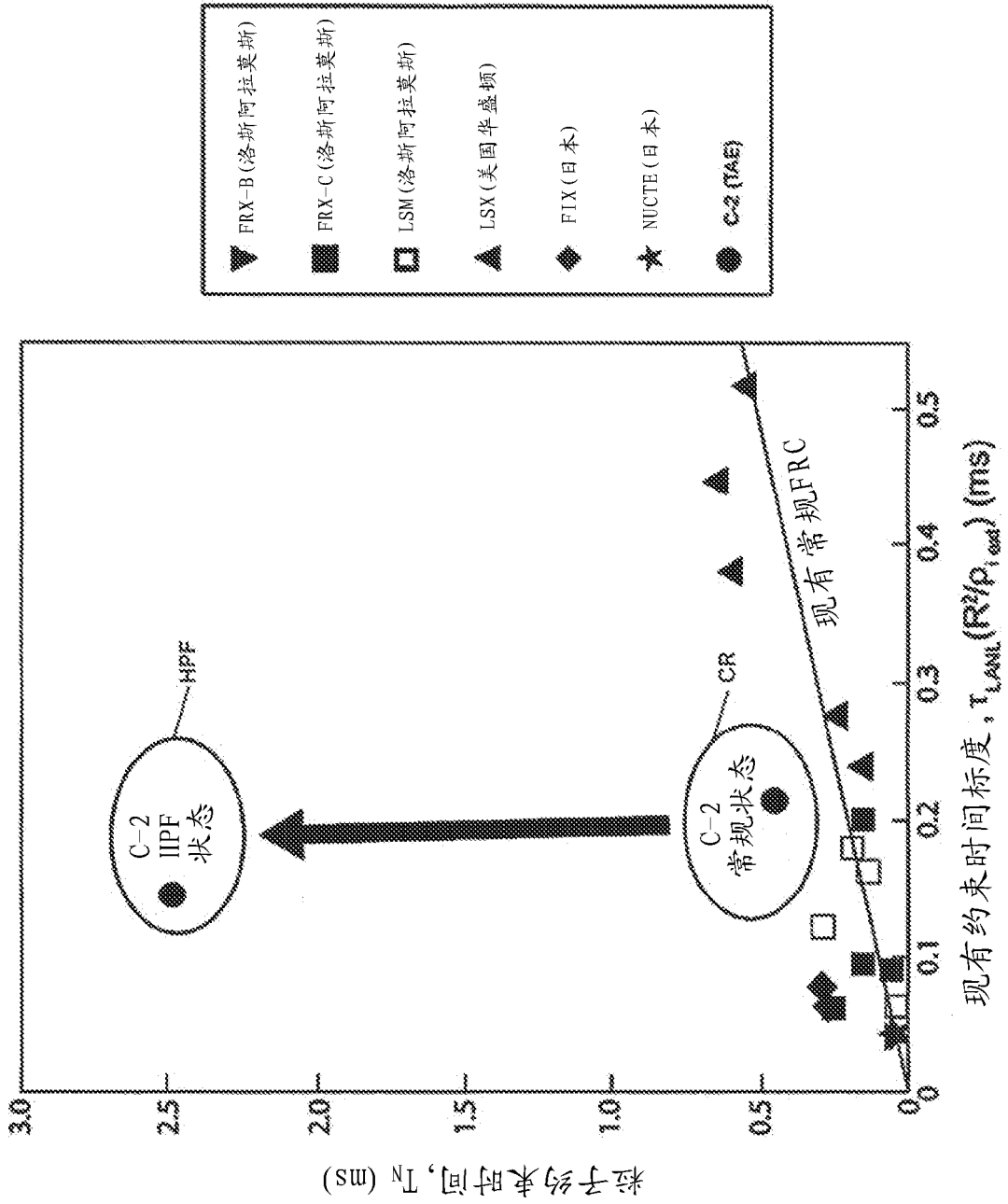


图 1

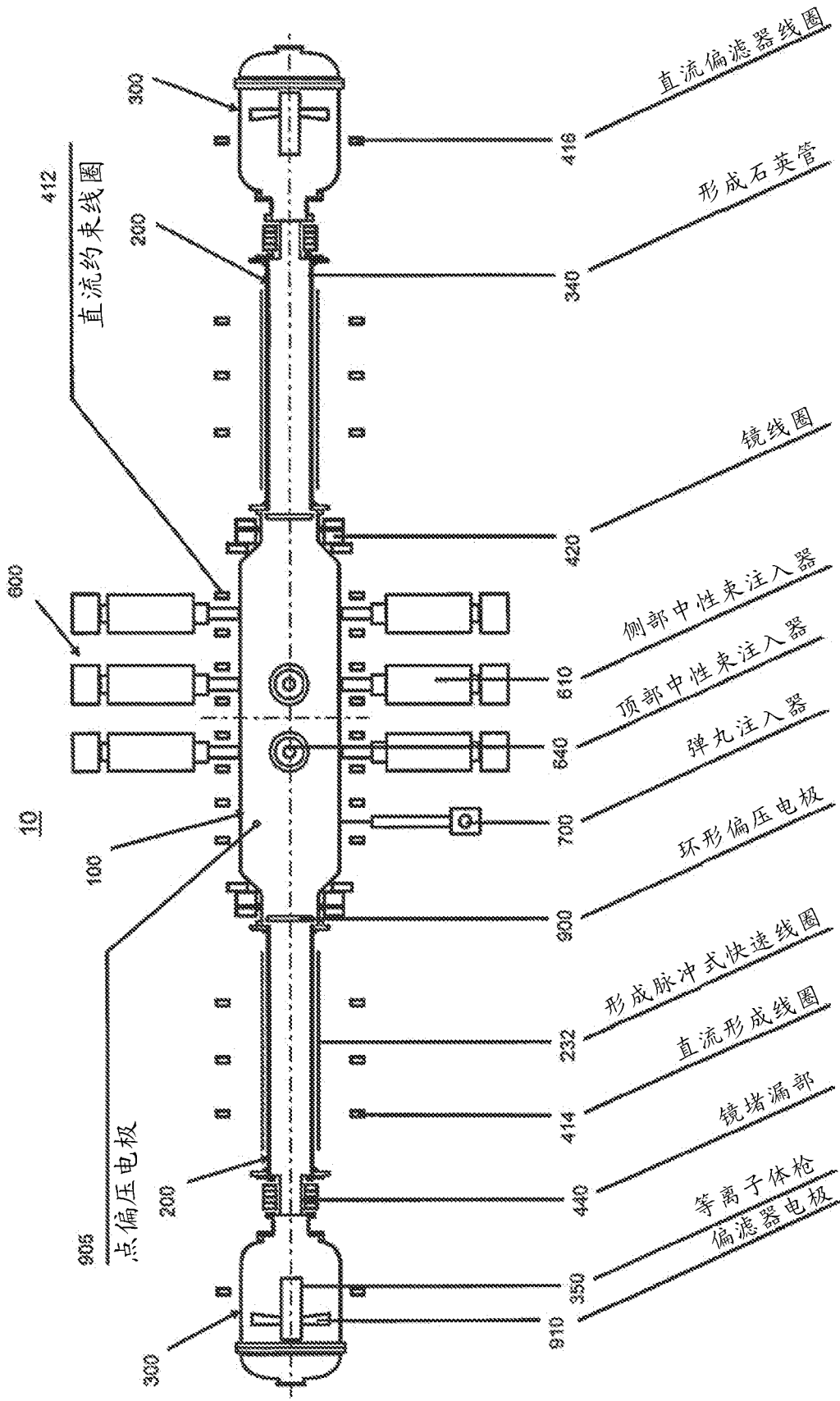


图 3A

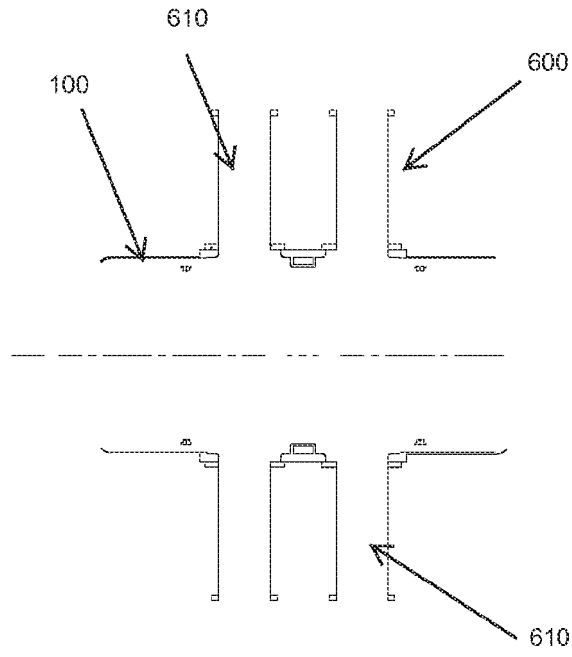


图 3B

