



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115221647 B

(45) 授权公告日 2023. 03. 21

(21) 申请号 202210652768.1

G06F 119/08 (2020.01)

(22) 申请日 2022.06.08

G06F 119/18 (2020.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 115221647 A

(56) 对比文件

CN 114330169 A, 2022.04.12

US 5619433 A, 1997.04.08

(43) 申请公布日 2022.10.21

戈剑; 郑向阳; 詹佳硕; 左嘉旭; 靖剑平; 张大

(73) 专利权人 上海交通大学
地址 200240 上海市闵行区东川路800号

林; 田文喜; 秋穗正; 苏光辉. 基于计算流体动力学方法的氟盐冷却高温堆安全限值分析. 2017, (第22期), 全文.

(72) 发明人 柴翔 邓蛟龙 刘晓晶 熊进标
张腾飞 何辉

审查员 赵鸿

(74) 专利代理机构 上海交达专利事务所 31201
专利代理师 王毓理 王锡麟

(51) Int. Cl.

G06F 30/17 (2020.01)

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 119/02 (2020.01)

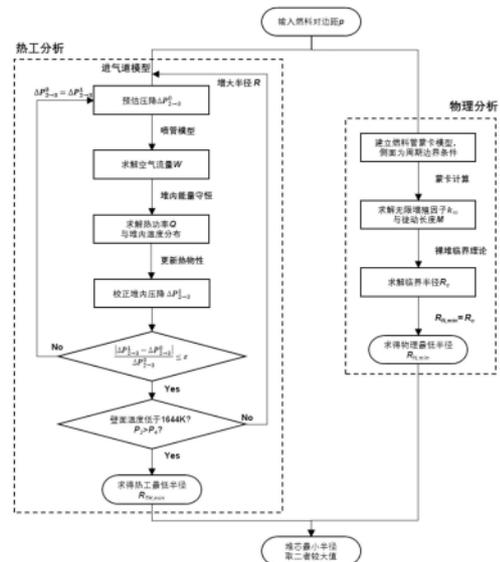
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

综合物理热工分析的气冷反应堆固体堆芯体积最小化设计实现方法

(57) 摘要

一种综合物理热工分析的气冷反应堆固体堆芯体积最小化设计实现方法,通过热工分析得到气冷反应堆固体堆芯的最小热工半径,通过物理分析得到气冷反应堆固体堆芯的最小物理半径,取两者中的较大值即为综合考虑物理热工限制情况下的反应堆固体堆芯体积最小化设计方案。本发明同时考虑物理热工分析,从而获得该系统在同时满足热工水力安全特性和中子物理临界特性下的固体堆芯体积最小化设计,能够运用在小型固体堆芯反应堆的前期概念设计之中,对于其几何尺寸与物理热工性能的优化具有一定参考价值。



1. 一种综合物理热工分析的气冷反应堆固体堆芯体积最小化设计实现方法,其特征在于,通过热工分析得到气冷反应堆固体堆芯的最小热工半径,通过物理分析得到气冷反应堆固体堆芯的最小物理半径,取两者中的较大值即为综合考虑物理热工限制情况下的反应堆固体堆芯体积最小化设计方案;

所述的最小热工半径是指:在给定输出推力下使燃料壁面温度不超过上限的最低堆芯半径,具体通过构建进气道与喷管模型后,根据预估压降依次计算空气流量、热功率以及堆内温度分布后,进一步更新堆内空气物性后迭代得到校正后的压降,再根据堆内壁面温度最大值限制得到;

所述的最小物理半径,即符合裸堆临界理论的临界半径,具体通过建立燃料管蒙卡模型并通过蒙卡计算得到无限增殖因子与徙动长度,然后基于裸堆临界理论计算得出临界半径得到;

所述的热工分析,具体包括:

步骤一:对于飞行在海平面高度上的核动力推进器,其所吸入的来自大气环境中的空气温度 T_1 与压力 P_1 可以根据标准大气模型求得;根据已知的 T_1 与 P_1 进一步求得反应堆入口处的空气温度 T_2 与压力 P_2 ;

