



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102460596 A

(43) 申请公布日 2012. 05. 16

(21) 申请号 201080025056. 2

G. B. 齐默尔曼

(22) 申请日 2010. 04. 02

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

(30) 优先权数据

12/384, 669 2009. 04. 06 US

12/459, 591 2009. 07. 01 US

代理人 周少杰

(51) Int. Cl.

G21C 7/06 (2006. 01)

(85) PCT申请进入国家阶段日

2011. 12. 06

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2010/001006 2010. 04. 02

(87) PCT申请的公布数据

W02010/147615 EN 2010. 12. 23

(71) 申请人 希尔莱特有限责任公司

地址 美国华盛顿州

(72) 发明人 C. E. 阿尔菲尔德 J. R. 吉尔兰德

R. A. 海德 M. Y. 艾什卡瓦

D. G. 麦卡利斯 N. P. 迈尔沃尔德

C. 惠特默 小洛厄尔 . L. 伍德

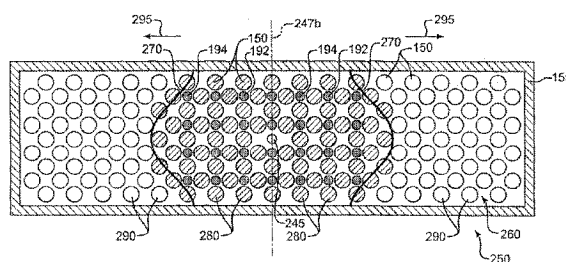
权利要求书 3 页 说明书 22 页 附图 59 页

(54) 发明名称

行波核裂变反应堆、燃料组件以及控制其中
燃耗的方法

(57) 摘要

一种行波核裂变反应堆、燃料组件以及控制其中燃耗的方法。在行波核裂变反应堆中，核裂变反应堆燃料组件包含多根核裂变燃料棒，多根核裂变燃料棒暴露给爆燃波燃烧波前端，该爆燃波燃烧波前端又行进通过燃料棒。通过多个可移动中子吸收剂结构控制过剩反应，该多个可移动中子吸收剂结构有选择地插入燃料组件中和从燃料组件中拔出以便控制过剩反应，因此控制燃烧波前端的位置、速度和形状。控制燃烧波前端的位置、速度和形状来管理燃料组件结构材料接受的中子注量，以便降低温度和对结构材料的辐射损伤的风险。



1. 一种在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的方法,包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量。
2. 一种在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的方法,包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,所述中子通量限定燃烧波前端。
3. 如权利要求2所述的方法,进一步包含达到预定燃耗值。
4. 如权利要求2所述的方法,进一步包含使燃耗值达到预定燃耗值或以下。
5. 如权利要求4所述的方法,其中使燃耗值达到预定燃耗值或以下包含在燃烧波前端后面的位置上控制中子吸收剂的数量。
6. 如权利要求4所述的方法,其中使燃耗值达到预定燃耗值或以下包含在相对于燃烧波前端的多个位置上控制实现中子吸收的中子吸收剂的数量,并且其中由中子吸收剂引起的大多数中子吸收处在燃烧波前端后面的多个位置上。
7. 如权利要求4所述的方法,其中使燃耗值达到预定燃耗值或以下包含在燃烧波前端后面的位置上控制中子反射体的数量。
8. 如权利要求7所述的方法,其中所述中子反射体包含从铍(Be)、铅(Pb)、钨(W)、钒(V)、可增殖材料、钢合金及其混合物中选择材料。
9. 如权利要求4所述的方法,其中使燃耗值达到预定燃耗值或以下包含在相对于燃烧波前端的一个或多个位置上控制实现中子反射的中子反射体的数量,并且其中由中子反射体引起的大多数中子反射处在燃烧波前端后面的多个位置上。
10. 如权利要求4所述的方法,其中使燃耗值达到预定燃耗值或以下包含将中子发射体从燃烧波前端后面的第一位置移动到燃烧波前端后面的第二位置。
11. 如权利要求4所述的方法,其中使燃耗值达到预定燃耗值或以下包含将中子发射体从燃烧波前端后面的第一位置移动到接近燃烧波前端的第二位置。
12. 如权利要求4所述的方法,其中使燃耗值达到预定燃耗值或以下包含将中子发射体从燃烧波前端后面的第一位置移动到燃烧波前端前面的第二位置。
13. 如权利要求2所述的方法,进一步包含响应行波核裂变反应堆中的燃耗值控制,控制对一种或多种结构材料的辐射损伤。
14. 如权利要求13所述的方法,其中控制辐射损伤包含达到辐射损伤值。
15. 如权利要求13所述的方法,其中控制辐射损伤包含使辐射损伤达到预定辐射损伤值或以下。
16. 如权利要求15所述的方法,其中使辐射损伤达到预定辐射损伤值或以下包含将中子发射体从燃烧波前端后面的第一位置移动到燃烧波前端后面的第二位置。
17. 如权利要求15所述的方法,其中使辐射损伤达到预定辐射损伤值或以下包含将中子发射体从燃烧波前端后面的第一位置移动到接近燃烧波前端的第二位置。
18. 如权利要求15所述的方法,其中使辐射损伤达到预定辐射损伤值或以下包含将中子发射体从燃烧波前端后面的第一位置移动到燃烧波前端前面的第二位置。
19. 如权利要求15所述的方法,其中使辐射损伤达到预定辐射损伤值或以下包含在燃烧波前端后面的位置上控制中子吸收剂的数量。
20. 如权利要求15所述的方法,其中使辐射损伤达到预定辐射损伤值或以下包含在相对于燃烧波前端的多个位置上控制实现中子吸收的中子吸收剂的数量,并且其中由中子吸

收剂引起的大多数中子吸收处在燃烧波前端后面的多个位置上。

21. 如权利要求 15 所述的方法,其中使辐射损伤达到预定辐射损伤值或以下包含在燃烧波前端后面的位置上控制中子反射体的数量。

22. 如权利要求 15 所述的方法,其中使辐射损伤达到预定辐射损伤值或以下包含在相对于燃烧波前端的多个位置上控制实现中子反射的中子反射体的数量,并且其中由中子反射体引起的大多数中子反射处在燃烧波前端后面的多个位置上。

23. 一种在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的方法,包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,所述中子通量限定燃烧波前端,其中调节行波核裂变反应堆发出的中子通量包含在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。

24. 如权利要求 23 所述的方法,其中在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量包含在燃烧波前端后面的位置上有选择地调节中子通量。

25. 如权利要求 23 所述的方法,其中在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量包含在相对于燃烧波前端的多个位置上有选择地调节中子通量,并且其中相对于燃烧波前端的多个位置上的调节量受空间轮廓支配。

26. 如权利要求 25 所述的方法,其中所述空间轮廓相对于燃烧波前端是对称的。

27. 如权利要求 25 所述的方法,其中所述空间轮廓相对于燃烧波前端是非对称的。

28. 如权利要求 25 所述的方法,其中所述空间轮廓具有存在最陡部分的斜坡,并且其中所述空间轮廓的斜坡的最陡部分出现在燃烧波前端后面的位置上。

29. 如权利要求 23 所述的方法,其中在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量包含在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量,以便中子通量的大多数调节处在燃烧波前端后面的多个位置上。

30. 如权利要求 23 所述的方法,其中在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量包含在相对于燃烧波前端的位置上有选择地吸收一部分中子通量。

31. 如权利要求 23 所述的方法,其中在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量包含在相对于燃烧波前端的位置上控制中子吸收剂的数量。

32. 如权利要求 31 所述的方法,其中所述中子吸收剂包含从锂、银、铟、镉、硼、钴、铅、镓、钽、钷、铈及其混合物中选择材料。

33. 如权利要求 31 所述的方法,其中所述中子吸收剂包含从银铟镉合金、碳化硼、二硼化锆、二硼化钛、二硼化钪、钛酸钪、钛酸镓及其混合物中选择的化合物。

34. 如权利要求 23 所述的方法,其中在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量包含在相对于燃烧波前端的位置上控制中子相互作用材料的数量。

35. 如权利要求 34 所述的方法,其中在相对于燃烧波前端的位置上控制中子相互作用材料的数量包含在相对于燃烧波前端的位置上控制中子发射体的数量。

36. 如权利要求 35 所述的方法,其中所述中子发射体包括可裂变同位素。

37. 如权利要求 35 所述的方法,其中所述中子发射体包括可增殖同位素。

38. 如权利要求 35 所述的方法,其中所述中子发射体包括能够经历 β 衰变变成可裂变同位素的元素。

39. 如权利要求 34 所述的方法,其中在相对于燃烧波前端的位置上控制中子相互作用材料的数量包含在相对于燃烧波前端的位置上控制中子反射体的数量。

40. 如权利要求 23 所述的方法,进一步包含:

检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数;以及

响应与燃烧波前端相关联的燃烧参数的检测至少部分有选择调节中子通量。

41. 如权利要求 40 所述的方法,其中检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数包含在接近燃烧波前端的至少一个位置上监视对材料的辐射损伤。

42. 如权利要求 40 所述的方法,其中检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数包含在接近燃烧波前端的至少一个位置上监视燃耗值。

43. 如权利要求 40 所述的方法,其中检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数包含监视燃烧波前端速度。

44. 如权利要求 40 所述的方法,其中检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数包含监视燃烧波前端宽度。

45. 如权利要求 40 所述的方法,其中检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数包含在接近燃烧波前端的至少一个位置上监视与中子通量相关联的一种或多种特性。

46. 如权利要求 40 所述的方法,其中检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数包含在接近燃烧波前端的至少一个位置上监视核辐射。

47. 如权利要求 40 所述的方法,其中检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数包含在热接近燃烧波前端的至少一个位置上监视温度。

48. 如权利要求 40 所述的方法,其中响应燃烧参数的检测至少部分有选择地调节中子通量包含响应反馈控制过程的燃烧参数检测,至少部分有选择地调节中子通量。

49. 如权利要求 40 所述的方法,其中响应燃烧参数的检测至少部分有选择地调节中子通量包含响应基于计算机的算法的至少部分燃烧参数检测,至少部分有选择地调节中子通量。

50. 如权利要求 49 所述的方法,其中所述基于计算机的算法包含多个参数。

51. 如权利要求 50 所述的方法,其中响应包含多个参数的基于计算机的算法的燃烧参数检测至少部分有选择地调节中子通量包含:响应燃烧参数的检测,调整基于计算机的算法的多个参数的一个或多个参数。

52. 如权利要求 40 所述的方法,进一步包含响应中子通量的有选择调节,控制对多种结构材料的一种或多种结构材料的辐射损伤。

行波核裂变反应堆、燃料组件以及控制其中损耗的方法

技术领域

[0001] 本申请一般涉及核反应的控制,尤其涉及行波核裂变反应堆、燃料组件以及控制其中损耗的方法。

背景技术

[0002] 众所周知,在正在运行的核裂变反应堆中,已知能量的中子被具有大原子质量的核素吸收。所产生的复合核分解成包括两个较小原子质量裂变碎片的裂变产物以及衰变产物。已知通过所有能量的中子经受这样的裂变的核素包括铀-233,铀-235和钚-239,它们都是可裂变核素。例如,动能为0.0253eV(电子伏特)的热中子可用于使U-235原子核裂变。作为可增殖核素的钚-232和铀-238将不经受诱发裂变,除非利用动能为至少1MeV(兆电子伏特)的快中子。从每个裂变事件中释放的总动能是大约200MeV。这种动能最终转化成热。

[0003] 此外,从初始中子源开始的裂变过程释放出额外的中子,并且将动能转化成热。这导致了伴随着持续能量释放的自持链式裂变反应。

[0004] 在1963年6月11日以Richard F.Post等人的名字颁发和发明名称为“Traveling Wave Pyrotron(行波磁镜热核装置)”的美国专利第3,093,569号中公开了连续运行的行波磁镜热核装置。这个专利公开了提高等离子体的能量和密度以及在其中进行核反应的连续运行反应堆或设备。该发明的目的是提供应用电磁行波来实现各个约束区内、每个随时间沿着机器行进的带电粒子的俘获、加热和能量回收的磁镜热核装置。但是,这个专利似乎未公开如本文所述和要求保护的行波核裂变反应堆、燃料组件、和控制其中损耗的方法。

[0005] 1974年3月6日以David L.Fischer等人的名字颁发和发明名称为“Reactivity And Power Distribution Control Of Nuclear Reactor(核反应堆的反应和功率分布控制)”的美国专利第3,799,839号公开了在核反应堆堆芯的运行循环期间,控制预定量过剩反应和保持恒定或静态功率分布的可燃抑制剂的分布、数量、密度和配置。按照这个专利,该发明的目的是提供在运行循环的整个周期内在核反应堆堆芯中将提供基本静态功率分布的堆芯中可燃抑制剂的装置。此外,按照这个专利,其它目的是依照该发明,通过确定对运行循环的一致功率和伴随反应分布来达到的;通过确定导致的过剩局部反应,以及通过提供在运行循环的整个周期内在空间分布、数量、密度和配置方面与过剩局部反应的变化基本匹配的可燃抑制剂。但是,这个专利似乎未公开如本文所述和要求保护的行波核裂变反应堆、燃料组件、和控制其中损耗的方法。

[0006] 1970年1月13日以Jean Paul Van Dievoet等人的名字颁发和发明名称为“Method of Pulsating or Modulating a Nuclear Reactor(使核反应堆脉动或调节核反应堆的方法)”涉及使核反应堆的运行脉动或调节核反应堆的运行的方法。这个专利公开了通过周期性地改变中子通量密度调节反应堆。按照这个专利,通过在反应堆的核裂变区以外的地方,移动至少在某些位置上,包含一定数量中子活性物质的一种或多种结构,从而取决于结构的速度,调整从反应堆堆芯发出的中子流,来控制核反应堆的运行。如此从外部

调整反应堆系统的反应的中子活性材料的样品,可以是像可裂变材料、反射体材料或其它中子影响物质那样的中子生成和 / 或中子影响材料。但是,这个专利似乎未公开如本文所述和要求保护的行波核裂变反应堆、燃料组件、和控制其中损耗的方法。

[0007] 上文所列举的现有技术似乎没有一个公开了如本文所述和要求保护的行波核裂变反应堆、燃料组件、和控制其中损耗的方法。

[0008] 因此,所需要的是如本文所述和要求保护的行波核裂变反应堆、燃料组件、和控制其中损耗的方法。

发明内容

[0009] 按照本公开的一个方面,提供了一种在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制损耗的方法,其包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量。

[0010] 按照本公开的另一个方面,提供了一种在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制损耗的方法,其包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,该中子通量限定燃烧波前端 (burnfront)。

[0011] 按照本公开的进一步方面,提供了一种行波核裂变反应堆,其包含核反应堆堆芯;以及布置在该反应堆堆芯中的核裂变反应堆燃料组件,该核裂变反应堆燃料组件被配置成使损耗值达到预定损耗值或以下。

[0012] 按照本公开的另外方面,提供了一种行波核裂变反应堆,其包含能够在其中产生燃烧波前端的核反应堆堆芯;布置在该反应堆堆芯中的核裂变反应堆燃料组件;布置在该核裂变反应堆燃料组件中的中子相互作用材料;以及配置成响应与燃烧波前端相关联的参数控制核相互作用材料的布置的控制系统。

[0013] 按照本公开的再一个方面,提供了能够控制其中损耗的行波核裂变反应堆,其包含反应堆压力容器;密封地布置在该压力容器中的核裂变反应堆燃料组件,该核裂变反应堆燃料组件包括按预定装载模式安排的中子相互作用材料;以及能够布置成与该中子相互作用材料中子连通 (communication) 的可拆除核裂变点火器,该核裂变点火器能够将行进通过该中子相互作用材料的爆燃波燃烧波前点火。

[0014] 本公开的特征是提供控制棒、反射体或中子发射材料形式的中子吸收材料或提高相对于爆燃波燃烧波前端的位置上的吸收的其它吸收材料。

[0015] 除了上文之外,在本公开的像文字部分 (例如,权利要求书和 / 或详细描述) 那样和 / 或附图的教导中展示和描述了各种其它方法和 / 或设备方面。

[0016] 上文是一个总结,因此可能包含细节的简化、概括、蕴含、和 / 或省略;因此,本领域的技术人员将懂得,该总结只是例示性的,而决不是打算限制性的。除了上述的例示性方面、实施例、和特征之外,通过参考附图和如下详细描述,进一步的方面、实施例、和特征将变明显。

附图说明

[0017] 虽然本说明书以特别指出和不同地声明本公开的主题的权利要求书作为结论,但相信本公开可以从结合附图所作的如下详细描述中得到更好理解。另外,用在不同图形中的相同符号通常表示相似或相同项目。

- [0018] 图 1 是核裂变反应堆装置的局部正面图；
- [0019] 图 2 是示出随中子能量而变的截面的曲线图；
- [0020] 图 3 是示出随中子能量而变的截面以及那些随中子能量而变的截面的比值的曲线图；
- [0021] 图 4 是核裂变反应堆燃料组件的一般表示的局部正面图；
- [0022] 图 5 是核燃料棒的局部垂直剖面图；
- [0023] 图 6 是控制棒的局部垂直剖面图；
- [0024] 图 7 是反射体棒的局部垂直剖面图；
- [0025] 图 8 是第一实施例燃料组件的水平剖面图,这个视图示出了由点火器点火的两个相对放置并对称的爆燃波燃烧波前端以及示出了第一燃料装载模式；
- [0026] 图 9 是半个第一实施例燃料组件的水平剖面图,这个视图示出了两个相对放置并对称的爆燃波燃烧波前端之一；
- [0027] 图 10 是示出包含随相对于点火器的距离而变的控制棒插入百分比的第一控制函数,这个第一控制函数对应于第一实施例燃料组件的第一燃料装载模式；
- [0028] 图 11 是半个第二实施例燃料组件的水平剖面图,这个视图示出了相对放置并对称的爆燃波燃烧波前端之一以及示出了第二燃料装载模式；
- [0029] 图 12 是示出包含随相对于点火器的距离而变的控制棒插入百分比的第二控制函数,这个第二控制函数对应于第二实施例燃料组件的第二燃料装载模式；
- [0030] 图 13 是半个第三实施例燃料组件的水平剖面图,这个视图示出了相对放置并对称的爆燃波燃烧波前端之一以及示出了第三燃料装载模式；
- [0031] 图 14 是示出包含随相对于点火器的距离而变的控制棒插入百分比的第三控制函数,这个第三控制函数对应于第三实施例燃料组件的第三燃料装载模式；
- [0032] 图 15 是半个第四实施例燃料组件的水平剖面图,这个视图示出了相对放置并对称的爆燃波燃烧波前端之一以及示出了第四燃料装载模式；
- [0033] 图 16 是示出包含随相对于点火器的距离而变的控制棒插入百分比的第四控制函数,这个第四控制函数对应于第四实施例燃料组件的第四燃料装载模式；
- [0034] 图 17 是半个第五实施例燃料组件的水平剖面图,这个视图示出了相对放置并对称的爆燃波燃烧波前端之一以及示出了第五燃料装载模式；
- [0035] 图 18 是示出包含随相对于点火器的距离而变的控制棒插入百分比的第五控制函数,这个第五控制函数对应于第五实施例燃料组件的第五燃料装载模式；
- [0036] 图 19 是半个第六实施例燃料组件的水平剖面图,这个视图示出了相对放置并对称的爆燃波燃烧波前端之一以及示出了第六燃料装载模式；
- [0037] 图 20 是示出包含随相对于点火器的距离而变的控制棒插入百分比的第六控制函数,这个第六控制函数对应于第六实施例燃料组件的第六燃料装载模式；
- [0038] 图 21 是半个第七实施例燃料组件的水平剖面图,这个视图示出了相对放置并对称的爆燃波燃烧波前端之一以及示出了第七燃料装载模式；
- [0039] 图 22 是示出包含随相对于点火器的距离而变的控制棒插入百分比的第七控制函数,这个第七控制函数对应于第七实施例燃料组件的第七燃料装载模式；
- [0040] 图 23 是例示爆燃波燃烧波前端速度和反向燃耗百分比对于波控制函数的程度之

间的线性关系的曲线图；

[0041] 图 23A 是示出包含随相对于点火器的距离而变的中子通量的中子通量示范性空间分布的曲线图,该空间分布代表基于示范性控制函数的燃烧波前端；

[0042] 图 23B 是示出与显示在图 23A 中的空间分布相对应的控制函数的曲线图,这个曲线图包含随相对于点火器的距离而变的控制棒插入百分比；

[0043] 图 23C 是示出包含随相对于点火器的距离而变的中子通量的中子通量示范性空间分布的曲线图,该空间分布代表基于示范性控制函数的燃烧波前端；

[0044] 图 23D 是示出与显示在图 23C 中的空间分布相对应的控制函数的曲线图,这个曲线图包含随相对于点火器的距离而变的控制棒插入百分比；

[0045] 图 23E 是示出包含随相对于点火器的距离而变的中子通量的中子通量示范性空间分布的曲线图,该空间分布代表燃烧波前端；

[0046] 图 23F 是示出与显示在图 23E 中的空间分布相对应的控制函数的曲线图,这个曲线图包含随相对于点火器的距离而变的控制棒插入百分比；以及

[0047] 图 24-65 是在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法的流程图。

具体实施方式

[0048] 在如下详细描述中,将参考形成其一部分的附图。在这些附图中,相似的符号通常表示相似的部件,除非上下文另有规定。描述在详细描述、附图和权利要求书中的例示性实施例并不意味着限制本发明的范围。可以不偏离本文展示的主题的精神或范围地利用其它实施例,以及可以作出其它改变。

[0049] 另外,为了清晰地展示起见,本申请使用了形式上的概括性标题。但是,应该明白,这些概括性标题用于展示的目的,可以在整个申请中讨论不同类型的主题(例如,可以在过程/操作标题下讨论描述设备/结构和/或可以在结构/过程标题下讨论过程/操作;和/或单个话题的描述可以跨越两个或更多个话题标题)。因此,形式上的概括性标题的使用决不是打算限制本发明的范围。

[0050] 此外,本文所述的主体有时例示了包含在其它不同部件中,或与其它不同部件连接的不同部件。应该明白,这样描绘的架构仅仅是示范性的,事实上,可以实现许多实现相同功能的其它架构。从概念上来讲,有效地“关联”实现相同功能的部件的任何安排,以便实现所希望功能。因此,本文组合在一起实现特定功能的任何两个部件可以看作相互“关联”,使得与架构或中间部件无关地实现所希望功能。同样,如此关联的任何两个部件也可以视作实现所希望功能的相互“可操作地连接”或“可操作地耦合”,以及能够如此关联的任何两个部件也可以视作实现所希望功能的相互“可操作耦合”。可操作耦合的特例包括(但不局限于)物理上可配对和/或物理上相互作用部件、可无线相互作用和/或无线相互作用部件、和/或逻辑上相互作用和/或逻辑上可相互作用部件。

[0051] 在一些情况下,一个或多个部件在本文中可能被称为“配置成”,“可配置成”,“可操作/操作”,“适用于/可适用于”,“能够”,“可依照/依照”等。本领域的普通技术人员应该认识到,“配置成”一般可以包含活动状态部件和/或非活动状态部件和/或等待状态部件,除非上下文另有要求。

[0052] 一些关于本文公开的各种实施例的考虑通过概述给出,但不应该理解成限制性的。此外,本文公开的一些实施例反映了下面所讨论的所有考虑的实现。另一方面,本文公开的一些其它实施例反映了所选考虑的实现,而无需包罗下文所讨论的所有考虑。如下讨论的各个部分包括从如下论文中摘录的信息:“Completely Automated Nuclear Power Reactors for Long-Term Operation:III.Enabling Technology For Large-Scale, Low-Risk,Affordable Nuclear Electricity”,Edward Teller,Muriel Ishikawa,Lowell Wood,Roderick Hyde,and John Nuckolls,Workshop of the Aspen Global Change Institute,University ofCalifornia Lawrence Livermore National Laboratory publication UCRL-JRNL-122708(2003),July 2003(此论文准备提交给 Energy, The International Journal,30 November 2003,在此通过引用并入其全部内容)。

[0053] 如前所述,对于导致裂变事件的被可裂变核素吸收的每个中子,释放出不止一个中子,直到可裂变原子核耗尽。这种现象用于商业核反应堆中,以产生连续热量,其又有益地用于发电。

[0054] 但是,设计和运行反应堆时的一个考虑是由“峰”温度(即热通道峰值因子)造成的对反应堆结构材料的热损伤,这个“峰”温度是由反应堆中的不平衡中子通量、冷却剂流、燃料成分和功率分布综合引起的。若峰温度超过材料极限就造成热损伤。这可以与燃料的程度(即每单位燃料质量生成的能量累积量)无关地发生,燃料的程度通常用兆瓦天每公吨重金属燃料(MWd/MTM)或千兆瓦天每公吨重金属燃料(GWd/MTM)的单位表达。“反应性变化”(即,反应堆的响应性的变化)可以因燃料燃料而发生。具体地说,“反应性变化”与反应堆产生比保持临界链式反应的确切数量多或少的中子的相对能力有关。反应堆的响应性通常表征成使反应堆的功率成指数增大或减小的反应性变化的时间导数,其中时间常数被称为反应堆周期。关于这方面,由中子吸收材料制成的控制棒通常用于调整和控制变化反应性和反应堆响应性。将这样的控制棒来回插入反应堆堆芯中和从反应堆堆芯中拔出,以便可变地控制中子吸收,因此在堆芯中控制中子通量水平和反应性。中子通量水平在控制棒附近降低,而在远离控制棒的区域中可能较高。因此,中子通量在整个反应堆堆芯中是不均匀的。这导致了在通量较高的那些区域中燃料燃料较高。此外,核能发电领域的普通技术人员可懂得,通量和功率密度变化是由许多因素造成的。离控制棒远近可能是也可能不是主要因素。例如,通量通常在附近没有控制棒的堆芯边界上显著下降。这些效应又可能引起通量较高的那些区域过热或高温。这样的峰温度可能通过改变结构的机械性质而非所希望地缩短了经受这样峰温度的结构的运行寿命。此外,与中子通量和可裂变燃料浓度的乘积成比例的反应堆功率密度,受堆芯结构材料不受损伤地承受这样高温的能力限制。因此,所希望的是避免由高燃料燃料引起的高温造成的结构损伤。

[0055] 设计和运行反应堆时的另一个考虑是由高燃料燃料引起的对包含在核反应堆堆芯中的结构材料的辐照损伤。这样的辐照损伤可以用每原子位移(DPA)的术语来表达,DPA包括关于材料(即,位移原子)的响应、以及材料遭受的快中子注量的信息。DPA与燃料成比例,并且是辐射损伤的计算的、代表性度量,其不仅要考虑辐照的剂量和类型,而且还包括材料对辐照的响应的度量。关于这方面,用在反应堆堆芯结构中的一些结构材料,当暴露在在裂变过程期间释放的中子中时可能变脆。所希望的是使这样对反应堆结构材料的辐照损伤保持在已知极限内,以便保证反应堆的结构完整性和安全运行。

[0056] 因此,参照图 1,只作为例子而非限制性地,图 1 示出了统称为 10、解决上文列举的问题的核裂变反应堆装置。核裂变反应堆装置 10 产生要在多条传输线(未示出)上传输的电力。反应堆装置 10 可以替代性地用于进行确定中子通量对反应堆材料的影响的测试。

[0057] 再次参照图 1,反应堆装置 10 包含统称为 20 的核裂变反应堆,核裂变反应堆 20 包括布置在反应堆压力容器 40 内、统称为 30 的多个通用核裂变反应堆燃料组件(只示出其中之一),反应堆压力容器 40 又可以容纳在外壳结构(未示出)内。只例示性而非限制性地,下文公开通用燃料组件 30 的示范性实施例。通用燃料组件 30 可以被中子倍增剂或反射体材料(未示出)和辐射屏蔽层(也未示出)包围着。在这种情况下,反射体材料减少从燃料组件 30 的中子泄漏。反射体材料的附加功能是显著减少燃料组件 30 的外部(如它的辐射屏蔽层、结构支承件和外壳结构)接受的快中子注量。它还影响通用燃料组件 30 的性能,以便提高通用燃料组件 30 的最外部中的再生效率和功率系数(specific power)。另一方面,辐射屏蔽层进一步保护生物圈免受从通用燃料组件 30 中无意释放的辐射影响。

[0058] 还再次参照图 1,主冷却剂回路 50 将热量从通用燃料组件 30 传送到蒸汽生成热交换器 60。主回路 50 可以由像不锈钢那样的任何合适材料制成。因此,如果需要的话,主回路 50 可以由铁合金、有色金属合金、铅基合金或其它结构材料或复合材料制成。主回路 50 传送的冷却剂可以是惰性气体或其混合物。可替代的是,冷却剂可以是像水(H₂O)或气态或超临界二氧化碳(CO₂)那样的其它流体。作为另一个例子,冷却剂可以是像钠(Na)或铅(Pb)那样的液态金属或像铅-铋(Pb-Bi)那样的合金。并且,冷却剂可以是像聚苯或碳氟化合物那样的有机冷却剂。随着主回路 50 传送的冷却剂通过蒸汽生成热交换器 60,冷却剂将它的热量放给驻留在热交换器 60 中的工作流体(未示出)。当工作流体是水时,工作流体将蒸发成蒸汽。在这种情况下,蒸汽行进到与主回路 50 隔离并与涡轮发电机组 80A 和 80B 耦合的副回路 70 中。因此,热交换器 60 将热量转移给热交换器 60 和副回路 70 中的工作流体,以便生成作为使涡轮发电机组 80A 和 80B 旋转的工作流体提供的蒸汽。涡轮发电机组 80A 和 80B 以蒸汽发电领域的普通技术人员所十分了解的方式随着其旋转而发电。可以将冷凝器 90 适当地与涡轮发电机组 80A 和 80B 耦合,以便将从涡轮发电机组 80A 和 80B 中排出的蒸汽从蒸气状态冷凝到液体状态。

[0059] 再次参照图 1,将泵 100 与副回路 70 耦合,并且与副回路 70 传送的工作流体流体连通,以便将液化的工作流体从冷凝器 90 抽运到热交换器 60。此外,将泵 110 与主回路 50 耦合,并且与主回路 50 传送的反应堆冷却剂流体连通,以便抽运反应堆冷却剂通过主回路 50。主回路 50 将反应堆冷却剂从通用燃料组件 30 传送到热交换器 60。此外,主回路 50 将冷却剂从热交换器 60 传送到压力容器 40。泵 110 使反应堆冷却剂循环通过包括通用燃料组件 30 和热交换器 60 的主回路 50,以便在反应堆运行期间带走燃料组件 30 生成的热量,或在反应堆 20 未运行期间带走残余衰变热。从通用燃料组件 30 中带走热量降低了极不希望有的通用燃料组件 30 过热的风险。

[0060] 现在参照图 2 和 3,通用燃料组件 30 适当利用快中子谱,因为超热到热中子的裂变产物的大吸收截面因裂变产物的中子吸收,在以铀为燃料的实施例中,不允许利用多于小量的钍或更丰铀同位素 U²³⁸。

[0061] 从图 2 中可以最佳地看出,以 Th²³² 为燃料实施例的感兴趣的占主导中子驱动核反应的截面画在中子能量范围 10⁻³-10⁷eV 上。可以看出,裂变产物核的辐射俘获造成的损失

在近热（约 0.1eV）能量上支配着中子的有效利用，但在共振俘获区（约 3 到 300eV 之间）上相对可忽略不计。因此，试图实现高增益转换到裂变再生反应堆时利用快中子谱的运行可以有助于排除运行期间累积在堆芯中的裂变产物造成的中子损失。所示的裂变产物的辐射俘获截面是经历随后 β 衰变到可忽略不计程度的由快中子诱发裂变引起的中等 Z 核的那些辐射俘获截面。通用燃料组件 30 的实施例的燃烧波的中心部分中的那些将经历某种衰变，因此将具有更高一点的中子亲和力 (avidity)。但是，参数研究表明，堆芯燃料燃烧结果可能对这样衰减的精确程度不敏感。

[0062] 在图 3 中，在图 3 的上部，将以 Th^{232} 为燃料实施例的主要感兴趣的占主导中子驱动核反应的截面画在 $> 10^4$ 与 $< 10^{6.5}$ eV 之间的中子能量范围的最感兴趣部分上。通用燃料组件 30 的实施例的中子谱的峰位在 $\geq 10^5$ eV 中子能区中。图 3 的下部包含这些随中子能量而变的截面与 Th^{232} 的中子辐射俘获的截面的比值，即，转换到裂变再生步骤（因为所得 Th^{233} 与基于 U^{238} 的中子俘获的 U^{239} - Np^{239} - Pu^{239} β 衰变链类似，迅速地 β 衰变到 Pa^{233} ，然后相对缓慢地 β 衰变到 U^{233} ）。因此，可以看出，裂变产物的辐射俘获造成的损失对于具有快中子谱的反应堆相对达到最小。

[0063] 现在转到图 4 和 5，通用燃料组件 30 包含可以采用按预定燃料装载模式安排的多根细长核裂变反应堆燃料棒 150（只示出了其中一些）的形式的可增殖和 / 或可裂变材料。下文公开通用燃料组件 30 的示范性实施例。燃料棒 150 密封地包含在防漏外壳 155 内。每根燃料棒 150 含有布置在其中的核燃料 160，该核燃料 160 被燃料棒包壳材料 170 密封地包围着。燃料组件 30 的平均燃耗值受包壳材料 170 限制，包壳材料 170 是燃料组件 30 内的最相干结构材料。核燃料 160 包含像铀-235、铀-233 或钚-239 那样的上述可裂变核素。可替代的是，核燃料 160 可以包含像钍-232 和 / 或铀-238 那样的上述可增殖核素，它们在裂变过程中蜕变成上文提到的可裂变核素。进一步的可替代实施例是，核燃料 160 可以包含可裂变核素和可增殖核素的预定混合物。只作为例子而非限制性地，核燃料 160 可以由从基本上由如下组成的群组中选择的氧化物制成：一氧化铀 (UO)、二氧化铀 (UO_2)、二氧化钍 (ThO_2)（也称为氧化钍）、三氧化铀 (UO_3)、氧化铀-氧化钚 (UO-PuO)、八氧化三铀 (U_3O_8) 及其混合物。可替代的是，核燃料 160 可以主要包含与像（但不局限于）合金的或非合金的锆或钍金属那样的其它材料合金的铀。作为另外的可替代实施例，核燃料 160 可以主要包含铀的碳化物 (UC_x) 或钍的碳化物 (ThC_x)。例如，核燃料 160 可以由从基本上由如下组成的群组中选择的碳化物制成：一碳化铀 (UC)、二碳化铀 (UC_2)、三碳化二铀 (U_2C_3)、二碳化钍 (ThC_2)、碳化钍 (ThC) 及其混合物。作为另一个非限制性例子，核燃料 160 可以由从基本上由如下组成的群组中选择的氮化物制成：氮化铀 (U_3N_2)、氮化铀-氮化锆 ($\text{U}_3\text{N}_2\text{Zr}_3\text{N}_4$)、氮化铀钚 ($(\text{U-Pu})\text{N}$)、氮化钍 (ThN)、铀-锆合金 (UZr) 及其混合物。密封地包围核燃料 160 的燃料棒包壳材料 170 可以是已知抗腐蚀和抗破裂的像 ZIRCOLOY™（西屋电气公司 (Westinghouse Electric Corporation) 的注册商标）那样的适当锆合金。包壳材料 170 也可以是像铁素体马氏体钢那样的其它材料。

[0064] 参照图 4 和 6，通用燃料组件 30 进一步包含可以采用具有相关控制棒包壳 190 的多根细长中子吸收或控制棒 180（只示出了其中一些）的形式的中子吸收材料。控制棒 180 能够将负反应引入通用燃料组件 30 中。控制棒 180 可以是“部分长度”控制棒 192（只示出了其中一些）和 / 或“全长”控制棒 194（只示出了其中一些）的形式。全长控制棒 194 被

适当地放置成与燃料棒 150 平行,当完全插入外壳 155 中时,沿着燃料棒 150 的整个长度延伸。部分长度控制棒 192 也被适当地放置成与燃料棒 150 平行,但当完全插入外壳 155 中时,不沿着燃料棒 150 的整个长度延伸。取决于燃料组件的中子通量成形设计要求,可以存在任何数量的这样部分长度和全长控制棒。全长控制棒 192 的用途是像在反应堆装置 10 退役之前那样,降低处在通用燃料组件 30 中的裂变过程的速率或停止处在通用燃料组件 30 中的裂变过程。此外,控制棒和 / 或燃料棒配置可以偏离上文刚提到的经典棒状组件类配置。例如,可以使用板状燃料。另外,燃料棒可以与燃烧方向垂直(或成任何其它角度)。

[0065] 仍然参照图 4 和 6,每根控制棒 180 包含具有可接受大中子俘获截面的适当中子吸收材料 200。关于这方面,吸收材料 200 可以从基本上由如下组成的群组中选择的金属或准金属:锂、银、铟、镉、硼、钴、钆、镓、钷、钷、铀及其混合物。可替代的是,吸收材料 200 可以从基本上由如下组成的群组中选择的化合物或合金:银铟镉合金、碳化硼、二硼化锆、二硼化钛、二硼化钆、钛酸钆、钛酸镓及其混合物。另外,已经燃烧过和具有高裂变产物浓度的燃料棒可以用作控制棒的一部分。只作为例子而非限制性地,每根这样的控制棒 180 是,例如,像在制造通用燃料组件 30 期间那样,事先固定在通用燃料组件 30 内的多根控制棒导管(未示出)的可在内部垂直滑动的各自一根。部分长度控制棒 194 的用途是细调通用燃料组件 30 内的中子通量,以便在通用燃料组件 30 内实现燃料的更精确燃烧。

[0066] 再次参照图 4 和 6,控制棒 180 是像通过受控制器(未示出)控制的多个驱动电机 210 的各自一个那样,可有选择操作的。每个驱动电机 210 在将电力供应给电机 210 时,与它的各自控制棒 180 啮合,而在像发生断电事故期间那样,未将电力供应给电机 210 时,适当地与控制棒脱离。因此,如果发生断电事故,电机 210 将与控制棒 180 脱离,以便控制棒 180 在重力作用下沿着前述导管的内部垂直滑落到通用燃料组件 30 中。这样,控制棒 180 将可控制地将负反应供应给通用燃料组件 30。因此,在发生断电事故的情况下,无需反应堆操作人员控制或干预,通用燃料组件 30 通过控制棒 180 来提供反应管理能力。

[0067] 参照图 7,通用燃料组件 30 可以进一步包含可以采用密封地容纳在反射体棒包壳 230 内的多根细长中子反射体棒 220 的形式的中子倍增剂或反射体。反射体棒 220 使中子弹性散射,因此意味着“反射”中子。由于这样的中子弹性散射,反射体棒 220 能够通过减少从通用燃料组件 30 的中子泄漏,将正反应引入燃料组件 30 中。关于这方面,每根反射体棒 220 包含具有适当中子散射概率的适当中子反射体材料 240。关于这方面,反射体棒 240 可以从基本上由如下组成的群组中选择的材料:铍(Be)、铅合金、钨(W)、钒(V)、贫化铀(U)、钍(Th)及其混合物。反射体棒 240 也可以从多种多样的钢合金中选择。应该懂得,拟用在通用燃料组件 30 中的可裂变和可增殖材料也具有大弹性散射截面。