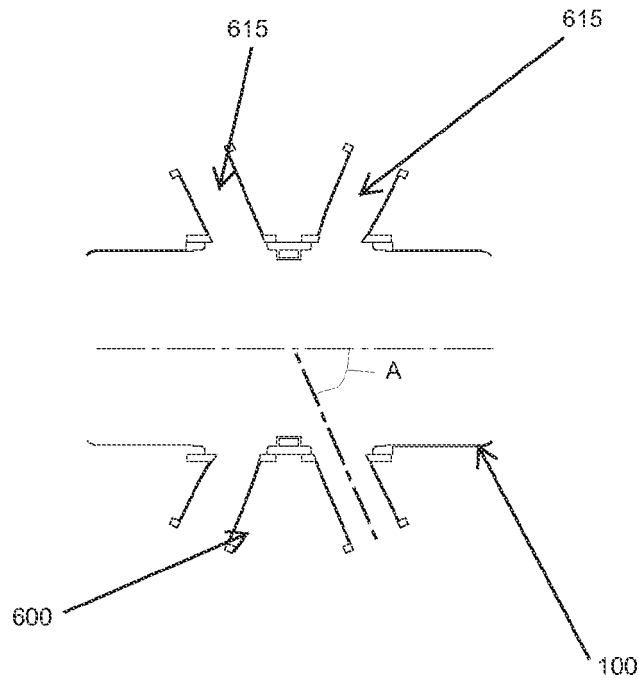


图 3C

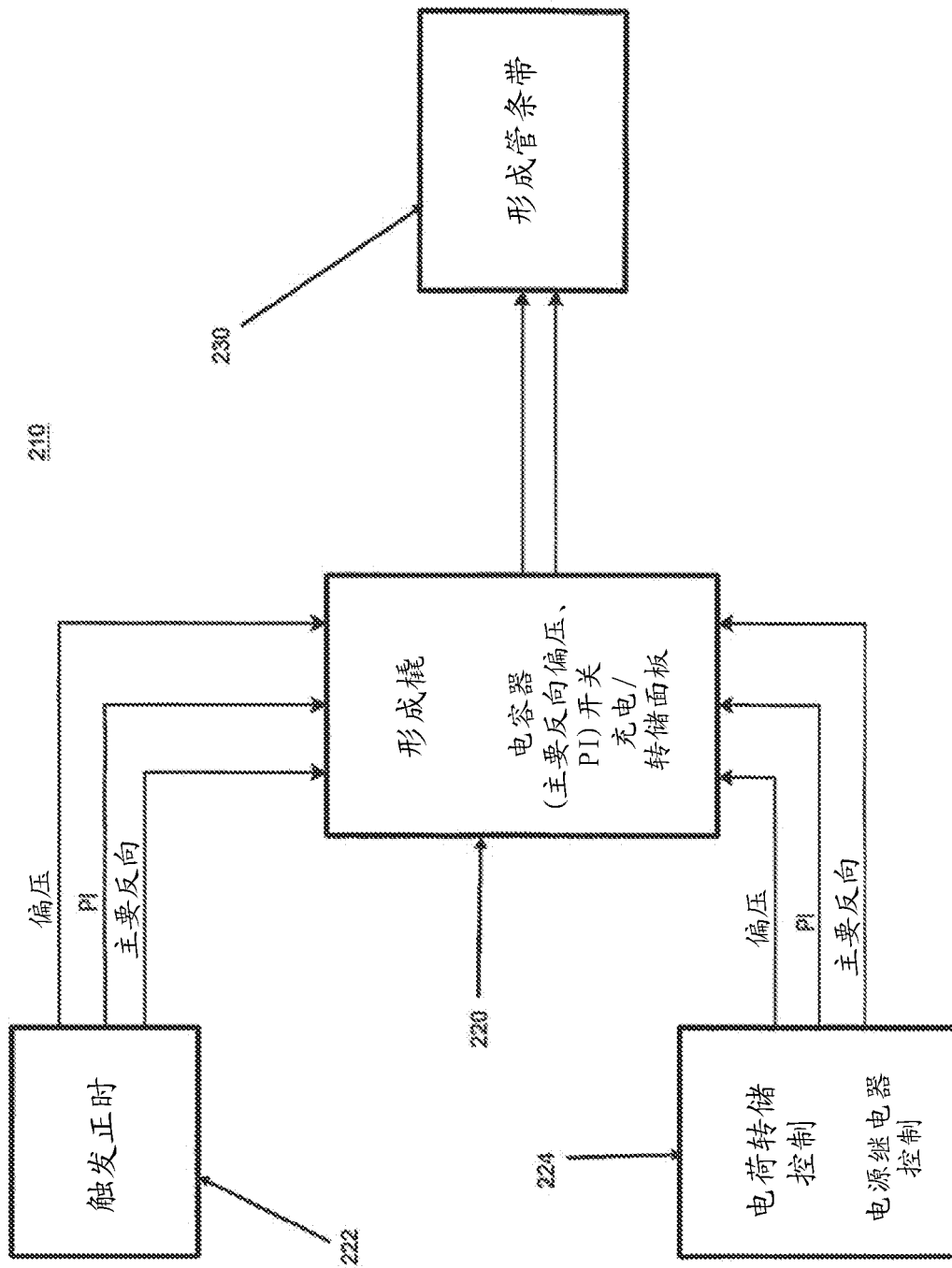


图 4

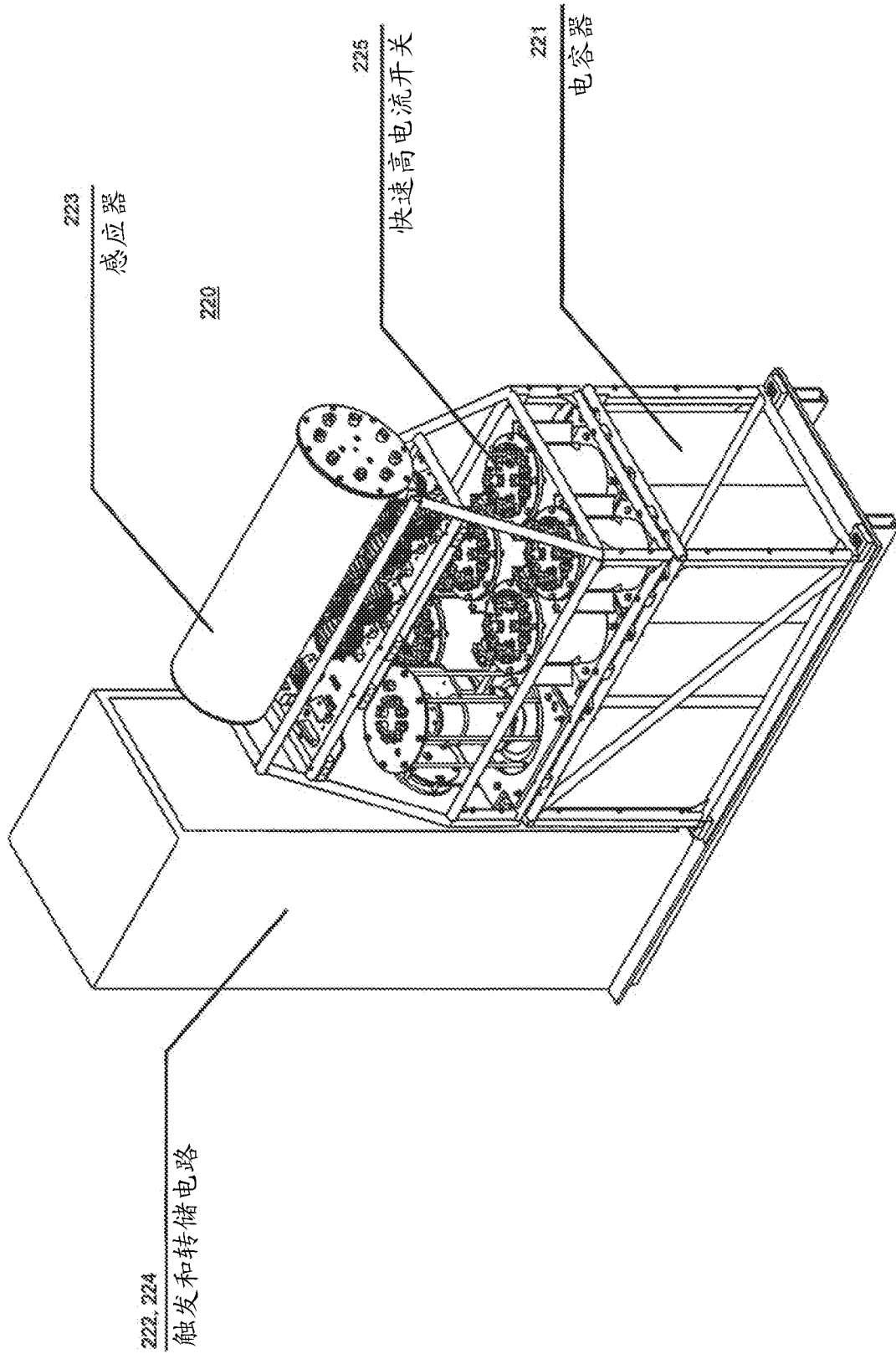


图 5

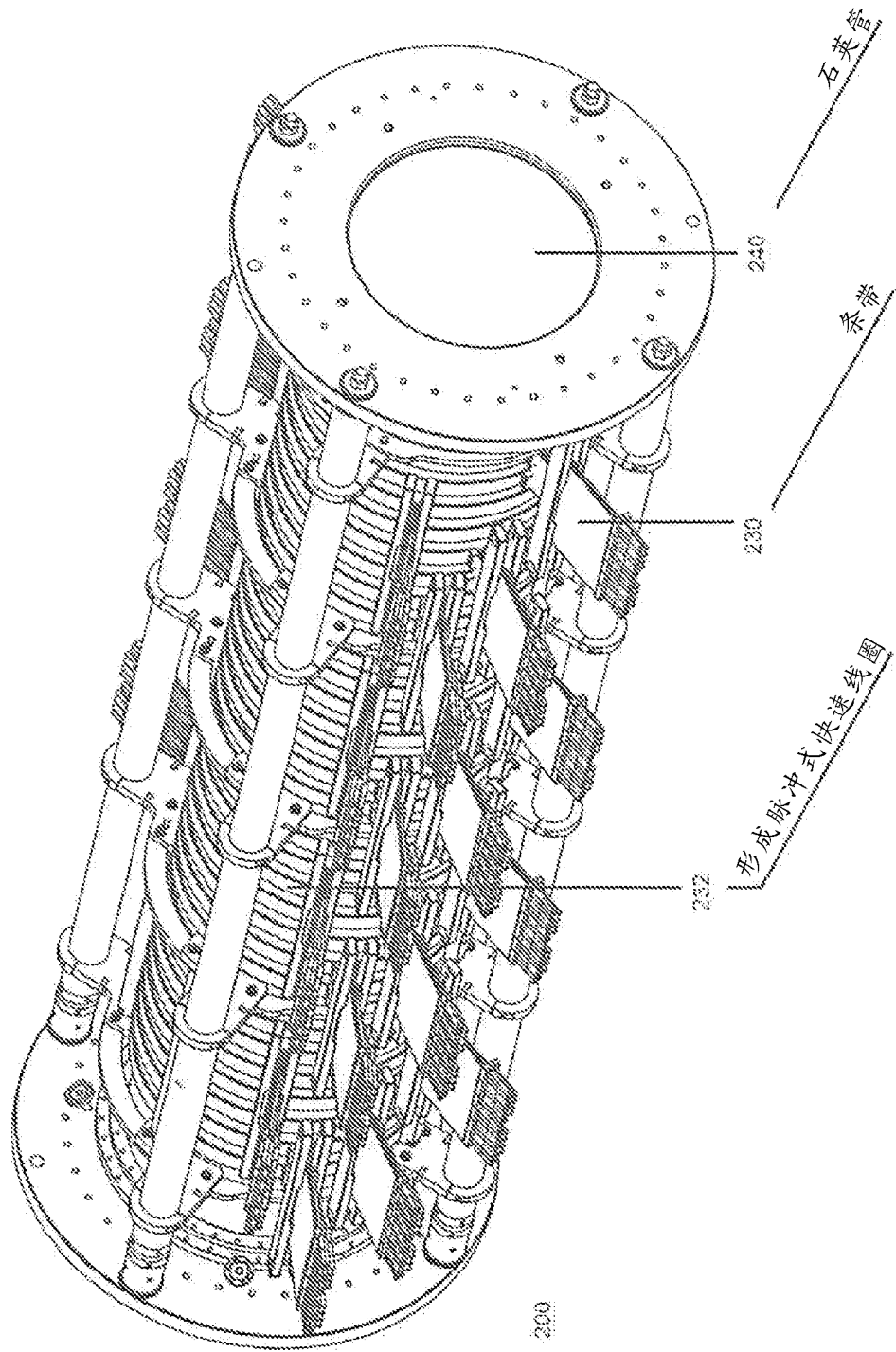