步骤二:空气流经反应堆内的流道后,将产生由于流动导致的空气压力损失;首先预估堆内压损值为 $\Delta P_{2 \rightarrow 3}^0$,已知堆入口压力 P_2 的前提下,得到堆出口压力 P_3 ;根据堆出口空气温度和空气流动状态,确定 T_3 与 P_3 ;

步骤三:依据冲压式发动机喷管的绝热熵增膨胀理论,根据已知的 T_3 与 P_3 进一步求得反应堆入口处的空气温度 T_4 与压力 P_4 ;空气在喷管出口的速度 U_4 远远大于其在喷管入口的速度 U_3 ,因此由能量守恒定律,在求得 T_3 与 T_4 的前提下,求得空气在喷管出口的速度 $U_4 = \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma-1} R_g (T_3 - T_4)}$,其中: γ 为空气比热比,取值为1.4; R_g 为空气气体常数,值为287J·kg/K; T_3 与 T_4 分别为喷管进出口空气温度;

步骤四:根据总推力 F 、来流空气速度 U_1 、飞行器排出空气速度 U_4 ,得到流经飞行器内部的总空气流量 $W = \frac{F}{(U_4 - U_1)}$,其中: F 为推力, U_1 与 U_4 分别为飞行器吸入与排出空气速度,稳态飞行下 U_1 恒为2.8Ma, U_4 由上一步求得;

步骤五:现进行反应堆内流动传热特性分析,求解反应堆内空气的流动状态;已知堆进出口温度 T_2 与 T_3 ,又已知堆内空气总流量 W ,可根据能量守恒定律求解得到堆内总的燃料热功率 Q ,当堆内流动传热在全部的 N 个燃料管上是均匀的,因此求得每根燃料管上的流量 $w = W/N$ 与功率 $q = Q/N$;燃料管的数量 N 由总堆芯半径 R 与紧密排布的六角形燃料管对边距 p 求得,根据前文对反应堆几何布置形式的描述可知, $\pi R^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} p^2 \cdot N$,其中: R 为堆芯半径, N 为六角形燃料管数量, p 为六角形燃料管对边距;

步骤六:已知 w 与流道直径 d ,得到圆管流道内空气的流动 Re 数,管内对流换热的 Nu 数由经验关系式求得,具体为: $Nu(z) = 0.023 Re(z)^{0.8} Pr(z)^{0.4} \left[\frac{T_s(z)}{T_b(z)} \right]^{\frac{1.59}{z/d} - 0.57}$,其中: Re 为管内流动雷诺数, Pr 为空气普朗特数; z 为距离堆入口的距离($0 < z < L$); $T_b(z)$ 为空气沿管内流动的主流

温度分布,根据上一步已知的 w 、 q 、 T_2 、 T_3 由能量守恒求出;在已知主流温度与Nu数分布的情况下,并进而迭代求得堆内的壁面温度分布 $T_s(z)$;

步骤七:经上一步求得堆内温度分布后计算空气热物性;

步骤八:在已知堆内温度分布与物性的情况下,管内流动压降 $\Delta P_{2-3} = \int_2^3 (0.0007 + \frac{0.0625}{Re(z)^{0.32}}) \left[\frac{T_s(z)}{T_b(z)} \right]^{-0.5} \frac{w^2}{\rho(z)d} dz$,其中: Re 为管内流动雷诺数, z 为距离堆入口的距离($0 < z < L$);

$T_b(z)$ 、 $T_s(z)$ 为空气沿管内流动的主流温度分布与壁面温度分布; w 为管内空气流量, ρ 为空气密度, d 为流道内径;

步骤九:以步骤八求得的校正后的堆内压降为 ΔP_{2-3}^1 ,更新步骤二中预估的堆内压降值 ΔP_{2-3}^0 ,重复上述步骤二~步骤八,直到堆内压降求解收敛为止,确定堆稳态工作状态;