[0068] 返回到图 4,通用燃料组件 30 进一步包含沿着垂直轴 247a 适当地放置在外壳 155 的中心上、包括非限制性地像 U^{233} 、 U^{235} 或 Pu^{239} 那样的可核裂变材料的适中浓缩同位素的相对较小和可拆除核裂变点火器 245。如果需要的话,点火器 245 可以放置在外壳 155 的端部,而不是放置在外壳 155 的中心上。点火器 245 释放出中子。点火器 245 释放的中子被燃料棒 150 内的可裂变和 / 或可增殖材料俘获,点火前述的链式裂变反应。如果需要的话,一旦链式反应变成自持的,就可以拆除点火器 245。

[0069] 应该明白,本文的教导描述了行波核裂变反应堆。在 2006 年 11 月 28 日以 Roderick A. Hyde 等人的名字提交和发明名称为“Automated Nuclear Power Reactor

For Long-Term Operation(长期运行的自动核动力反应堆)”的同时待审美国专利申请第 11/605,943 号中更详细地公开了这样行波核裂变反应堆的基本原理,该申请已转让给本申请的受让人,特此通过引用将其整个公开文本并入本文中。

[0070] 参照图 4,8 和 9,它们示出了统称为 250 的特定示范性第一实施例核裂变反应堆燃料组件。该示范性第一实施例核裂变反应堆燃料组件 250 包含统称为 260、拟定和调节第一实施例燃料组件 250 中的中子通量水平(即,中子布居)的第一装载模式。图中示出了点火器 245 点火中子之后的预定瞬时(例如,点火之后 7.5 年)的第一装载模式 260。术语“调节”在本文中被定义成作为时间、空间和 / 或能量的函数调整或改变中子通量水平的意思。调节中子通量水平来管理第一实施例燃料组件 250 中的反应。这样,使反应堆的一个区域的材料成分发生了改变。这导致了有效中子倍增因子 k_{eff} 的水平的变化,从而又导致了能量的变化(调节)。如前简述以及如当前所更详细公开,第一装载模式 260 生成使过剩反应累积在第一实施例燃料组件 250 中的爆燃波或“燃烧波前端”270。造成过剩反应有几个原因,一个原因是燃料再生的比燃烧的多。第一装载模式 260 在允许在燃烧波前端 270 的前面内和附近再生的同时,充分地在燃烧波前端 270 的后面(即,点火器 245 与燃烧波前端 270 之间的空间)平衡这种过剩反应。

[0071] 参照图 10,其中以包含作为相对于点火器 245 的距离的函数的第一实施例燃料组件 250 中的控制棒插入量的曲线图形式示出了与第一装载模式 260 相对应、统称为 275 的第一控制函数。从图 10 中可以看出,y 轴是反射体棒插入的百分比(该值在燃烧波前端 270 之后是 100%,而在燃烧波前端 270 的前面是 0%)。x 轴是以米为单位示出的相对于点火器 245 的距离。在例示在图 10 中的示范性实施例中,x 轴具有约 4 米的长度。但是,这个距离可以是像 4 米那样的任何适当距离。这个特例示出了“极限”情况。例如,燃烧波前端 270 移动距离“x”,将反射体棒完全插入。然后,燃烧波前端 270 移动另一个距离“ Δx ”,将另一根反射体棒插入。所示的阶跃控制函数是“二元”情况。实际上,反应堆运行可以偏离阶跃函数。例如,与燃烧波前端 270 最接近的反射体棒可以在中途或 50%位置上。如下文所述,第一控制函数 275 在响应监视系统观察的变化的水平上调节中子通量。应该懂得,改善稳态爆燃波燃烧波前端 270 的传播通过充分地在燃烧波前端 270 后面的控制材料的阶跃函数型分布建立起来。举例来说,万一在燃烧波前端 270 的前面反应速率降到所希望水平以下,控制函数响应就移去或重新定位燃烧波前端 270 后面的吸收剂,以便提高裂变速率。获取中子通量水平并重新调整控制函数,以再次保持所希望条件。通过移动与燃烧波前端 270 的前面较接近的阶跃函数吸收剂以便降低燃烧区裂变速率,也可以降低功率。在意外情形下,可以想象,通过将足够多的吸收剂放在整个燃烧波区中可以偏离阶跃函数配置。

[0072] 再次参照图 8,9 和 10,第一装载模式 260 包含如图所示,排列在燃烧波前端 270 的后面和以水平轴 247b 为中心的控制棒 192/194。第一装载模式 260 进一步包含排列成两个组的燃料棒。第一组燃料棒 280 包括可裂变材料(本文称为“燃烧区”),如下文所述,按预定第一组燃料棒模式排列在燃烧波前端 270 的后面和以轴 247b 为中心。燃烧区主要是可裂变材料,以及再生成它的一定百分比可增殖材料。第二组燃料棒 290 包括可增殖燃烧材料,如图所示,按预定第二组燃料棒模式排列在燃烧波前端 270 的前面和以轴 247b 为中心。术语“在燃烧波前端 270 的前面”被定义成传播燃烧波前端 270 与外壳 155 的端部之间的空间的意思。术语“在燃烧波前端 270 的后面”被定义成点火器 270 与燃烧波前端 270 之

间的空间的意思。

[0073] 仍然参照图 8,9 和 10,当点火器 245 释放它的中子引起“点火”时,只作为例子而非限制性地,两个燃烧波前端 270 从点火器 245 到外壳 155 的端部迅速向外行进,以便形成相对传播波对。当发生这种情况时,随着燃烧波前端 270 从点火器 245 开始传播,进入基本上耗尽了可裂变燃料材料的第一组燃料棒 280 中,燃烧波前端 270 使过剩反应累积在第一实施例燃料组件 250 中。这往往使一些过剩反应处在燃烧波前端 270 的后面。这种结果是不希望有的,因为过剩反应使已经造成巨大燃耗的燃烧波前端 270 后面的区域中的燃料组件结构材料接受的中子注量增大。

[0074] 再次参照图 8,9 和 10,应该明白,在燃烧波前端 270 后面的第一组燃料棒 280 生成的中子通量通过在燃烧波前端的前沿使第二组燃料棒 290 中的可增殖燃料材料蜕变成可裂变燃料材料,在燃烧波前端 270 前面的第二组燃料棒 290 中再生可裂变燃料材料。在燃烧波前端的前沿使第二组燃料棒 290 中的可增殖燃料材料蜕变成可裂变燃料材料使燃烧波前端 290 沿着箭头 295 的方向前进。随着燃烧波前端 290 掠过给定质量的燃料,只要存在在可增殖核中经受辐射俘获的中子,就连续生成可裂变同位素。在反应堆内,对于给定时间和位置,生成可裂变同位素的速率可能超过由寄生俘获和裂变引起的可裂变同位素消耗的速率。另外,可增殖材料中的中子俘获导致以给定半衰期衰变成可裂变材料的中间同位素。因为波具有传播速度,所以在燃烧波前端 270 的后面会发生一定数量的中间同位素衰变。这些效应的综合结果是使在燃烧波前端 270 的后面保留和生成的反应加强。

[0075] 因此,如图 8,9 和 10 所示,可以调节燃烧波前端 270 以便实现可变核裂变燃料燃耗。在这种类型的控制配置中,通过使吸收剂保持在燃烧波前端 270 的后面远至允许功率保持在恒定水平上的程度来提高传播速率。将吸收材料偏置在燃烧波前端 270 的后面不会减少可用于在燃烧波前端 270 的前面再生的中子数量地抵消了燃烧波前端 270 内过剩反应的累积。因此,为了在第一实施例燃料组件 250 中传播燃烧波前端 270,如上所述,由点火器 245 点火燃烧波前端 270,然后允许它传播。在一个实施例中,可主动控制控制棒 192/194 将非限制性地像 Li6、B10 或 Gd 那样的中子吸收剂插入燃烧波前端 270 后面的第一组燃料棒 280 中。假设波具有箭头 295 所指的传播方向,这样插入中子吸收剂相对于燃烧波前端 270 前面的第二组燃料棒 290 的中子反应,向下驱动或减弱了当前通过燃烧波前端 270 燃烧的第一组燃料棒 280 的中子反应。以这种方式控制反应提高了燃烧波前端 270 的传播速率,因此提供了将燃耗控制在传播所需的最小值和部分通过上面讨论的结构极限设置的较大值以上的手段。

[0076] 参照图 11,它示出了统称为 300 的示范性第二实施例核裂变反应堆燃料组件。该示范性第二实施例燃料组件 300 包含统称为 310、调节第二实施例燃料组件 300 中的中子通量水平的第二装载模式。图中示出了点火器 245 点火中子之后的预定瞬时(例如,点火之后 7.5 年)的第二装载模式 310。调节中子通量水平来管理第二实施例燃料组件 300 中的反应。如当前所更详细讨论,第二装载模式 310 生成使过剩反应累积在第二实施例燃料组件 300 中的爆燃波或“燃烧波前端”270。第二装载模式 310 在减少燃料组件接受的中子注量的同时,充分地在燃烧波前端 270 的前面平衡这种过剩反应,从而减慢燃烧波前端 270 的传播。在这种情况下,允许燃烧波前端 270 左边的燃料随着燃烧波前端传播而发电。可以看到,这样的控制方法可以导致整个燃料组件 300 的点火。

[0077] 参照图 12,其中以包含作为相对于点火器 245 的距离的函数的第二实施例燃料组件 250 中的控制棒插入量的曲线图形式示出了与第二装载模式 310 相对应、统称为 320 的第二控制函数。如下文所述,第二控制函数 320 在响应监视系统观察的变化的水平上调节中子通量。因此,本实施例中改善稳态爆燃波燃烧波前端 270 的传播通过如图所示的阶跃函数型分布建立起来,并且部分取决于移去控制棒 192/194 的速率。

[0078] 参照图 13,它示出了统称为 330 的示范性第三实施例核裂变反应堆燃料组件。该示范性第三实施例燃料组件 330 包含统称为 340、调节第三实施例燃料组件 330 中的中子通量水平的第三装载模式。图中示出了点火器 245 点火中子之后的预定瞬时(例如,点火之后 7.5 年)的第三装载模式 340。调节中子通量水平来管理第三实施例燃料组件 330 中的反应。如当前所更详细公开,第三装载模式 340 生成使过剩反应累积在第三实施例燃料组件 330 中的爆燃波燃烧波前端 270。第三装载模式 340 经由将中子吸收剂插入燃烧波前端 270 内的第一组燃料棒 280 中或插在燃烧波前端 270 的旁边的控制棒 192/194 充分接近燃烧波前端 270(即,在燃烧波前端 270 内或与燃烧波前端 270 相邻的空间)地平衡这种过剩反应。通过允许累积和/或利用燃烧波前端的周线上或附近的过剩反应,可以调整燃烧波前端 270 的有效大小和速度。

[0079] 参照图 14,其中以包含作为相对于点火器 245 的距离的函数的第三实施例燃料组件 300 中的控制棒插入量的曲线图形式示出了与第三装载模式 340 相对应、统称为 350 的第三控制函数。如下文所述,第三控制函数 350 在响应监视系统观察的变化的水平上调节中子通量。稳态爆燃波燃烧波前端 270 的传播通过如图所示的连续函数型分布建立起来。

[0080] 参照图 15,它示出了统称为 360 的示范性第四实施例核裂变反应堆燃料组件。该示范性第四实施例燃料组件 360 包含统称为 370、调节第四实施例燃料组件 360 中的中子通量水平的第四装载模式。图中示出了点火器 245 点火中子之后的预定瞬时(例如,点火之后 7.5 年)的第四装载模式 370。调节中子通量水平来管理第四实施例燃料组件 360 中的反应。如当前所更详细公开,第四装载模式 370 生成使过剩反应累积在第四实施例燃料组件 360 中的爆燃波燃烧波前端 270。第四装载模式 370 通过使用控制棒 192/194 充分地、在燃烧波前端 270 的后面和前面平衡这种过剩反应。从而,装载模式 370 给出控制波大小、传播特性,因此,损耗和注量的附加手段。可替代的是,可以通过其中含有可裂变材料的控制棒 192/194 “直接地(out front)”刺激燃烧波前端 270。

[0081] 参照图 16,其中以包含作为相对于点火器 245 的距离的函数的第四实施例燃料组件 360 中的控制棒插入量的曲线图形式示出了与第四装载模式 370 相对应、统称为 380 的第四控制函数。如下文所述,第四控制函数 380 在响应监视系统观察的变化的水平上调节中子通量。稳态爆燃波燃烧波前端 270 的传播通过如图所示的函数型分布建立起来。

[0082] 参照图 17,它示出了统称为 390 的示范性第五实施例核裂变反应堆燃料组件。该示范性第五实施例燃料组件 390 包含统称为 400、调节第五实施例燃料组件 390 中的中子通量水平的第五装载模式。除了燃料棒 150 和控制棒 192/194 之外,第五装载模式 400 还包括反射体棒 220。可以看出,作为非限制性例子,存在一行反射体接在一行吸收剂后面的重复模式。可替代的是,一行反射体可以位于一行吸收剂的前面。反射体使一部分泄漏中子返回到吸收行(和燃烧波前端 270),导致在燃烧/再生区中需要较少吸收剂和较多中子。图中示出了点火器 245 点火中子之后的预定瞬时(例如,点火之后 7.5 年)的第五装载模

式 400。调节中子通量水平来管理第五实施例燃料组件 390 中的反应。如当前所更详细公开,第五装载模式 400 生成使过剩反应累积在第五实施例燃料组件 390 中的爆燃波燃烧波前端 270。第五装载模式 390 在作为相对较高燃耗的结果减少燃烧波前端后面的燃料组件材料接受的中子注量的同时,充分地在燃烧波前端 270 的后面平衡这种过剩反应。控制棒 192/194 和反射体棒 220 调节燃烧波前端 270 后面的第一组燃料棒 280 中的中子通量,从而改变燃烧波前端 270 的有效大小和传播特性。

[0083] 参照图 18,其中以包含作为相对于点火器 245 的距离的函数的第五实施例燃料组件 390 中的控制棒插入量的曲线图形式示出了与第五装载模式 400 相对应、统称为 410 的第五控制函数。如下文所述,第五控制函数 410 在响应监视系统观察的变化的水平上调节中子通量。稳态爆燃波燃烧波前端 270 的传播通过如图所示的阶跃函数型分布建立起来。与显示在图 10 和 11 中的实施例一样,以及如上所述,这种类型的分布导致为实现燃耗减少创造条件的燃烧波前端传播速率的提高。

[0084] 参照图 19,它示出了统称为 420 的示范性第六实施例核裂变反应堆燃料组件。该示范性第六实施例燃料组件 420 包含统称为 430、调节第六实施例燃料组件 420 中的中子通量水平的第六装载模式。第六装载模式 430 是在点火器 245 点火中子之后的预定瞬时(例如,点火之后 7.5 年)获得的。调节中子通量水平来管理第六实施例燃料组件 420 中的反应。如当前所更详细公开,第六装载模式 430 生成使过剩反应累积在第六实施例燃料组件 420 中的爆燃波燃烧波前端 270。第六装载模式 430 在作为相对较高燃耗的结果减少燃料组件材料接受的中子注量的同时,充分地在燃烧波前端 270 的后面和燃烧波前端 270 的前面平衡这种过剩反应。控制棒 192/194 将中子吸收剂插入燃烧波前端 270 后面和前面的第一组燃料棒 280 中,从而改变燃烧波前端 270 的有效大小。应该懂得,除了吸收材料之外,还可能存在其它材料。

[0085] 参照图 20,其中以包含作为相对于点火器 245 的距离的函数的第六实施例燃料组件 420 中的控制棒插入量的曲线图形式示出了与第六装载模式 430 相对应、统称为 440 的第六控制函数。如下文所述,第六控制函数 440 在响应监视系统观察的变化的水平上调节中子通量。改善稳态爆燃波燃烧波前端 270 的传播通过如图所示的连续函数型分布建立起来。

[0086] 参照图 21,它示出了统称为 450 的示范性第七实施例核裂变反应堆燃料组件。该示范性第七实施例燃料组件 450 包含统称为 460、调节第七实施例燃料组件 450 中的中子通量水平的第七装载模式。图中示出了点火器 245 点火中子之后的预定瞬时(例如,点火之后 7.5 年)的第七装载模式 460。应该注意到,燃料棒 290 可能已经燃烧完了。调节中子通量水平来管理第七实施例燃料组件 450 中的反应。如当前所更详细公开,第七装载模式 460 生成使过剩反应累积在第七实施例燃料组件 450 中的爆燃波燃烧波前端 270。第七装载模式 460 在作为相对较高燃耗的结果减少燃料组件材料接受的中子注量的同时,充分地在燃烧波前端 270 的后面平衡这种过剩反应。可以在调整燃烧波前端 270 后面的控制反应的同时在燃烧波前端 270 的前面适当地设置控制阶跃函数,使燃烧波前端 270 传播的方向反过来,导致波通过前述燃烧过的棒 290 传播。控制棒 192/194 将中子吸收剂插入现在排列在燃烧波前端 270 后面第一组燃料棒 280 中,从而改变燃烧波前端 270 的有效大小。

[0087] 参照图 22,其中以包含作为相对于点火器 245 的距离的函数的第七实施例燃料组

件 450 中的控制棒插入量的曲线图形式示出了与第七装载模式 460 相对应、统称为 470 的第七控制函数。如下文所述,第七控制函数 470 在响应监视系统观察的变化的水平上调节中子通量。改善稳态爆燃波燃烧波前端 270 的传播通过如图所示的阶跃函数型分布建立起来。

[0088] 从上文的教导中可以明白,如果需要的话,可以按照监视系统监视的所得传播参数引导燃烧波前端 270。例如,传播参数可以包括燃烧波前端 270 的传播方向或取向、燃烧波前端 270 的传播速率、像发热密度那样的功率要求参数、燃烧波前端 270 传播的燃烧区的截面尺度(像燃烧区相对于燃烧波前端 270 的传播轴的轴向或横向尺度那样)等。作为另一个例子,可以将传播参数选择成控制燃烧波前端 270 的空间或时间位置、轮廓和分布,以避免可能出故障或失常控制元件(例如,中子调整结构或恒温器)、出故障或失常燃料棒等。出故障或失常燃料棒可能由冷却剂通道流动堵塞引起的热点肿胀或熔覆造成。作为另一个例子,任何破裂破碎燃料棒可能通过在制造期间检测放置在燃料棒内的示踪同位素提供的反馈来检测。作为进一步的例子,传播参数可以根据通过气体监视器监视或感测铜系元素或通过伽马辐射探测器或“盖革计数器”感测伽马辐射来选择。作为另一个例子,传播参数可以根据从响应中子通量的“试样”中监视数据来选择。作为再一个例子,传播参数可以根据经由热电偶对部分地温度的测量和经由中子探测器对通量的测量来选择。

[0089] 参照图 23,该曲线图例示了爆燃波燃烧波前端速度和燃耗百分比与波控制函数的程度之间的线性关系。如通过中子模拟所确定,曲线图上的位置“A”对应于燃烧波前端 270 的控制的阶跃函数类型,而曲线图上的位置“B”对应于燃烧波前端 270 的分布式控制棒排列。位置“A”对应于与例示在图 9 和 10 中的那种类似的配置,而位置“B”对应于与例示在图 13 和 14 中的那种类似的配置。曲线图上的位置“C”对应于吸收剂分布在如图 9 和 10 所示的阶跃函数的控制配置与显示在图 13 和 14 中的连续函数的控制配置之间;即,吸收剂分布在比在分布式情况下更在燃烧波前端的后面,但没有像在阶跃函数情况下那么多的控制配置。图 23 涉及使用 MCNPX-CINDER 计算机软件代码获得的中子结果。关于这方面,图 23 示出了如果使用吸收剂,则在波后面像阶跃函数那样将吸收剂放置在反应堆中给出最快波速和最低燃耗。偏离这种配置(使吸收剂分布在整个波中)使波变慢,最终,如果将吸收剂放在波的前面,则波的速度应该为零。

[0090] 参照图 23A,它示出了例示统称为 475 的中子通量示范性空间分布的曲线图。关于这方面,该曲线图画出了作为随相对于点火器 245 的距离而变的中子通量的空间分布 475。该空间分布 475 代表基于示范性控制函数的燃烧波前端。

[0091] 参照图 23B,它示出了例示统称为 477 的空间轮廓或控制函数的曲线图。控制函数 477 对应于显示在图 23A 中的空间分布 475。图 23B 画出了随相对于点火器 245 的距离而变的控制棒插入百分比。

[0092] 参照图 23C,它示出了例示统称为 479 的中子通量示范性空间分布的曲线图。关于这方面,该曲线图画出了作为随相对于点火器 245 的距离而变的中子通量的空间分布 479。该空间分布 479 代表基于示范性控制函数的燃烧波前端。

[0093] 参照图 23D,它示出了例示统称为 481 的空间轮廓或控制函数的曲线图。控制函数 481 对应于显示在图 23C 中的空间分布 479。这个曲线图画出了随相对于点火器 245 的距离而变的控制棒插入百分比。

[0094] 参照图 23E, 它示出了例示统称为 483 的中子通量示范性空间分布的曲线图。关于这方面, 该曲线图画出了作为随相对于点火器 245 的距离而变的中子通量的空间分布 483。该空间分布 483 代表燃烧波前端。

[0095] 参照图 23F, 它示出了例示与显示在图 23E 中的空间分布 483 相对应、统称为 485 的空间轮廓或控制函数的曲线图。空间轮廓 485 具有最陡部分 487。这个曲线图画出了随相对于点火器 245 的距离而变的控制棒插入百分比。

[0096] 从上文的公开中可以懂得, 可达到预定燃耗值或以下的燃耗值。关于这方面, 可以在相对于燃烧波前端 270 的多个位置上控制中子吸收剂、反射体和 / 或发射体的数量, 以便使大多数中子吸收处在燃烧波前端 270 后面的位置上, 以便达到预定燃耗值或以下的燃耗值。例如, 可以将中子发射体从燃烧波前端 270 后面的第一位置移动到燃烧波前端 270 前面的第二位置, 以便达到预定燃耗值或以下的所希望燃耗值。

[0097] 另外, 从上文的公开中可以懂得, 也可以响应通用燃料组件 30 以及示范性实施例燃料组件 250/300//330/360/390/420/450 中的燃耗控制来控制对一种或多种结构材料的辐射损伤。关于这方面, 控制这样的辐射损伤将使像 DPA 那样的所希望辐射损伤值达到预定辐射损伤值或以下。达到预定辐射损伤值或以下的辐射损伤值可以包含将中子发射体从燃烧波前端 270 后面的第一位置移动到燃烧波前端 270 后面的第二位置。可替代的是, 可以将中子发射体从燃烧波前端 270 后面的第一位置移动到燃烧波前端 270 前面的第二位置, 以便控制潜在辐射损伤。作为另一种替代, 可以通过燃烧波前端 270 后面的位置上的控制棒 270 来控制中子吸收剂的数量, 以便控制潜在辐射损伤。关于这方面, 由中子吸收剂引起的大多数中子吸收可能处在燃烧波前端 270 后面的位置上。另外, 达到预定辐射损伤值或以下的所希望辐射损伤值可以通过控制燃烧波前端 270 后面的位置上的中子反射体的数量来实现。关于这方面, 由中子反射体引起的大多数中子反射可能处在燃烧波前端 270 后面的位置上。

[0098] 从上文的公开中还可以懂得, 可以在相对于燃烧波前端 270 的位置上有选择地调节中子通量。关于这方面, 可以在燃烧波前端 270 后面的位置上调节中子通量。在这种情况下, 大多数调节处在燃烧波前端 270 后面的多个位置上。另外, 有选择地调节燃烧波前端 270 发出的中子通量可以带来有选择地吸收燃烧波前端 270 发出的一部分中子通量。换句话说, 在相对于燃烧波前端 270 的位置上控制中子吸收剂的数量。更一般地说, 可以在相对于燃烧波前端 270 的位置上控制中子相互作用材料的数量 (例如, 控制棒 192/194 的插入)。在一个实施例中, 在相对于燃烧波前端 270 的位置上控制中子相互作用材料的数量包含在相对于燃烧波前端 270 的位置上控制中子发射体的数量。中子发射体可以是可裂变元素、可增殖元素和 / 或能够经历 β 衰变变成可裂变元素的元素。另一方面, 在相对于燃烧波前端 270 的位置上控制中子相互作用材料的数量包含在相对于燃烧波前端 270 的位置上控制中子反射体的数量。

[0099] 另外, 从上文的公开中可以懂得, 有选择地调节中子通量可能受空间轮廓支配。空间轮廓相对于燃烧波前端 270 可以是对称的或非对称的。空间轮廓可以具有存在最陡部分的斜坡。最陡部分适当地出现在燃烧波前端 270 的后面。

[0100] 从上文的公开中可以进一步懂得, 有选择地调节燃烧波前端 270 发出的中子通量可以包含检测与燃烧波前端 270 相关联的燃烧参数, 以及响应燃烧参数检测至少部分地有

选择地调节中子通量。检测燃烧参数可以包含在接近燃烧波前端 270 的至少一个位置上监视像 DPA 那样的材料辐射损伤；在接近燃烧波前端 270 的至少一个位置上监视燃耗；监视燃耗速度；监视燃烧波前端宽度；在接近燃烧波前端 270 的至少一个位置上监视与中子通量相关联的一种或多种特性；在接近燃烧波前端 270 的至少一个位置上监视核辐射；和/或在在发热方面接近燃烧波前端 270 的至少一个位置上监视温度。此外，响应燃烧参数检测至少部分地有选择地调节中子通量可以包含响应燃烧参数检测至少部分地有选择地调节中子通量，以及响应反馈控制过程至少部分地和/或响应含有与燃烧参数相关联的多个参数的基于计算机的算法至少部分地检测燃烧参数。关于这方面，可以响应燃烧参数检测调整基于计算机的算法的一个或多个参数。

[0101] 例示性方法

[0102] 现在描述与在行波核裂变反应堆和燃料组件中控制燃耗的示范性实施例相关联的例示性方法。

[0103] 参照图 24-65，它们提供了在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆和燃料组件中控制燃耗的例示性方法。

[0104] 现在转到图 24，在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 490 从方块 500 开始。在方块 510 中，该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量。在方块 520 中结束该方法 490。

[0105] 参照图 25，在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 530 从方块 540 开始。在方块 550 中，该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量，该中子通量限定燃烧波前端。在方块 560 中结束该方法 530。

[0106] 参照图 26，在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 570 从方块 580 开始。在方块 590 中，该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量，该中子通量限定燃烧波前端。在方块 600 中，达到预定燃耗值。在方块 610 中结束该方法 570。

[0107] 参照图 27，在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 620 从方块 630 开始。在方块 640 中，该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量，该中子通量限定燃烧波前端。在方块 650 中，达到预定燃耗值或以下的所希望燃耗值。在方块 660 中结束该方法 620。

[0108] 参照图 28，在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 670 从方块 680 开始。在方块 690 中，该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量，该中子通量限定燃烧波前端。在方块 700 中，该方法包含达到预定燃耗值或以下的燃耗值。在方块 710 中，在燃烧波前端后面的位置处控制中子吸收剂的数量。在方块 720 中结束该方法 670。

[0109] 参照图 29，在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 790 从方块 800 开始。在方块 810 中，该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量，该中子通量限定燃烧波前端。在方块 820 中，使燃耗值达到预定燃耗值或以下。在方块 830 中，在相对于燃烧波前端的多个位置上控制实现中子吸收的中子吸收剂的数量，其中由中子吸收剂引起的大多数中子吸收处在燃烧波前端后面的多个位置上。在方块 840 中结束该方法。

[0110] 参照图 30, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 850 从方块 860 开始。在方块 870 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 880 中, 使燃耗值达到预定燃耗值或以下。在方块 890 中, 在燃烧波前端后面的位置上控制中子反射体的数量。在方块 900 中结束该方法。

[0111] 参照图 31, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 910 从方块 920 开始。在方块 930 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 940 中, 使燃耗值达到预定燃耗值或以下。在方块 950 中, 在相对于燃烧波前端的一个或多个位置上控制实现中子反射的中子反射体的数量, 其中由中子吸收剂引起的大多数中子反射处在燃烧波前端后面的多个位置上。在方块 960 中结束该方法。

[0112] 参照图 32, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 970 从方块 980 开始。在方块 990 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1000 中, 使燃耗值达到预定燃耗值或以下。在方块 1010 中, 将中子发射体从燃烧波前端后面的第一位置移动到燃烧波前端后面的第二位置。在方块 1020 中结束该方法。

[0113] 参照图 33, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1030 从方块 1040 开始。在方块 1050 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1060 中, 使燃耗值达到预定燃耗值或以下。在方块 1070 中, 将中子发射体从燃烧波前端后面的第一位置移动到接近燃烧波前端的第二位置。在方块 1080 中结束该方法。

[0114] 参照图 34, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1090 从方块 1100 开始。在方块 1110 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1120 中, 使燃耗值达到预定燃耗值或以下。在方块 1130 中, 将中子发射体从燃烧波前端后面的第一位置移动到燃烧波前端前面的第二位置。在方块 1140 中结束该方法。

[0115] 参照图 35, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1150 从方块 1160 开始。在方块 1170 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1180 中, 响应行波核裂变反应堆中的燃耗值控制, 控制对一种或多种结构材料的辐射损伤。在方块 1190 中结束该方法。

[0116] 参照图 36, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1200 从方块 1210 开始。在方块 1220 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1230 中, 响应行波核裂变反应堆中的燃耗值控制, 控制对一种或多种结构材料的辐射损伤。在方块 1240 中, 达到辐射损伤值。在方块 1250 中结束该方法。

[0117] 参照图 37, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1260 从方块 1270 开始。在方块 1280 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1290 中, 响应行波核裂变反应堆中的燃耗值控制, 控制对一种或多种结构材料的辐射损伤。在方块 1300 中, 使辐射损伤值达到预定辐射损伤值或以下。在方块 1310 中结束该方法。

[0118] 参照图 38, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1320 从方块 1330 开始。在方块 1340 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1350 中, 响应行波核裂变反应堆中的燃耗值控制, 控制对一种或多种结构材料的辐射损伤。在方块 1360 中, 使辐射损伤值达到预定辐射损伤值或以下。在方块 1370 中, 将中子发射体从燃烧波前端后面的第一位置移动到燃烧波前端后面的第二位置。在方块 1380 中结束该方法。

[0119] 参照图 39, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1390 从方块 1400 开始。在方块 1410 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1420 中, 响应行波核裂变反应堆中的燃耗值控制, 控制对一种或多种结构材料的辐射损伤。在方块 1430 中, 使辐射损伤值达到预定辐射损伤值或以下。在方块 1440 中, 将中子发射体从燃烧波前端后面的第一位置移动到接近燃烧波前端的第二位置。在方块 1450 中结束该方法。

[0120] 参照图 40, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1460 从方块 1470 开始。在方块 1480 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1490 中, 响应行波核裂变反应堆中的燃耗值控制, 控制对一种或多种结构材料的辐射损伤。在方块 1500 中, 使辐射损伤值达到预定辐射损伤值或以下。在方块 1510 中, 将中子发射体从燃烧波前端后面的第一位置移动到燃烧波前端前面的第二位置。在方块 1520 中结束该方法。

[0121] 参照图 41, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1530 从方块 1540 开始。在方块 1550 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1560 中, 响应行波核裂变反应堆中的燃耗值控制, 控制对一种或多种结构材料的辐射损伤。在方块 1570 中, 使辐射损伤值达到预定辐射损伤值或以下。在方块 1580 中, 在燃烧波前端后面的位置上控制中子吸收剂的数量。在方块 1590 中结束该方法。

[0122] 参照图 42, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1600 从方块 1610 开始。在方块 1610 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1620 中, 响应行波核裂变反应堆中的燃耗值控制, 控制对一种或多种结构材料的辐射损伤。在方块 1630 中, 使辐射损伤值达到预定辐射损伤值或以下。在方块 1650 中, 在相对于燃烧波前端的多个位置上控制中子吸收剂的数量, 其中由中子吸收剂引起的大多数中子吸收处在燃烧波前端后面的多个位置上。在方块 1660 中结束该方法。

[0123] 参照图 43, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1670 从方块 1680 开始。在方块 1690 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1700 中, 响应行波核裂变反应堆中的燃耗值控制, 控制对一种或多种结构材料的辐射损伤。在方块 1710 中, 使辐射损伤值达到预定辐射损伤值或以下。在方块 1720 中, 在燃烧波前端后面的位置上控制中子反射体的数量。在方块 1740 中结束该方法。

[0124] 参照图 44, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1740 从方块 1750 开始。在方块 1760 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通

量,该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1770 中,响应行波核裂变反应堆中的燃耗值控制,控制对一种或多种结构材料的辐射损伤。在方块 1780 中,使辐射损伤值达到预定辐射损伤值或以下。在方块 1790 中,在相对于燃烧波前端的多个位置上控制实现中子反射的中子反射体的数量,其中由中子反射体引起的大多数中子反射处在燃烧波前端后面的多个位置上。在方块 1800 中结束该方法。

[0125] 参照图 45,在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1810 从方块 1820 开始。在方块 1830 中,该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1840 中,在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 1850 中结束该方法。

[0126] 参照图 46,在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1860 从方块 1870 开始。在方块 1880 中,该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1890 中,在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 1900 中,在燃烧波前端后面的位置上有选择地调节中子通量。在方块 1910 中结束该方法。

[0127] 参照图 47,在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1920 从方块 1930 开始。在方块 1940 中,该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,该中子通量限定燃烧波前端。在方块 1950 中,在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 1960 中,在相对于燃烧波前端的多个位置上有选择地调节中子通量,其中相对于燃烧波前端的多个位置上的调节量受空间轮廓支配。在方块 1970 中结束该方法。

[0128] 参照图 48,在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 1980 从方块 1990 开始。在方块 2000 中,该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,该中子通量限定燃烧波前端。在方块 2010 中,在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 2020 中,在相对于燃烧波前端的多个位置上有选择地调节中子通量,以便大多数中子通量调节处在燃烧波前端后面的多个位置上。在方块 1970 中结束该方法。

[0129] 参照图 49,在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 2040 从方块 2050 开始。在方块 2060 中,该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,该中子通量限定燃烧波前端。在方块 2070 中,在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 2080 中,在相对于燃烧波前端的位置上有选择地吸收一部分中子通量。在方块 2090 中结束该方法。

[0130] 参照图 50,在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 2100 从方块 2110 开始。在方块 2120 中,该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,该中子通量限定燃烧波前端。在方块 2130 中,在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 2140 中,在相对于燃烧波前端的位置上控制中子吸收剂的数量。在方块 2150 中结束该方法。

[0131] 参照图 51,在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 2160 从方块 2170 开始。在方块 2180 中,该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,该中子通量限定燃烧波前端。在方块 2190 中,在相对于燃烧波前端的位置上有选择地

调节中子通量。在方块 2200 中,在相对于燃烧波前端的位置上控制中子相互作用材料的数量。在方块 2210 中结束该方法。

[0132] 参照图 52,在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 2220 从方块 2230 开始。在方块 2240 中,该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,该中子通量限定燃烧波前端。在方块 2250 中,在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 2260 中,在相对于燃烧波前端的位置上控制中子相互作用材料的数量。在方块 2270 上,在相对于燃烧波前端的位置上控制中子发射体的数量。在方块 2280 中结束该方法。

[0133] 参照图 53,在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 2290 从方块 2300 开始。在方块 2310 中,该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,该中子通量限定燃烧波前端。在方块 2320 中,在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 2330 中,在相对于燃烧波前端的位置上控制中子相互作用材料的数量。在方块 2340 上,在相对于燃烧波前端的位置上控制中子反射体的数量。在方块 2350 中结束该方法。

[0134] 参照图 54,在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 2360 从方块 2370 开始。在方块 2380 中,该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,该中子通量限定燃烧波前端。在方块 2390 中,在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 2400 中,检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数。在方块 2410 上,响应与燃烧波前端相关联的燃烧参数的检测至少部分地有选择地调节中子通量。在方块 2420 中结束该方法。

[0135] 参照图 55,在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 2430 从方块 2440 开始。在方块 2450 中,该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,该中子通量限定燃烧波前端。在方块 2460 中,在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 2470 中,检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数。在方块 2480 中,监视对接近燃烧波前端的至少一个位置上的材料的辐射损伤。在方块 2490 上,响应与燃烧波前端相关联的燃烧参数的检测至少部分地有选择地调节中子通量。在方块 2500 中结束该方法。

[0136] 参照图 56,在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 2510 从方块 2520 开始。在方块 2530 中,该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,该中子通量限定燃烧波前端。在方块 2540 中,在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 2550 中,检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数。在方块 2560 中,在接近燃烧波前端的至少一个位置上监视燃耗值。在方块 2570 上,响应与燃烧波前端相关联的燃烧参数的检测至少部分地有选择地调节中子通量。在方块 2580 中结束该方法。

[0137] 参照图 57,在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 2590 从方块 2600 开始。在方块 2610 中,该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量,该中子通量限定燃烧波前端。在方块 2620 中,在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 2630 中,检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数。在方块 2640 中,监视燃烧波前端速度。在方块 2650 上,响应与燃烧波前端相关联的燃烧参数的检测至少部分地有选择地调节中子通量。在方块 2660 中结束该方法。

[0138] 参照图 58, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 2670 从方块 2680 开始。在方块 2690 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 2700 中, 在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 2710 中, 检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数。在方块 2720 中, 监视燃烧波前端宽度。在方块 2730 上, 响应与燃烧波前端相关联的燃烧参数的检测至少部分地有选择地调节中子通量。在方块 2740 中结束该方法。

[0139] 参照图 59, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 2750 从方块 2760 开始。在方块 2770 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 2780 中, 在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 2790 中, 检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数。在方块 2800 中, 在接近燃烧波前端的至少一个位置上监视与中子通量相关联的一种或多种特性。在方块 2810 上, 响应与燃烧波前端相关联的燃烧参数的检测至少部分地有选择地调节中子通量。在方块 2820 中结束该方法。

[0140] 参照图 60, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 2830 从方块 2840 开始。在方块 2850 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 2860 中, 在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 2870 中, 检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数。在方块 2880 中, 在接近燃烧波前端的至少一个位置上监视核辐射。在方块 2890 上, 响应与燃烧波前端相关联的燃烧参数的检测至少部分地有选择地调节中子通量。在方块 2900 中结束该方法。

[0141] 参照图 61, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 3000 从方块 3010 开始。在方块 3020 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 3030 中, 在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 3040 中, 检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数。在方块 3050 中, 在接近燃烧波前端的至少一个位置上监视温度。在方块 3060 上, 响应与燃烧波前端相关联的燃烧参数的检测至少部分地有选择地调节中子通量。在方块 3070 中结束该方法。

[0142] 参照图 62, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 3080 从方块 3090 开始。在方块 3100 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 3110 中, 在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 3120 中, 检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数。在方块 3130 中, 响应与燃烧波前端相关联的燃烧参数的检测至少部分地有选择地调节中子通量。在方块 3140 中, 响应响应反馈控制过程的燃烧参数检测至少部分地有选择地调节中子通量。在方块 3150 中结束该方法。

[0143] 参照图 63, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 3160 从方块 3170 开始。在方块 3180 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 3190 中, 在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 3200 中, 检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数。在方块 3210 中, 响应与燃烧波前端相关联的燃烧参数的检测至少部分地有选择地调节中子通量。在方块 3220 中, 响应响应基于计算机的算法的燃烧参数检测至少部分地有选择地调节中子通量。在方块 3230 中结束该方法。

