

# HTR-PM 进气事故缓解措施初步分析

徐伟<sup>1</sup>, 石磊<sup>2</sup>

(1. 中国核电工程有限公司 郑州分公司, 河南 郑州 450000; 2. 清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

**摘要:** 热气导管双端断裂 (DEGB) 事故因其可能造成的严重后果逐渐引起研究者的大量关注。对于 200 MWe 球床模块式高温气冷堆 (HTR-PM), DEGB 进气事故是其事故安全分析中重点关注事故类型。针对 HTR-PM DEGB 进气事故, 提出了从装料管注入一定流量的氮气或氦气以缓解事故后果的方案, 并利用系统分析程序 TINTE-TIIXUW, 计算分析了注入不同流量氮气和氦气对进气事故的缓解效果。分析结果表明, 注入氮气时, 注气流量需达到一定值才能起到缓解效果, 而注入氦气时, 注气流量小或大均能有效缓解事故后果, 这为后续的实际工程应用提供了很好的参考和帮助。

**关键词:** HTR-PM; 进气事故; 注气流量; 缓解措施

中图分类号: TL364

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2017)12-2165-06

doi: 10. 7538/yzk. 2017. 51. 12. 2165

## Preliminary Analysis of Air Ingress Accident Mitigation Measure for HTR-PM

XU Wei<sup>1</sup>, SHI Lei<sup>2</sup>

(1. Zhengzhou Branch, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;  
2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Many concerns are paid to the double-ended guillotine break (DEGB) of horizontal gas duct accident because of the possible serious consequence. For the 200 MWe high temperature gas-cooled reactor pebble-bed module (HTR-PM), the DEGB of horizontal gas duct accident is very important for the safety analysis of HTR-PM. The method of injecting a certain flow of nitrogen or helium from the fuel charging tube was proposed to mitigate the consequence of the DEGB of horizontal gas duct accident. By using the system code TINTE-TIIXUW, the mitigation effect when injecting different mass flows of nitrogen or helium on the consequence of DEGB of horizontal gas duct accident was researched. According to the simulation result, the mass flow of nitrogen shall reach a certain value when the nitrogen can play a role in mitigating the consequence. However, as to the helium, both the small flow and the large flow can play a role in mitigating the consequence of air ingress accident, which will be helpful to the future engineering application as a good reference of mitigation measure.

**Key words:** HTR-PM; air ingress accident; mass flow of injected gas; mitigation measure

球床模块式高温气冷堆(HTR-PM)一回路压力边界由反应堆压力壳、热气导管压力壳和蒸汽发生器压力壳组成<sup>[1]</sup>,当一回路压力边界发生破裂时,可能会引起反应堆的进气事故。热气导管双端断裂(DEGB)事故,尽管发生概率极低,低于 $10^{-8}$ /(堆·年),在高温气冷堆安全分析中属于超设计基准事故(BDBA)<sup>[2-3]</sup>,但由于其可能造成严重后果仍引起了研究者的广泛关注。

针对高温气冷堆进气事故的缓解措施,许多研究者开展了大量工作。日本 JAEA 在 2008 年,首次提出了注入氦气的思想,并以 GTHTR300 装料管双端断裂进气事故为例,采用 CFD 模拟手段验证了从堆芯顶部注入小流量的氦气可有效阻止自然循环建立,起到缓解事故后果的作用<sup>[4]</sup>。美国 INL<sup>[5]</sup>在 2011 年指出,在大破口进气事故发生时, JAEA 所提出的缓解措施由于注气流量太小,不能抑制浮升力的形成而无法有效缓解事故后果。进一步地, INL<sup>[5]</sup>针对 DEGB 进气事故,提出了两种缓解事故后果的措施:一种是在反应堆底部冷却剂入口的另一侧开孔,将一定流量的氦气注入到热氦联箱;另一种是在反应堆压力容器和反应堆舱室之间设置一道反应堆屏蔽装置,并在反应堆屏蔽装置的底部开孔。INL<sup>[5]</sup>采用 CFD 数值模拟手段,以 GTHTR300 DEGB 进气事故为例,验证了上述两种缓解措施的有效性。

清华大学核能与新能源技术研究院针对 DEGB 进气事故的缓解措施也开展了一些研究。刘宝亭<sup>[6]</sup>在 1998 年针对 HTR-10 DEGB 事故的缓解措施提出了向堆腔注入砂子和  $\text{CO}_2$  气体的方案,并利用 THERMIX 程序初步分析了注砂和注  $\text{CO}_2$  对事故后果缓解的有效性及其可行性。Liu 等<sup>[7]</sup>在 2016 年针对 HTR-PM DEGB 进气事故提出了从装料管注入  $\text{N}_2$  的缓解方案。