步骤十:热工分析步骤中所涉及的两个未知数为上述总堆芯半径 R 与紧密排布的六角形燃料管对边距 p ;满足要求的热工设计的堆内壁面温度最大值不能超过1644K,堆出口空气压力 P_3 不能低于喷管出口压力 P_4 ;在确定某一 p 值的前提下,为堆芯半径 R 输入一个接近于0的正初值,执行步骤二~步骤九解算堆内温度压力分布,随后迭代并不断增大 R 的值并重复上述步骤二~步骤九,直到计算出的最高壁面温度低于1644K并且堆芯出口压力 P_3 大于喷管出口压力 P_4 为止,此时输入的 R 值即为所求得的热工最低半径为 $R_{TH,min}$;

所述的物理分析具体包括:

步骤①:在蒙卡程序OpenMC中对燃料管进行建模,六角形燃料单元对边距 p 为可变的输入条件;该蒙卡模型的六个侧面设置为周期边界条件,用于表示这样的六角形单元的密集排布;设置堆内固体与空气温度分别为1350K与1048K;投入足量粒子数并展开蒙卡计算;

步骤②:对蒙卡计算结果后处理得到系统的无限增殖因数 k_∞ 和徙动长度 M ;由裸堆临界理论,对于给定长度为 L 的圆柱形状反应堆而言,其临界半径 R_c 满足: $\frac{k_\infty - 1}{M^2} = \left(\frac{2.405}{R_c} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2$,其中: k_∞ 为无限增殖因数, M 为徙动长度, L 为堆芯长度, R_c 为临界半径。

2. 根据权利要求1所述的综合物理热工分析的气冷反应堆固体堆芯体积最小化设计实现方法,其特征是,所述的气冷反应堆,具体设置于超声速运行在海平面上采用空气作为推进工质的直接循环冲压式核动力发动机中,该反应堆的圆柱状堆芯内设有若干作为基本单元的六角形燃料管,该燃料管为二氧化铀-氧化铍陶瓷燃料,采用高富集度二氧化铀燃料弥散在氧化铍基体中;燃料管中心为圆形冷却剂流道供空气流过;高速空气经由发动机进气口吸入并流经进气道,在反应堆堆芯入口处形成高压气流并进入堆芯内工质流道;作为冷却剂的空气流经堆芯并带走重核裂变产生的热量,在堆芯出口形成高温高压气体,最后经由尾喷管膨胀做功,以高排出速度返回大气。

综合物理热工分析的气冷反应堆固体堆芯体积最小化设计实现方法

技术领域

[0001] 本发明涉及的是一种核动力发动机领域的技术,具体是一种综合物理热工分析的气冷反应堆固体堆芯体积最小化设计实现方法。

背景技术

[0002] 针对小型固体反应堆的稳态概念设计需要考虑到包括热工水力、中子物理等多物理场的共同作用。对于热工设计,需要在满足堆内结构材料耐受温度上限的前提下尽可能提高冷却剂带出的中子裂变能;对于物理设计,需要评估系统的临界特性与燃耗特性,尽可能提高装置的使用寿命与中子经济性。对于装载在高速飞行器上的小型空气冷却固体推进反应堆来说,其首要目标是 minimized 堆芯尺寸以提高发动机推进性能,然而此前针对小型固体堆的概念设计指标大多仅考虑输出功率以及运转寿命要求,目前尚未有针对此类小型固体推进反应堆的最小化尺寸优化设计方案。

发明内容

[0003] 本发明针对现有技术存在的上述不足,提出一种综合物理热工分析的气冷反应堆固体堆芯体积最小化设计实现方法,同时考虑物理热工分析,从而获得该系统在同时满足热工水力安全特性和中子物理临界特性下的固体堆芯体积最小化设计,能够运用在小型固体堆芯反应堆的前期概念设计之中,对于其几何尺寸与物理热工性能的优化具有一定参考价值。

[0004] 本发明是通过以下技术方案实现的:

[0005] 本发明涉及一种综合物理热工分析的气冷反应堆固体堆芯体积最小化设计实现方法,通过热工分析得到气冷反应堆固体堆芯的最小热工半径,通过物理分析得到气冷反应堆固体堆芯的最小物理半径,取两者中的较大值即为综合考虑物理热工限制情况下的反应堆固体堆芯体积最小化设计方案。