[0144] 参照图 64, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 3240 从方块 3250 开始。在方块 3260 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 3270 中, 在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 3280 中, 检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数。在方块 3290 中, 响应与燃烧波前端相关联的燃烧参数的检测至少部分地有选择地调节中子通量。在方块 3300 中, 响应响应基于计算机的算法的燃烧参数检测至少部分地有选择地调节中子通量, 其中基于计算机的算法内含多个参数。在方块 3310 中, 响应燃烧参数检测调整基于计算机的算法的多个参数的一个或多个参数。在方块 3320 中结束该方法。

[0145] 参照图 65, 在能够发出中子通量的行波核裂变反应堆中控制燃耗的例示性方法 3330 从方块 3340 开始。在方块 3350 中, 该方法包含调节行波核裂变反应堆发出的中子通量, 该中子通量限定燃烧波前端。在方块 3360 中, 在相对于燃烧波前端的位置上有选择地调节中子通量。在方块 3370 中, 检测与燃烧波前端相关联的燃烧参数。在方块 3380 中, 响应中子通量的有选择调节控制对多种结构材料的一种或多种结构材料的辐射损伤。在方块 3320 中结束该方法。

[0146] 本领域的普通技术人员应该认识到, 本文所述的部件 (例如, 操作)、设备、对象和伴随它们的讨论用作澄清概念的例子, 可以设想出各种配置变型。因此, 如本文所使用, 展示的特定例子以及伴随的讨论旨在代表它们的更一般类别。一般说来, 任何特定例子的使用都旨在代表它的类别, 以及特定部件 (例如, 操作)、设备、和对象的未包括不应该看作是限制性的。

[0147] 此外, 本领域的普通技术人员应该懂得, 前述的特定示范性过程、设备和 / 或技术代表像在随本文提交的权利要求书中和 / 或本申请中的其它地方那样, 在本文其它地方讲述的更一般过程、设备和 / 或技术。

[0148] 虽然已经显示和描述了本文所述的当前主题的特定方面, 但对于本领域的普通技术人员来说, 显而易见, 可以根据本文的教导, 不偏离本文所述的课题及其更宽广方面地作出改变和修改, 因此, 所附权利要求书将像在本文所述的课题的真正精神和范围之内那样的所有改变和修改都包括在它的范围之内。本领域的普通技术人员应该明白, 一般说来, 用在本文中, 尤其用在所附权利要求书 (例如, 所附权利要求书的主要部分) 中的术语一般旨在作为“开放”术语 (例如, 动名词术语“包括”应该理解为动名词“包括但不限于”, 术语“含有”应该理解为“至少含有”, 动词术语“包括”应该理解为动词“包括但不限于”等)。本领域的普通技术人员还应该明白, 如果有意表示特定数量的所介绍权利要求列举项, 则在权利要求中将明确列举这样的意图, 而在缺乏这样的列举的情况下, 则不存在这样的意图。例如, 为了帮助人们理解, 如下所附权利要求书可能包含使用介绍性短语“至少一个”和“一个或多个”来介绍权利要求列举项。但是, 即使同一个权利要求包括介绍性短语“一个或多个”或“至少一个”以及像“一个”或“一种” (例如, “一个”和 / 或“一种”通常应该理解成“至少一个”或“一个或多个”的意思) 那样的不定冠词, 这样短语的使用也不应该理解成暗示着通过不定冠词“一个”或“一种”介绍权利要求列举项将包含这样介绍权利要求列举项的任何特定权利要求限制在只包含一个这样列举项的权利要求上; 对于用于介绍权利要求列举项的定冠词的使用, 这同样成立。另外, 即使明确列举了特定数量的所介绍权利要求列举项, 本领域的普通技术人员也应该认识到, 这样的列举通常应该理解成至少具有所列举数

量的意思（例如，在没有其它修饰词的情况下，仅列举“两个列举项”通常意味着至少两个列举项，或两个或更多个列举项）。而且，在使用类似于“A、B、和 C 等的至少一个”的习惯用法的那些情况下，一般说来，这样的习惯用法旨在本领域的普通技术人员理解该习惯用法的意义上使用（例如，“含有 A、B、和 C 的至少一个的系统”将包括但不限于只含有 A，只含有 B，只含有 C，一起含有 A 和 B，一起含有 A 和 C，一起含有 B 和 C，和 / 或一起含有 A、B 和 C 等的系统）。在使用类似于“A、B、或 C 等的至少一个”的习惯用法的那些情况下，一般说来，这样的习惯用法旨在本领域的普通技术人员理解该习惯用法的意义上使用（例如，“含有 A、B、或 C 的至少一个的系统”将包括但不限于只含有 A，只含有 B，只含有 C，一起含有 A 和 B，一起含有 A 和 C，一起含有 B 和 C，和 / 或一起含有 A、B 和 C 等的系统）。本领域的普通技术人员还应该明白，通常，无论在描述、权利要求书还是附图中，出现两个或更多个可替代项目的分隔词和 / 或短语应该理解成具有包括这些项目之一，这些项目的任一个，或两个项目的可能性，除非上下文另有所指。例如，短语“A 或 B”通常理解成包括“A”，“B”或“A 和 B”的可能性。

[0149] 关于所附权利要求书，本领域的普通技术人员应该懂得，本文所列举的操作一般可以按任何次序执行。此外，尽管各种操作流程按顺序展示出来，但应该明白，各种操作可以按与所例示的次序不同的其它次序执行，或者可以同时执行。这样可替代排序的例子可以包括重叠、交错、截断、重排、递增、预备、补充、同时、反向、或其它衍生排序，除非上下文另有所指。而且，像“对... 敏感”、“与... 有关”或其它过去式形容词那样的术语一般无意排斥这样的衍生，除非上下文另有所指。

[0150] 因此，所提供的是行波核裂变反应堆、燃料组件以及控制其中能耗的方法。

[0151] 虽然本文公开了各种方面和实施例，但其它方面和实施例对于本领域的普通技术人员来说是显而易见的。例如，可以将核裂变反应堆燃料组件的每个实施例布置在热中子反应堆、快中子反应堆、中子再生反应堆、快中子再生反应堆以及前述的行波反应堆中。因此，燃料组件的每个实施例是多用途的，足以有利地用在各种核反应堆设计中。