图 6

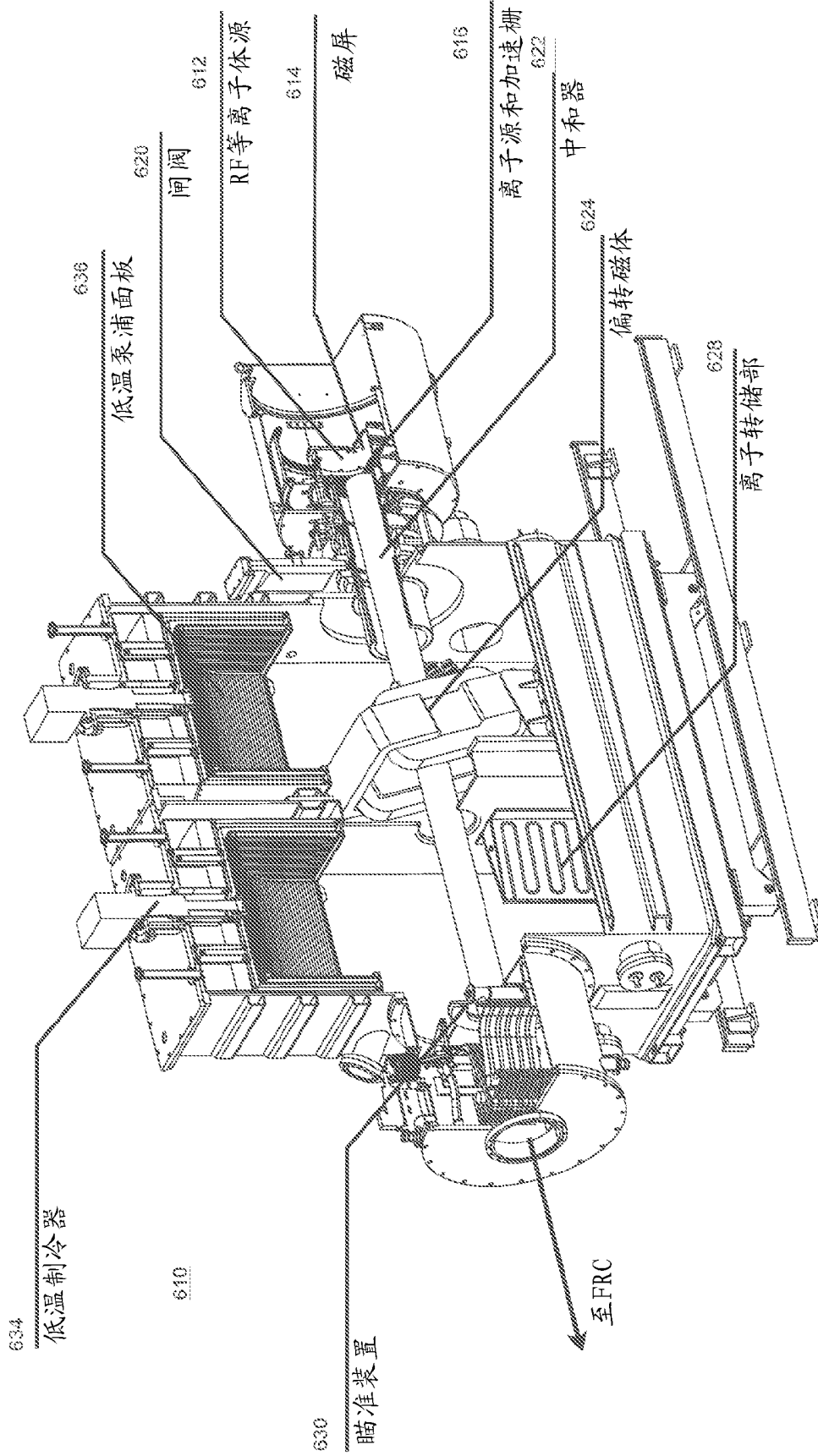


图 7

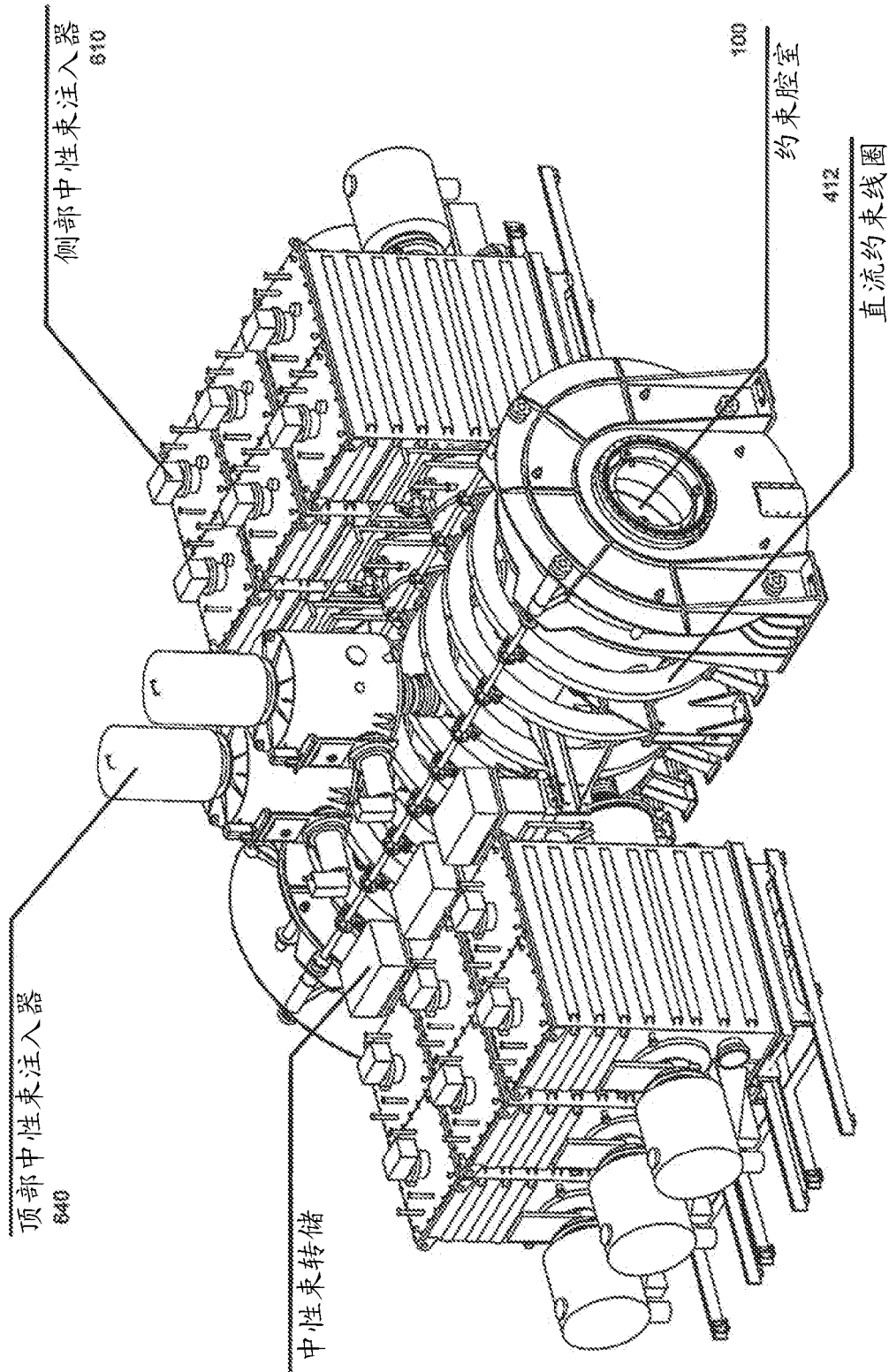


图 8

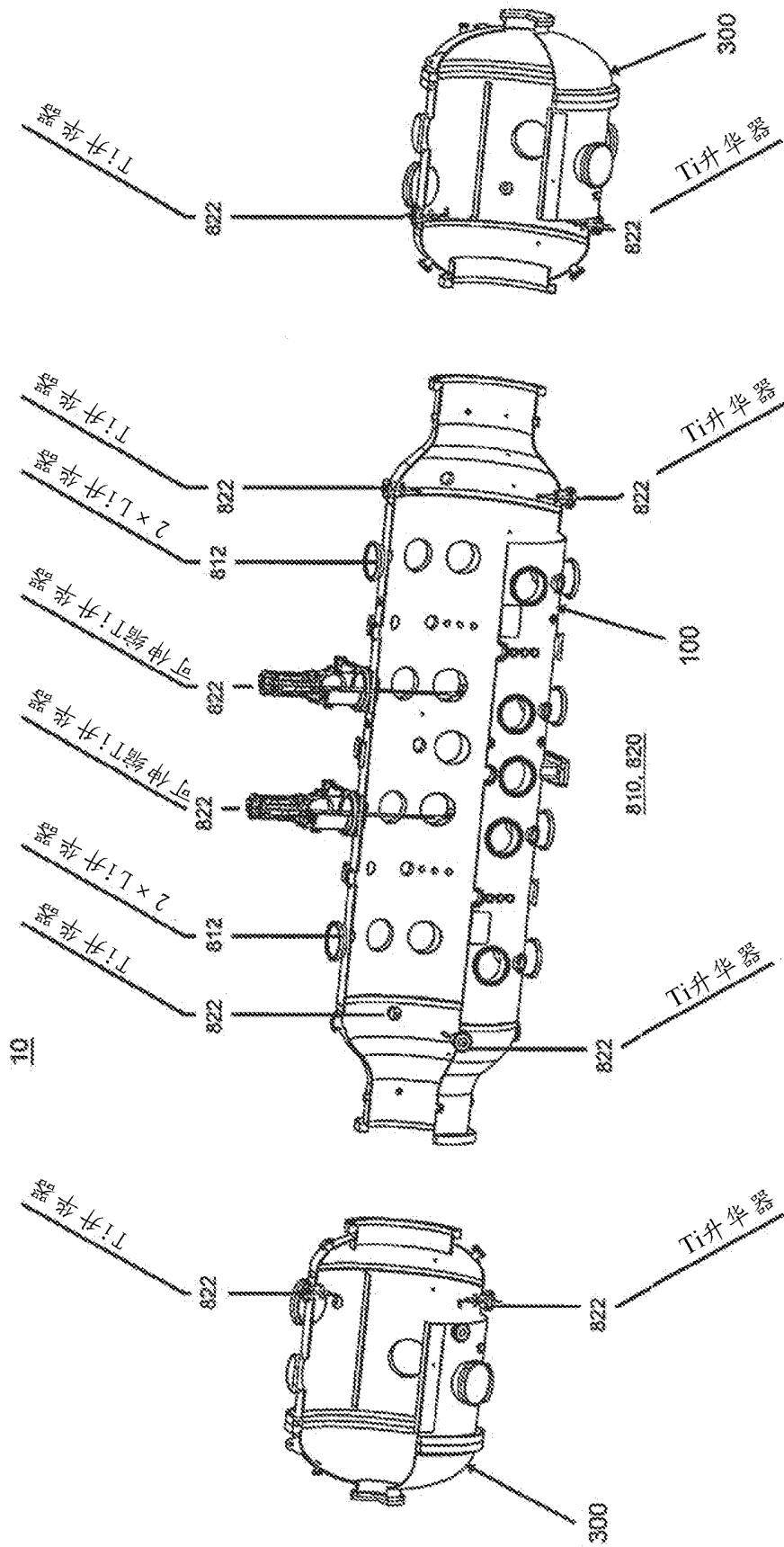


图 9