[0006] 所述的气冷反应堆,具体设置于超声速运行在海平面上采用空气作为推进工质的直接循环冲压式核动力发动机中,该反应堆的圆柱状堆芯内设有若干作为基本单元的六角形燃料管,该燃料管为二氧化铀-氧化铍陶瓷燃料,采用高富集度(>90%)二氧化铀燃料弥散在氧化铍基体中;燃料管中心为圆形冷却剂流道供空气流过;高速空气经由发动机进气口吸入并流经进气道,在反应堆堆芯入口处形成高压气流并进入堆芯内工质流道;作为冷却剂的空气流经堆芯并带走重核裂变产生的热量,在堆芯出口形成高温高压气体,最后经由尾喷管膨胀做功,以高排出速度返回大气。

[0007] 所述的最小热工半径是指:在给定输出推力下使燃料壁面温度不超过上限的最低堆芯半径,具体通过构建进气道与喷管模型后,根据预估压降依次计算空气流量、热功率以及堆内温度分布后,进一步更新堆内空气物性后迭代得到校正后的压降,再根据堆内壁面温度最大值限制得到。

[0008] 所述的最小物理半径,即符合裸堆临界理论的临界半径,具体通过建立燃料管蒙卡模型并通过蒙卡计算得到无限增殖因子与徙动长度,然后基于裸堆临界理论计算得出临界半径得到。

附图说明

[0009] 图1为小型固体推进反应堆结构示意图;

[0010] 图2为综合物理热工分析的气冷反应堆固体堆芯体积最小化设计实现方法流程图;

[0011] 图3为不同 p/d 下反应堆堆芯最低物理、热工质量示意图;

[0012] 图中:两条线交点为 $p/d=1.5$ 。

具体实施方式

[0013] 如图1所示,为本实施例应用对象,即以超声速运行在海平面上采用空气作为推进工质的直接循环冲压式核动力发动机,高速空气经由发动机进气口1吸入并流经进气道2,在气锥作用下空气在进气道末端滞止,动压几乎全部转换为静压,在反应堆堆芯入口处形成高压气流并进入堆芯内细密的、呈蜂窝状排布的工质流道。空气将作为冷却剂流经堆芯并带走重核裂变产生的大量热量,在堆芯出口3形成高温高压气体,最后经由尾喷管4膨胀做功,以高排出速度返回大气。

[0014] 如图1所示,所述的反应堆堆芯内设有若干作为基本单元的六角形燃料管,该燃料管为二氧化铀-氧化铍陶瓷燃料,采用高富集度($>90\%$)二氧化铀燃料弥散在氧化铍基体中;燃料管中心为圆形冷却剂流道供空气流过,流道直径为 d ,六角形燃料管对边距为 p 。通过 N 个这样的六角形燃料管紧密排布,最终构成一个长度为 L 、半径为 R 的圆柱状堆芯。

[0015] 本实施例涉及针对上述应用环境的综合物理热工分析的气冷反应堆固体堆芯体积最小化设计实现方法,分别通过热工分析得到气冷反应堆固体堆芯的最小热工半径 $R_{TH,min}$,通过物理分析得到气冷反应堆固体堆芯的最小物理半径 $R_{N,min}$,取两者中的较大值即为综合考虑物理热工限制情况下的反应堆固体堆芯体积最小化设计方案。

[0016] 如图2所示,所述的热工分析,具体包括:

[0017] 步骤一:对于一个以 2.8Ma 速度飞行在海平面高度上的,如图1所示的核动力推进器而言,其所吸入的来自大气环境中的空气温度 T_1 与压力 P_1 可以根据标准大气模型求得。依据冲压式发动机进气段的绝热熵增压理论,可根据已知的 T_1 与 P_1 进一步求得反应堆入口处的空气温度 T_2 与压力 P_2 分别为 740K 与 1925kPa 。相关理论计算已经非常成熟,故不再列出求解公式,故将 T_2 与 P_2 均作为已知参数写入表1中。