[0152] 此外，本文公开的各种方面和实施例用于例示的目的，而无意限制本发明的范围，本发明的真正范围和精神由如下权利要求书指出。

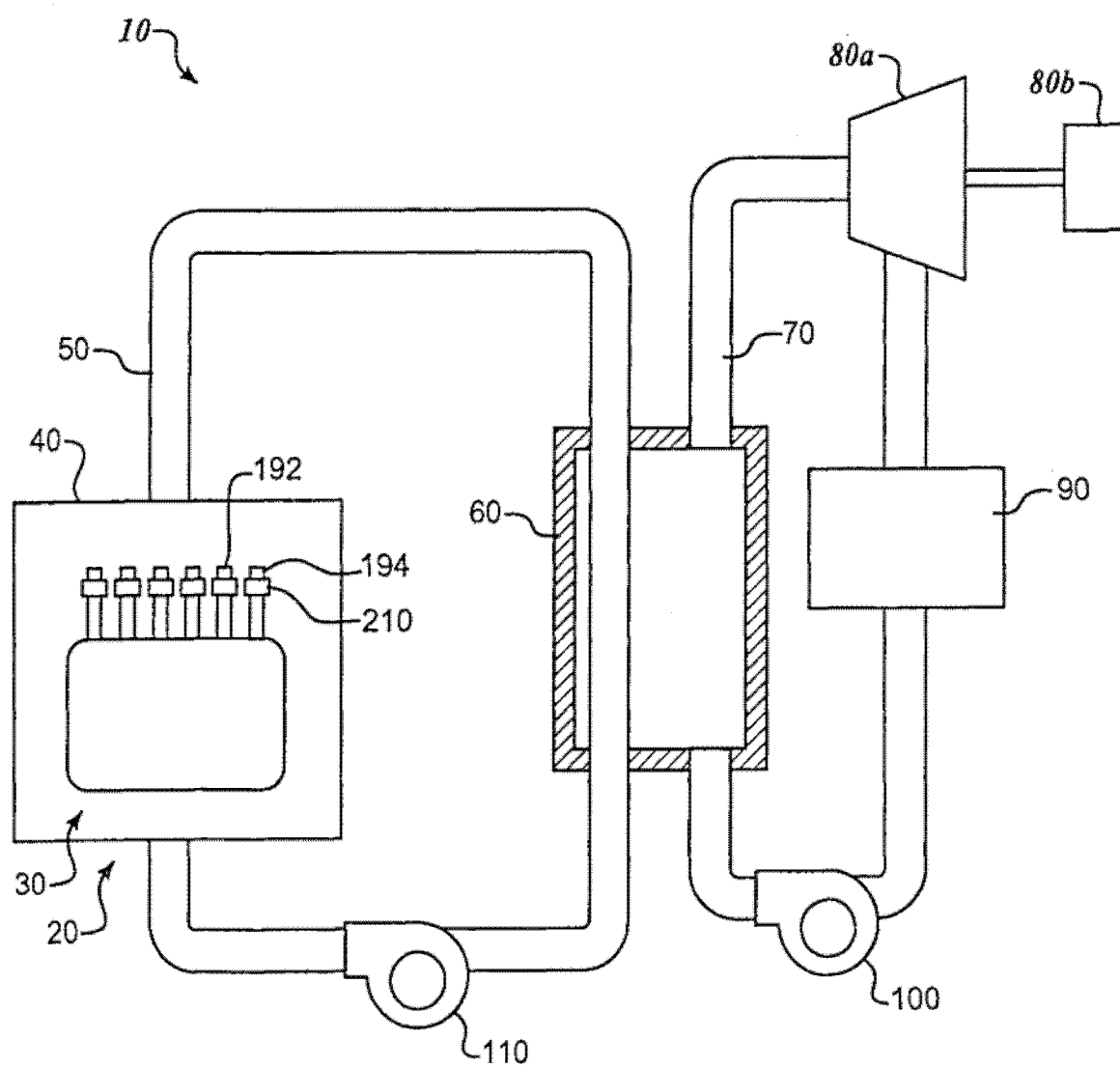


图 1

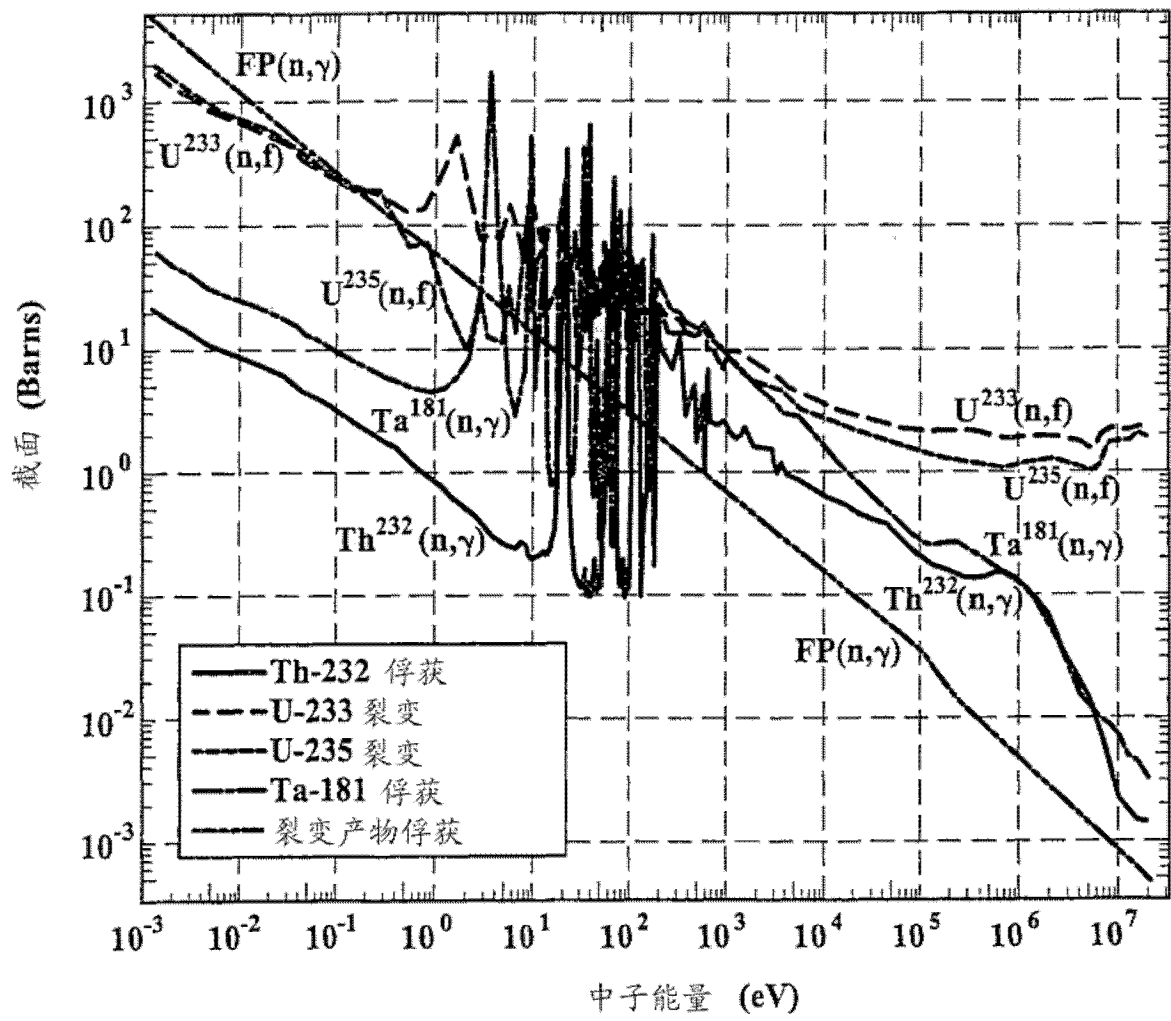


图 2

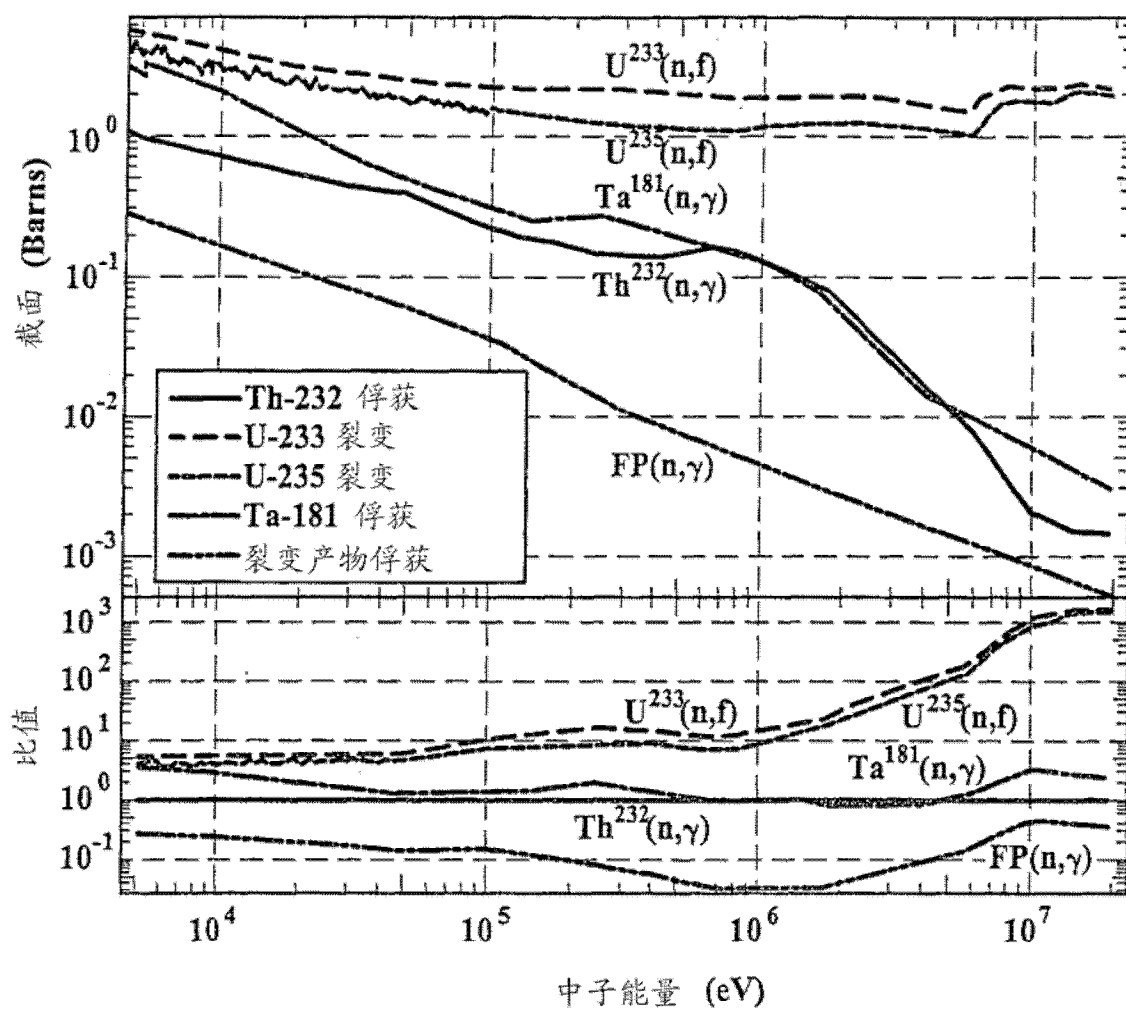


图 3

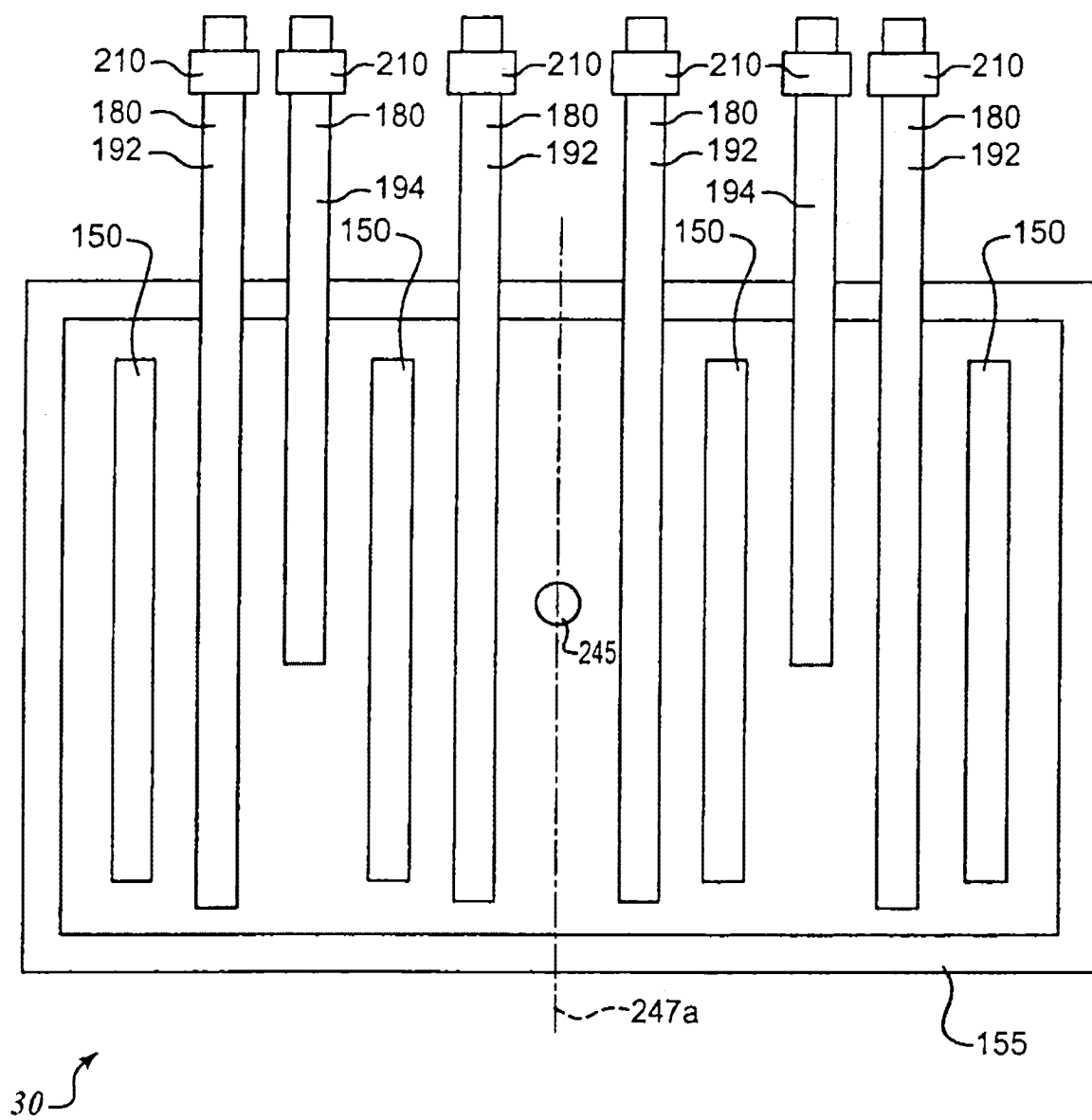


图 4

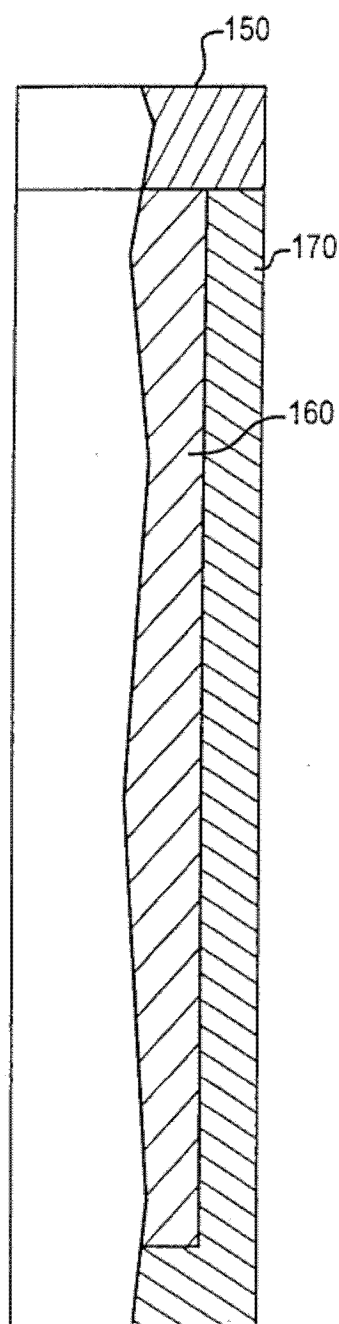


图 5

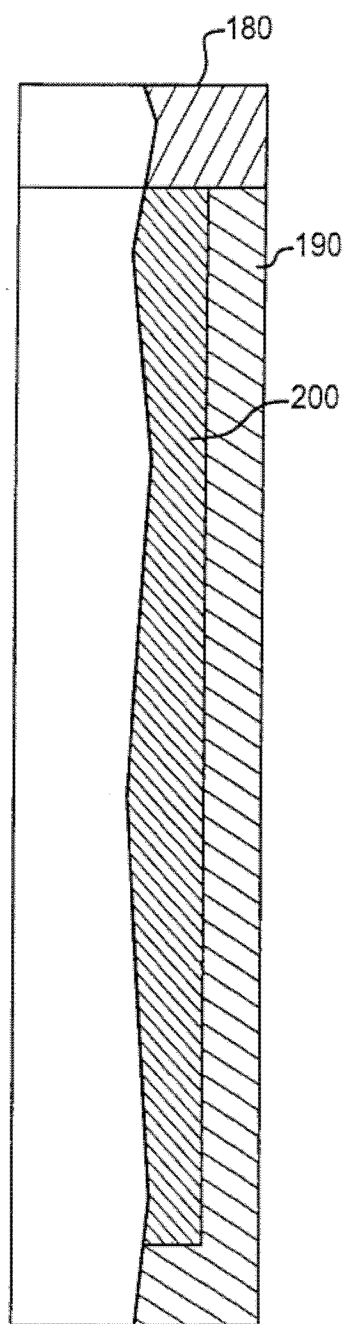


图 6

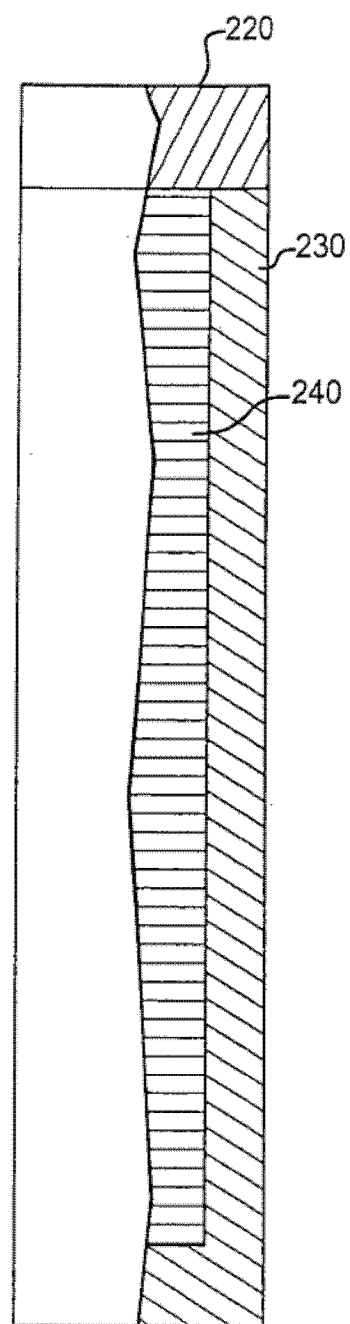


图 7

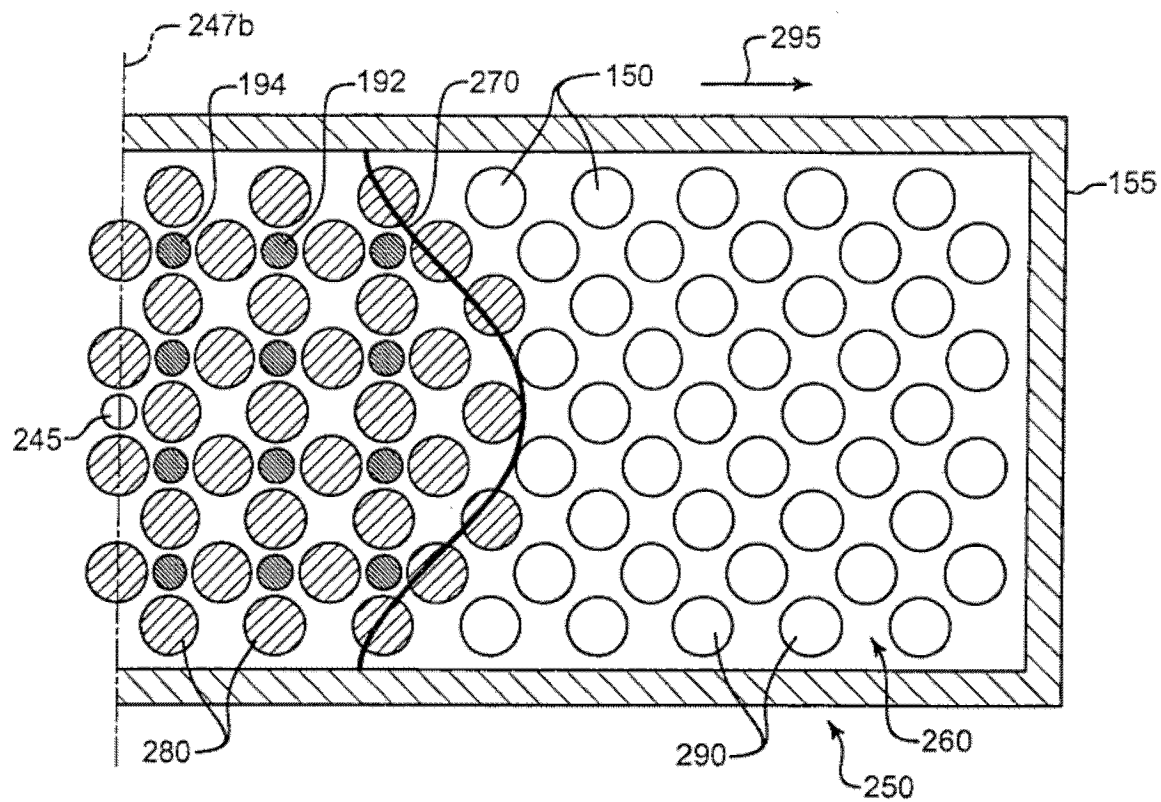


图 9

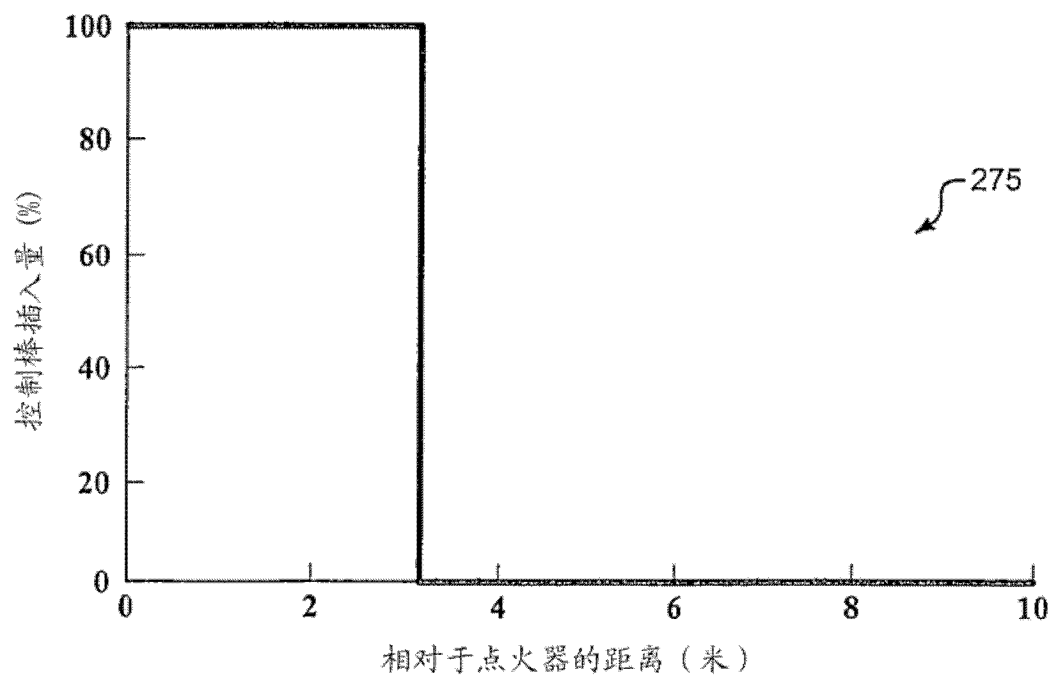


图 10

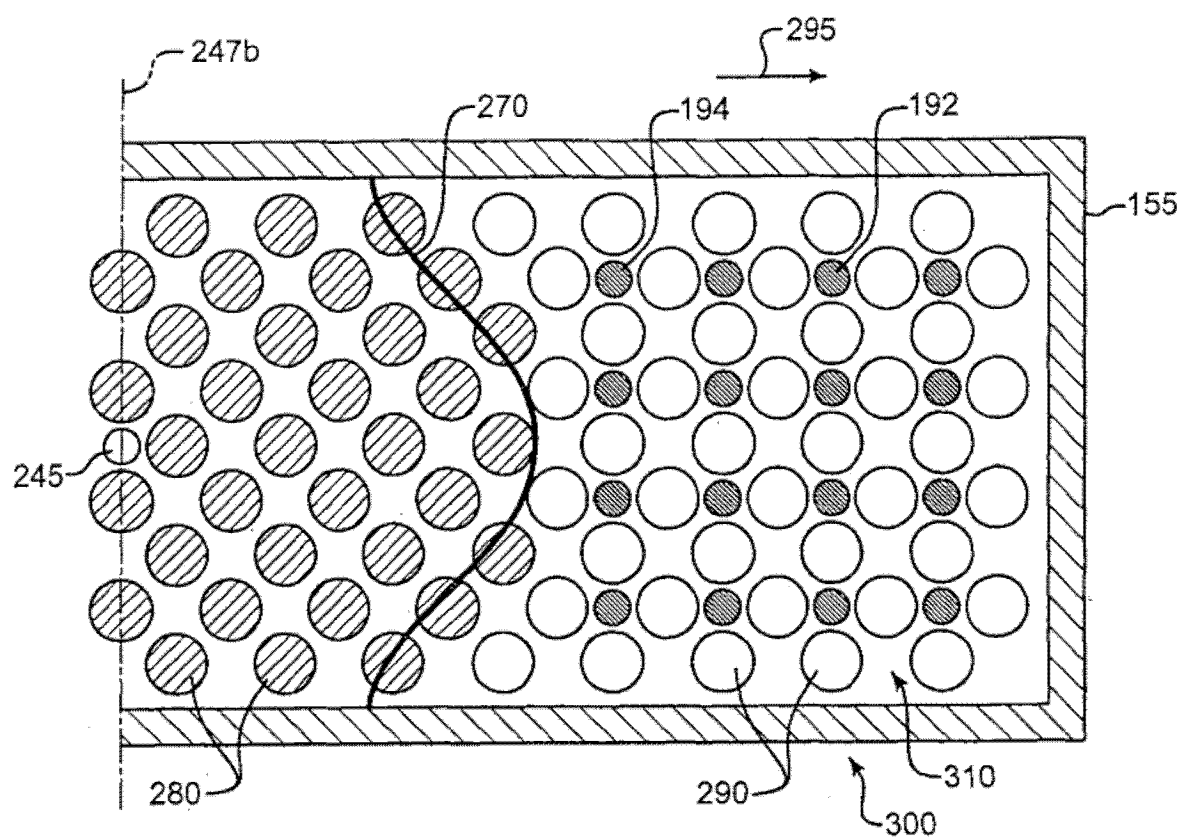


图 11

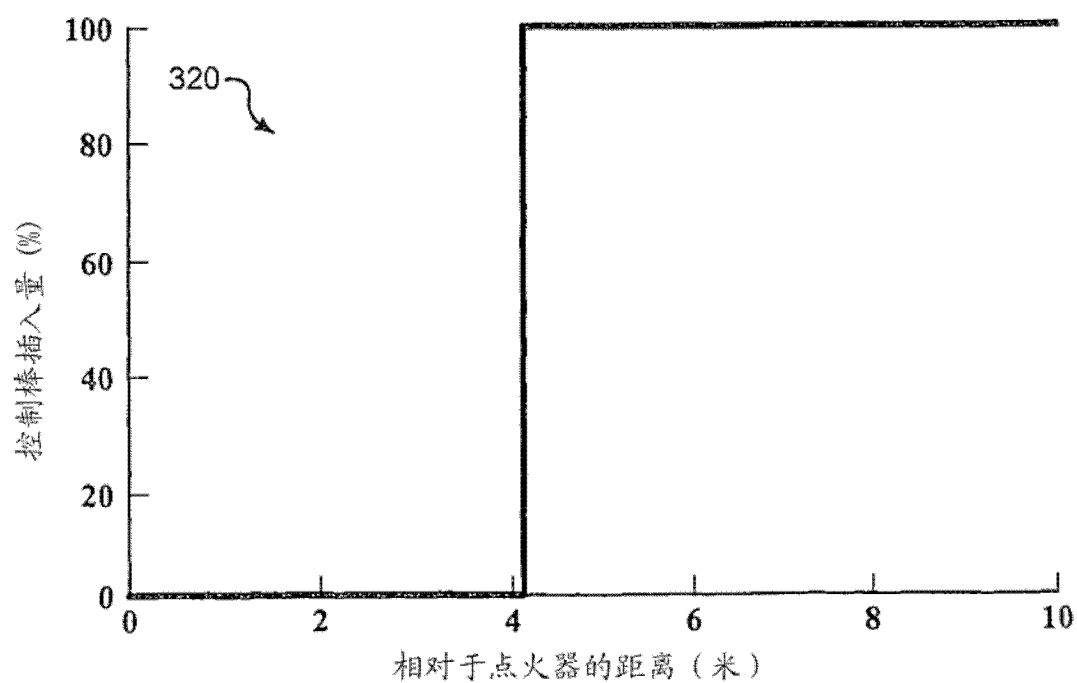


图 12

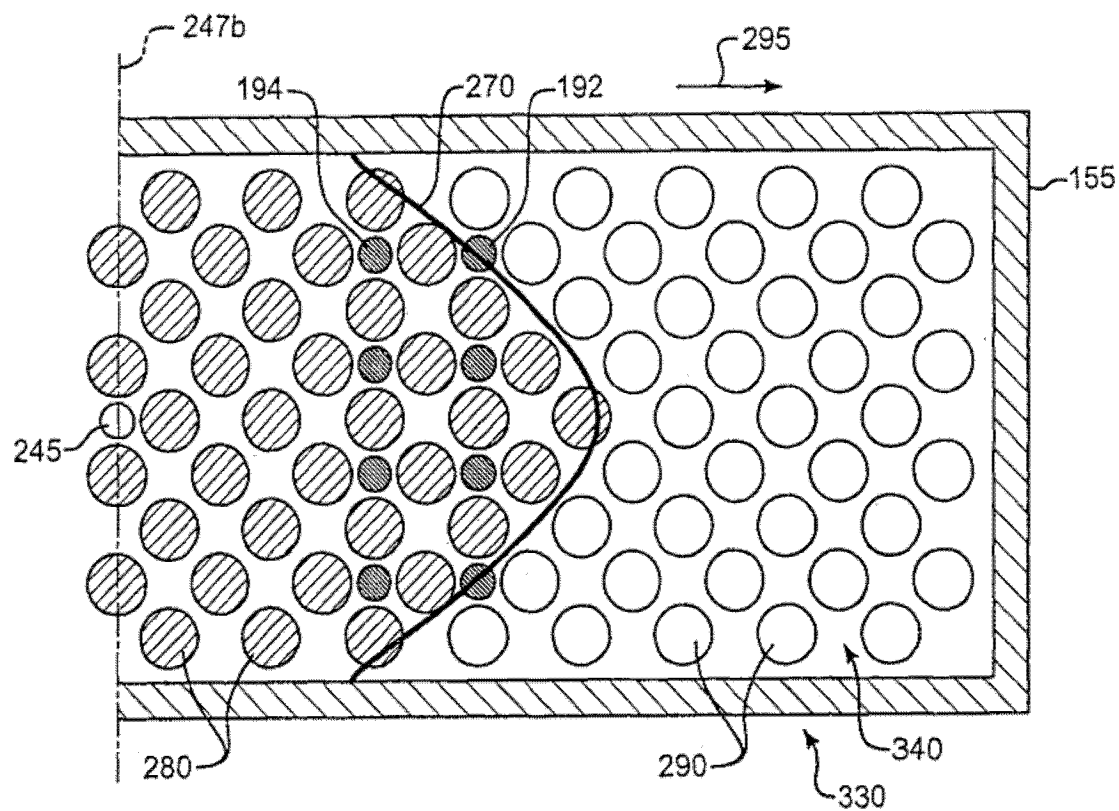


图 13

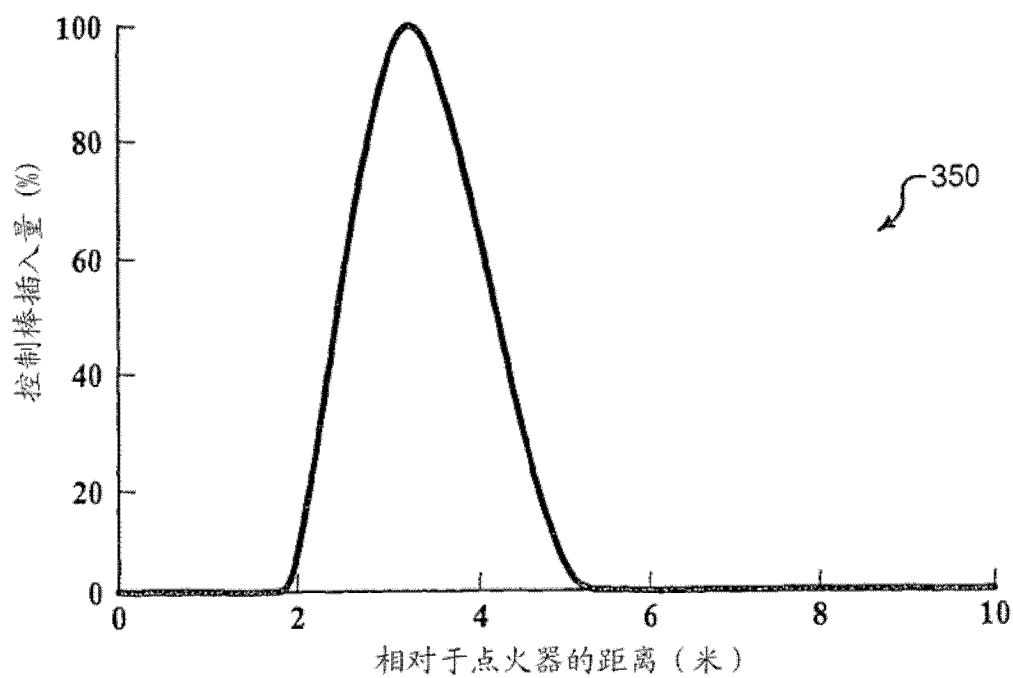


图 14