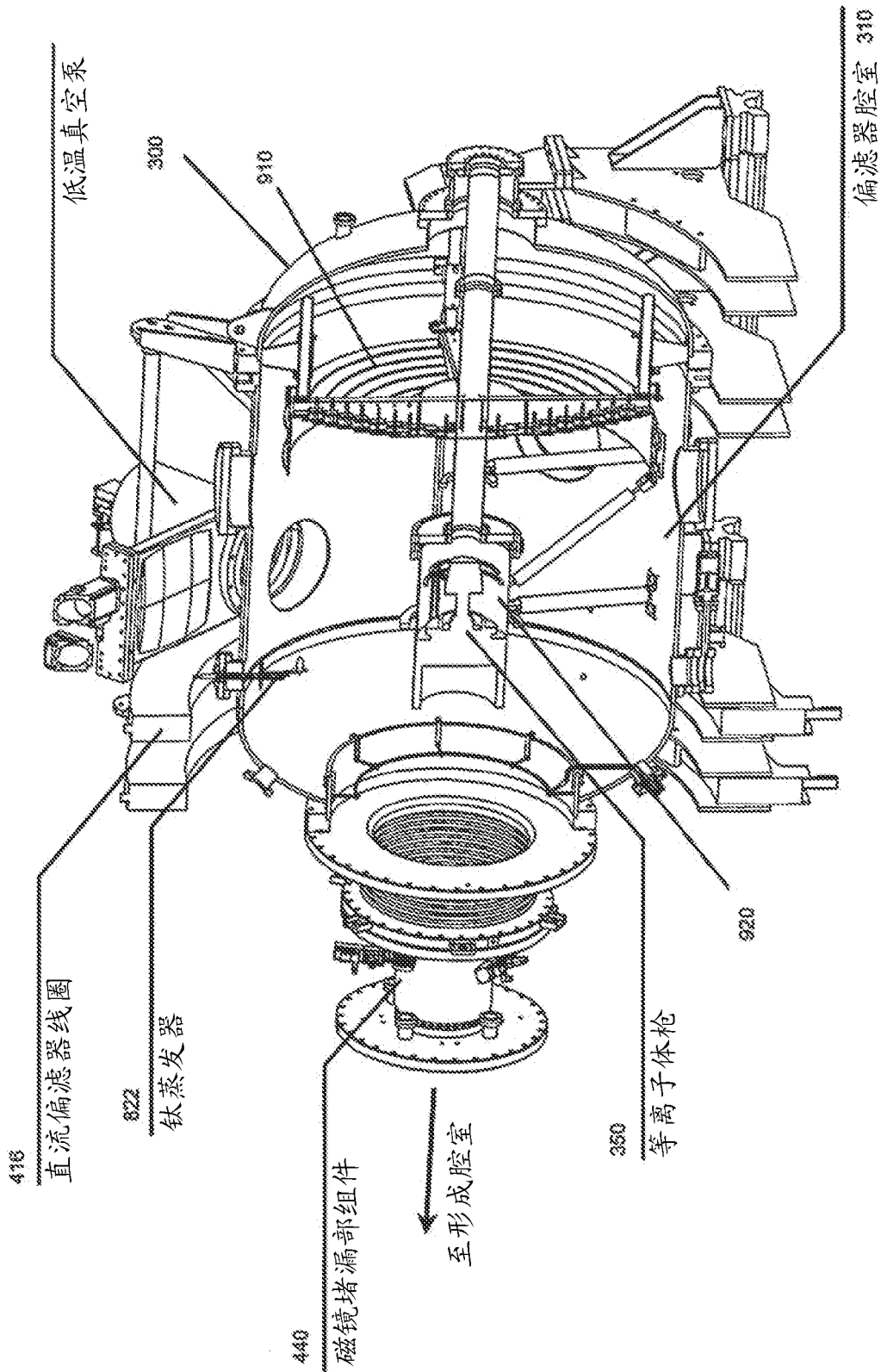


图 10

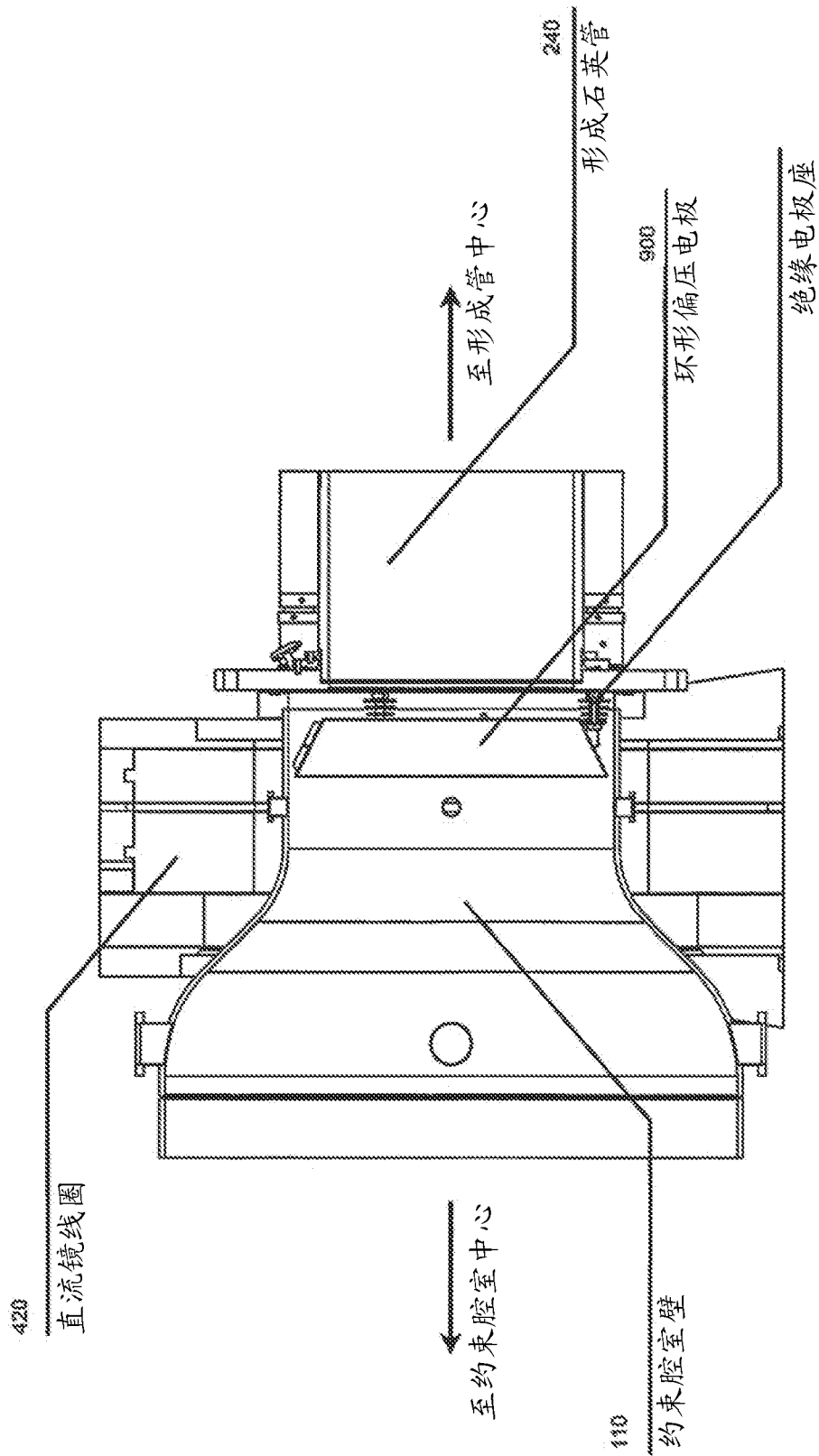


图 11

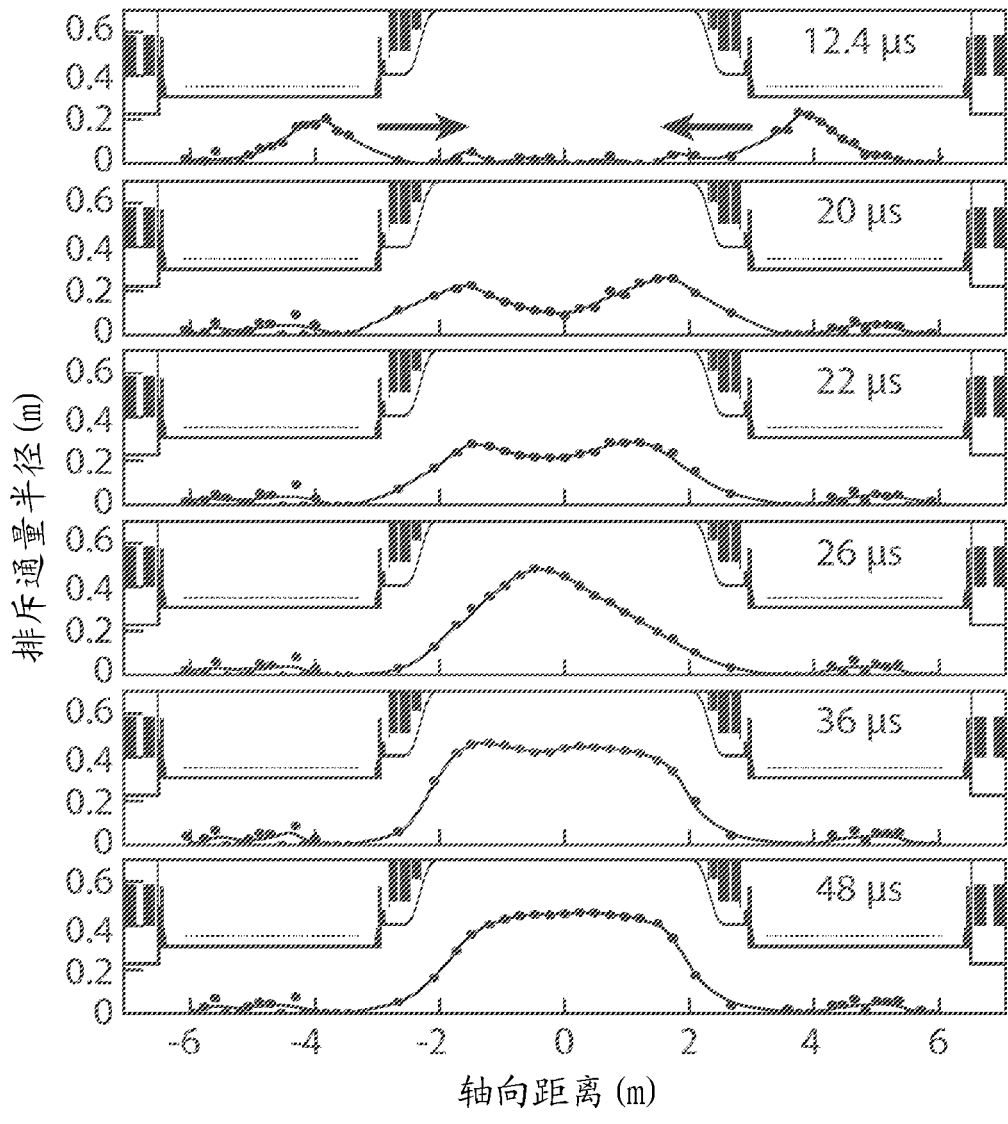


图 12

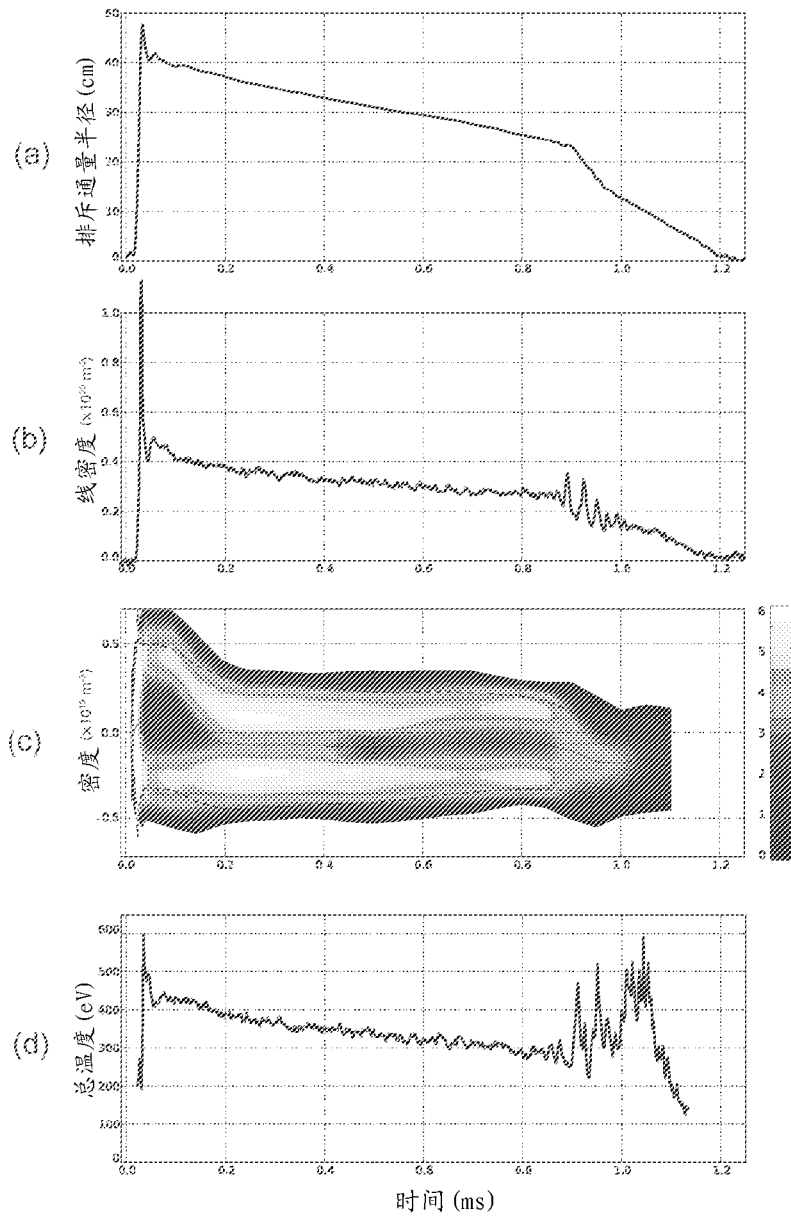