[0018] 步骤二:空气流经反应堆内的流道后,将产生由于流动导致的空气压力损失。由于目前尚且不清楚空气在堆内流动的流量,因此首先预估堆内压损值为 $\Delta P_{2\rightarrow 3}^0$,已知堆入口压力 P_2 的前提下,得到堆出口压力 P_3 。由表1知,堆出口空气温度定在 1350K 。由此,堆出口的空气流动状态,即 T_3 与 P_3 均能确定。

[0019] 步骤三:依据冲压式发动机喷管的绝热熵增膨胀理论,可根据已知的 T_3 与 P_3 进一步求得反应堆入口处的空气温度 T_4 与压力 P_4 。空气在喷管出口的速度 U_4 远远大于其在喷管入口的速度 U_3 ,因此由能量守恒定律,在求得 T_3 与 T_4 的前提下,能够求得空气在喷管出口的速度

度 $U_4 = \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma-1} R_g (T_3 - T_4)}$, 其中: γ 为空气比热比, 取值为 1.4; R_g 为空气气体常数, 值为 287J·kg/K; T_3 与 T_4 分别为喷管进出口空气温度。

[0020] 步骤四: 由表1知总推力 F 为 120kN, 来流空气速度 U_1 为 2.8Ma, 且上一步求得了飞行器排出空气速度 U_4 , 故流经飞行器内部的总空气流量 $W = \frac{F}{(U_4 - U_1)}$, 其中: F 为推力, U_1 与 U_4 分别为飞行器吸入与排出空气温度, 稳态飞行下 U_1 恒为 2.8Ma, U_4 由上一步求得。

[0021] 步骤五: 现进行反应堆内流动传热特性分析, 可求解反应堆内空气的流动状态。已知堆进出口温度 T_2 与 T_3 , 又已知堆内空气总流量 W , 可根据能量守恒定律求解得到堆内总的燃料热功率 Q , 假定堆内流动传热在全部的 N 个燃料管上是均匀的, 因此能够求得每根燃料管上的流量 $w = W/N$ 与功率 $q = Q/N$ 。燃料管的数量 N 可以由总堆芯半径 R 与紧密排布的六角形燃料管对边距 p 求得, 根据前文对反应堆几何布置形式的描述可知, $\pi R^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} p^2 \cdot N$, 其中: R 为堆芯半径, N 为六角形燃料管数量, p 为六角形燃料管对边距。

[0022] 步骤六: 已知 w 与流道直径 d , 得到圆管流道内空气的流动 Re 数, 依据 Taylor 在 1970 年对圆管内空气流动换热的实验研究, 管内对流换热的 Nu 数由经验关系式求得, 具体为:

$$Nu(z) = 0.023 Re(z)^{0.8} Pr(z)^{0.4} \left[\frac{T_s(z)}{T_b(z)} \right]^{\frac{1.59}{z/d} - 0.57},$$

其中: Re 为管内流动雷诺数, Pr 为空气普朗特数; z 为距离堆入口的距离 ($0 < z < L$); $T_b(z)$ 为空气沿管内流动的主流温度分布, 可根据上一步已知的 w 、 q 、 T_2 、 T_3 由能量守恒求出。在已知主流温度与 Nu 数分布的情况下, 可以并进而迭代求得堆内的壁面温度分布 $T_s(z)$ 。

[0023] 步骤七: 空气物性 (比热、动力粘度、热导率等) 是与温度相关的多项式, 因此经上一步求得堆内温度分布后可以计算空气热物性。

[0024] 步骤八: 依据 Taylor 的实验数据, 在已知堆内温度分布与物性的情况下, 管内流动压降 $\Delta P_{2-3} = \int_2^3 \left(0.0007 + \frac{0.0625}{Re(z)^{0.32}} \right) \left[\frac{T_s(z)}{T_b(z)} \right]^{-0.5} \frac{w^2}{\rho(z)d} dz$, 其中: Re 为管内流动雷诺数, z 为距离堆入口的距离 ($0 < z < L$); $T_b(z)$ 、 $T_s(z)$ 为空气沿管内流动的主流温度分布与壁面温度分布; w 为管内空气流量, ρ 为空气密度, d 为流道内径。