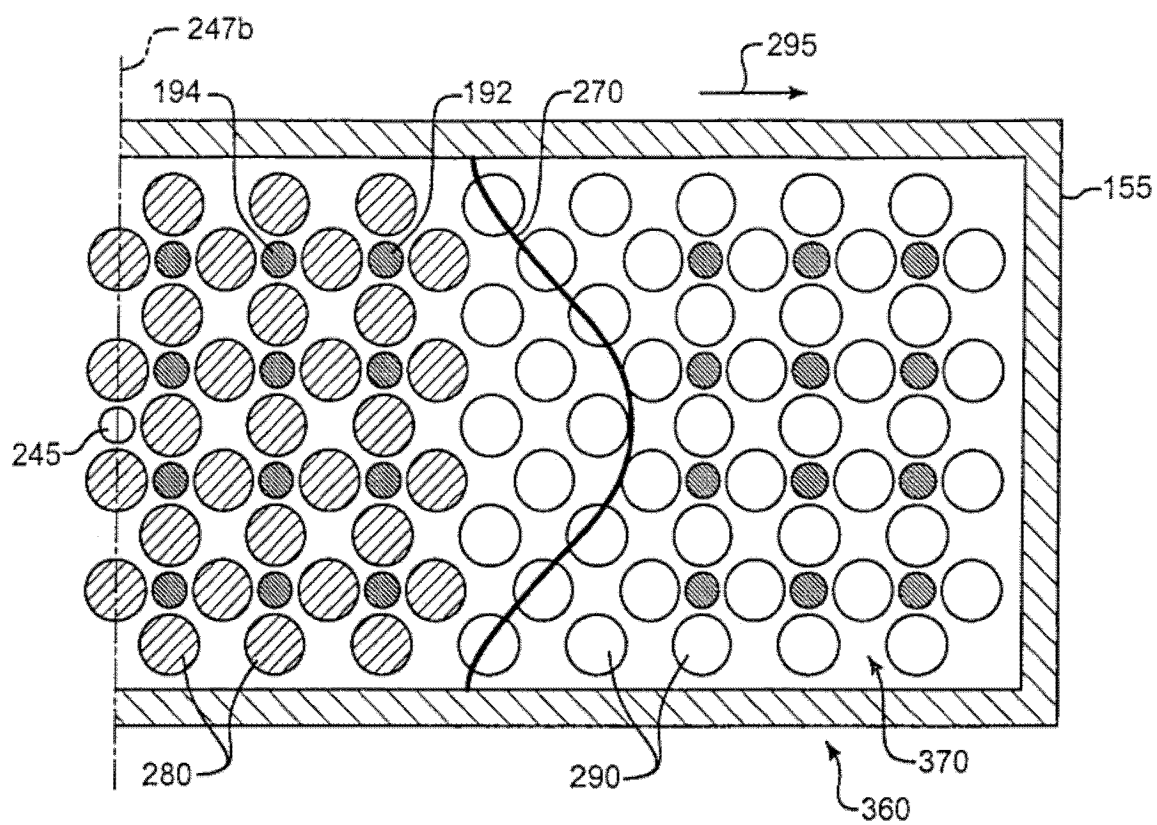


图 15

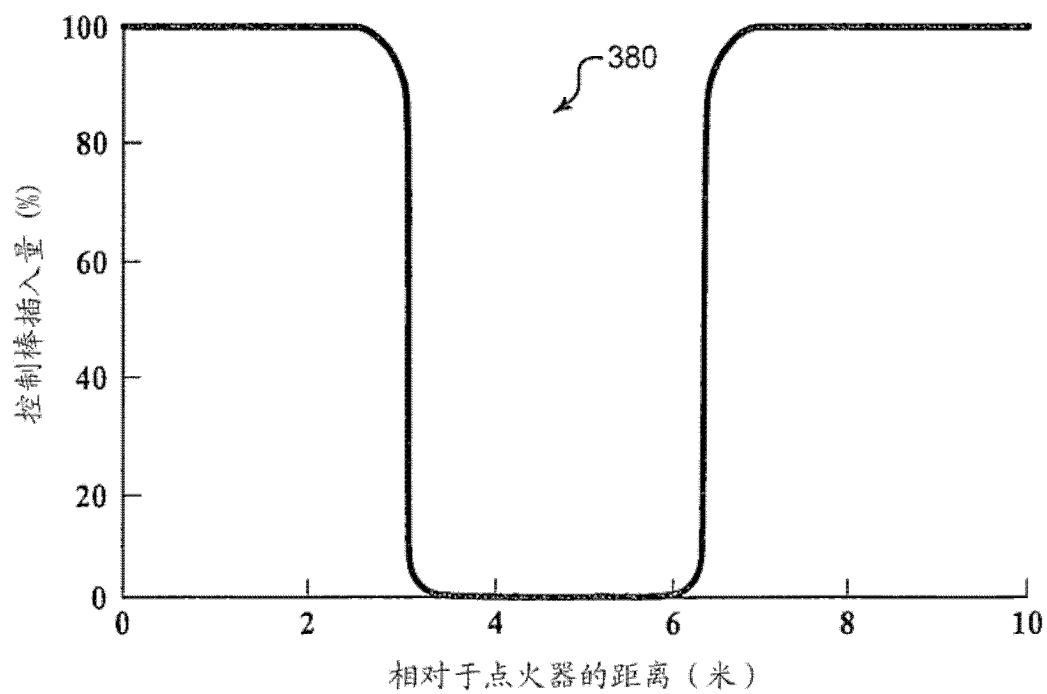


图 16

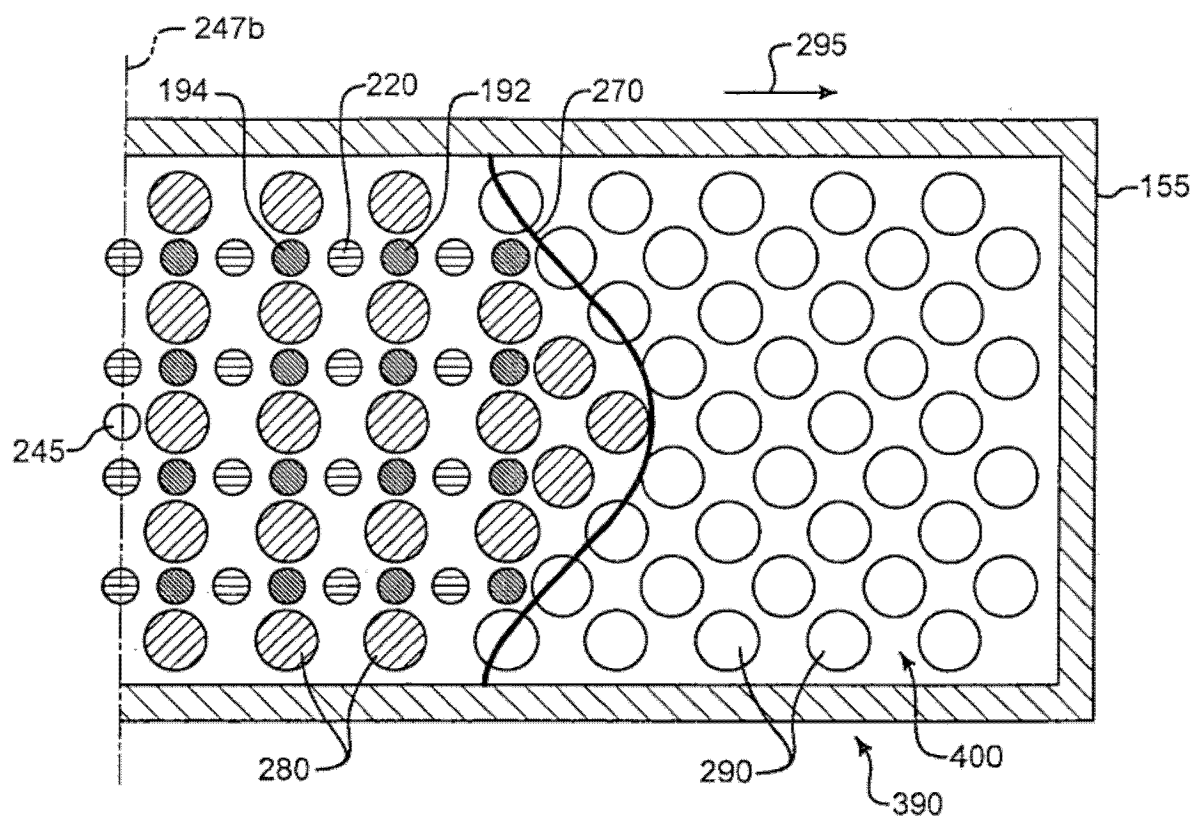


图 17

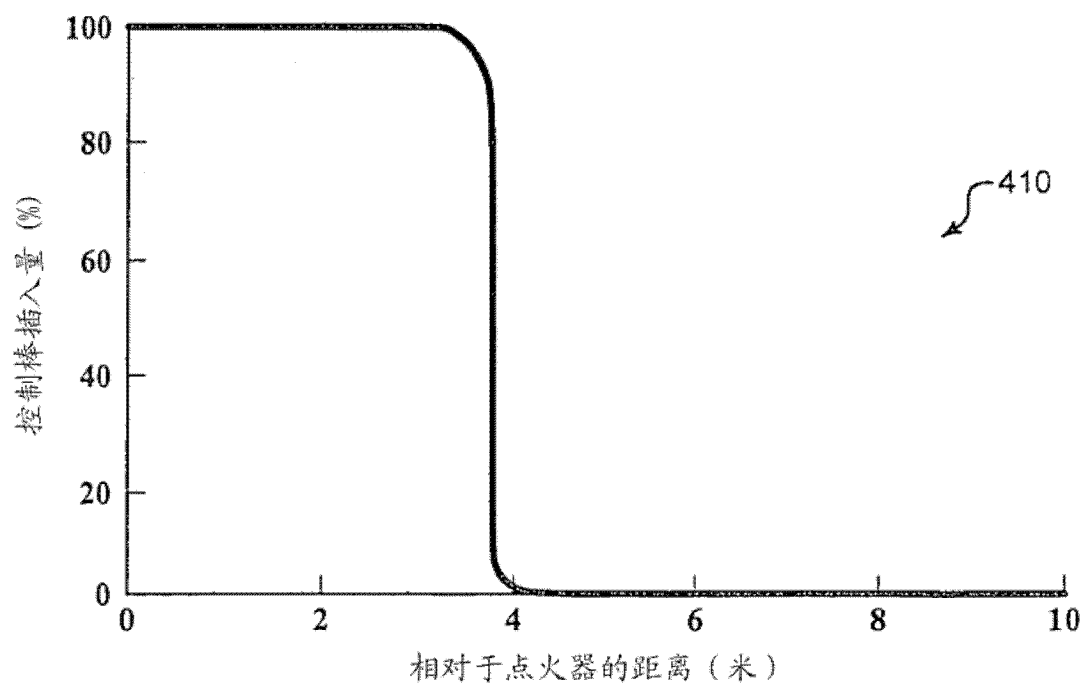


图 18

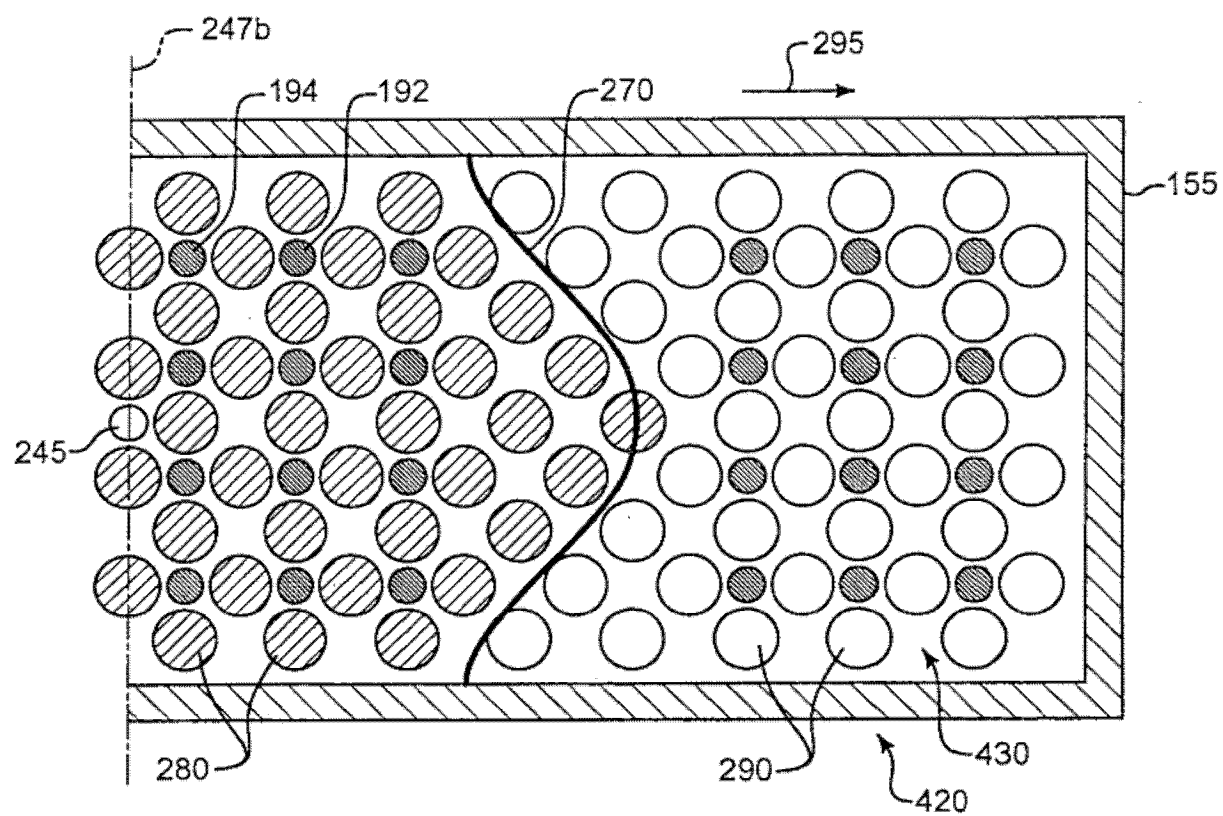


图 19

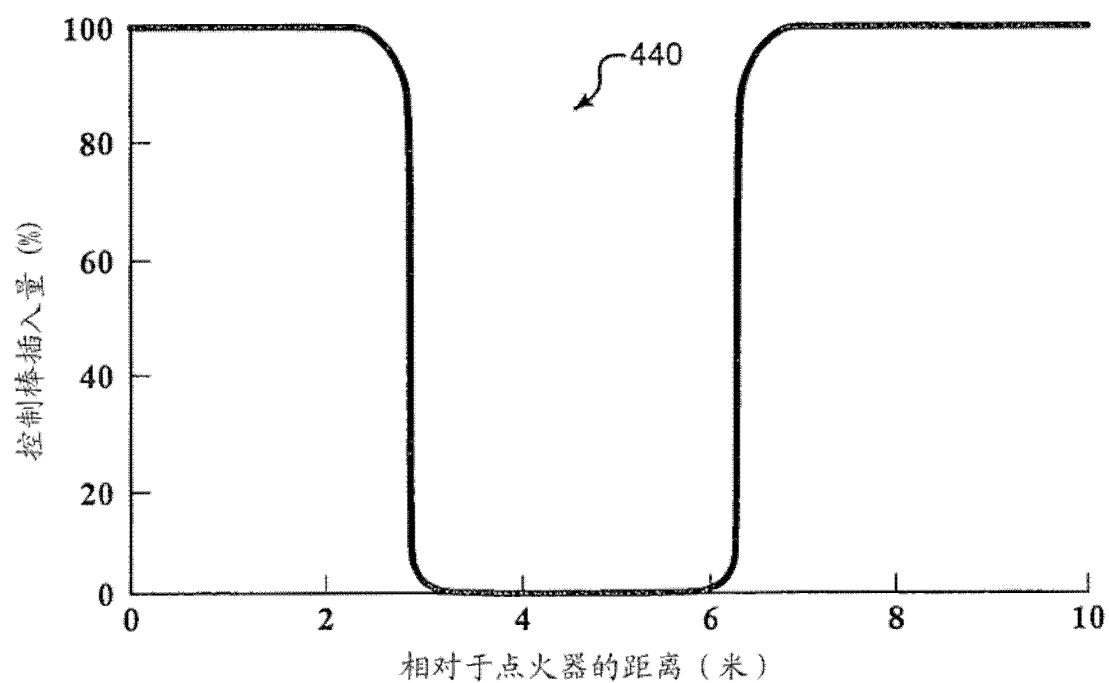


图 20

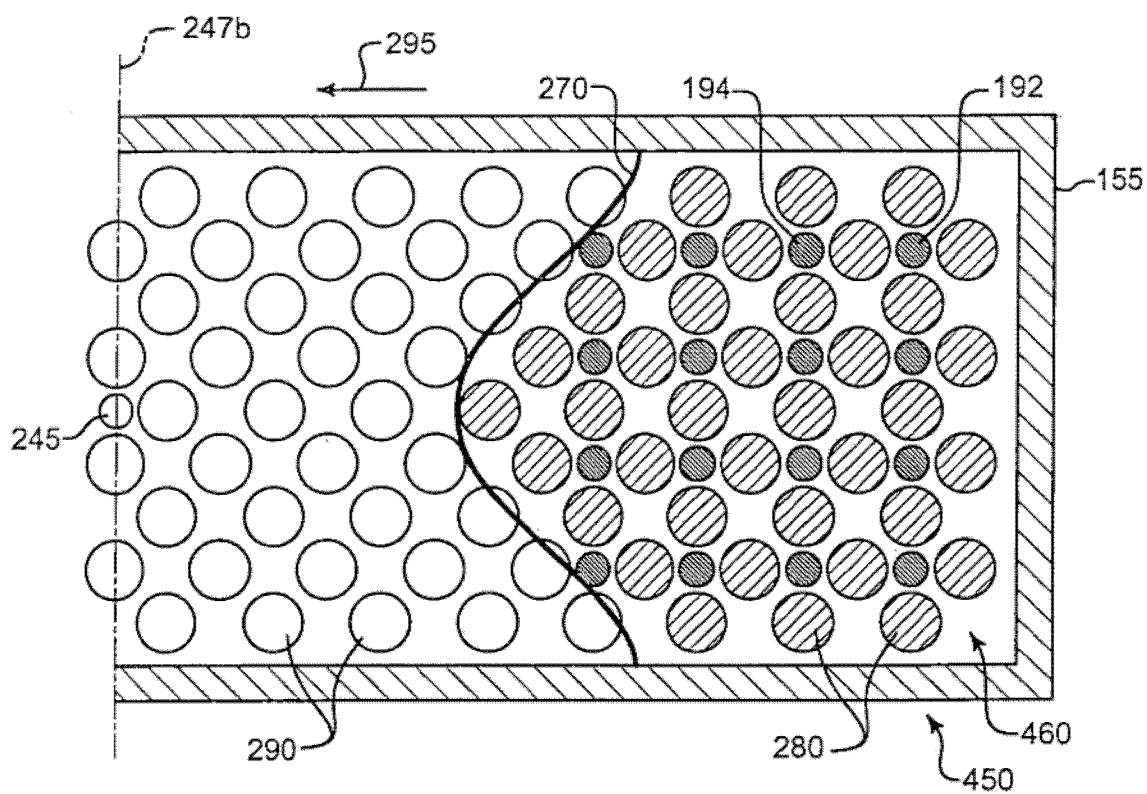


图 21

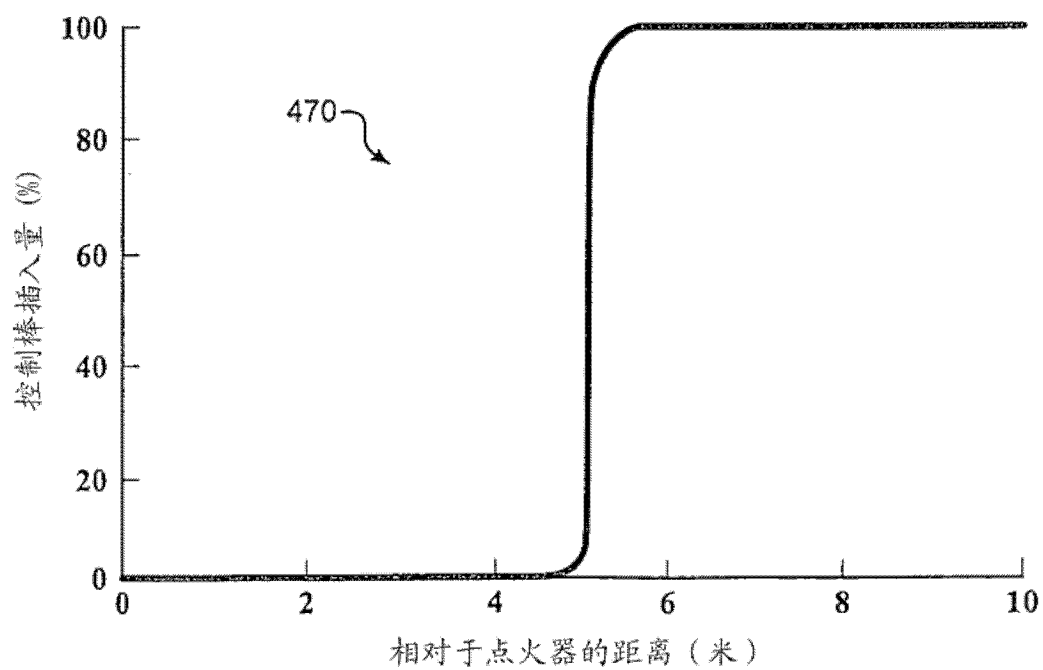


图 22

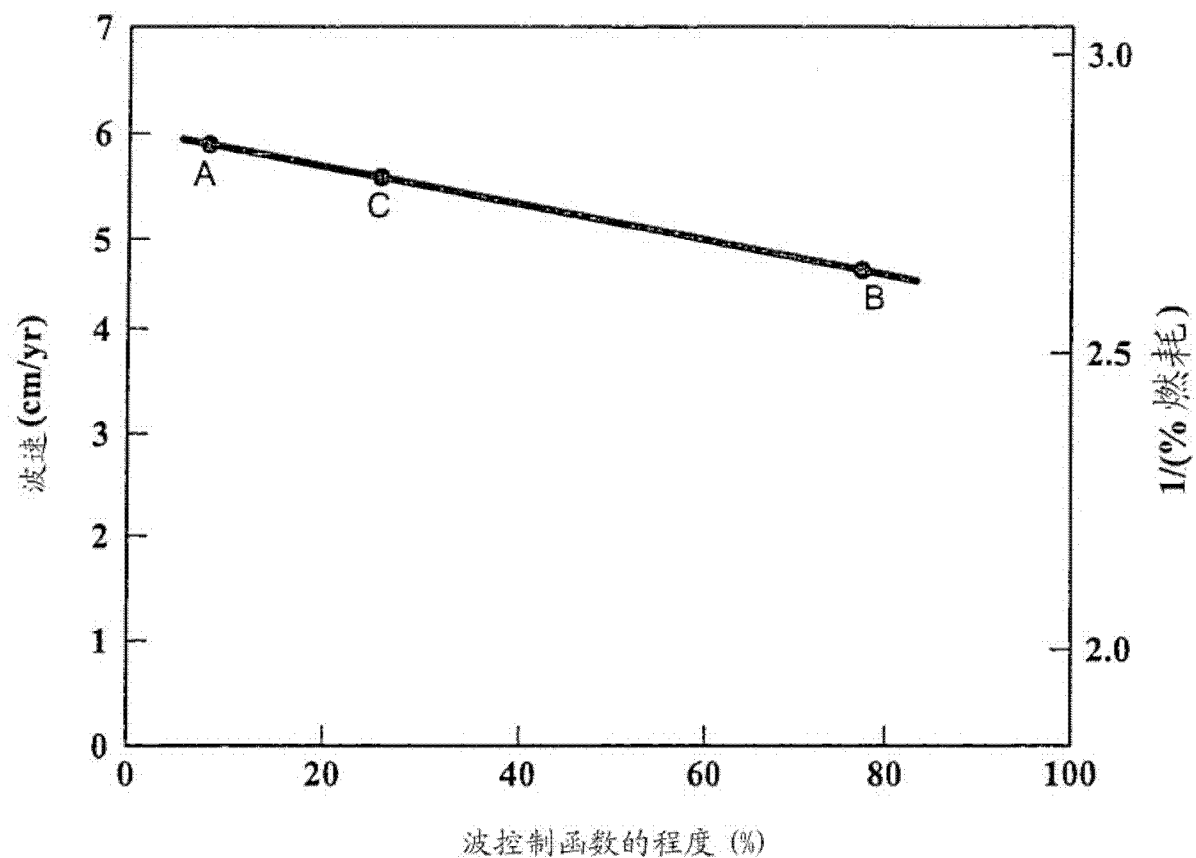


图 23

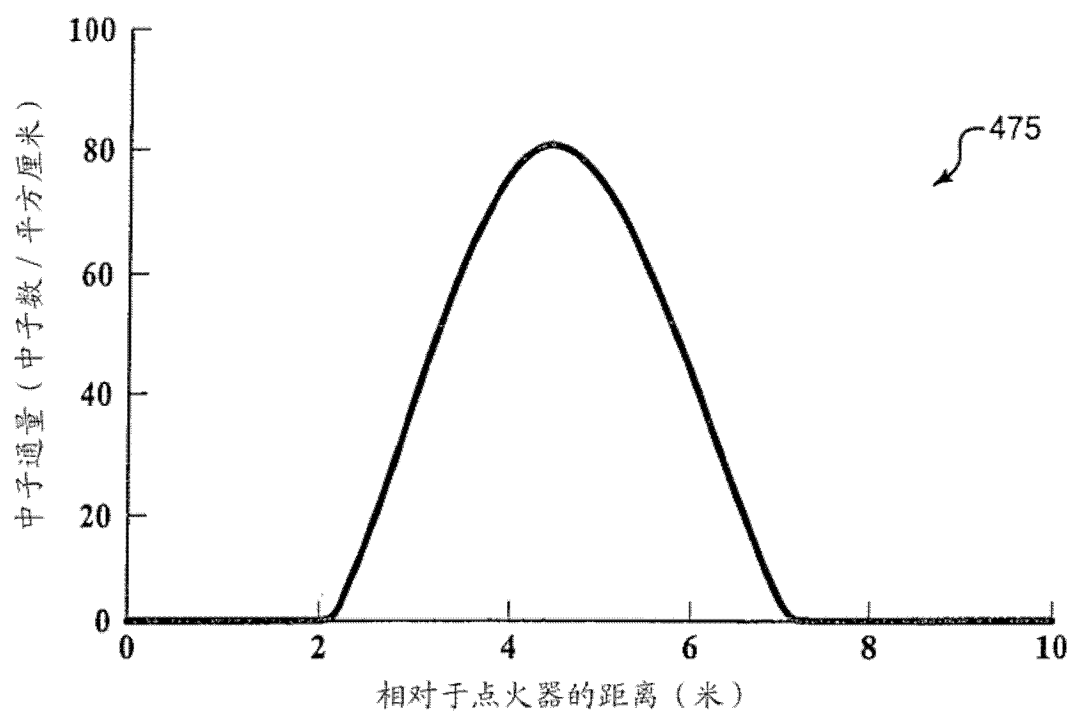


图 23A

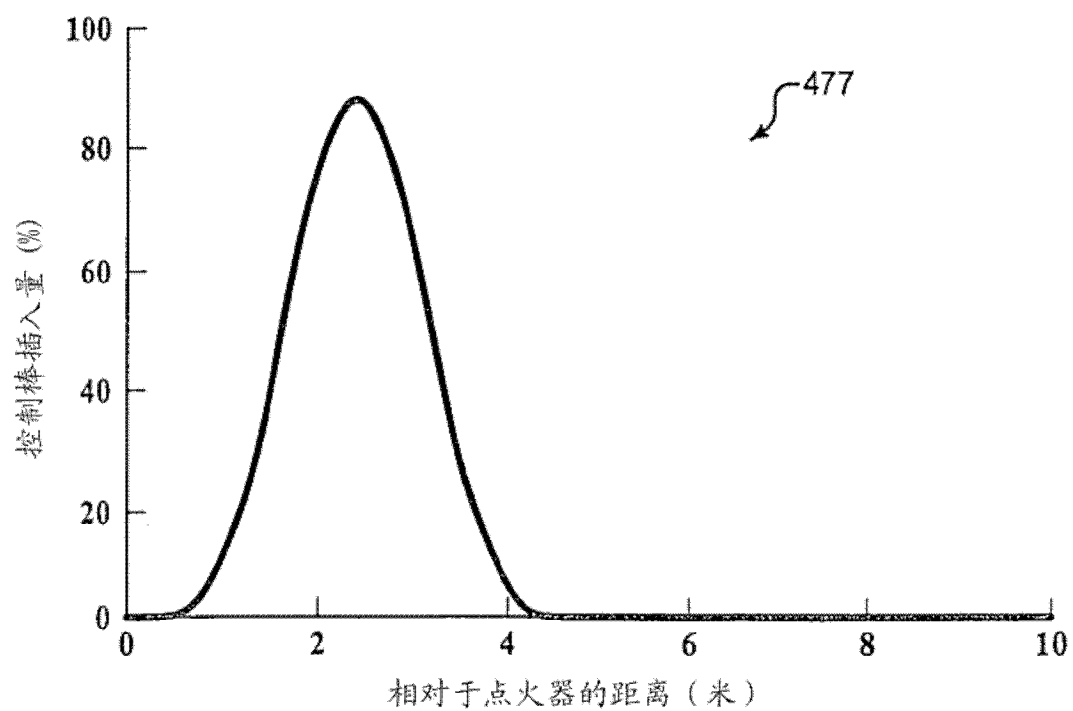


图 23B

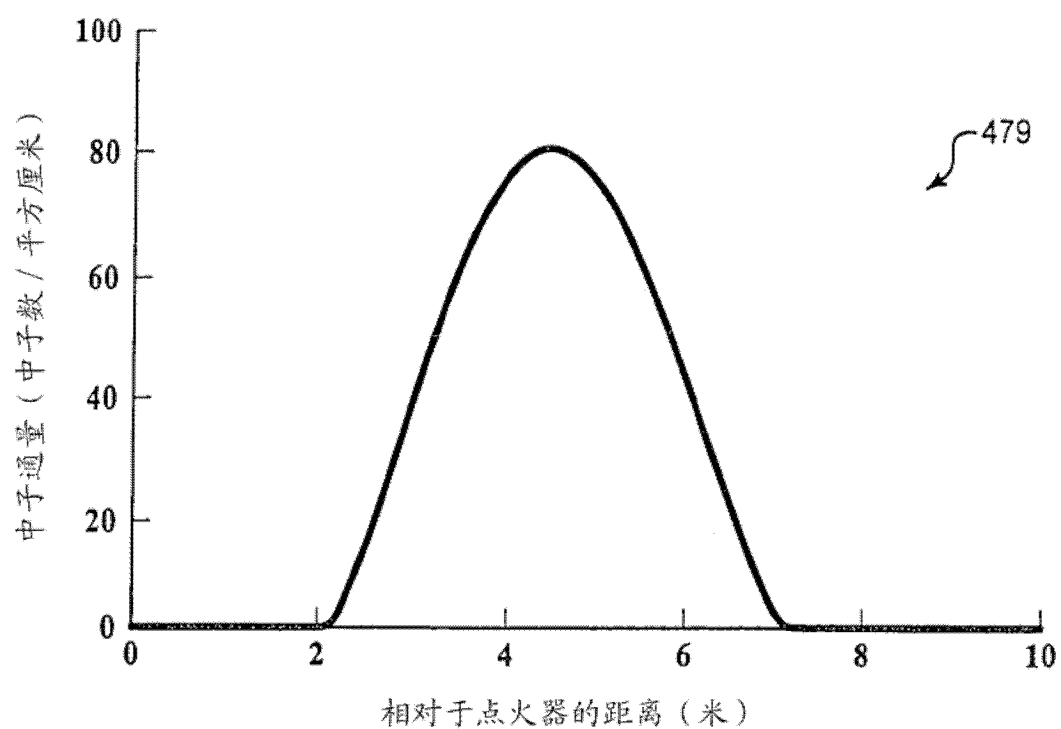


图 23C

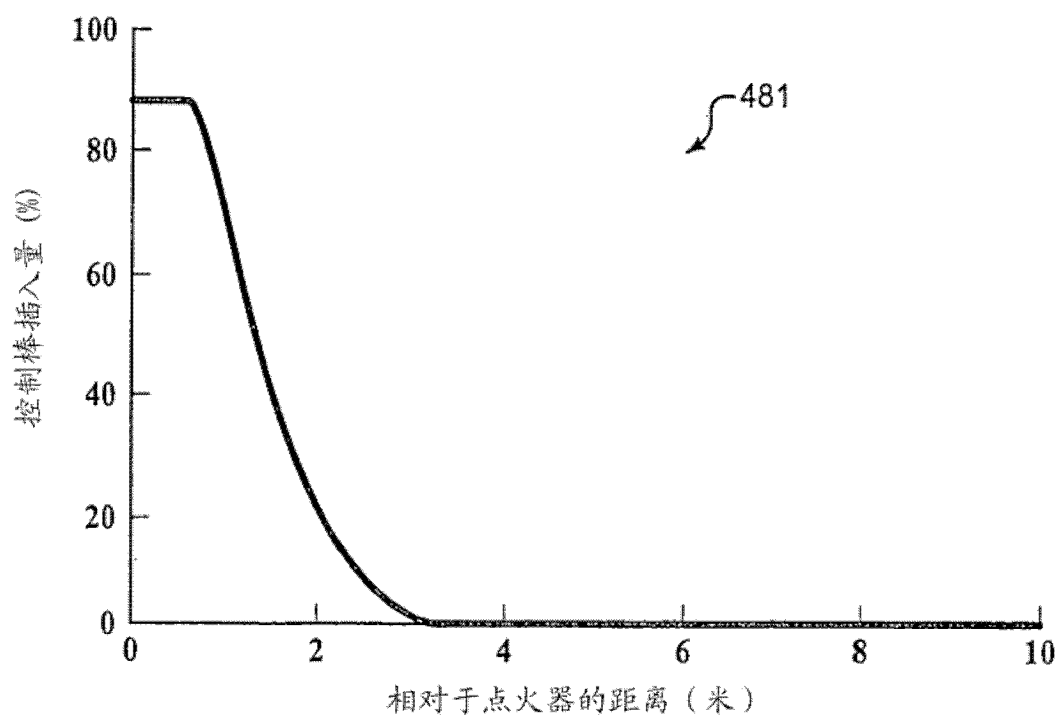


图 23D

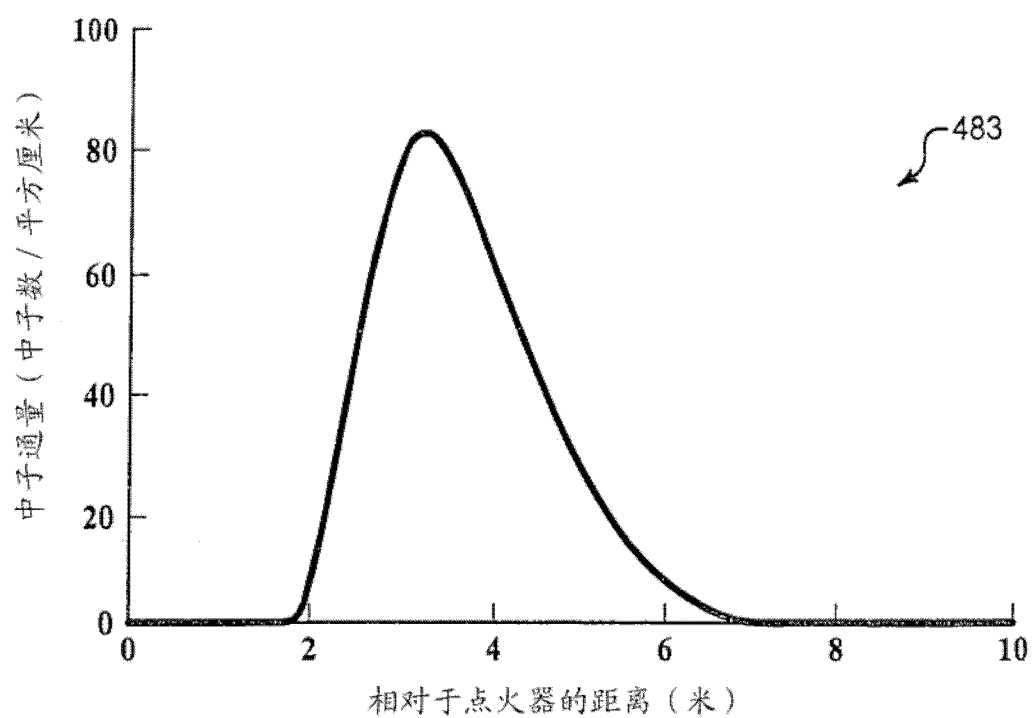


图 23E