图 13

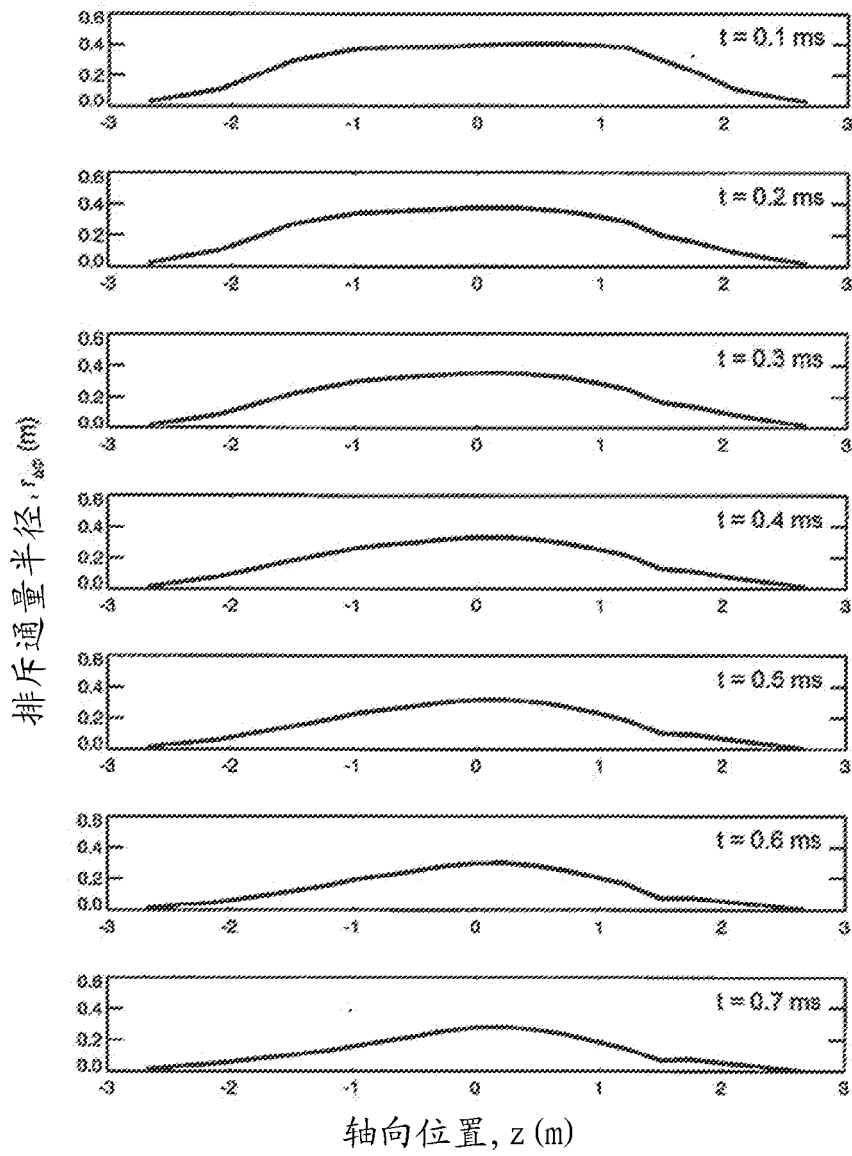


图 14

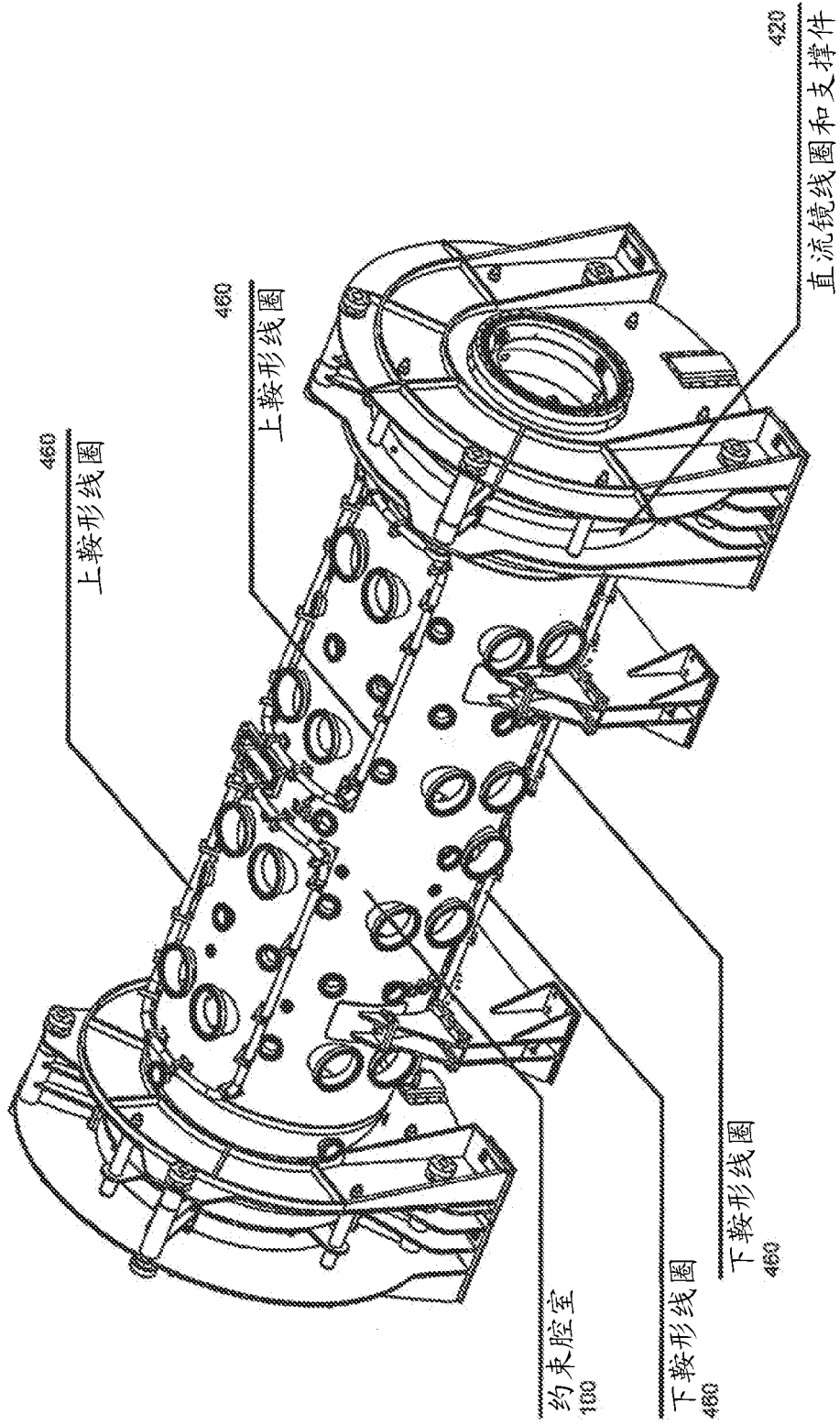


图 15

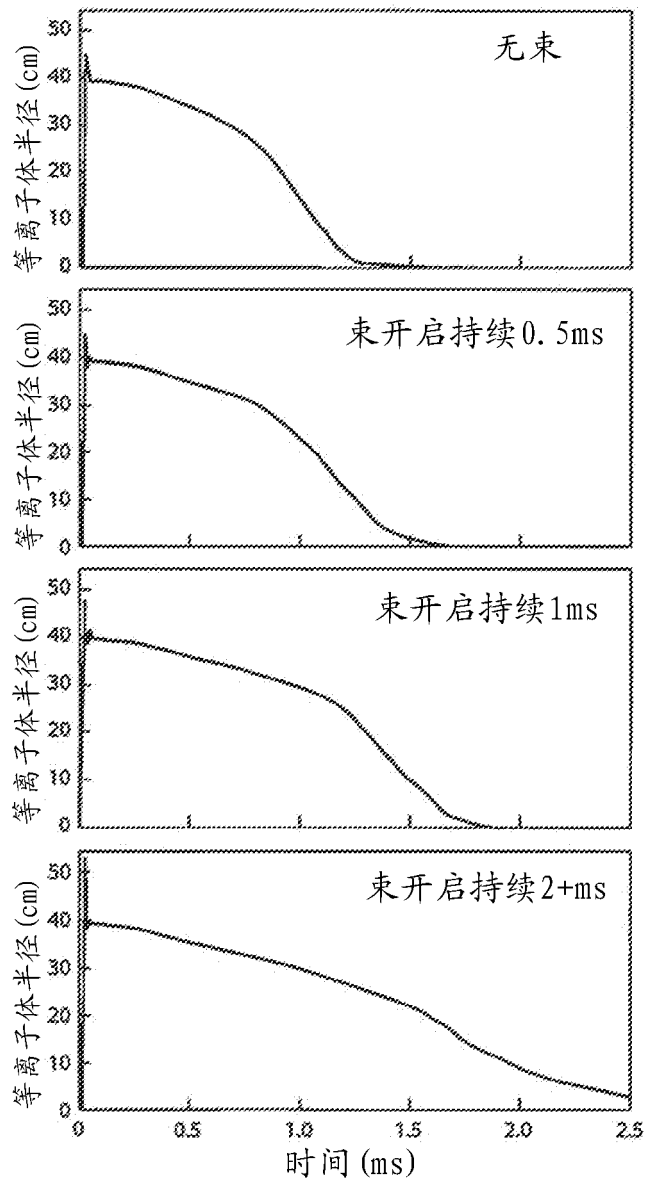


图 16