[0025] 步骤九: 以步骤八求得的校正后的堆内压降为 ΔP_{2-3}^1 , 更新步骤二中预估的堆内压降值 ΔP_{2-3}^0 , 重复上述步骤二~步骤八, 直到堆内压降求解收敛为止, 确定堆稳态工作状态。

[0026] 步骤十: 结合表1, 上述热工分析步骤中所涉及的两个未知数为上述总堆芯半径 R 与紧密排布的六角形燃料管对边距 p 。由表2, 满足要求的热工设计的堆内壁面温度最大值不能超过 1644K, 堆出口空气压力 P_3 不能低于喷管出口压力 P_4 。在确定某一 p 值的前提下, 为堆芯半径 R 输入一个接近于 0 的正初值, 执行步骤二~步骤九解算堆内温度压力分布, 随后迭代并不断增大 R 的值并重复上述步骤二~步骤九, 直到计算出的最高壁面温度低于 1644K 并且堆芯出口压力 P_3 大于喷管出口压力 P_4 为止, 此时输入的 R 值即为所求得的热工最低半径为 $R_{TH, \min}$ 。

[0027] 所述的物理分析具体包括:

[0028] 步骤①: 对于一个正六角形的、中间挖去圆柱形空气流道的燃料管, 其材料为富集

度90%的二氧化铀-氧化铍陶瓷燃料,密度为 $3.65\text{g}/\text{cm}^3$ 。在蒙卡程序OpenMC中对这样一根燃料管进行建模,其长度 L 与圆形流道直径 d 如表1所示,六角形燃料单元对边距 p 为可变的输入条件。该蒙卡模型的六个侧面设置为周期边界条件,用于表示这样的六角形单元的密集排布。设置堆内固体与空气温度分别为1350K与1048K。投入足量粒子数并展开蒙卡计算。

[0029] 步骤②:对蒙卡计算结果后处理得到系统的无限增殖因数 k_{∞} 和徙动长度 M 。由裸堆临界理论,对于给定长度为 L 的圆柱形状反应堆而言,其临界半径 R_c 满足: $\frac{k_{\infty}-1}{M^2} = \left(\frac{2.405}{R_c}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2$,其中: k_{∞} 为无限增殖因数, M 为徙动长度, L 为堆芯长度, R_c 为临界半径。

[0030] 如表2所示,物理设计所需要满足的要求是反应堆裸堆临界。即在一给定的燃料管对边距 p 下由上一步骤求得的临界半径 R_c 就是反应堆物理最小半径 $R_{N,\min}$ 。

[0031] 为了验证图2所示方法的使用效果,计算了输入不同 p 值下的反应堆最低质量,并将结果绘制在图3中,该图横坐标为无量纲化的 p/d (d 值恒为5mm,如表1),两条线分别表示物理最小质量与热工最小质量。从图中可清晰地看出,固体反应堆的堆芯质量最小化方案在两条线相交处(即 $p/d=1.5$, $p=7.5\text{mm}$)处取到,此时最小半径为42.5cm,已知固体堆芯密度为 $3.65\text{g}/\text{cm}^3$,则对应的堆芯最低质量为1.49吨。这是能够同时满足物理与热工设计要求的最低质量。

[0032] 表1本方法分析过程中所涉及的常参数

	参数	值	参数	值	
[0033]	热工分析	飞行高度 H	海平面	飞行速度	2.8 Ma
		反应堆入口温度 T_2	740 K	反应堆入口压力 P_2	1925 kPa
		反应堆出口温度 T_3	1350 K	推力 F	120 kN
		反应堆长度 L	1.2 m	流道直径 d	5 mm
		空气比热比 γ	1.4	空气气体常数 Rg	287.68 J/kg-K
		其它空气物性	基于 NIST 数据库拟合的随温度变化的多项式		
物理分析	堆内固体平均温度	1350 K	堆内空气平均温度	1048 K	
	固体堆芯密度	3.65 g/cm ³			