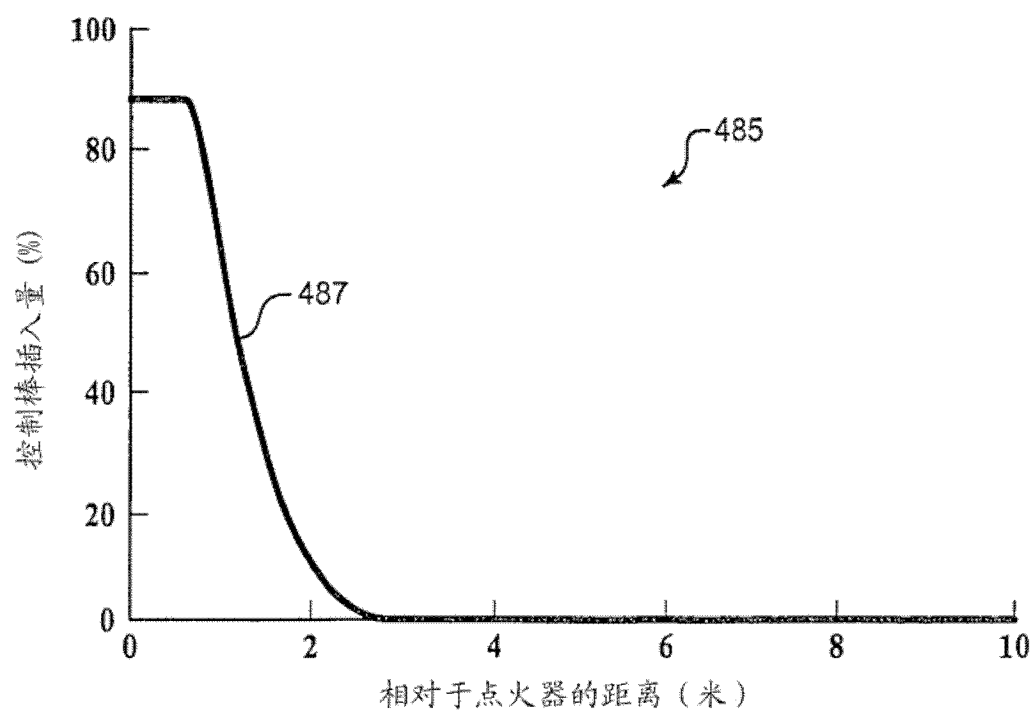


图 23F

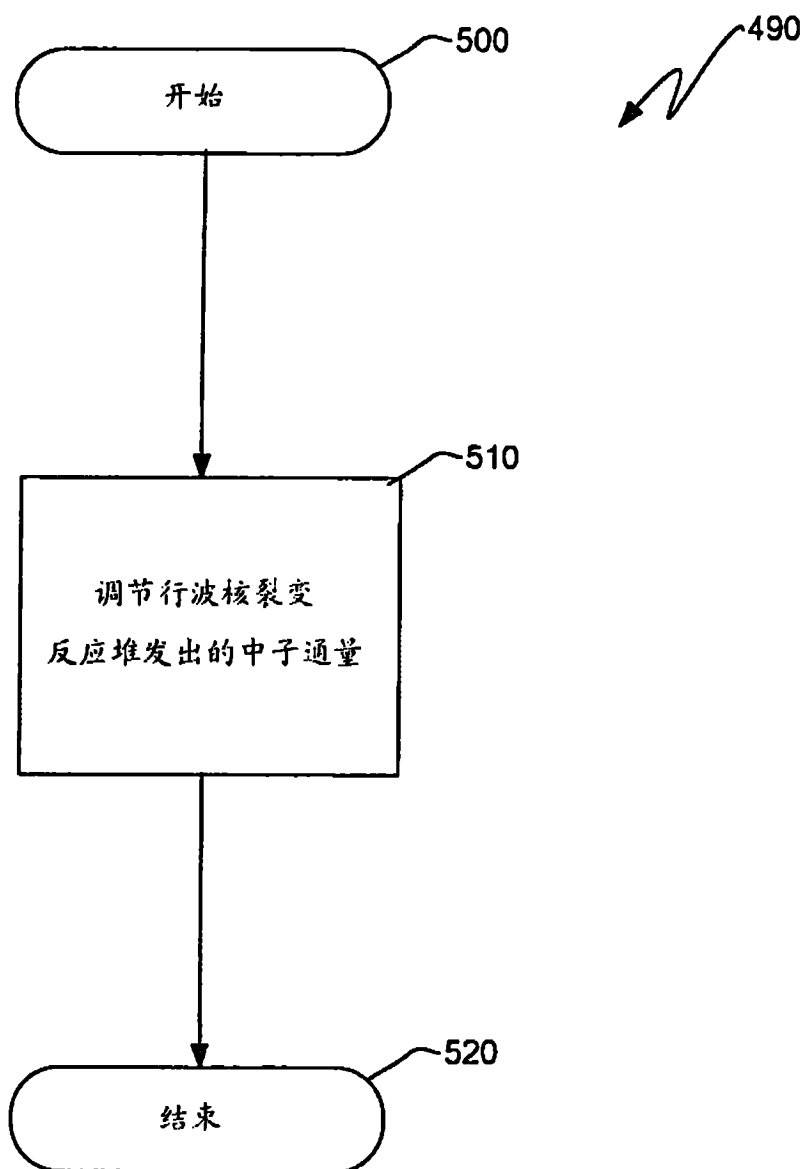


图 24

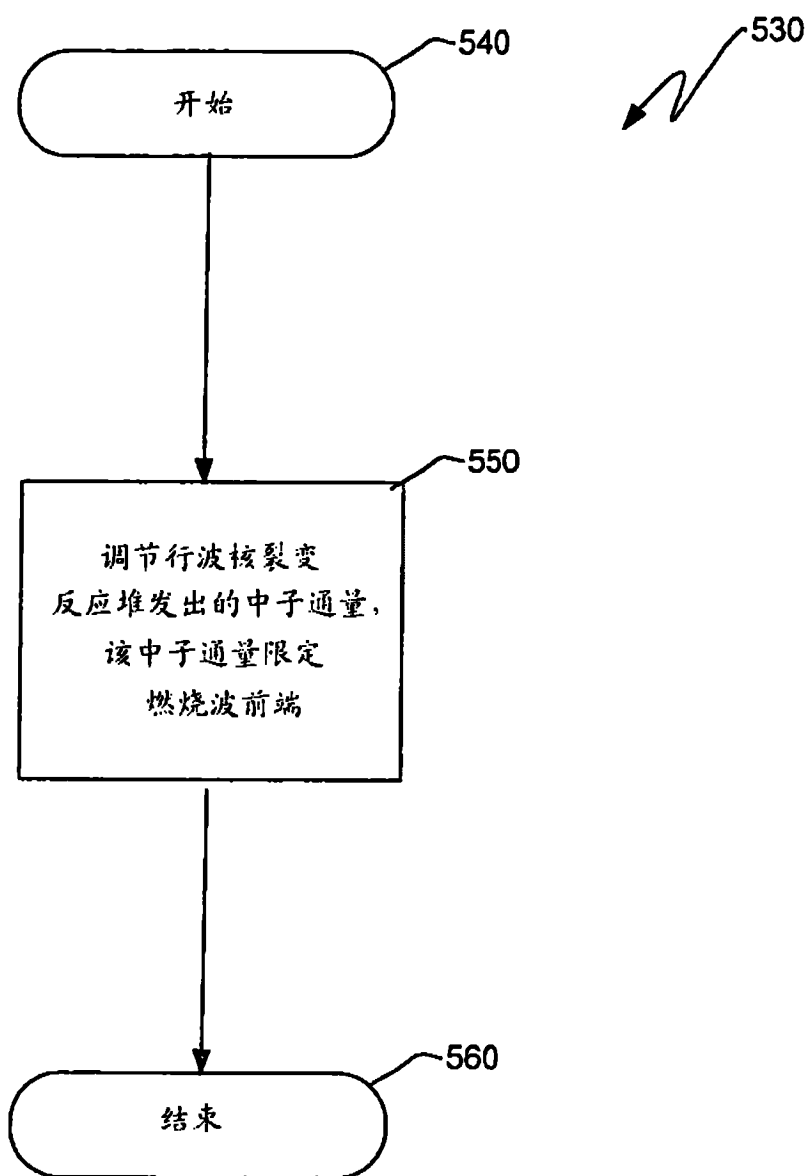


图 25

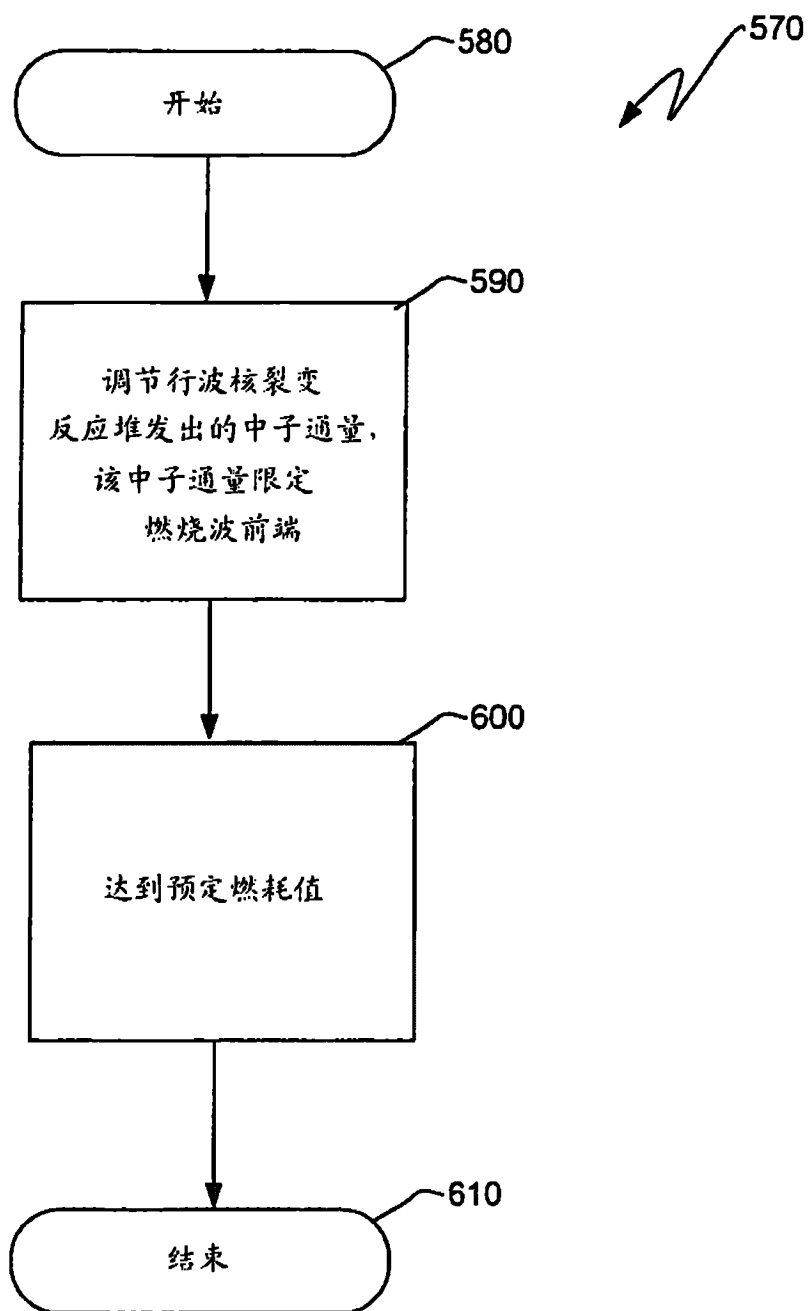


图 26

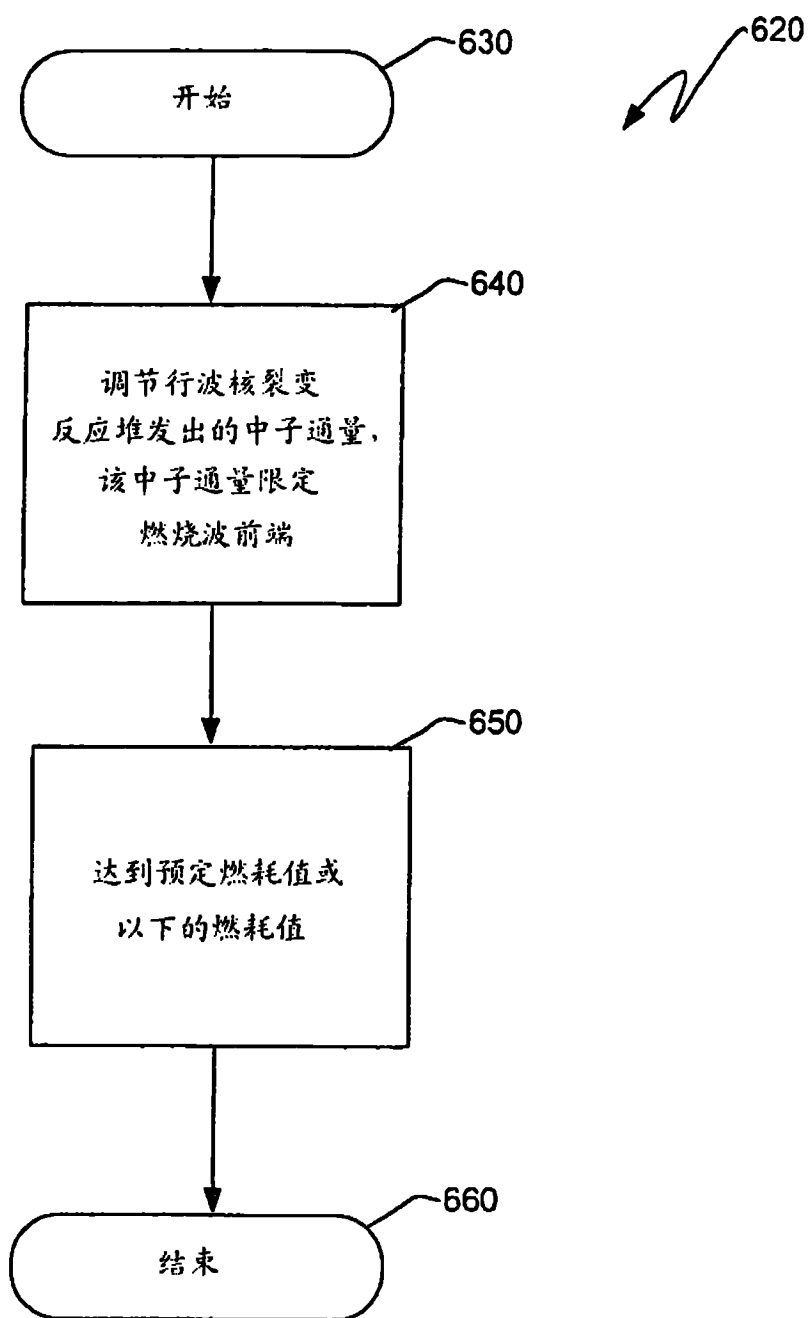


图 27

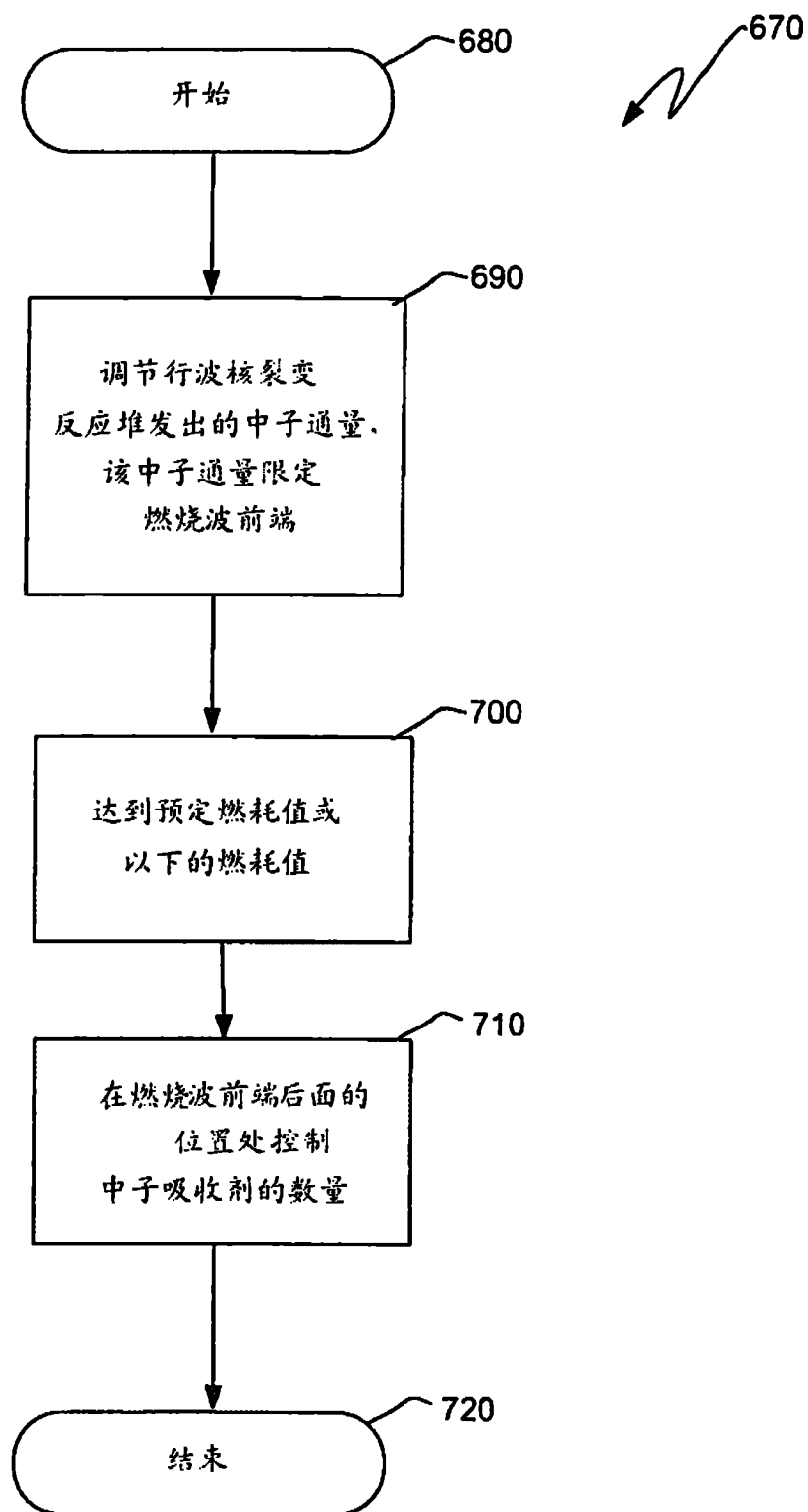


图 28

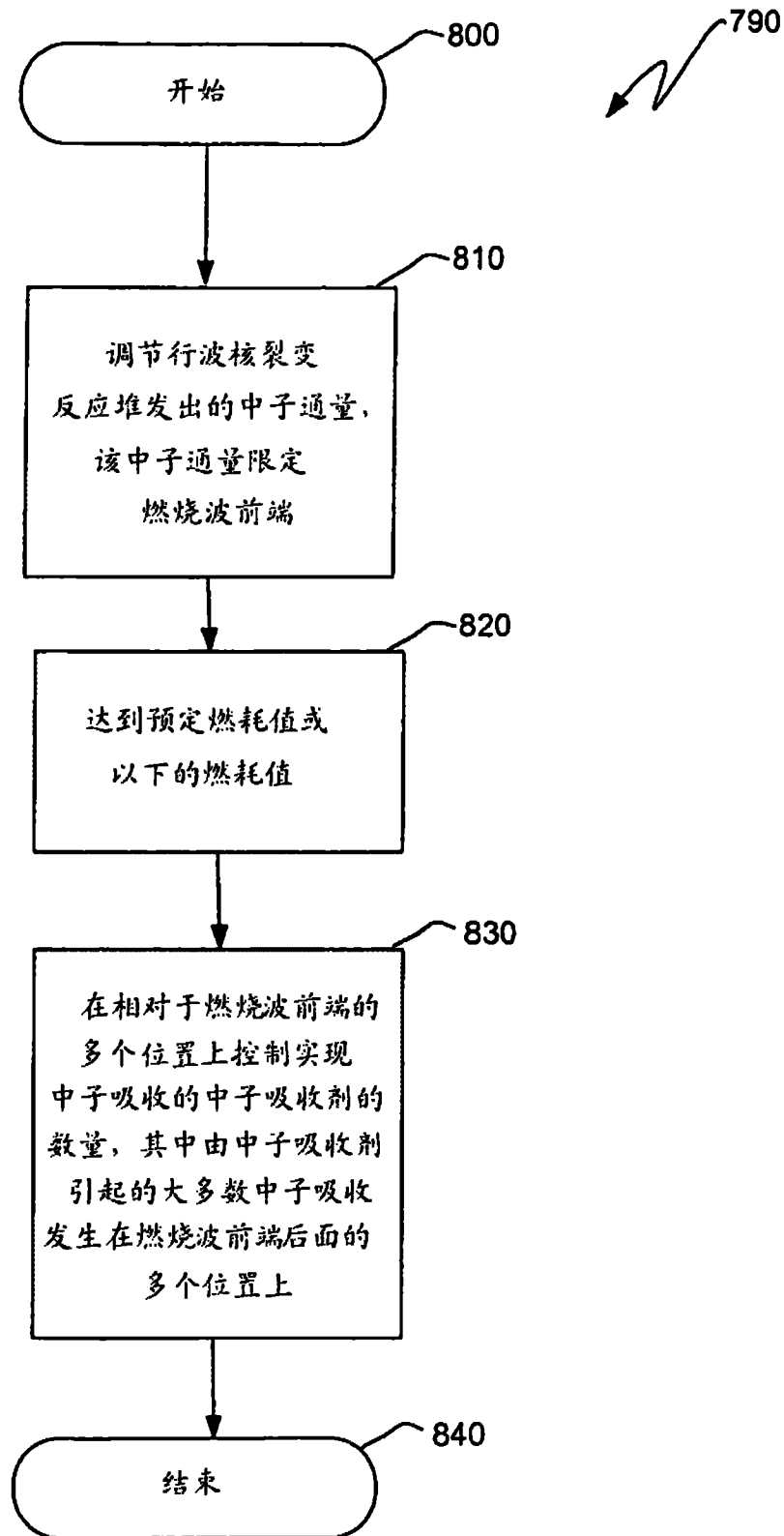


图 29

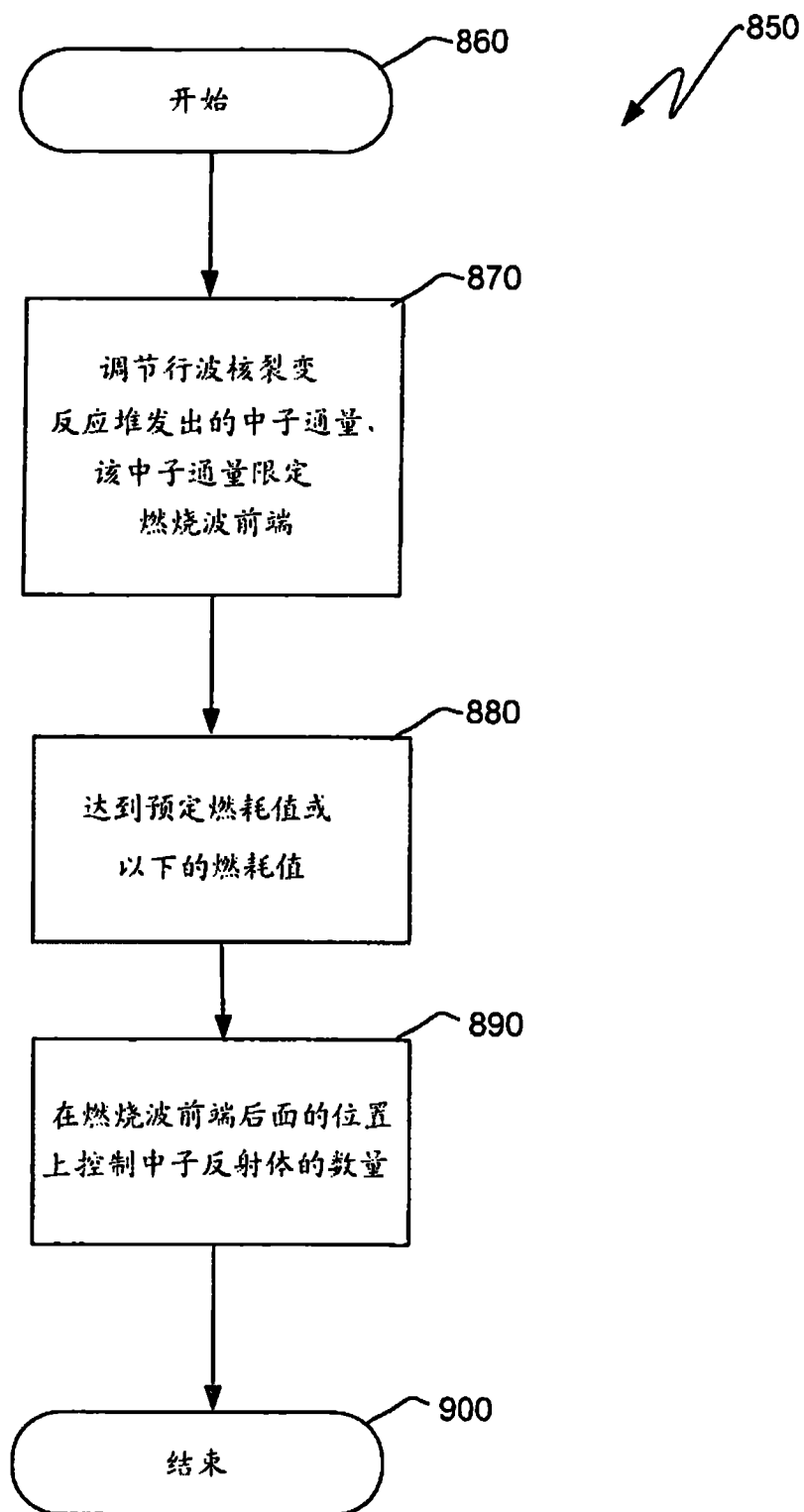


图 30

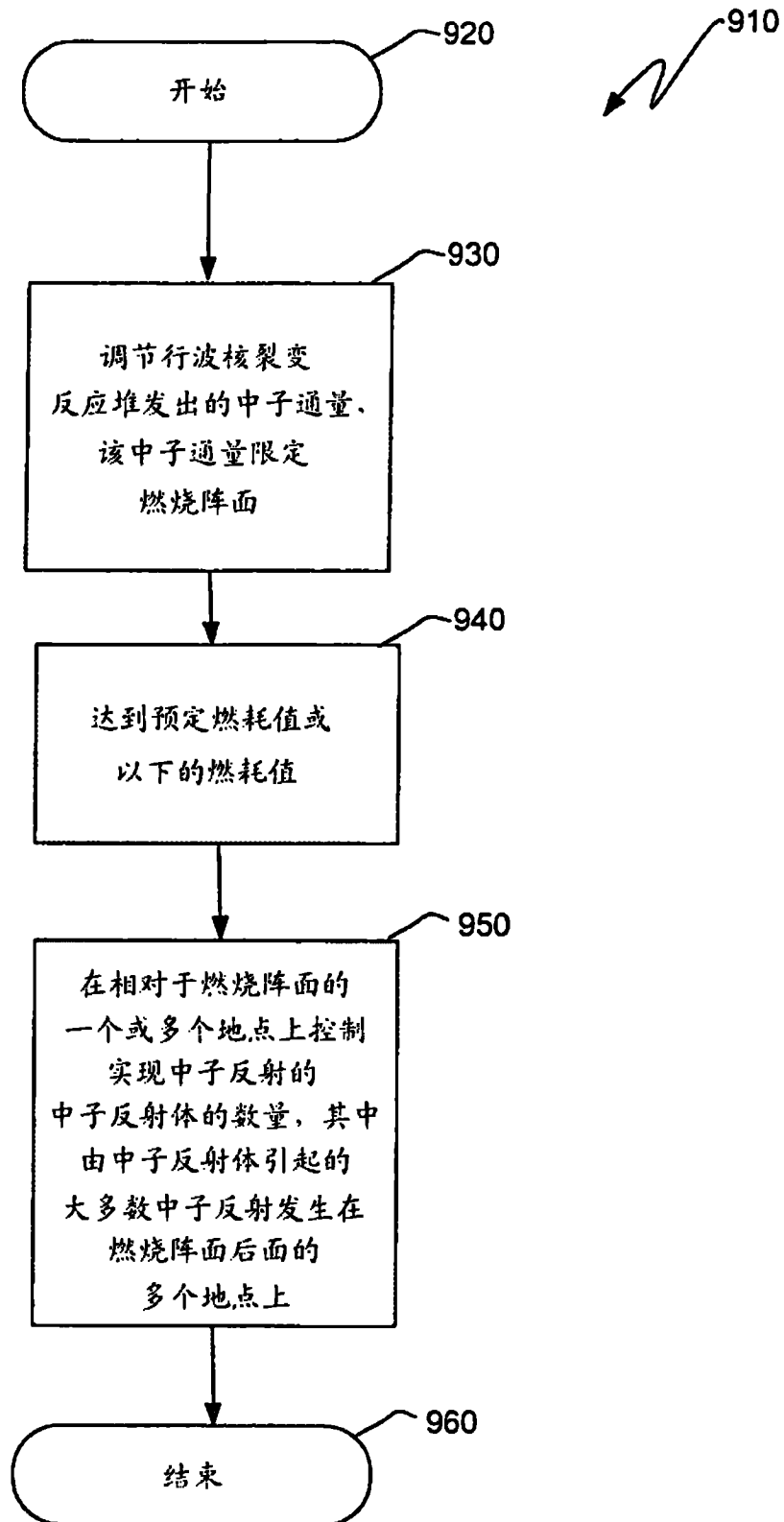


图 31

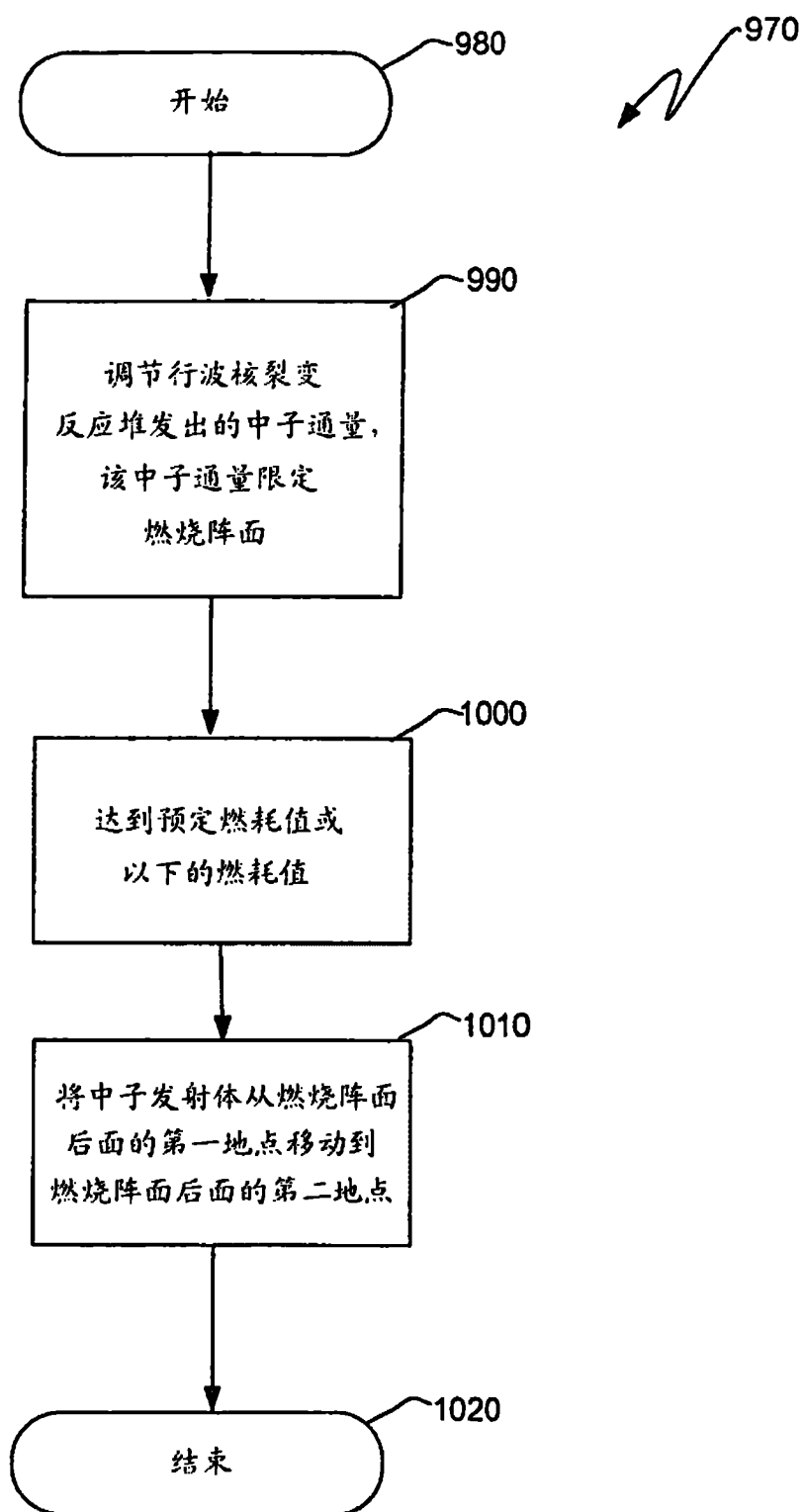


图 32

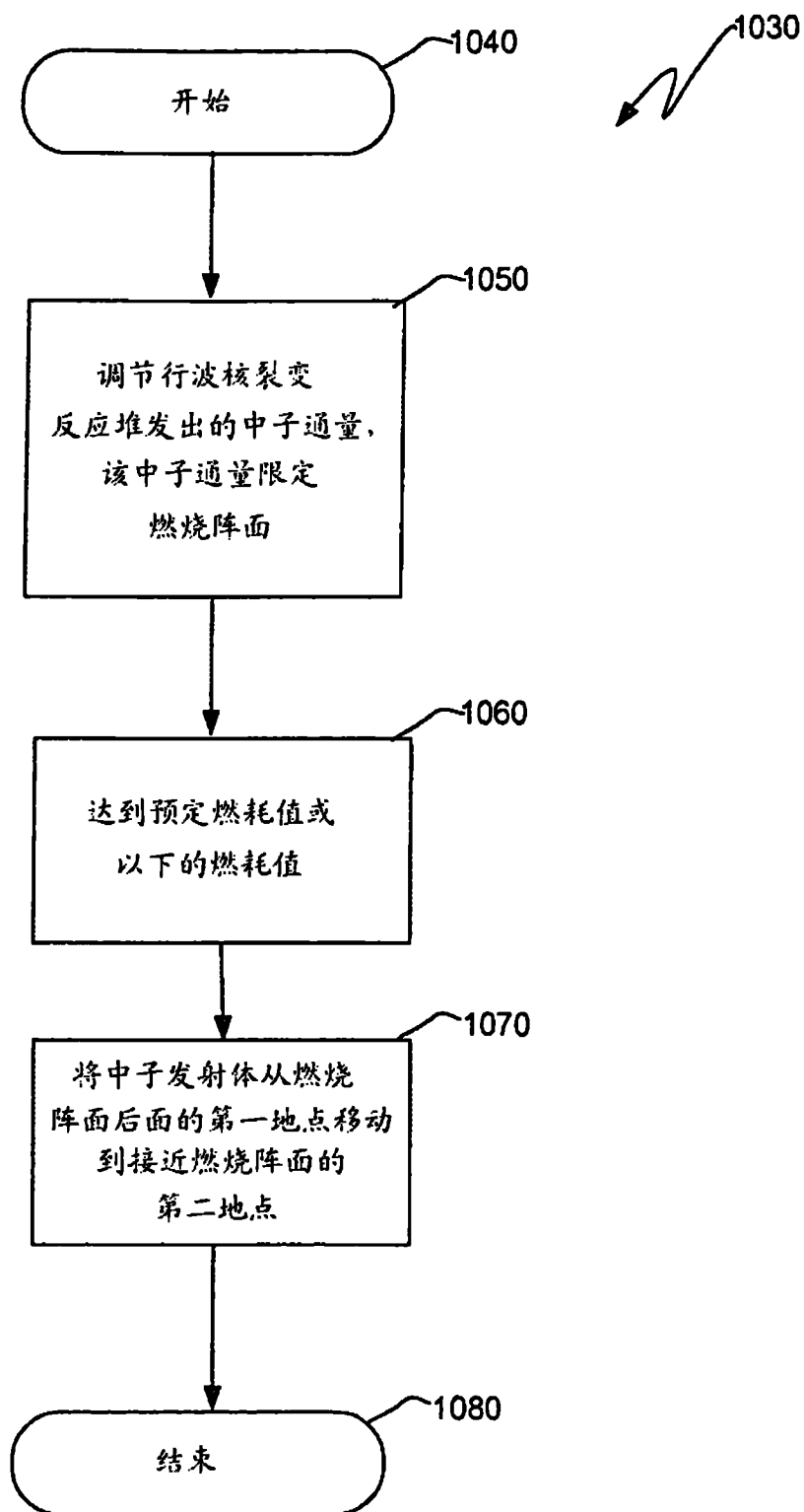


图 33

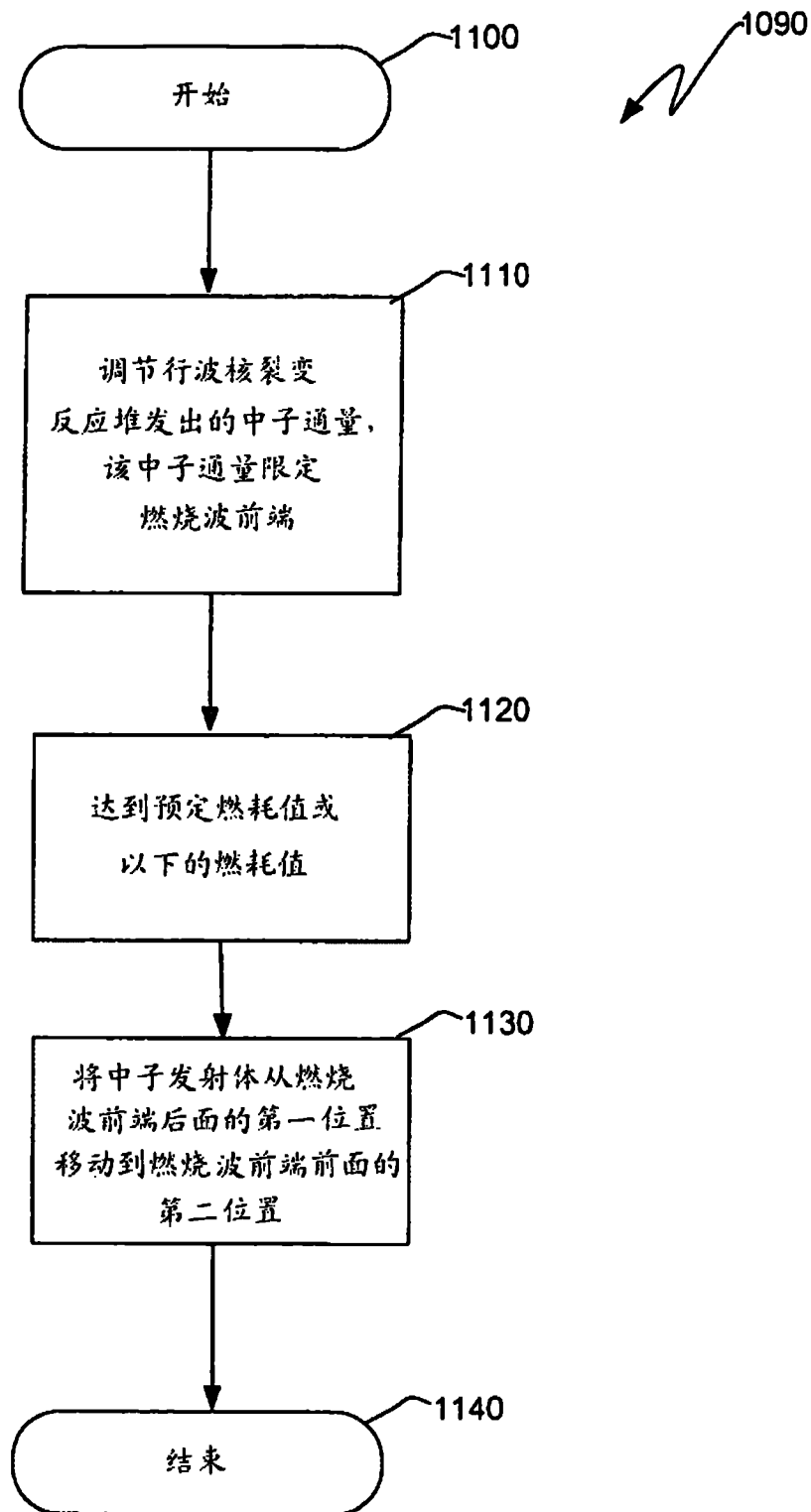


图 34

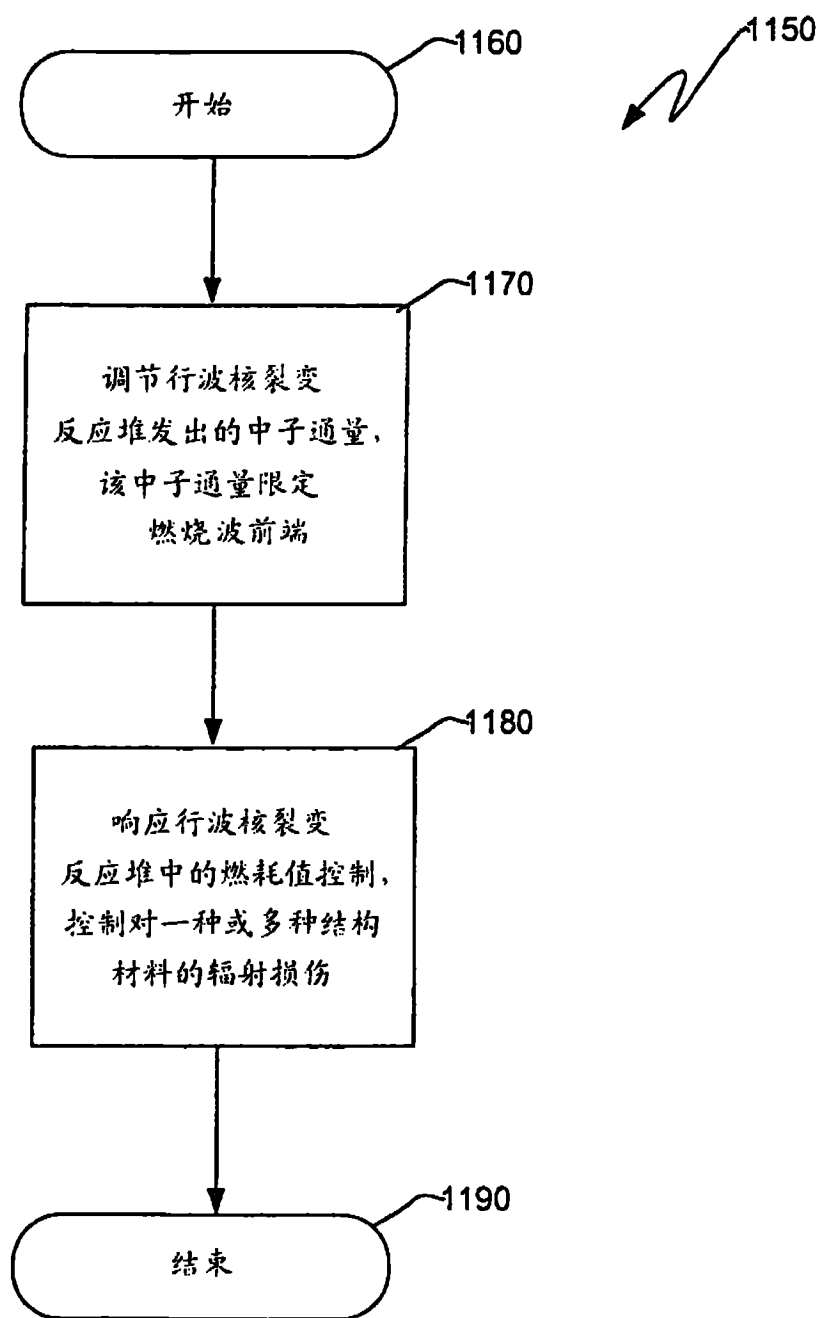


图 35

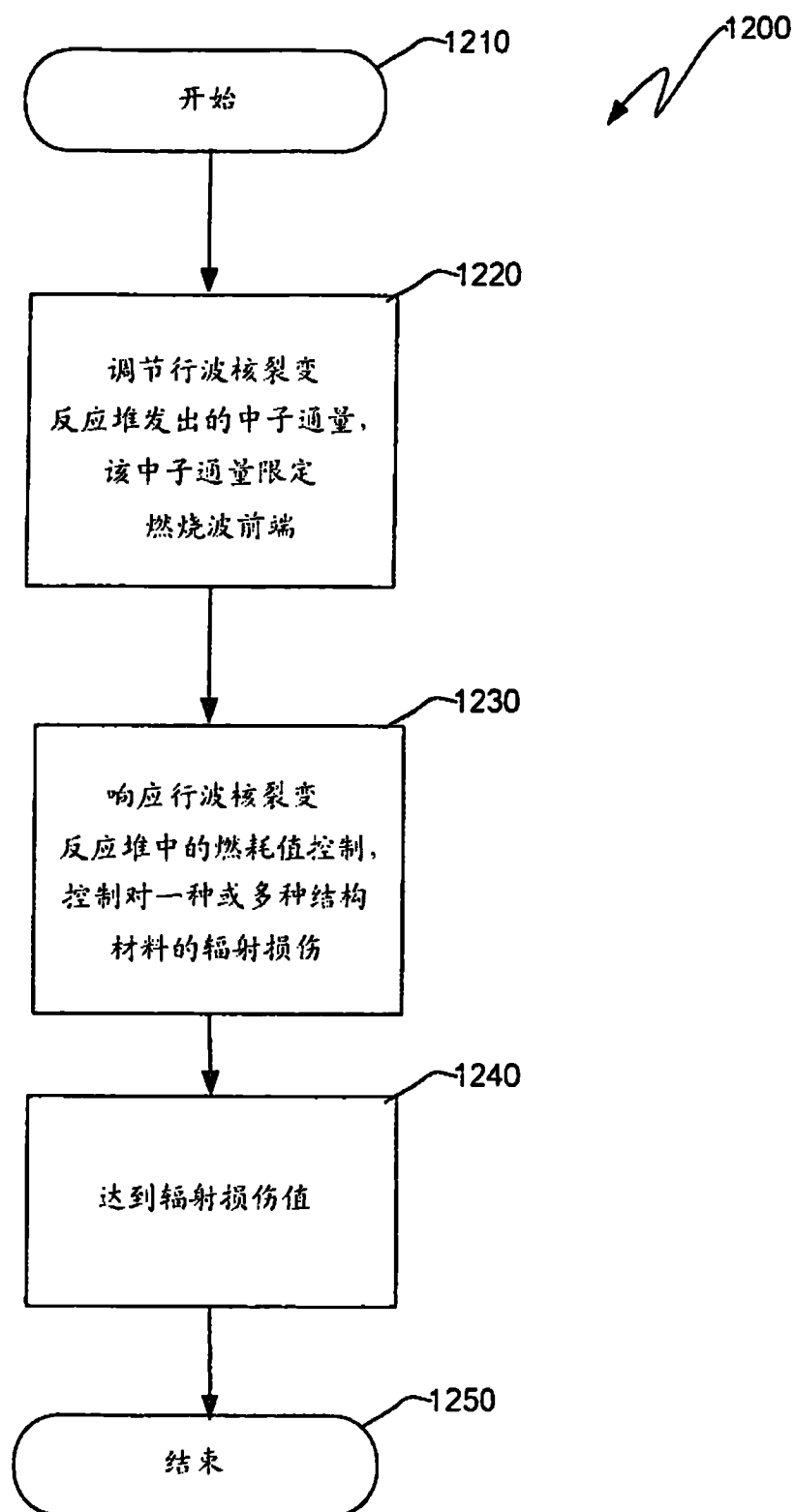


图 36

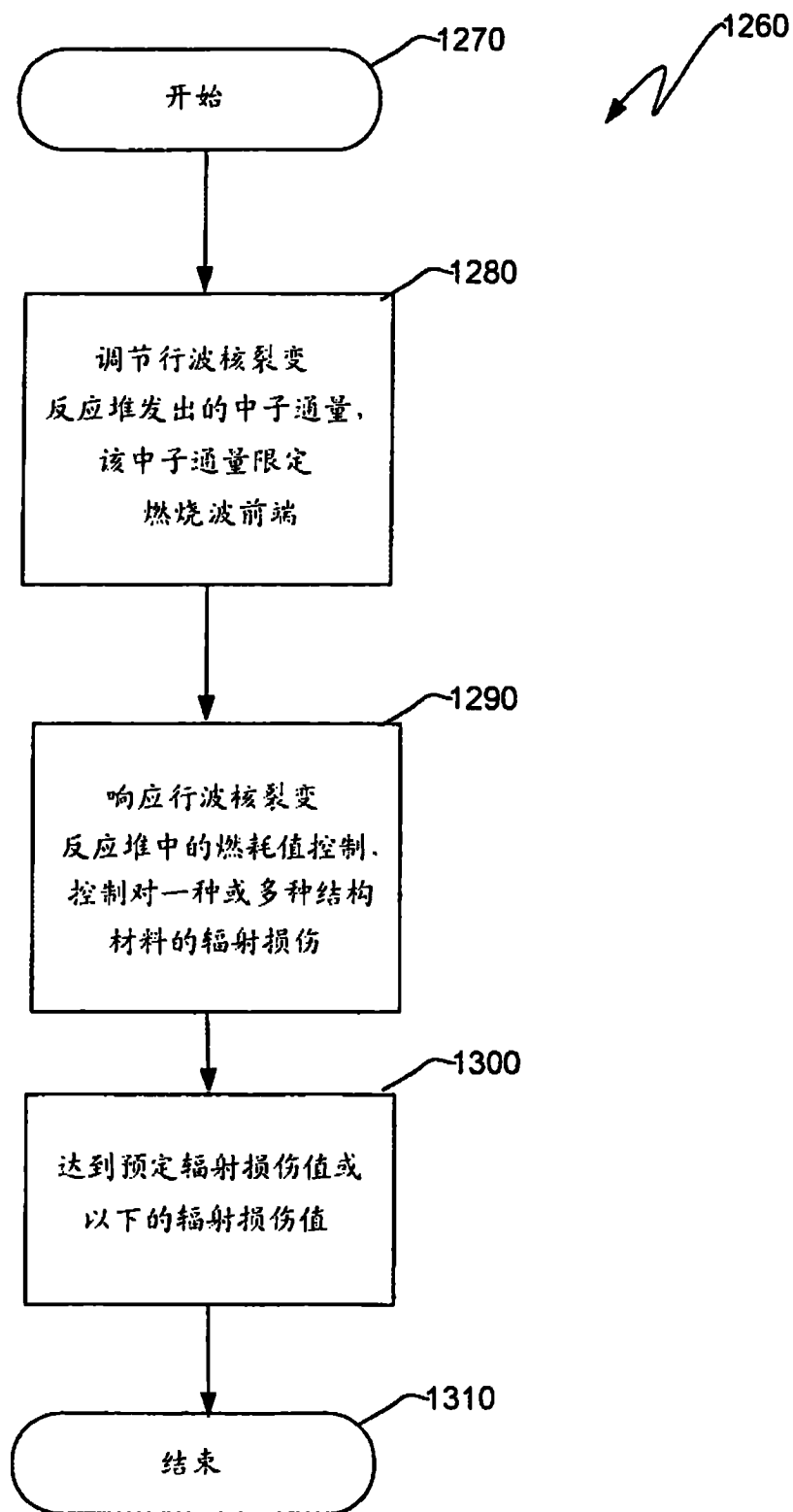