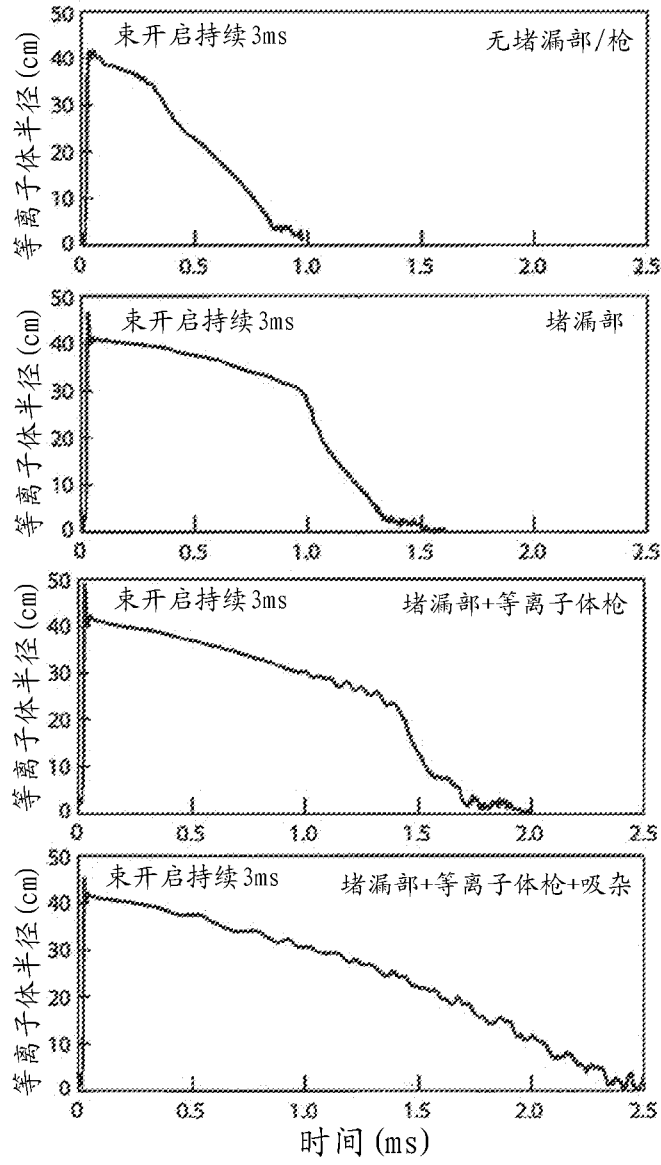


图 17

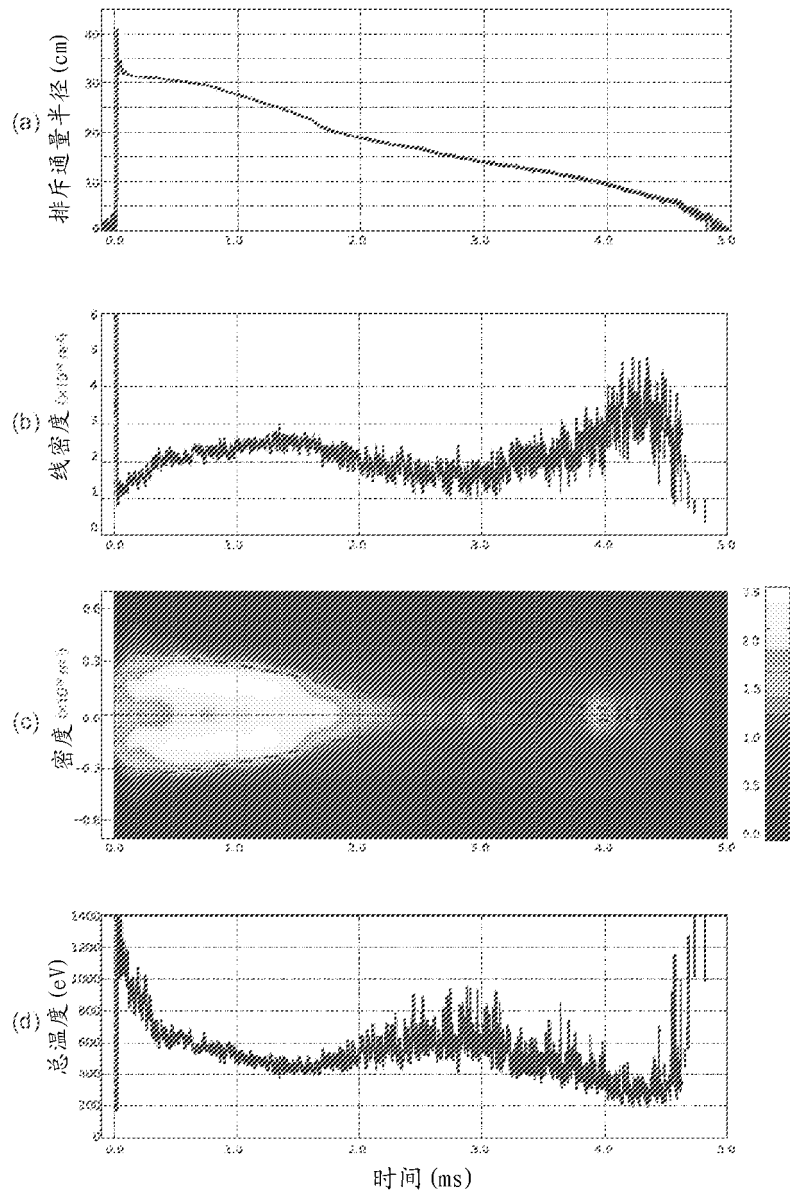


图 18

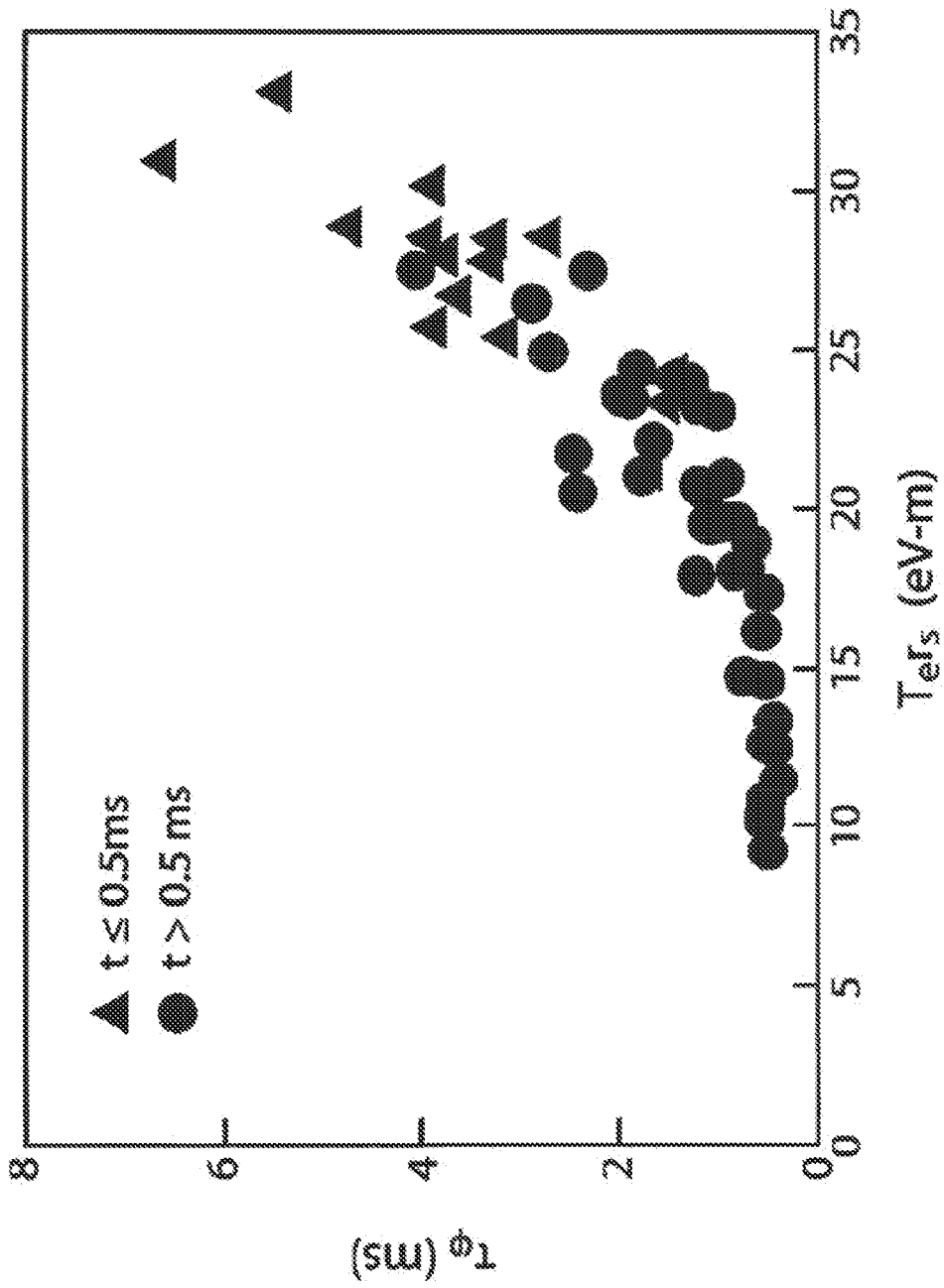


图 19