[0034] 表2物理热工分析的设计准则

[0035]	热工	堆内流道壁面最高温度 $T_{w,\max} < 1644\text{ K}$
		反应堆出口空气压力不能低于环境压力, 即 $P_3 > P_4$
物理	六角形燃料管排布而成的圆柱形裸堆能够达到临界, 即 $R > R_c$	
总体	满足上述热工、物理准则下取堆芯尺寸最小的方案	

[0036] 与现有技术相比,本发明在同时满足反应堆物理与热工安全设计要求下,所设计的最小化堆芯能提供足够的推力输出,获得更好的推进性能。在同等推力要求120kN的前提下,已有的Tory II-C设计中反应堆固体堆芯尺寸为 $1.296*1.206\text{m}$ (长度*直径),质量达2.86吨,而本发明下获得的堆芯尺寸为 $1.2*0.85\text{m}$ (长度*直径),质量仅1.49吨,仅为已有设计的52%;另一方面,已有的XNJ140E推进反应堆尺寸为 $0.76*1.15\text{m}$ (长度*直径),质量约为

1.69吨,这与本设计下堆芯质量相当,但XNJ140E仅能提供37kN的推力输出,仅为本设计的1/3左右。综上,本发明下获得的堆芯设计相较于已有设计方法获得的结果来说具有优越性。

[0037] 上述具体实施可由本领域技术人员在不背离本发明原理和宗旨的前提下以不同的方式对其进行局部调整,本发明的保护范围以权利要求书为准且不由上述具体实施所限,在其范围内的各个实现方案均受本发明之约束。