图 37

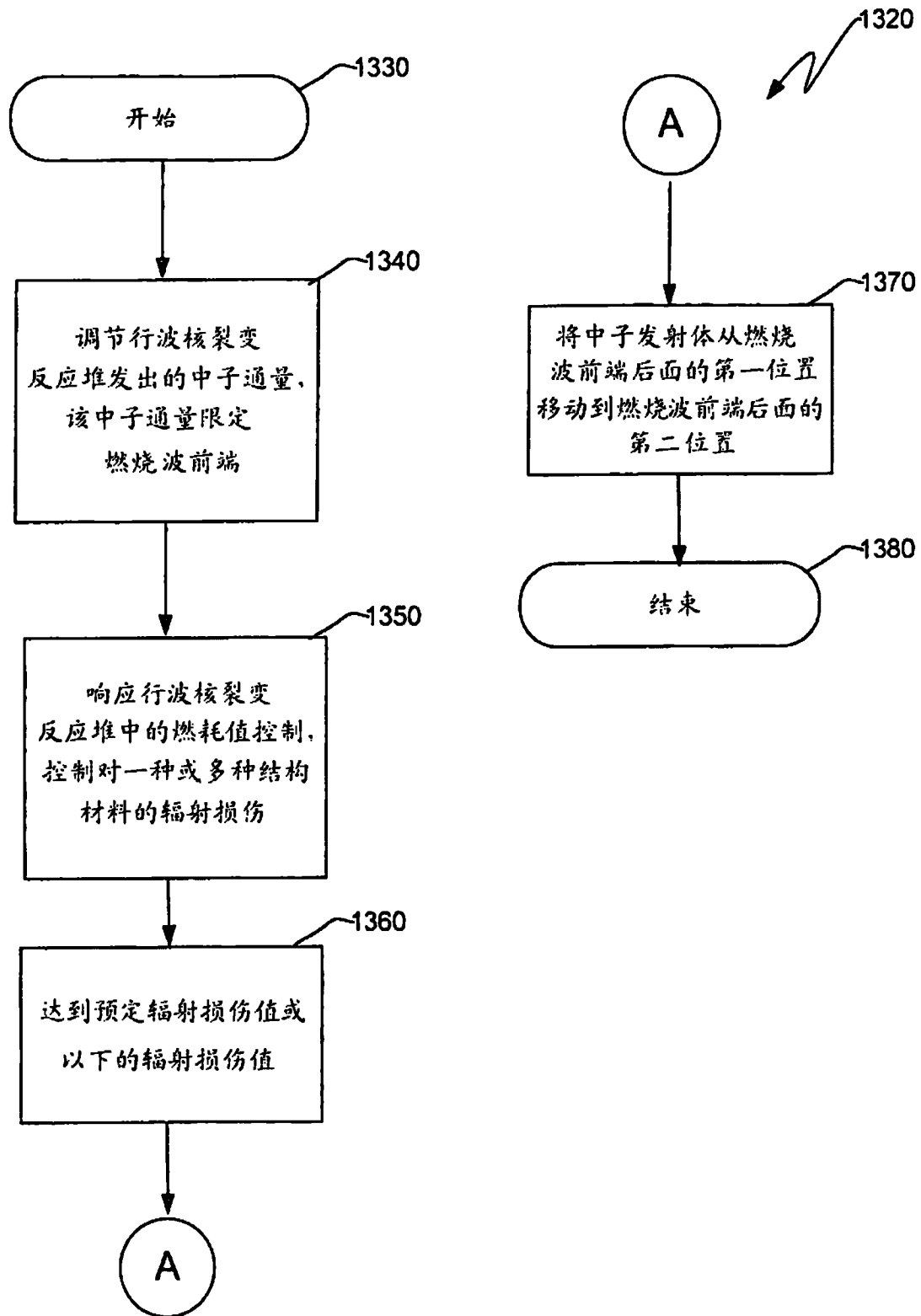


图 38

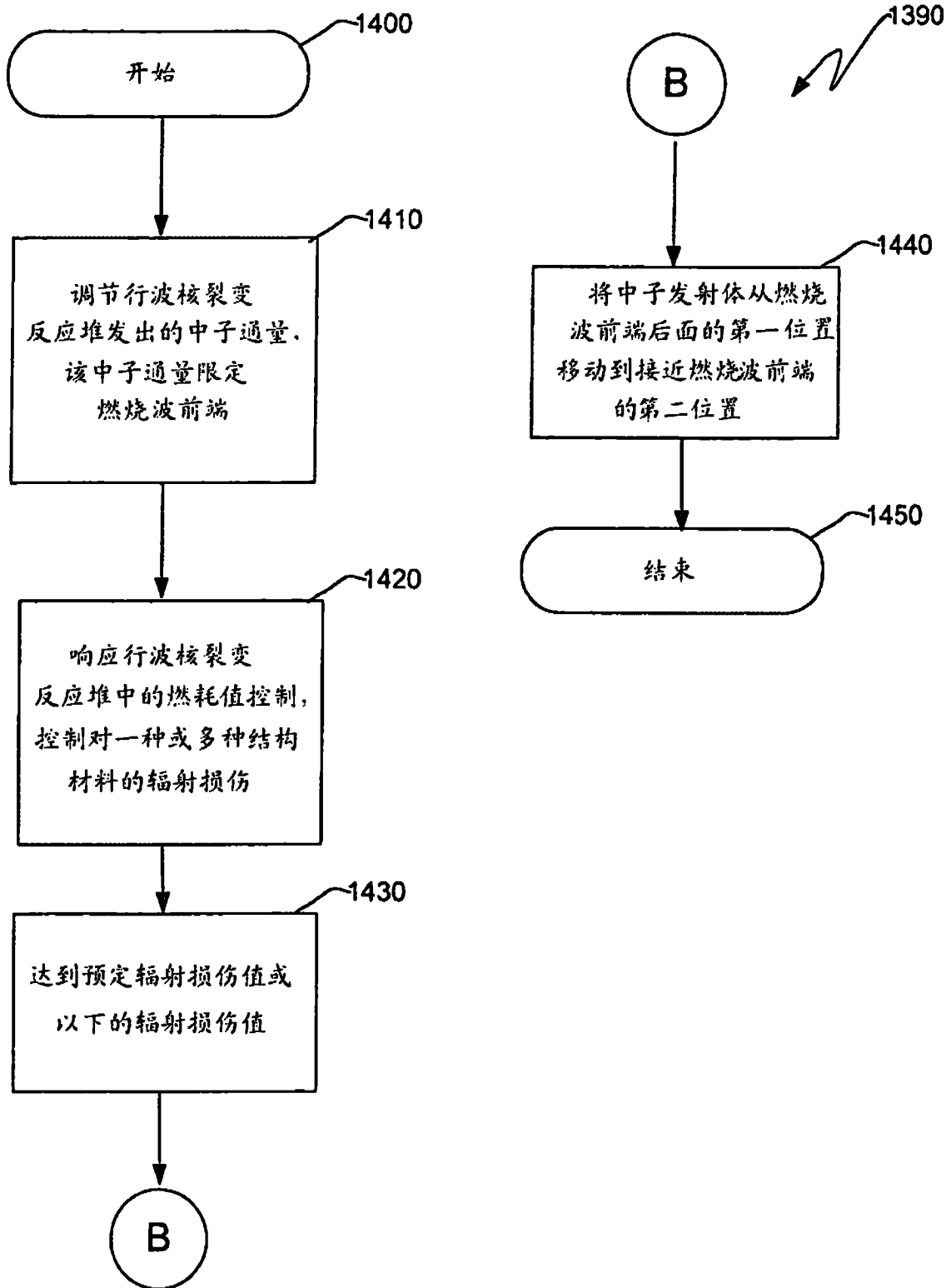


图 39

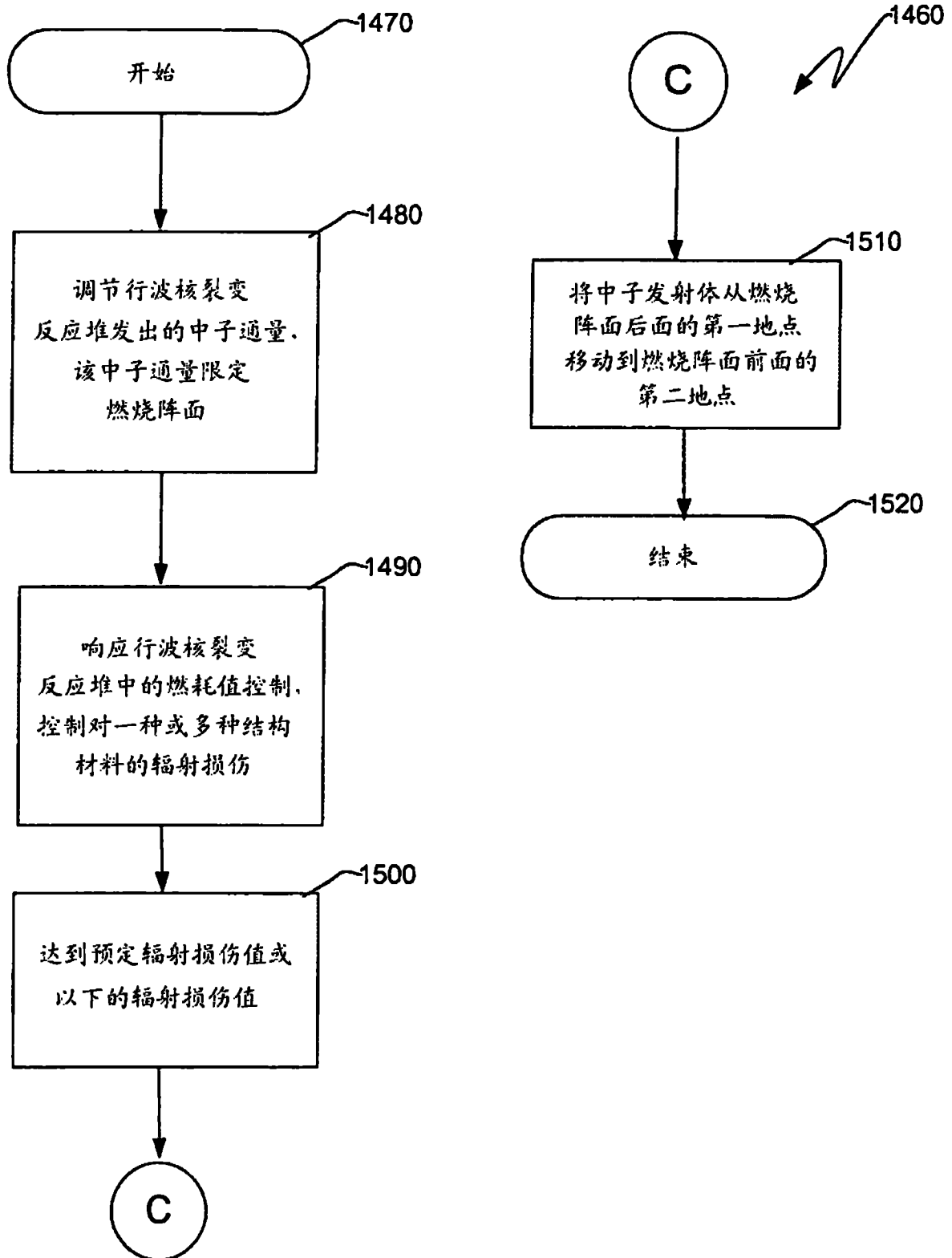


图 40

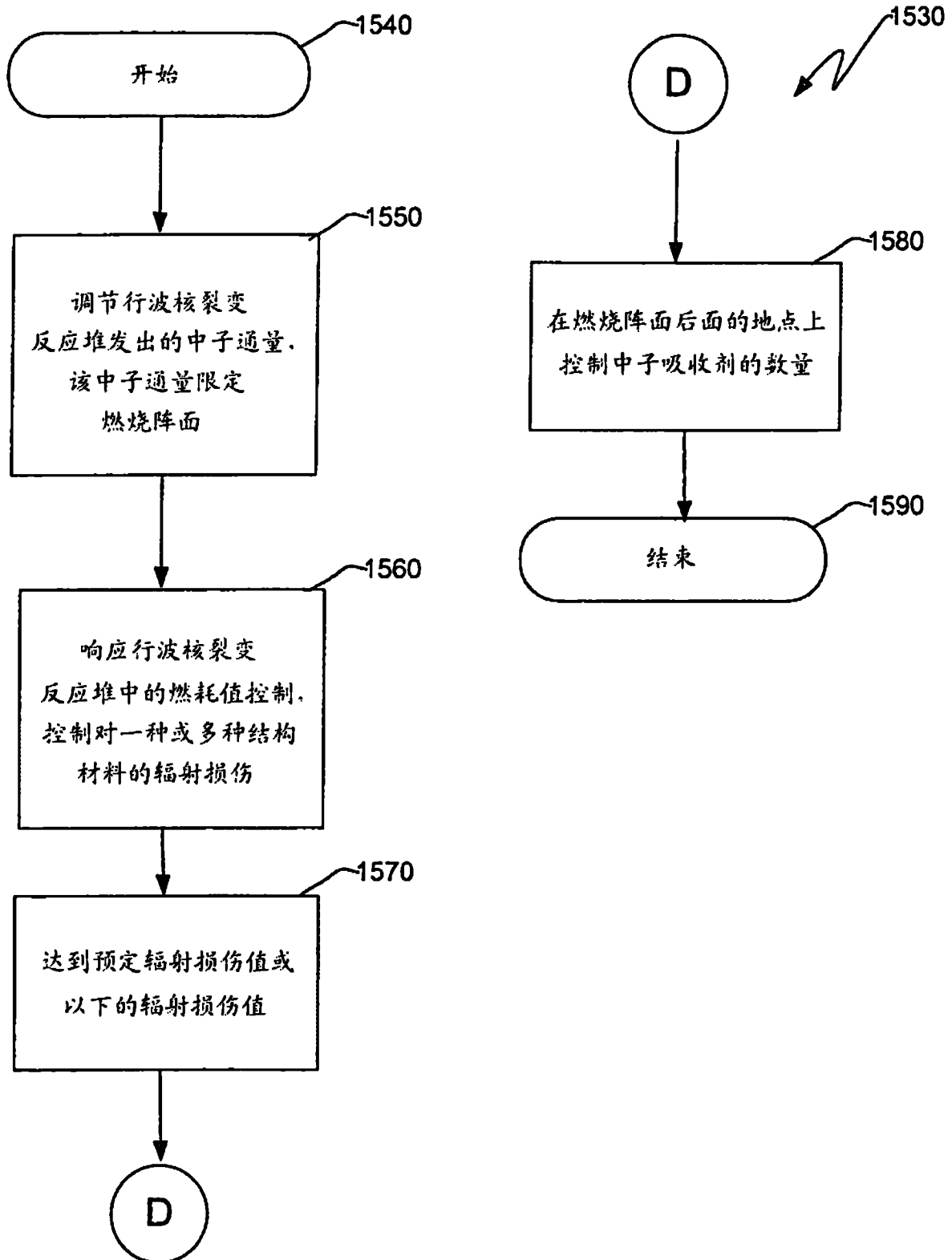


图 41

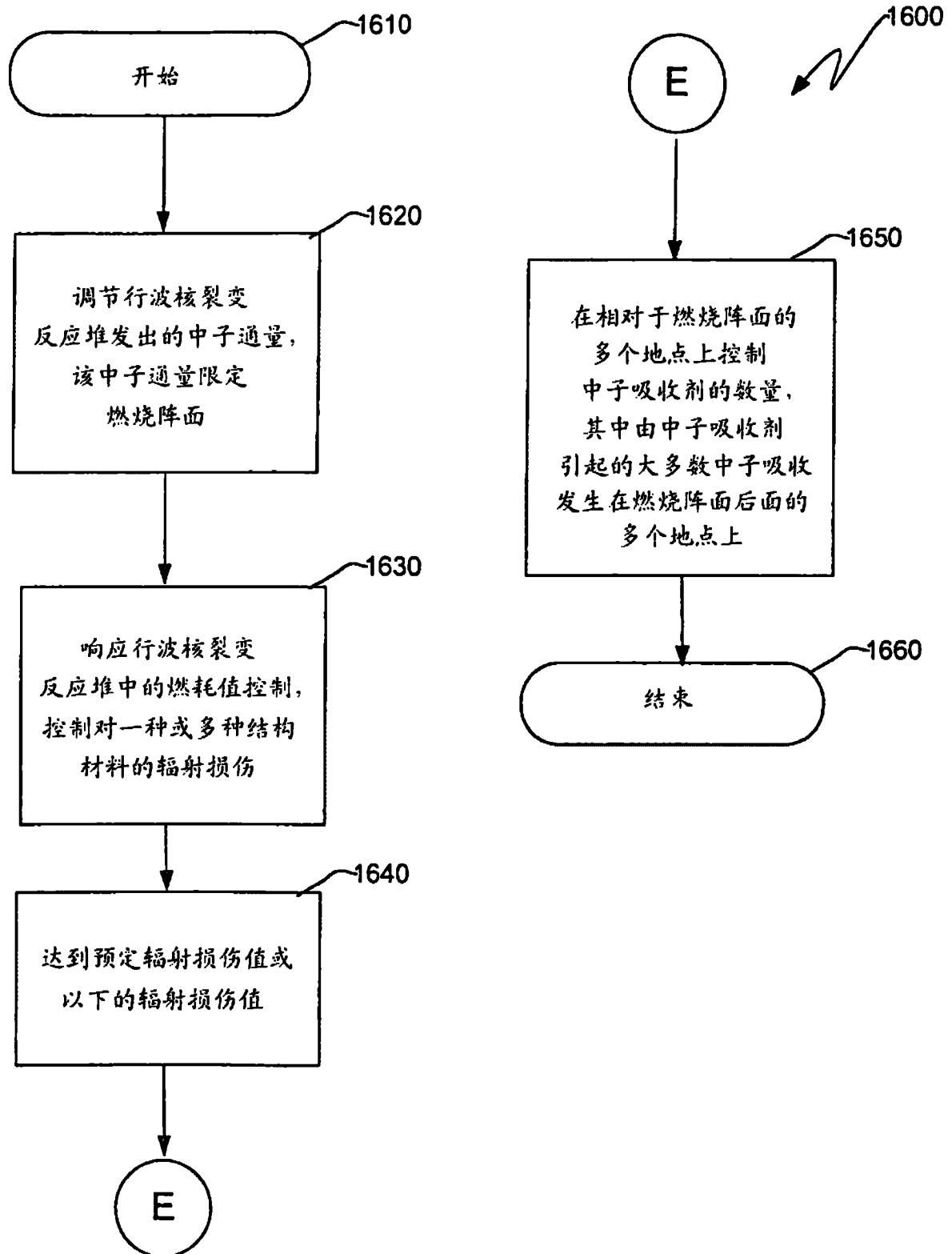


图 42

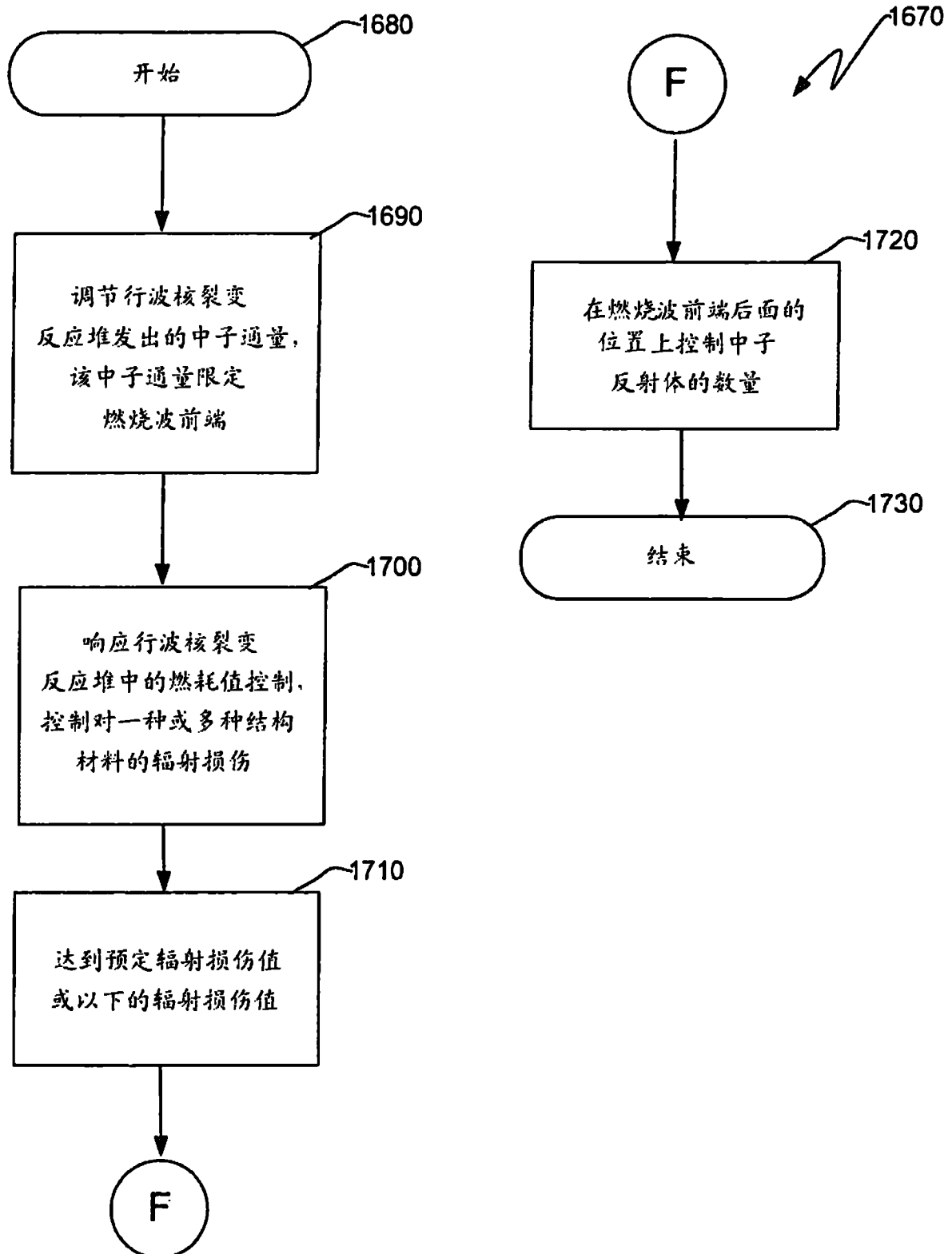


图 43

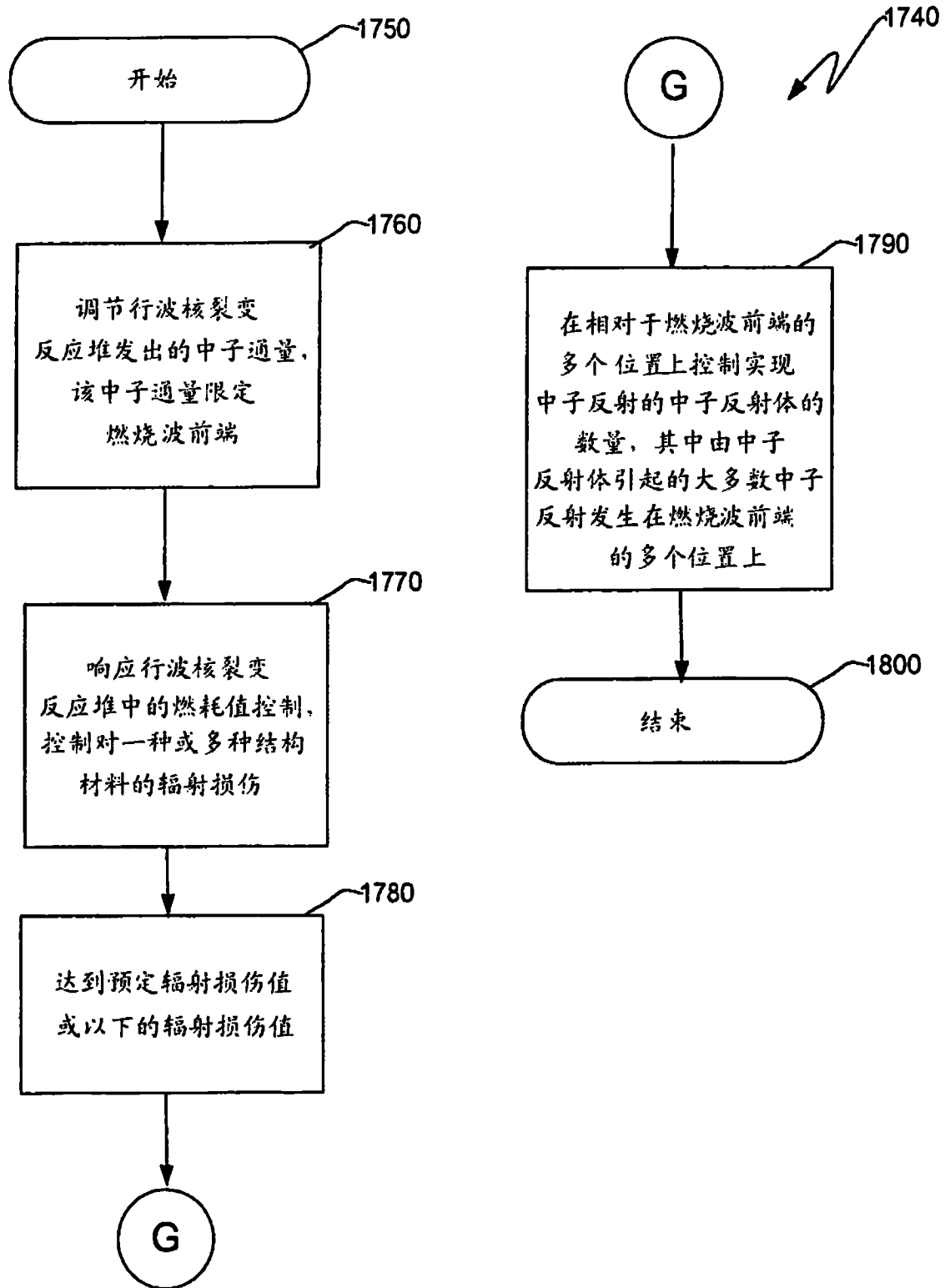


图 44

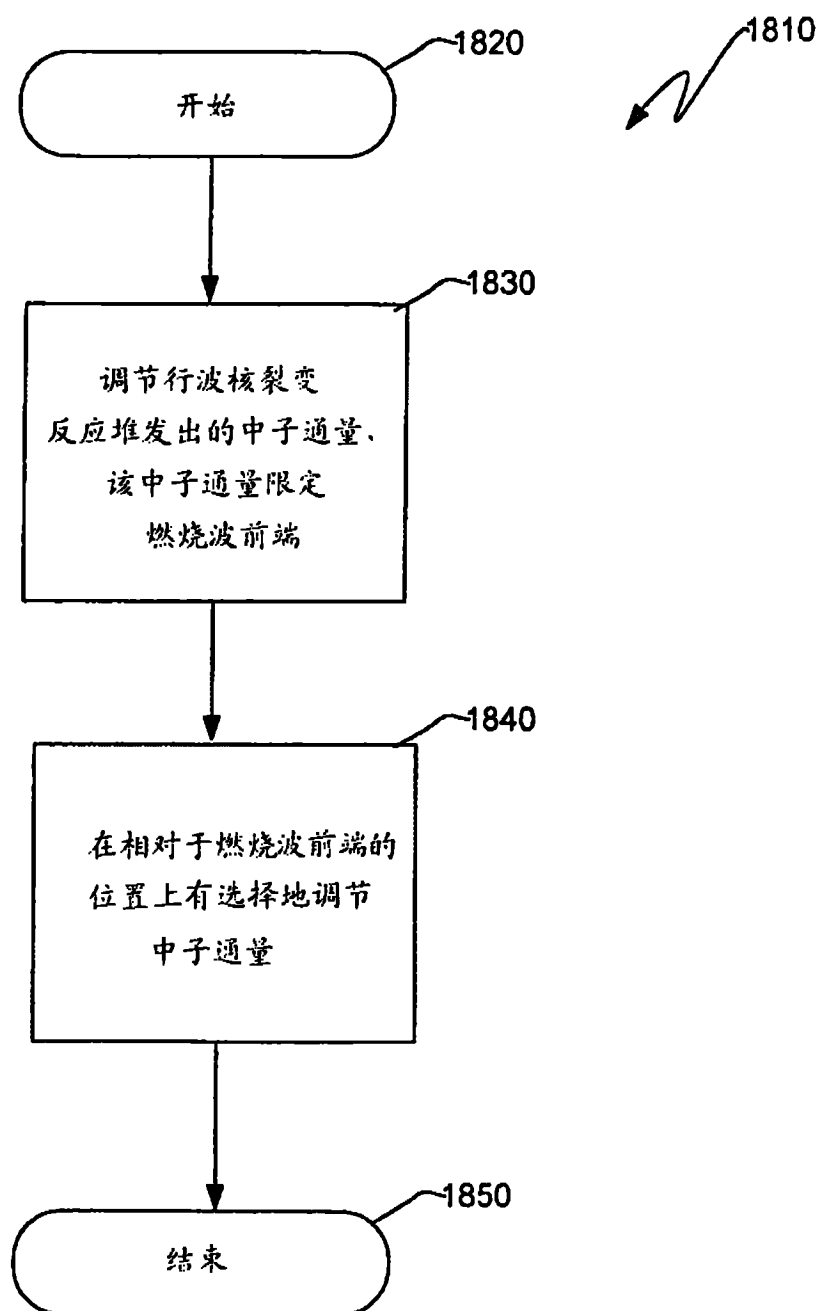


图 45

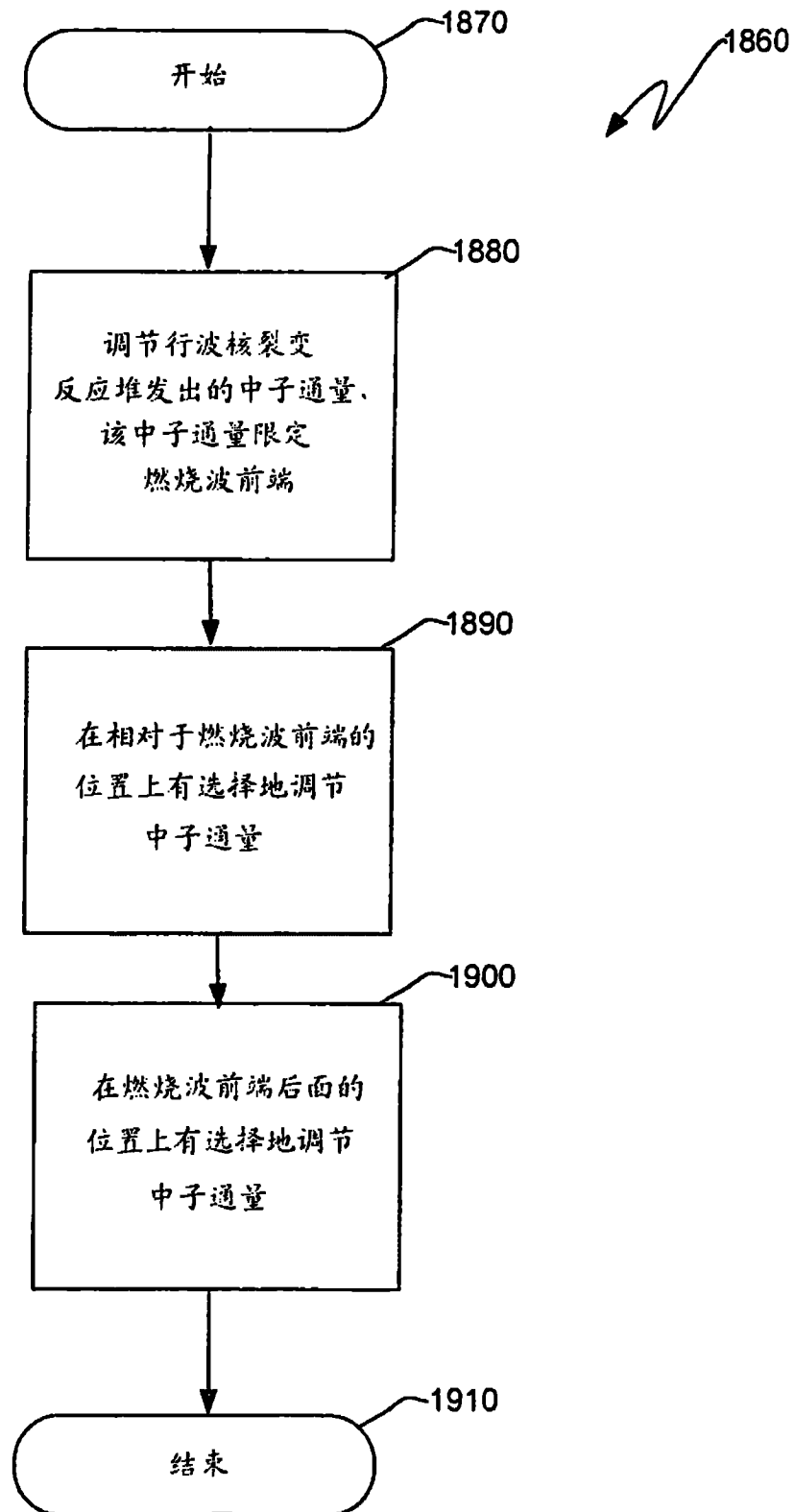


图 46

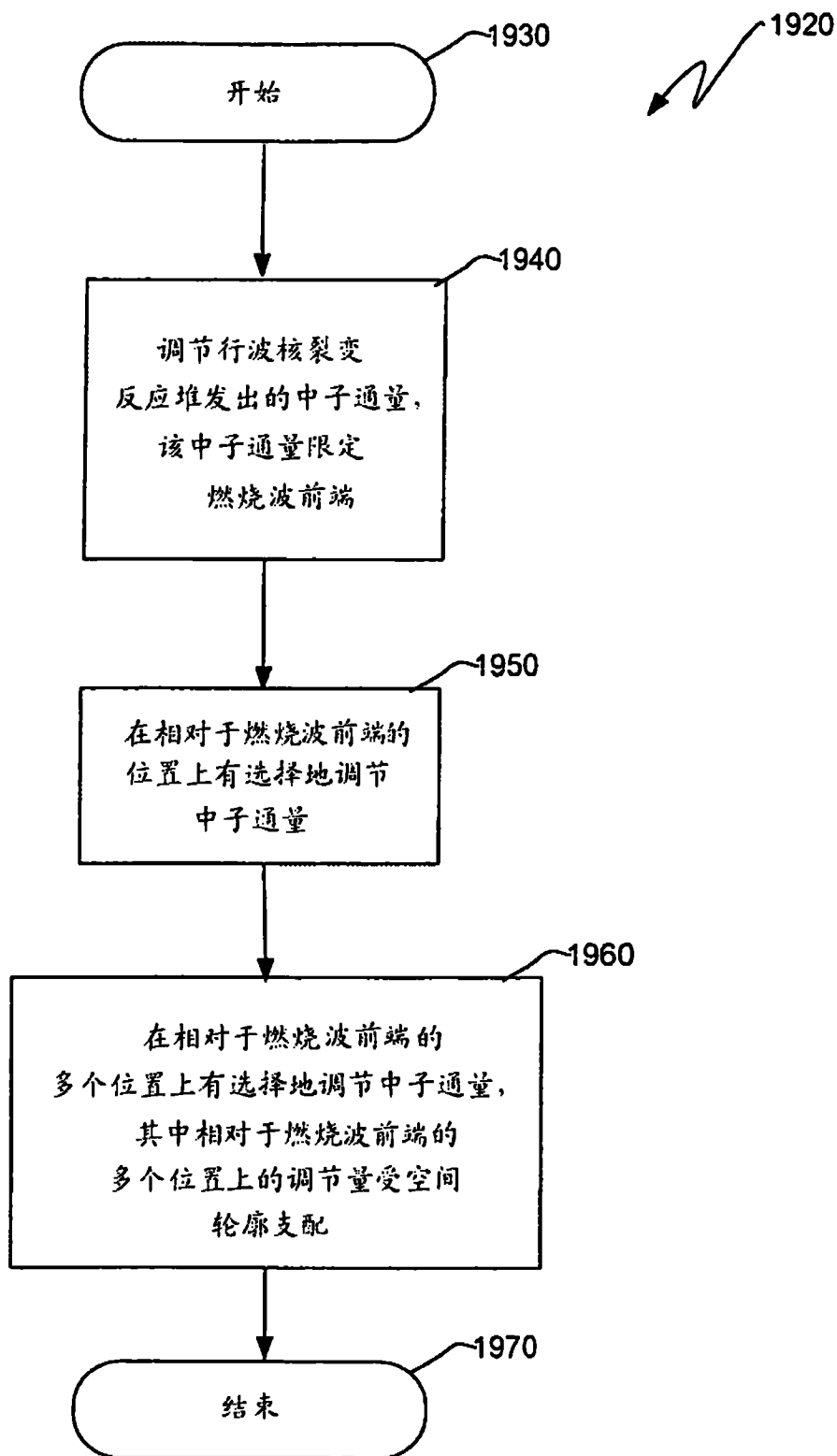


图 47

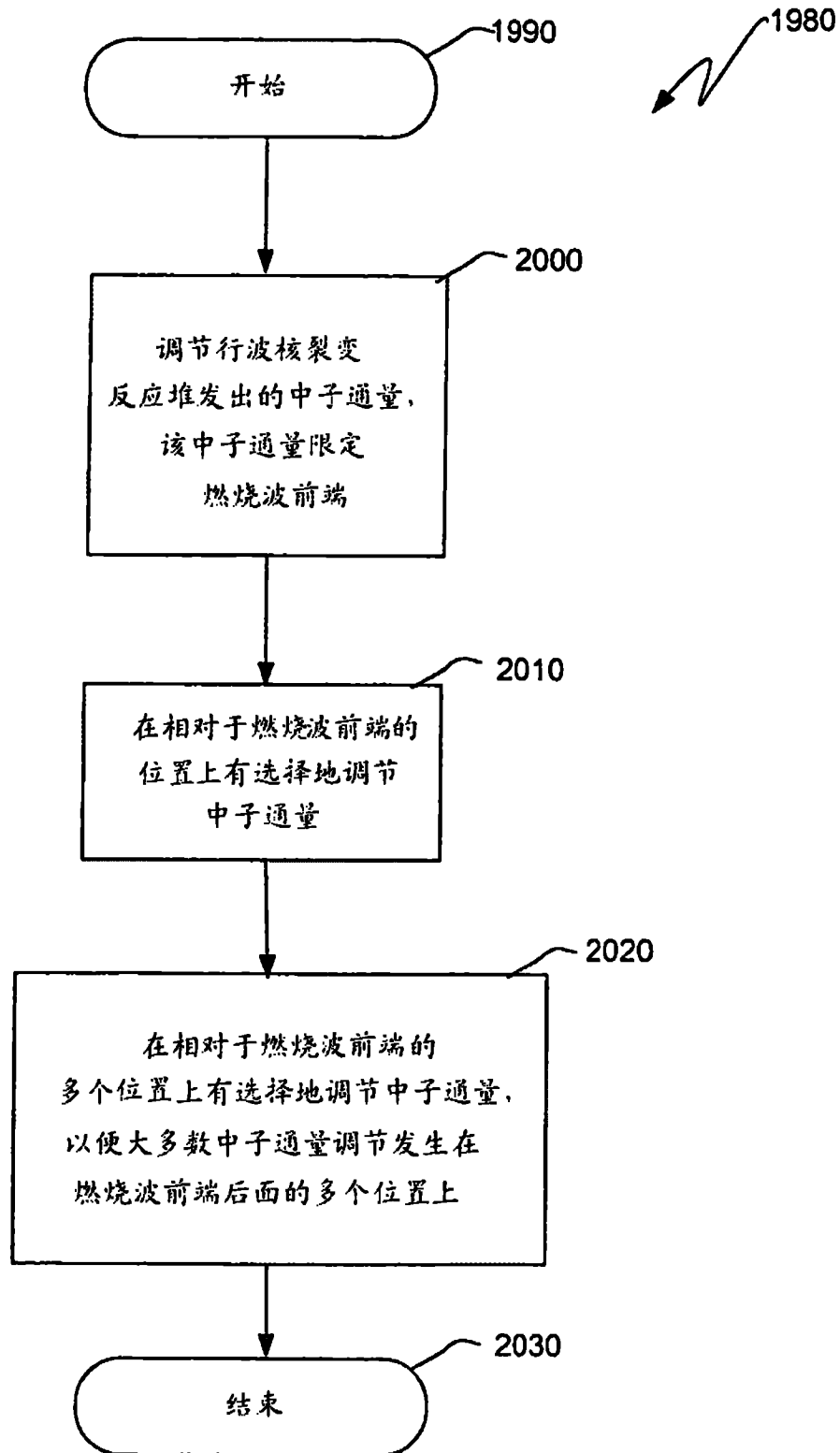


图 48

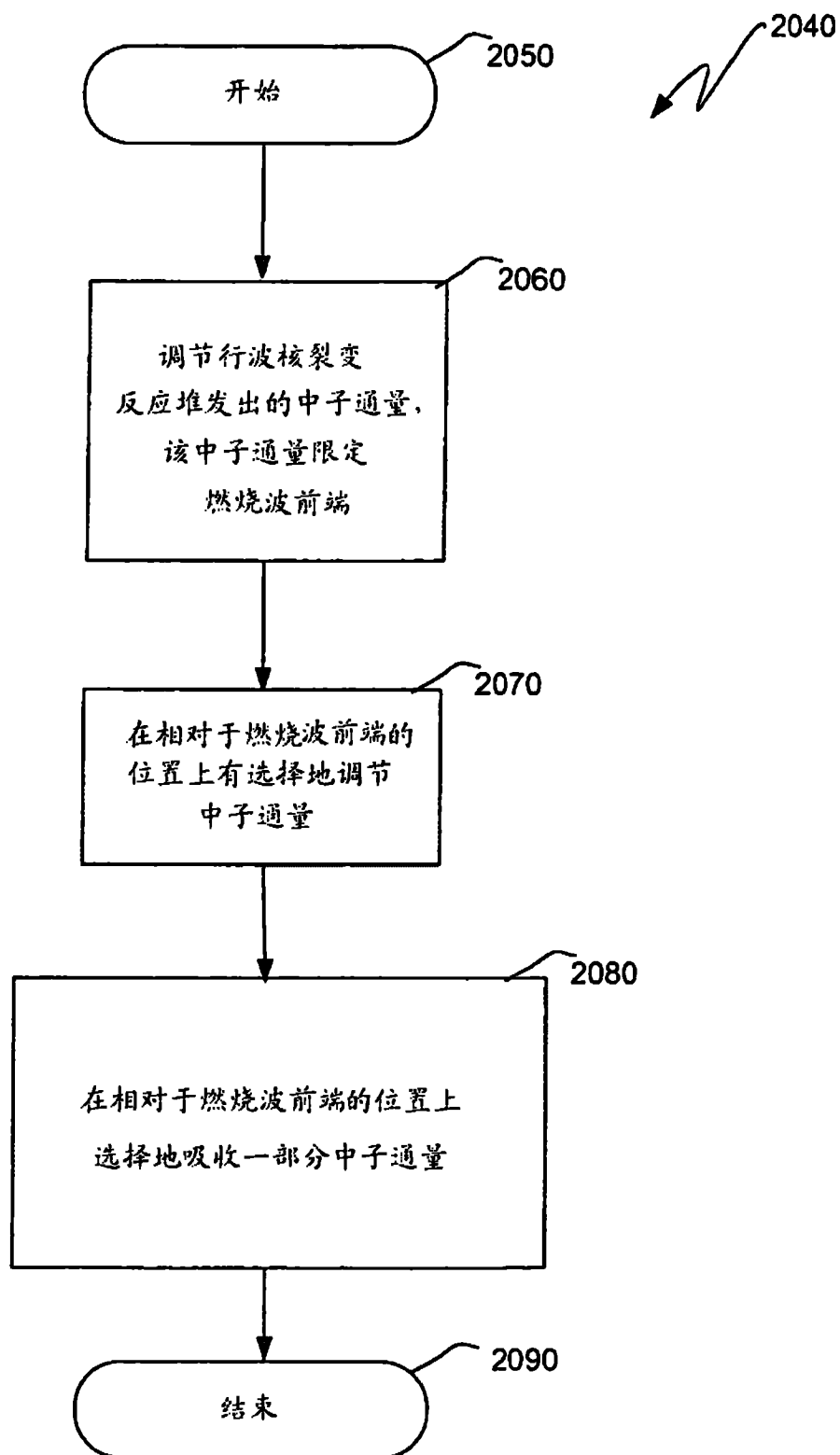


图 49

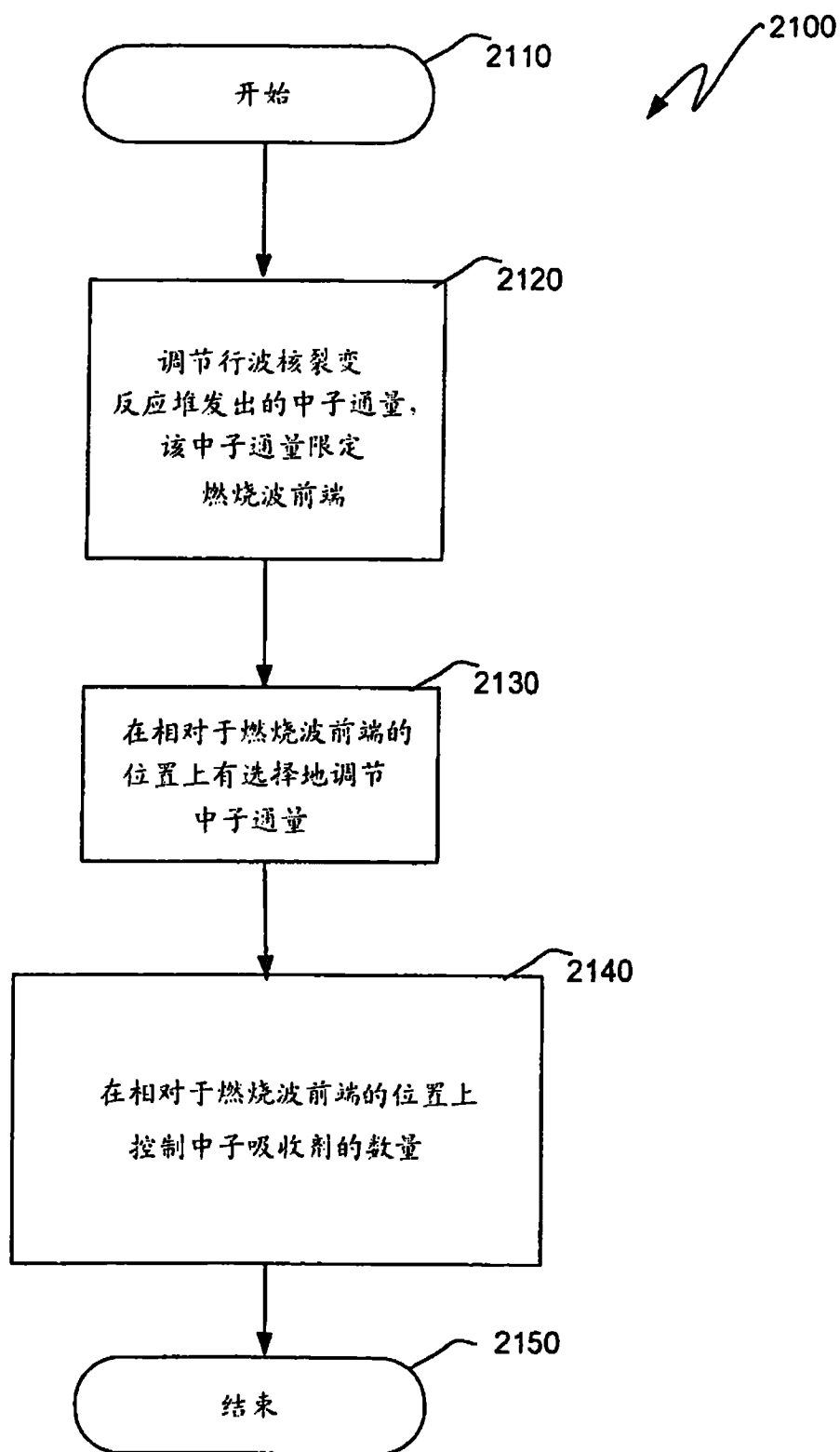


图 50

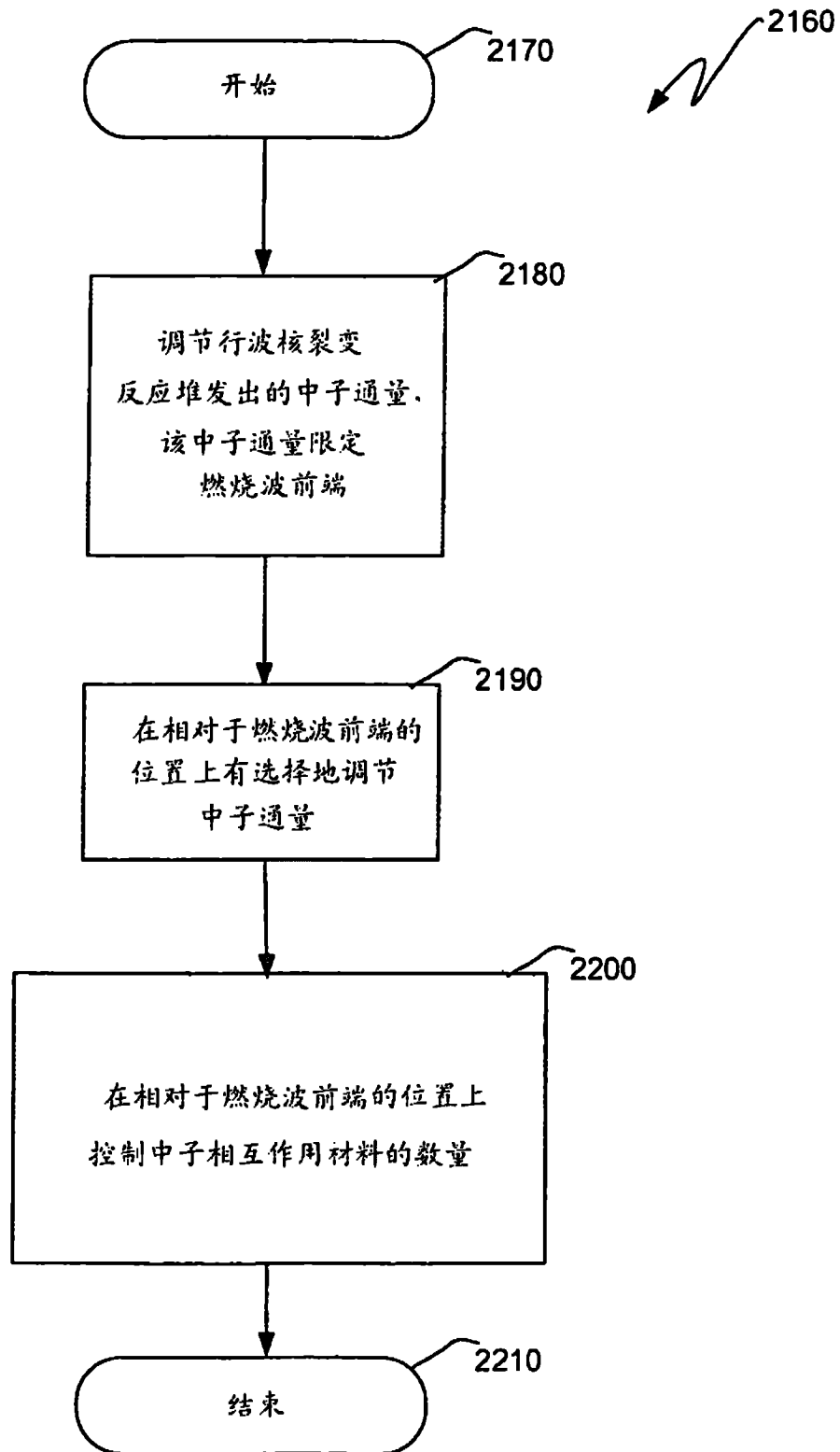