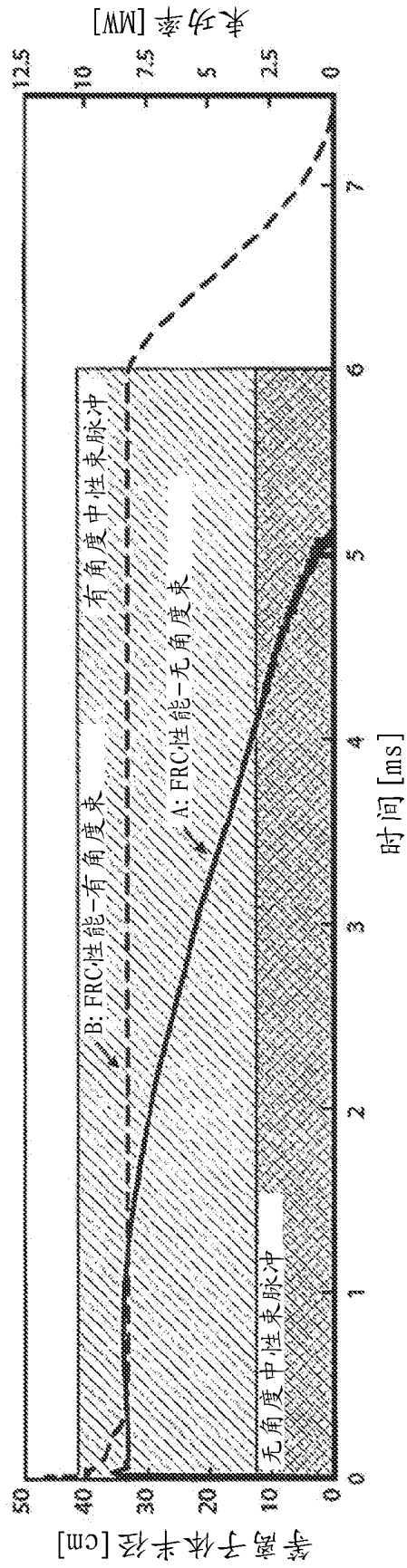


图 20

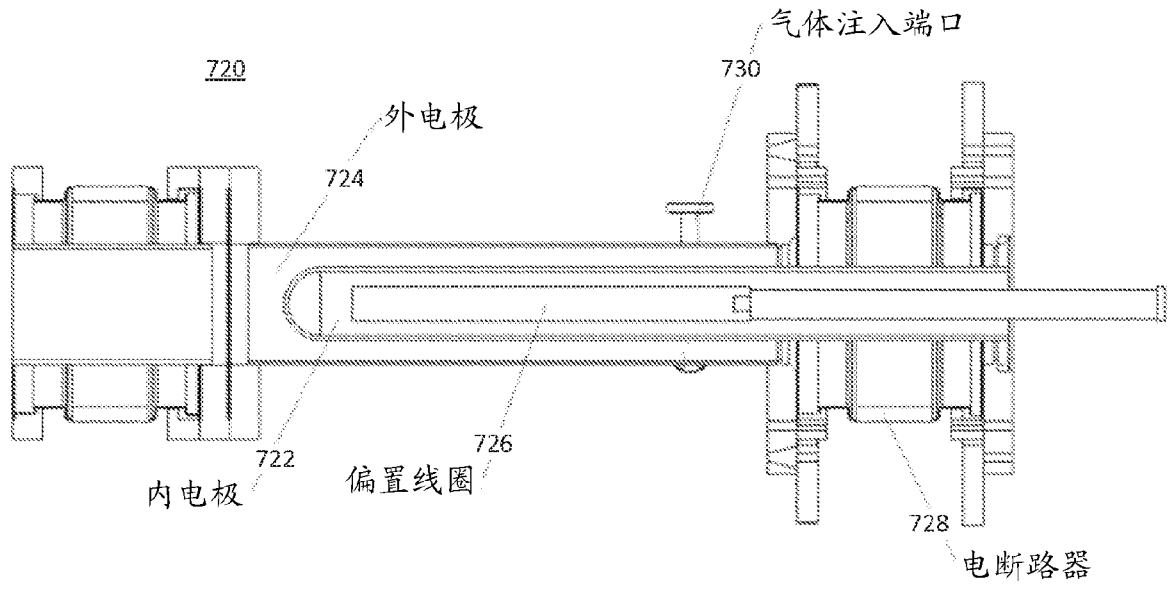


图 21A

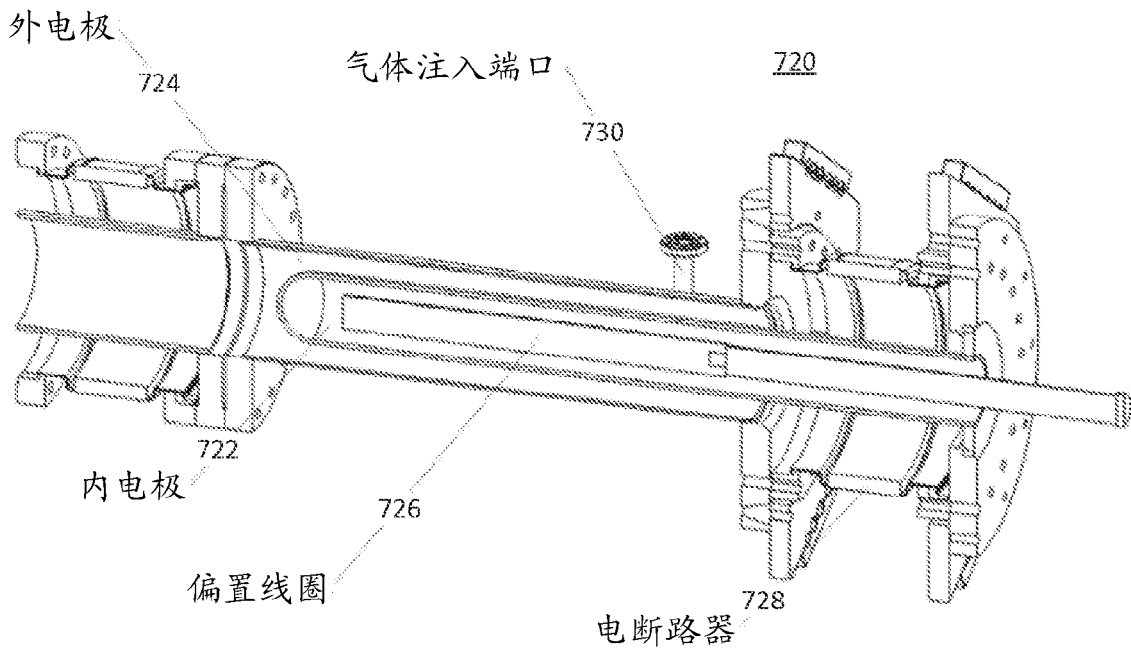


图 21B

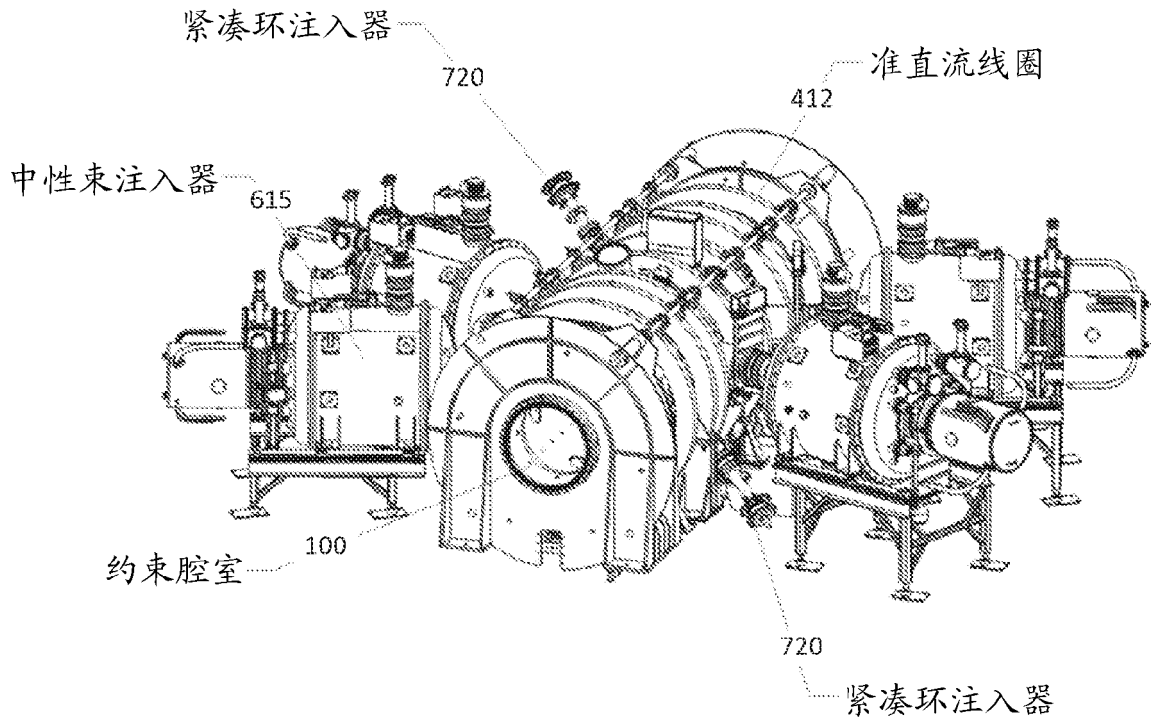