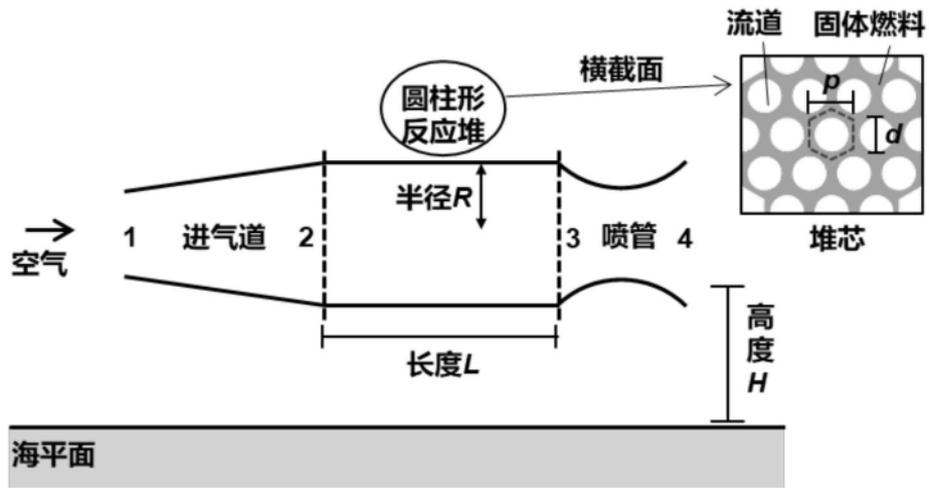


图1

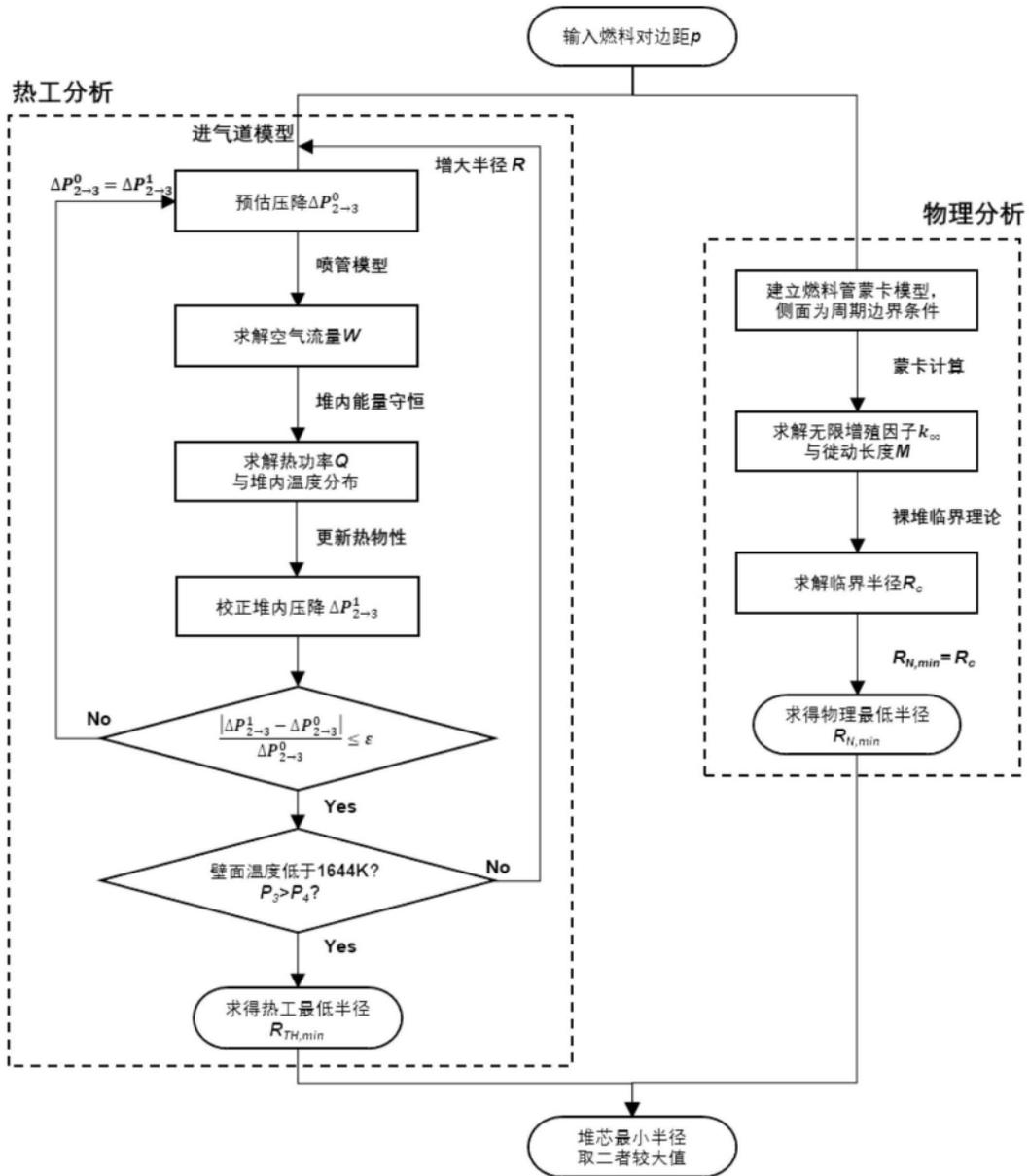


图2

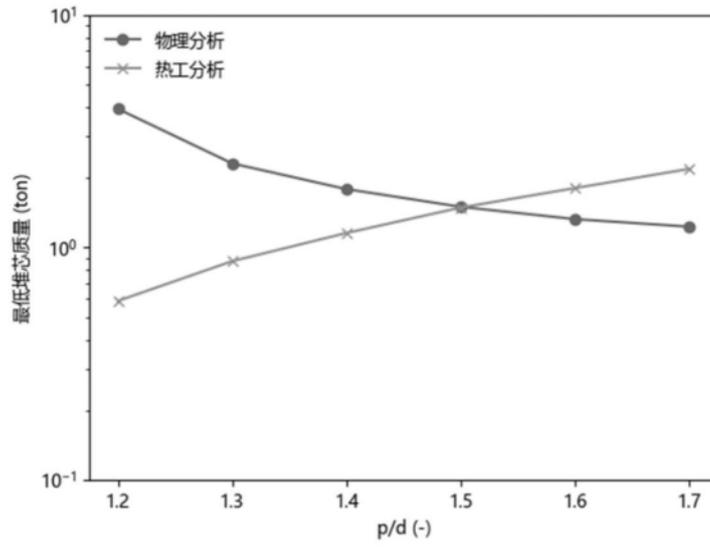


图3