图 51

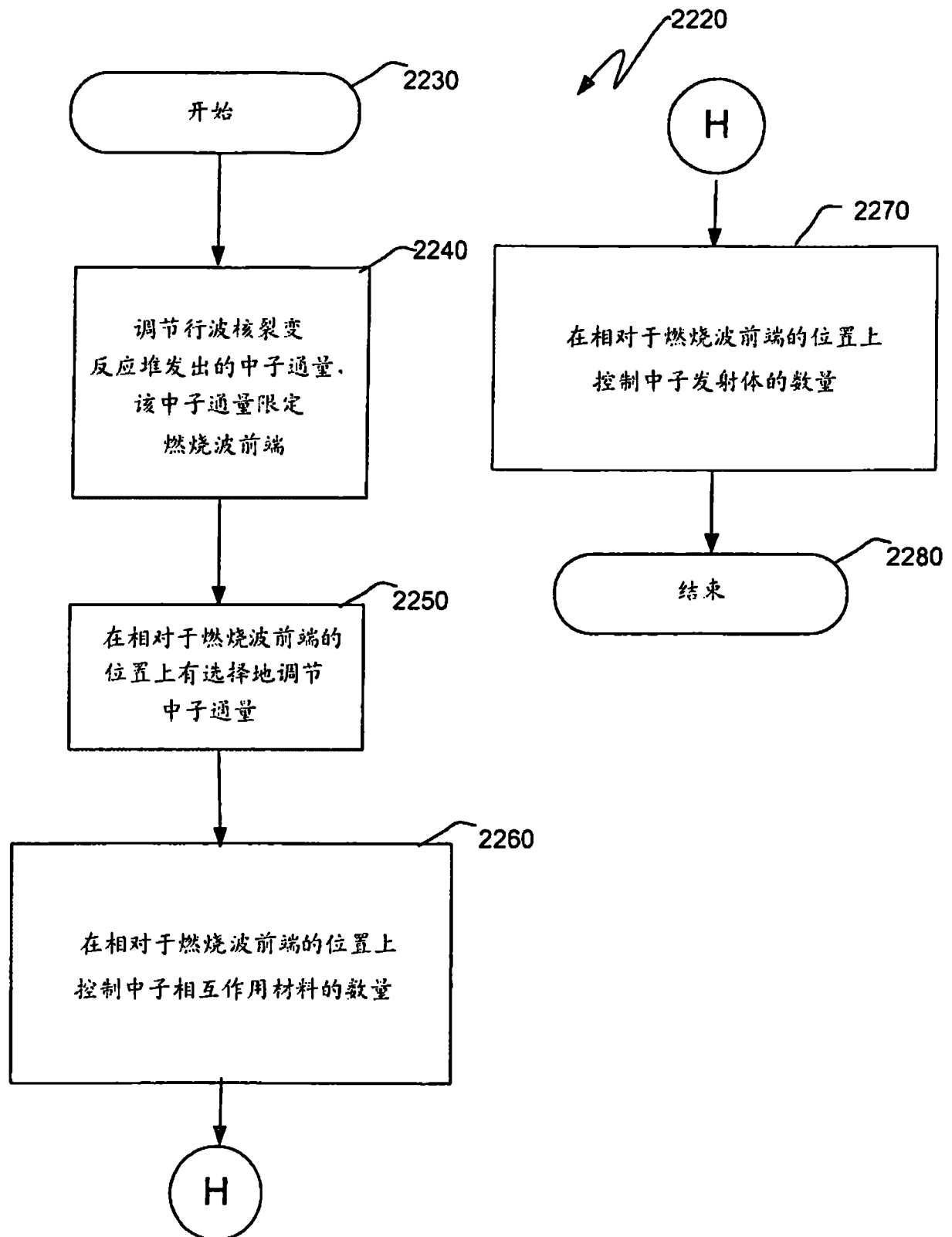


图 52

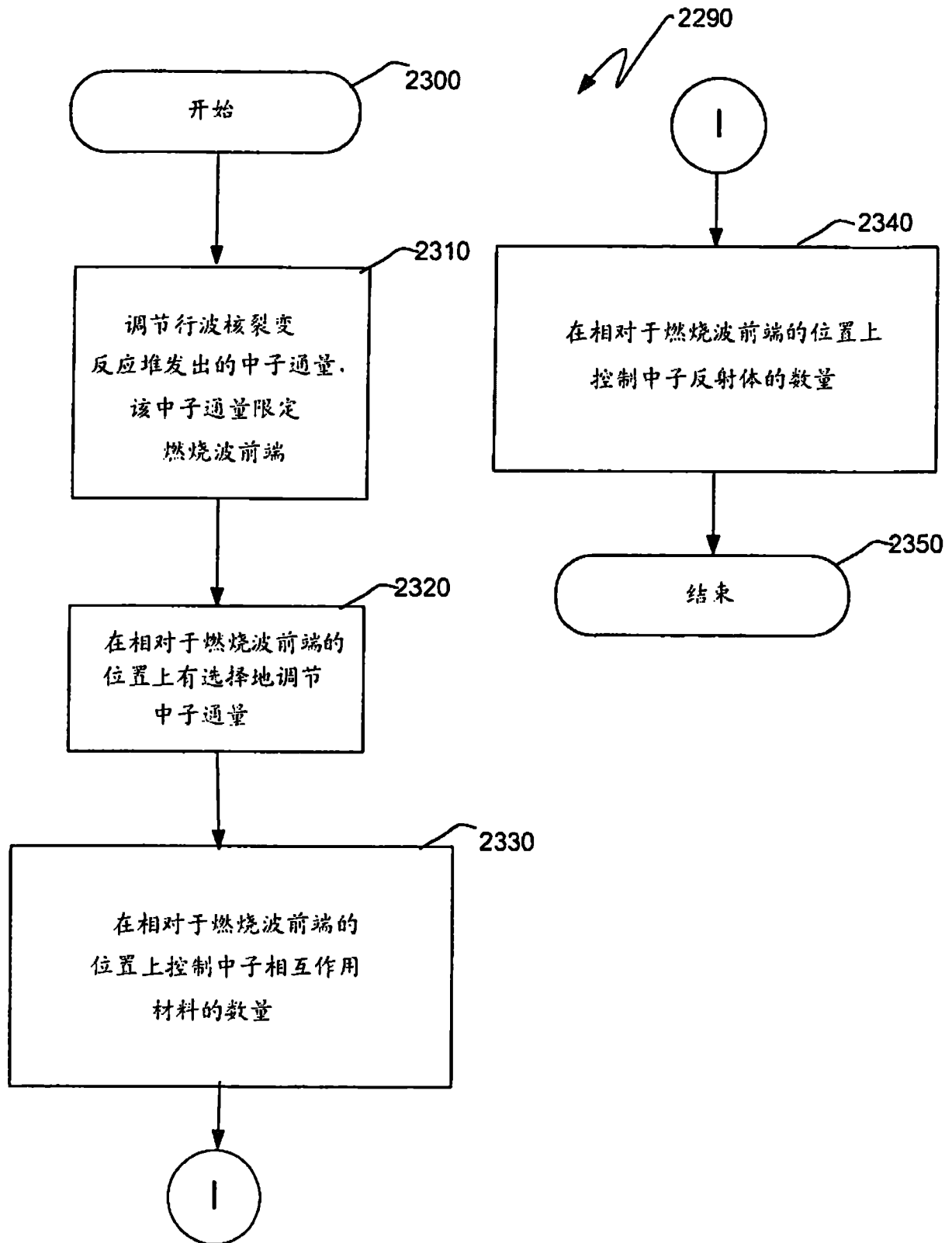


图 53

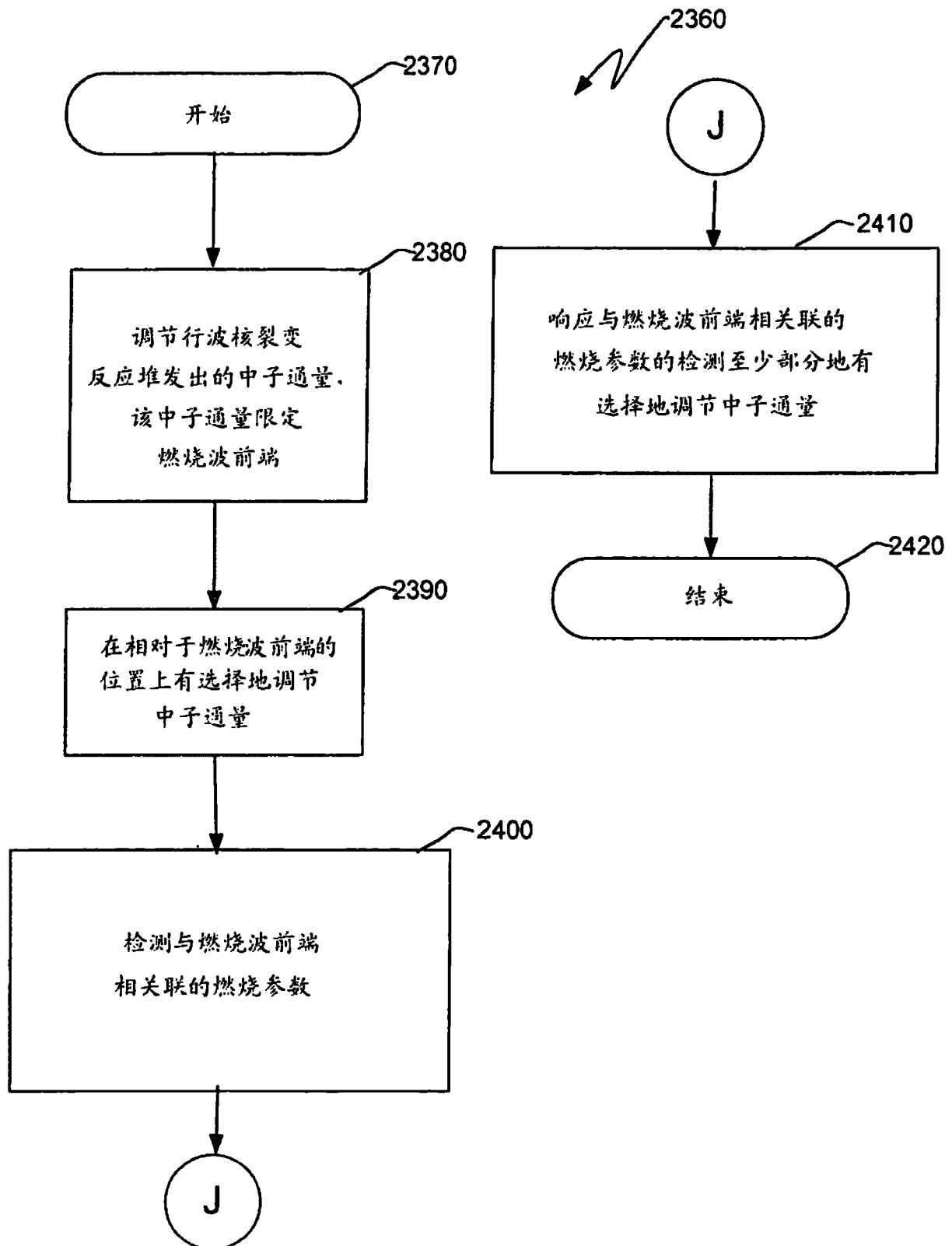


图 54

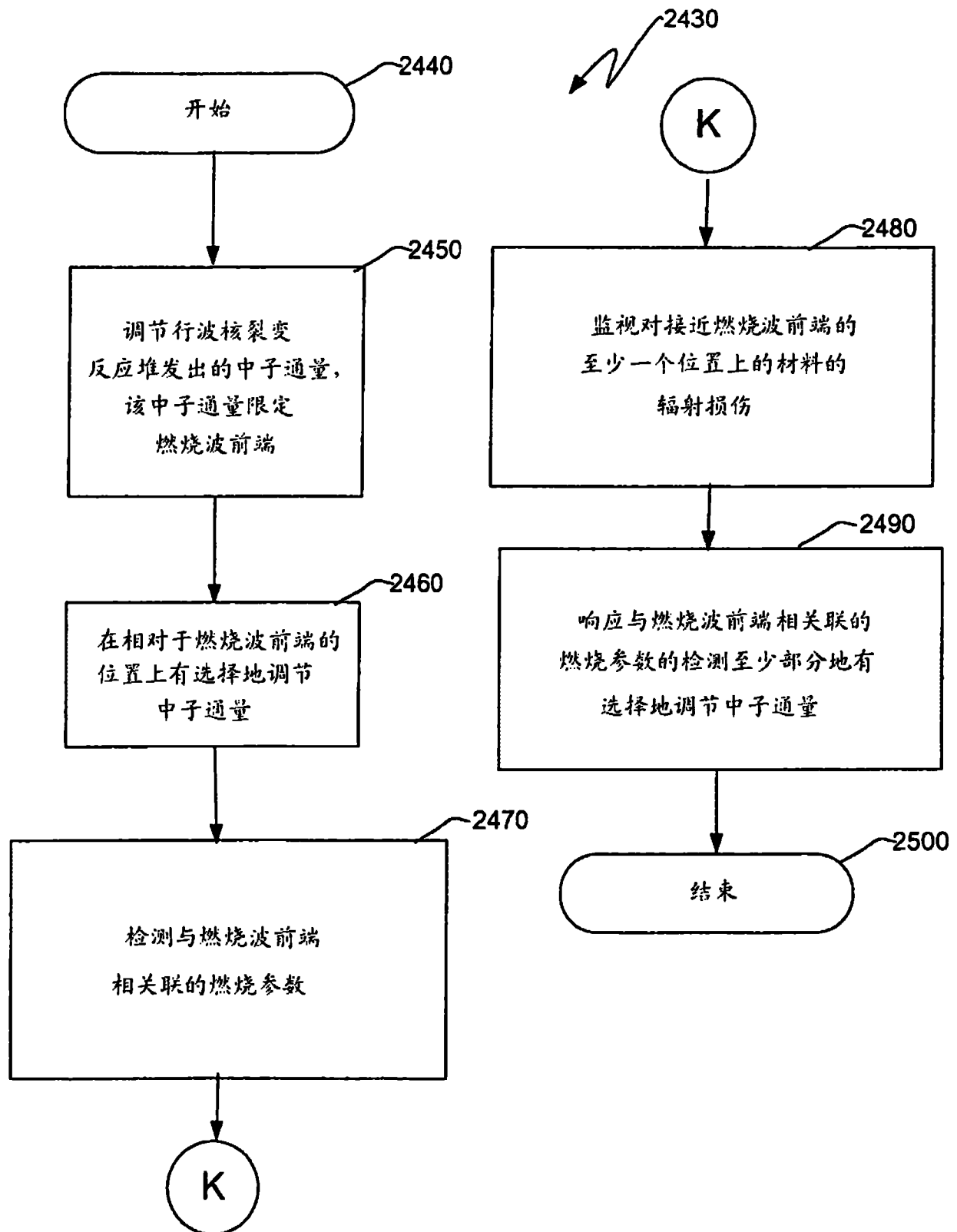


图 55

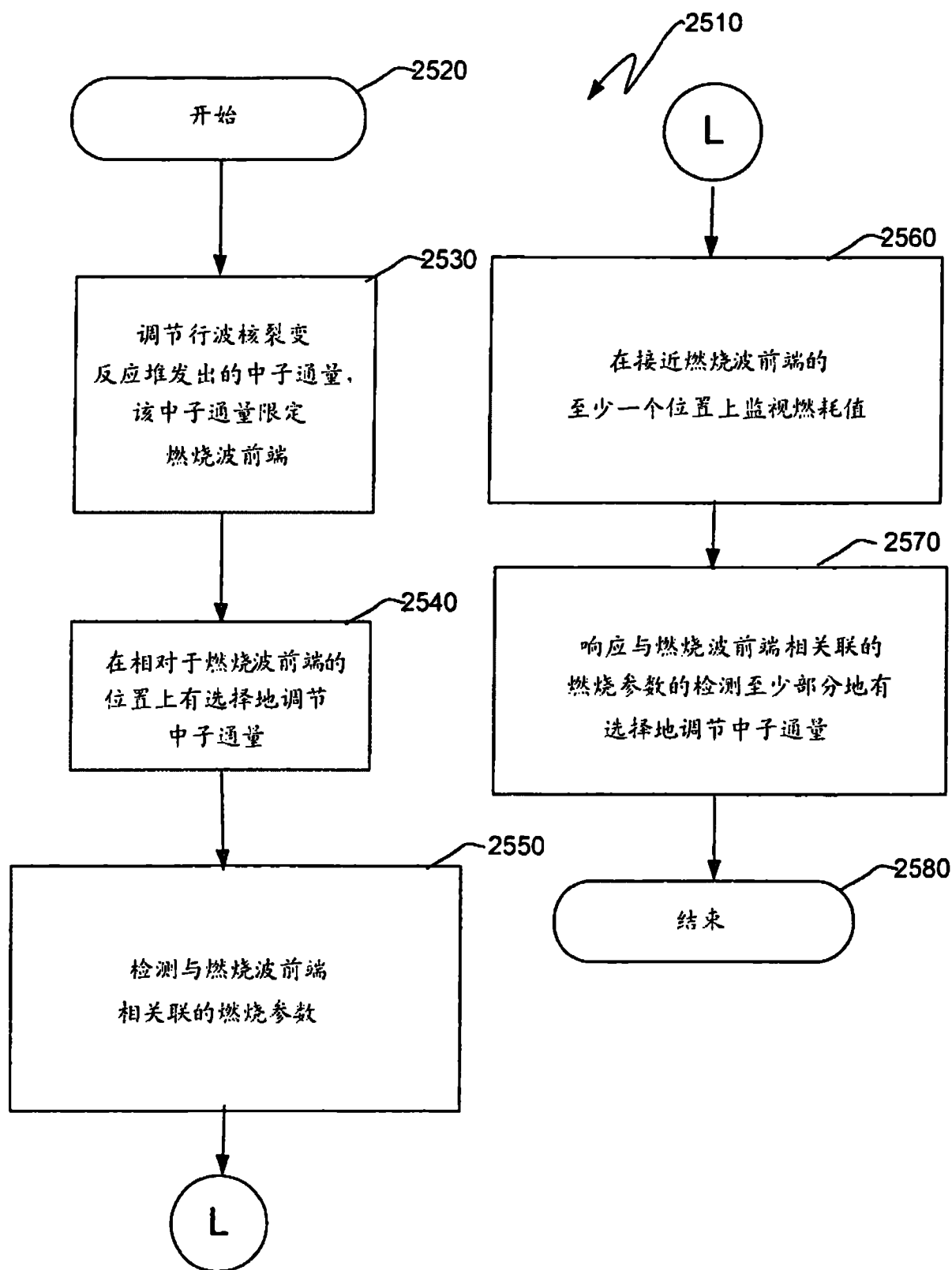


图 56

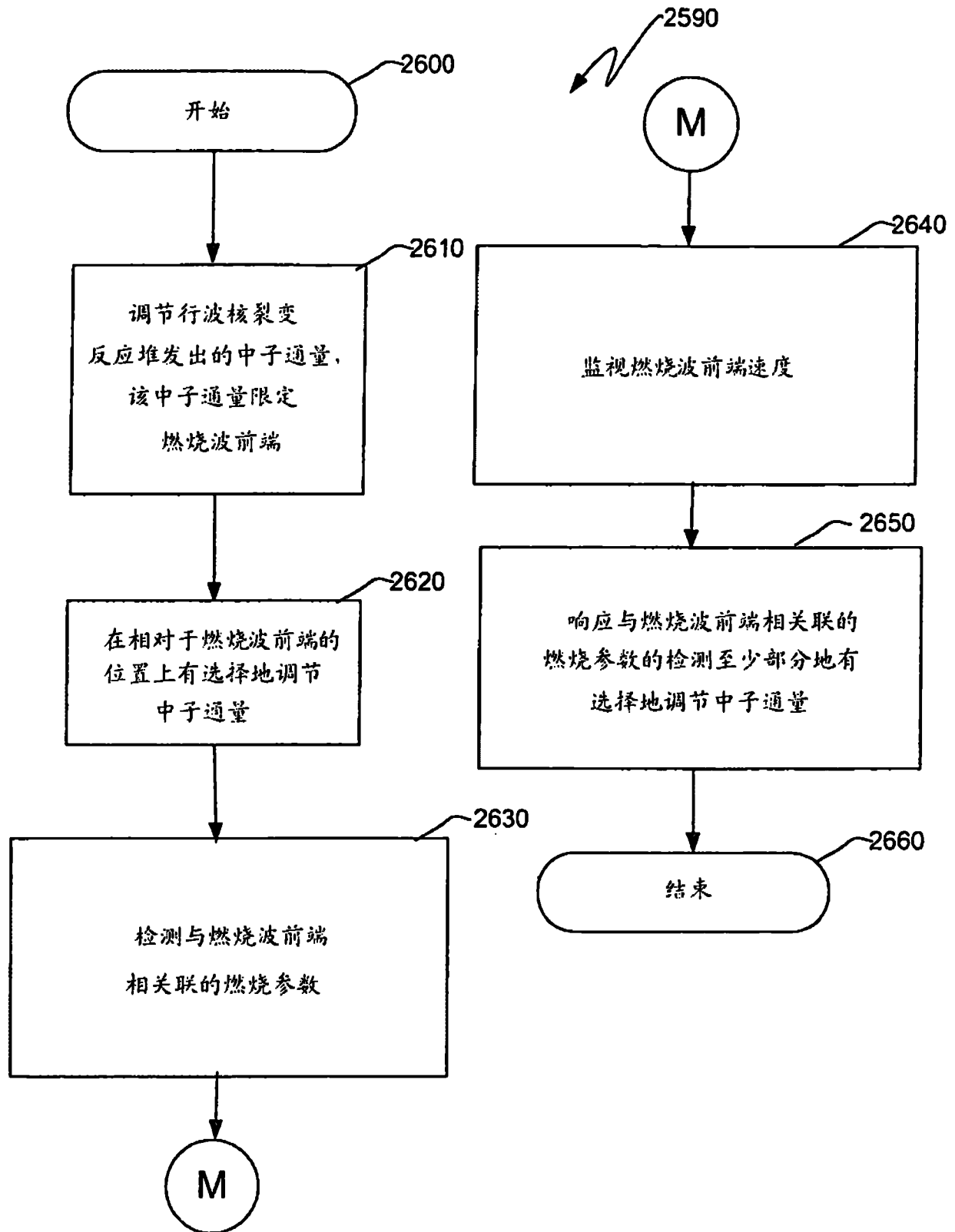


图 57

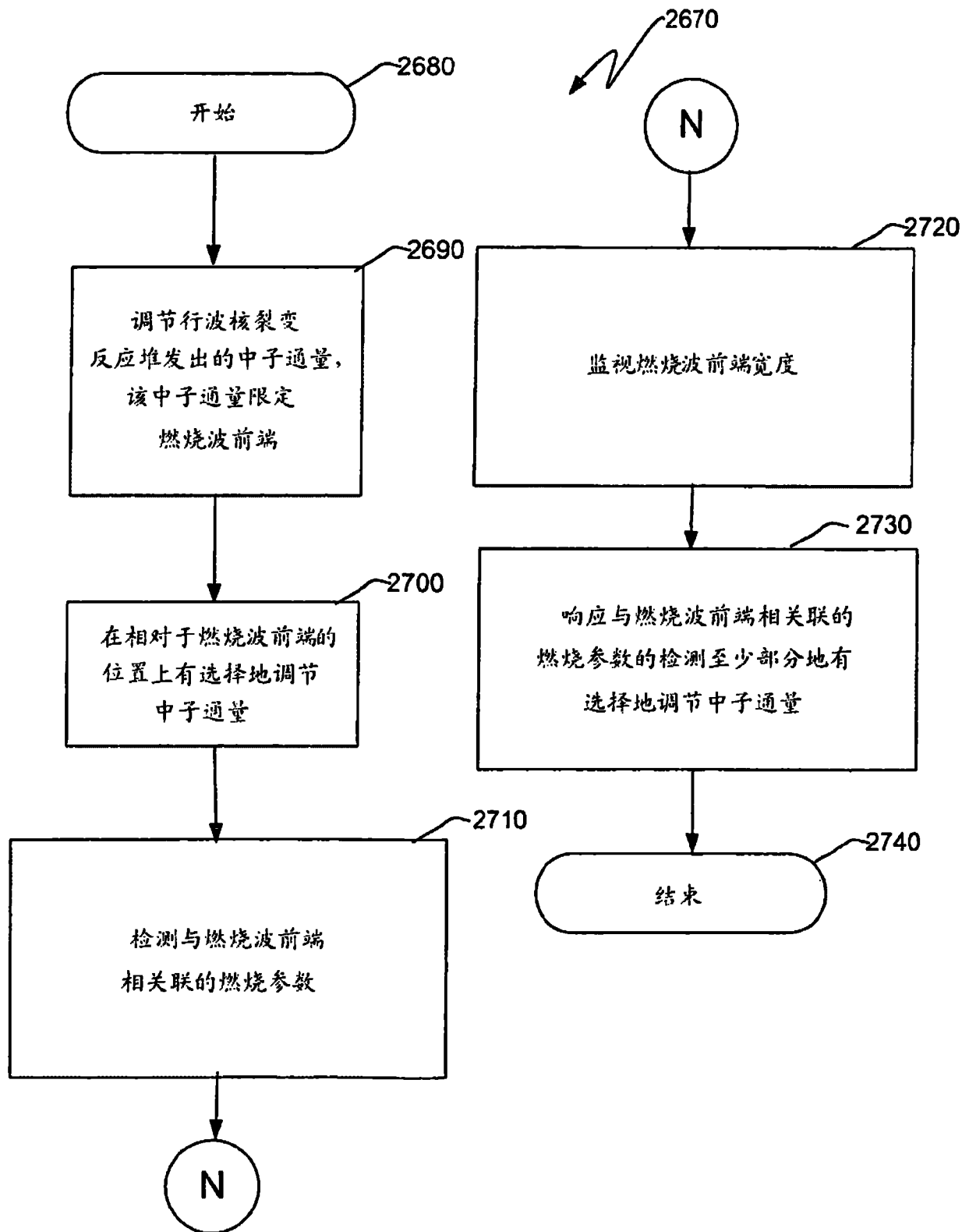


图 58

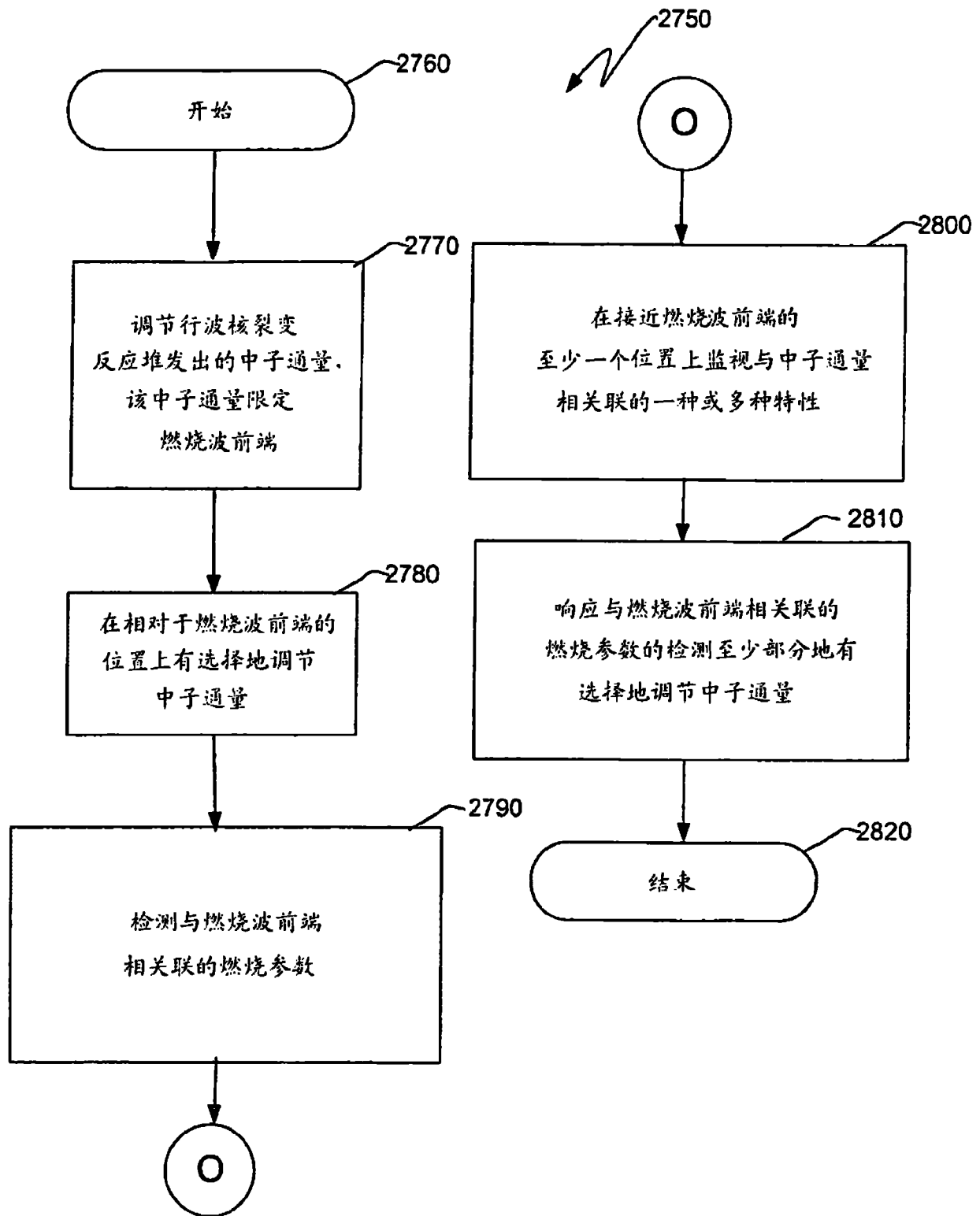


图 59

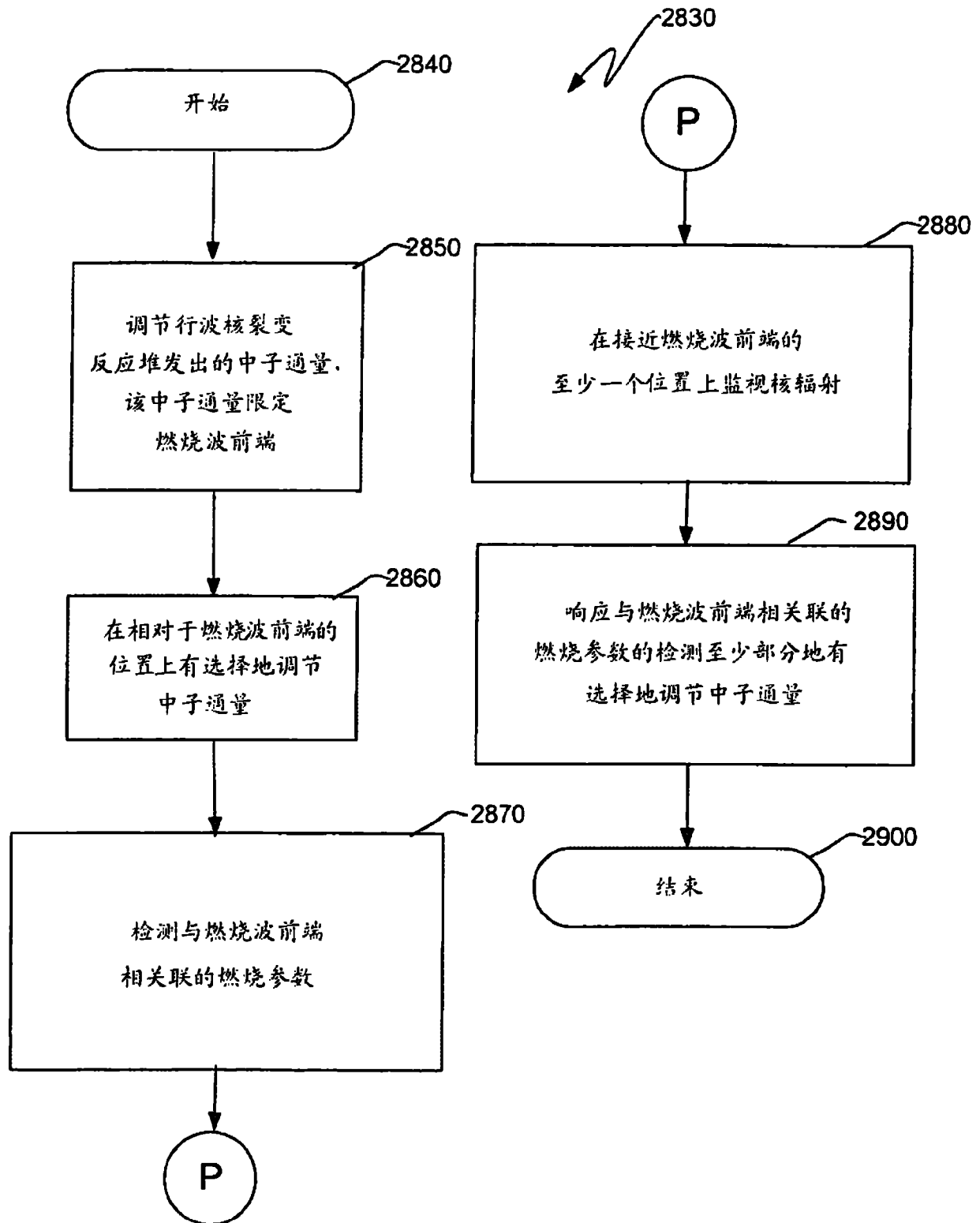


图 60

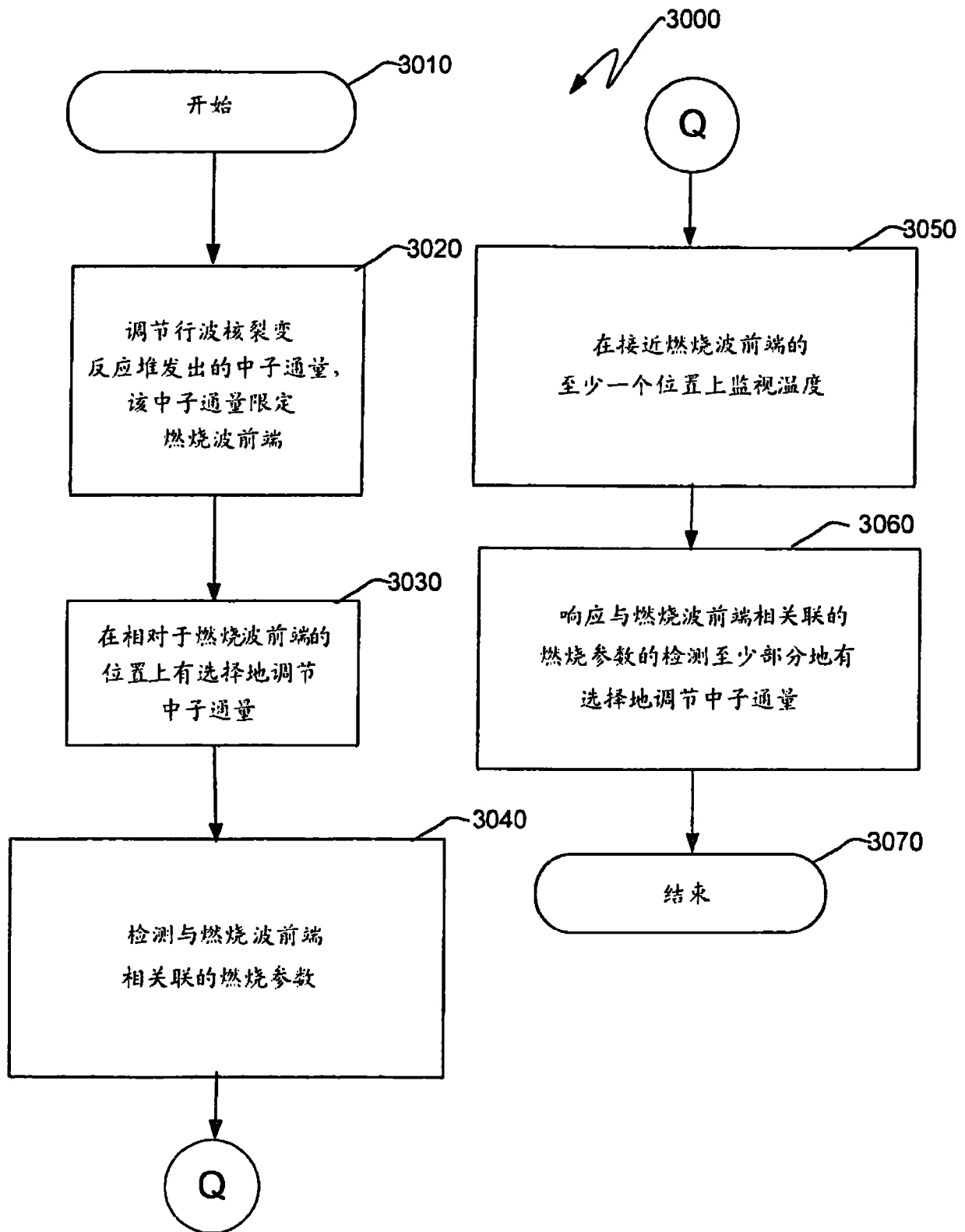


图 61

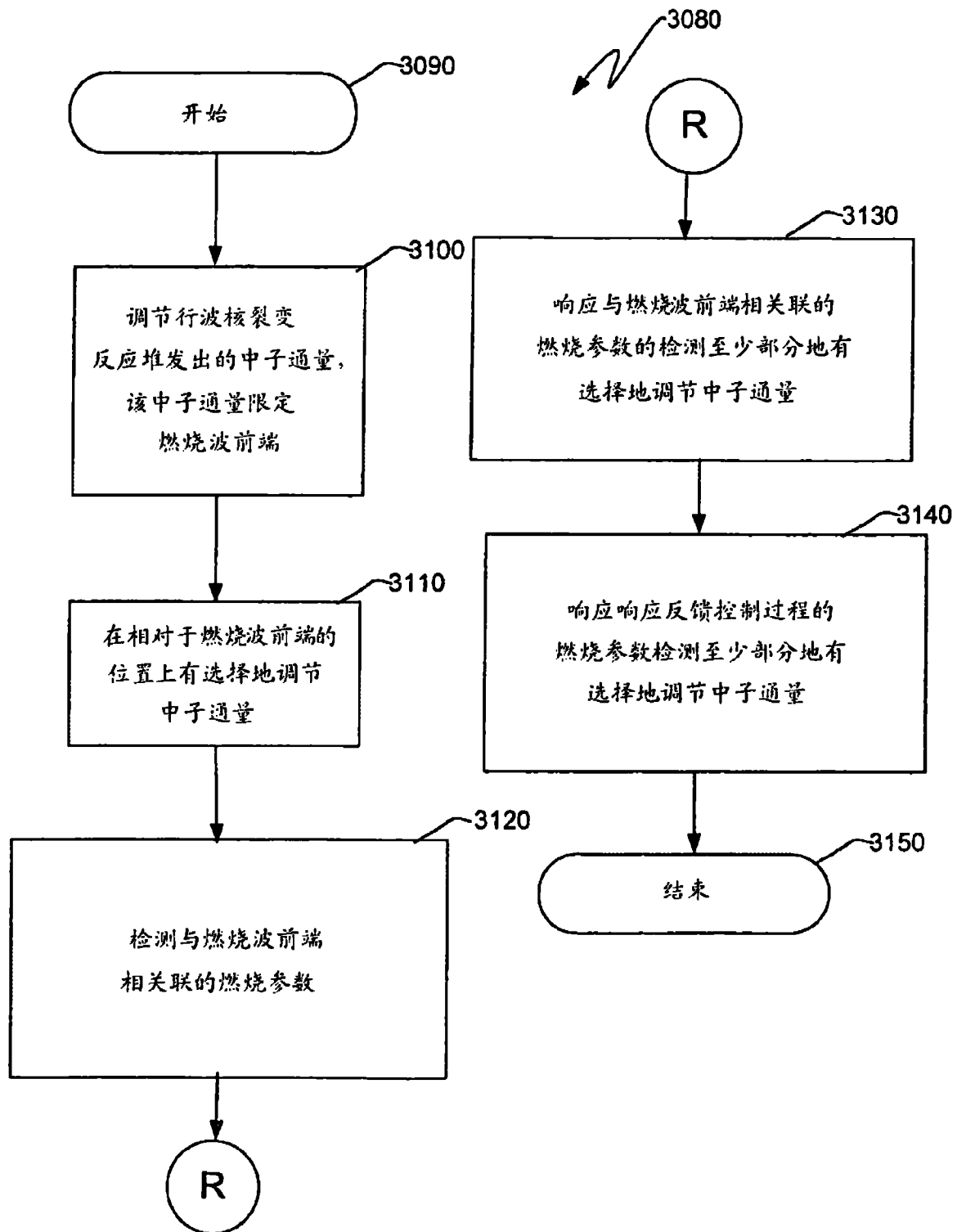


图 62

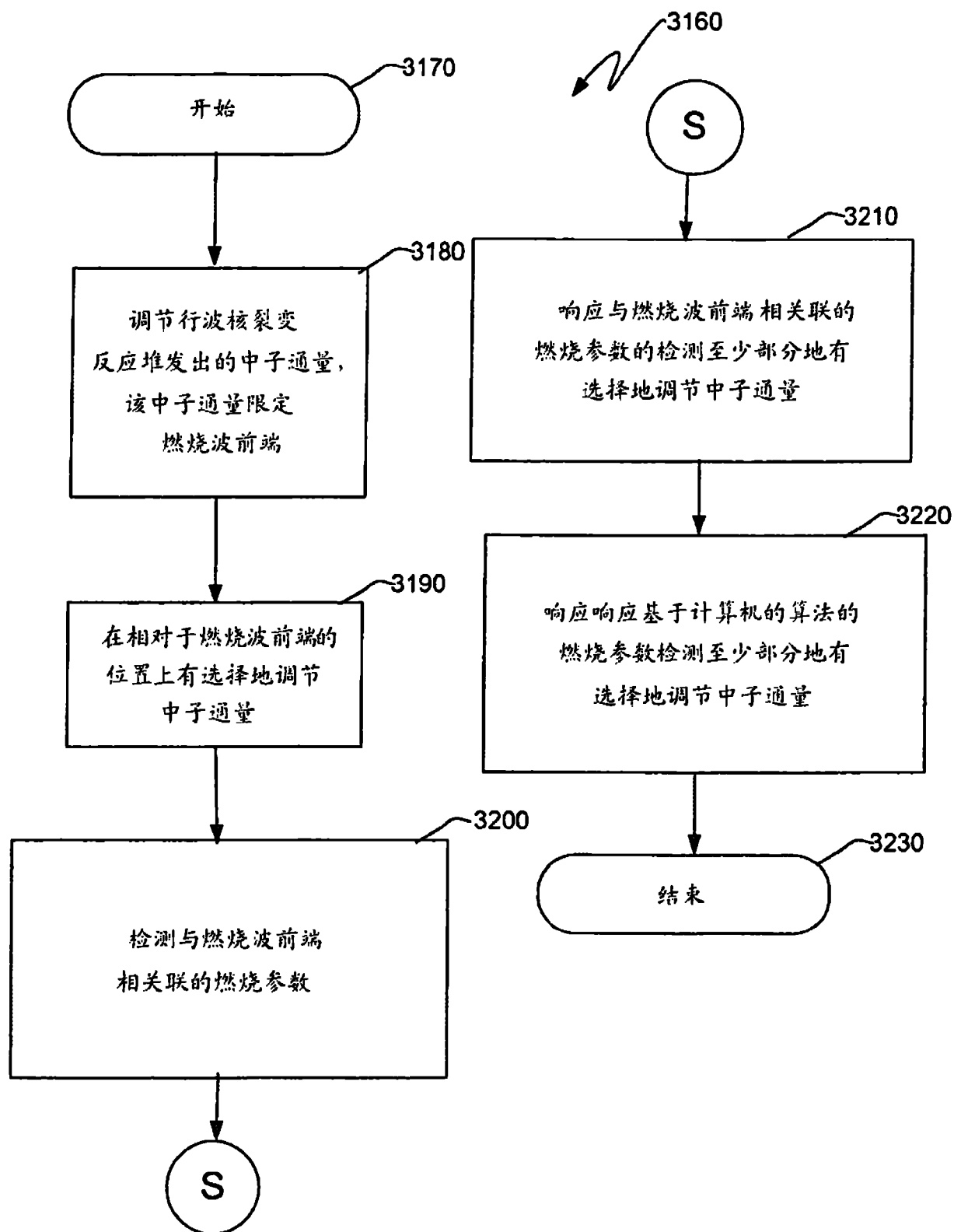


图 63

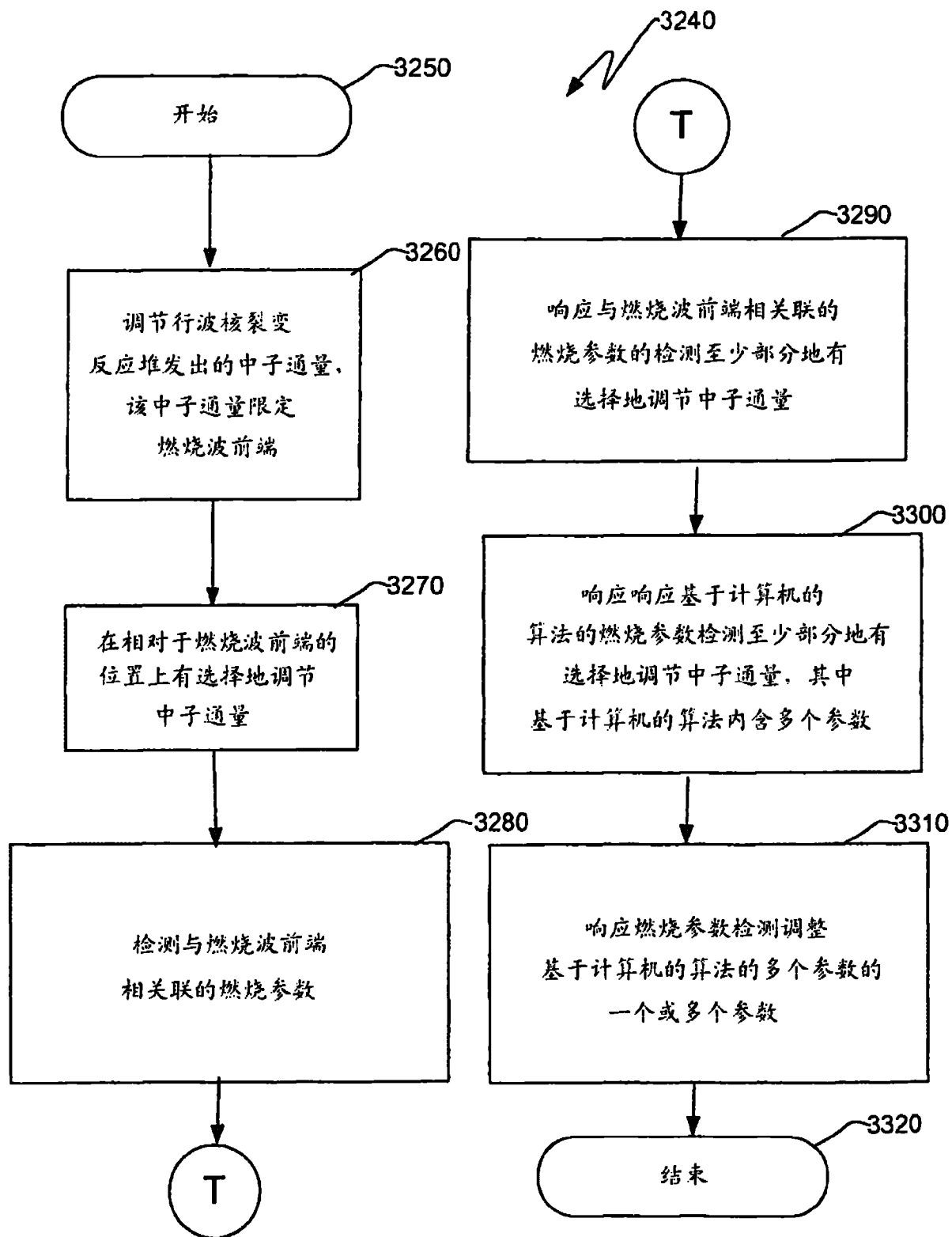


图 64

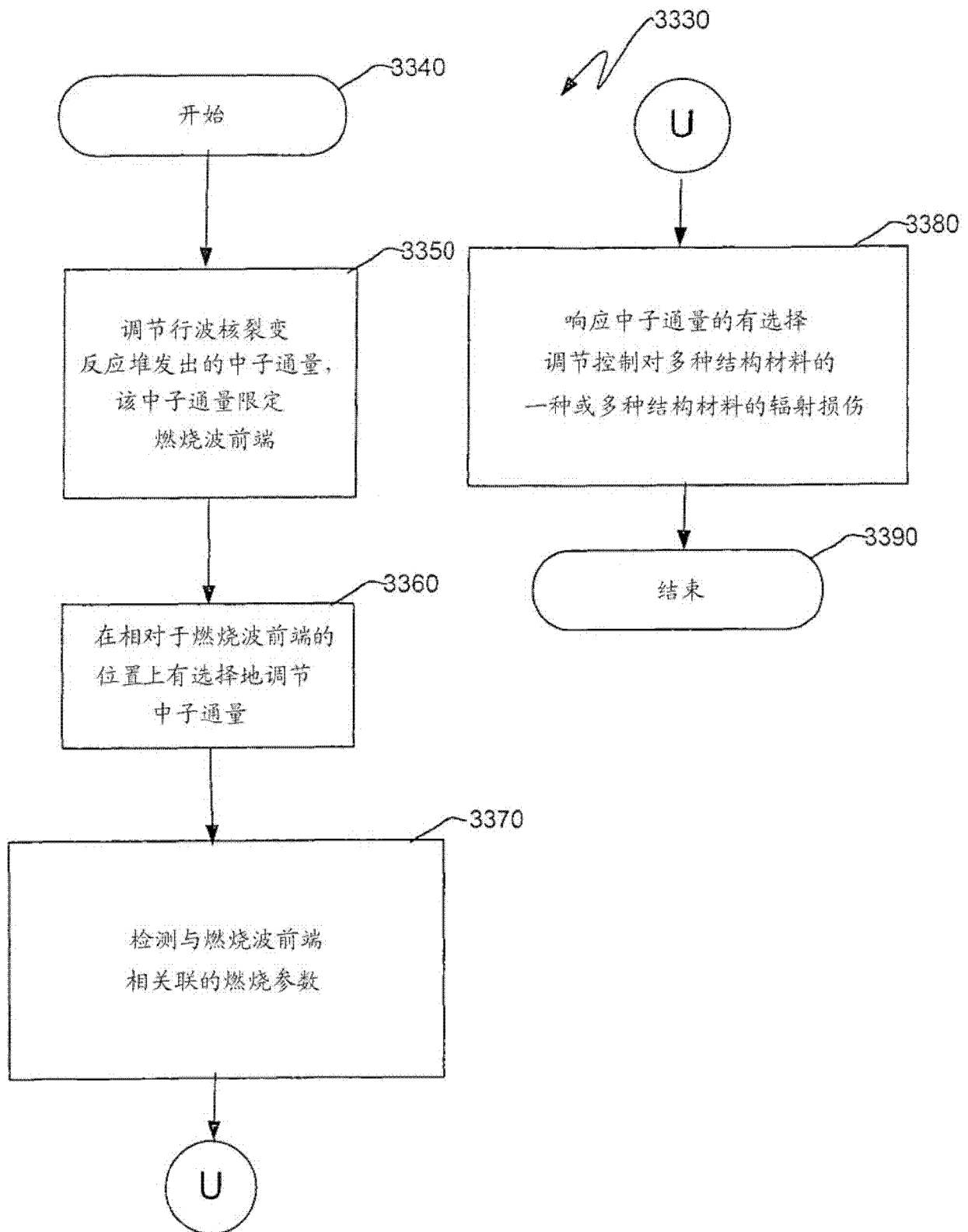


图 65