图 22A

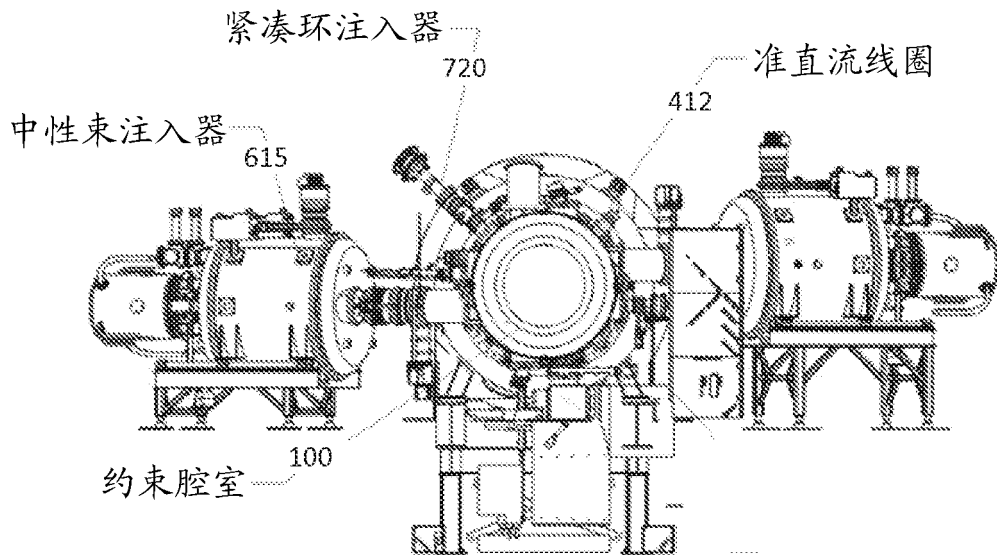


图 22B

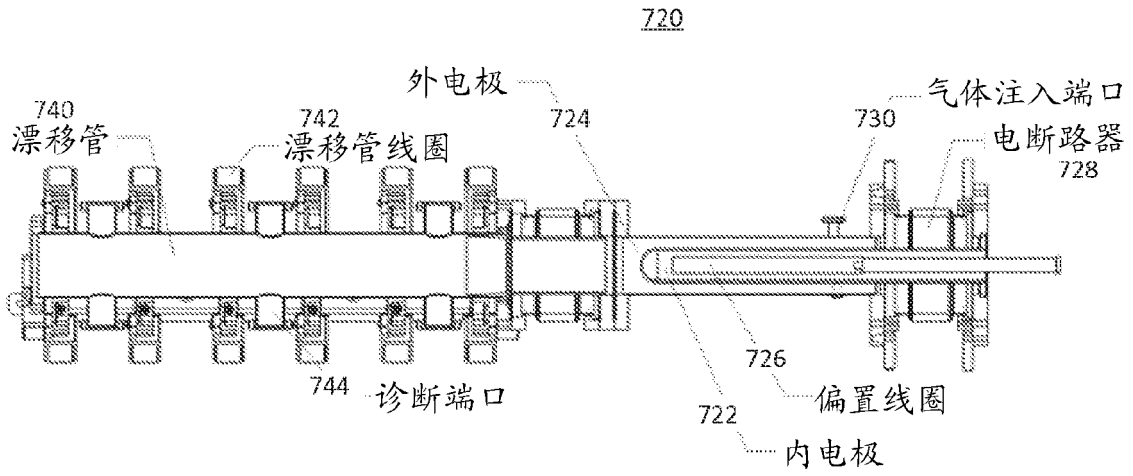


图 23A

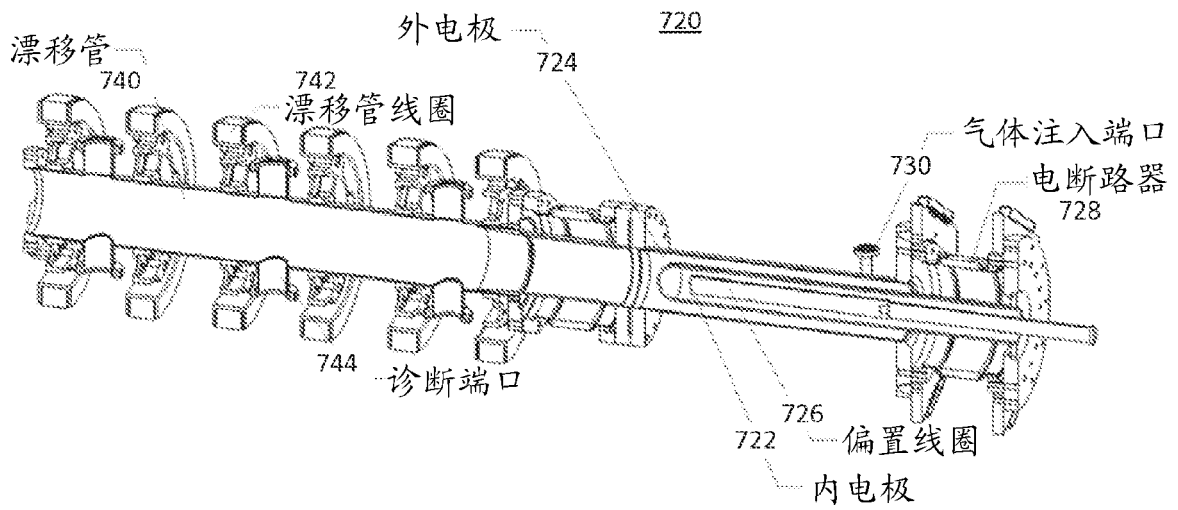


图 23B