根据现有研究结果,注气方案的候选气体主要有 He、 $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$ 。由 DEGB 事故的初步计算分析结果<sup>[8-9]</sup>可知,对于 HTR-PM, DEGB 事故后堆芯燃料平均温度仍在  $900\text{ }^\circ\text{C}$  以上,若注入  $\text{CO}_2$ ,则注入的  $\text{CO}_2$  会与堆芯石墨材料发生反应,反而使事故后果更加严重。因此,针对 HTR-PM DEGB 进气事故,本文以  $\text{N}_2$  和 He

为候选气体,利用 TINTE-TIIXUW 程序<sup>[10]</sup>分别分析从装料管注入不同流量的  $\text{N}_2$  和 He 对 DEGB 进气事故的缓解效果。

## 1 理论分析

对于 HTR-PM,进气事故的主要危害在于自然循环建立后,堆芯及反射层等石墨材料会被氧化性气体腐蚀,进而造成放射性释放增加或堆内结构材料机械性能降低。因此在采取从装料管注气等缓解措施时,主要从阻止或延缓自然循环的建立来考虑。从装料管注气的气体流向示意图示于图 1。

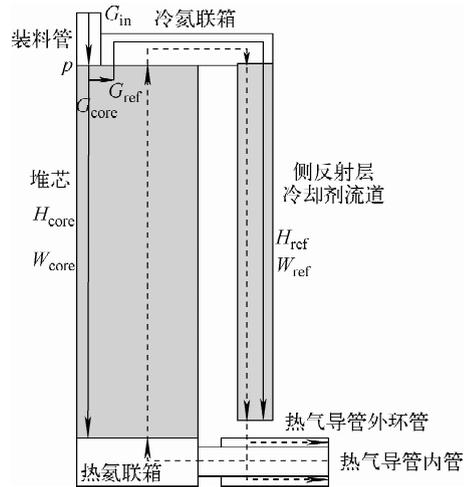


图 1 从装料管注气时气体流向示意图  
Fig.1 Schematic diagram of flow direction of injected gas from fuel charging tube

图 1 中,虚线为发生 DEGB 事故后建立稳定自然循环时混合气体的流向,实线为从装料管注入 He 或  $\text{N}_2$  时的气体流向。从装料管注入的气体一部分流向堆芯,一部分经冷氦联箱流向侧反射层冷却剂通道。若流经堆芯的气体可到达堆芯底部甚至从热气导管内管流出,则可有效阻止自然循环的建立。从装料管注入一定流量的气体,忽略气体在装料管的重位压降和摩擦压降,若从装料管注入的气体可到达堆芯底部,由能量守恒得到:

$$\frac{G_{in}^2}{2\rho_{in}A_{in}^2} + \rho_{in}gH_{core} \geq W_{core} + W_j + W_{ref} \quad (1)$$

其中:  $G_{in}$  为从装料管注入的气体流量,  $\text{kg/s}$ ;  $\rho_{in}$  为注入气体的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $A_{in}$  为装料管的截面积,  $\text{m}^2$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $H_{core}$  为堆芯高度,  $\text{m}$ ;  $W_{core}$  为堆芯阻力产生的压降,  $\text{Pa}$ ;  $W_j$  为从装料管到堆芯顶部空腔的局部损失,  $\text{Pa}$ ;  $W_{ref}$  为冷却剂通道摩擦阻力产生的压降,  $\text{Pa}$ 。即注入的气体流量  $G_{in}$  满足式(1)所示的条件时, 能保证注入堆芯的气体可从堆芯顶部流到堆芯底部。

从装料管到堆芯顶部空腔的局部损失为:

$$W_j = \left(1 - \frac{A_{in}}{A_{core}}\right)^2 \frac{G_{in}^2}{2\rho_{in}A_{in}^2} \quad (2)$$

其中,  $A_{core}$  为堆芯的截面积,  $\text{m}^2$ 。

堆芯阻力产生的压降<sup>[11]</sup>为:

$$W_{core} = \left( \frac{320}{Re} + \frac{6}{\left(\frac{Re}{1 - \epsilon_g}\right)^{0.1}} \right) \cdot \frac{1 - \epsilon_g}{\epsilon_g^3} \frac{1}{d_{fuel}} \frac{1}{2\rho_{core}} \left(\frac{G_{core}}{A_{core}}\right)^2 H_{core} \quad (3)$$

其中:  $\epsilon_g$  为堆芯的孔隙率;  $\rho_{core}$  为堆芯气体的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $d_{fuel}$  为球形燃料元件的直径,  $\text{m}$ ;  $Re$  为雷诺数。对于流过堆芯的气体, 其雷诺数为:

$$Re = \frac{G_{core}}{A_{core}} d_{fuel} / \eta \quad (4)$$

$$\eta = 3.674 \times 10^{-7} T^{0.7} \quad (5)$$

其中:  $G_{core}$  为流过堆芯的流量,  $\text{kg/s}$ ;  $\eta$  为气体的动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $T$  为气体温度,  $\text{K}$ 。

侧反射层冷却剂通道的摩擦压降为:

$$W_{ref} = \frac{\xi}{2\rho_{ref}A_{ref}^2} G_{ref}^2 \quad (6)$$

$$\xi = \zeta_a + \xi_{pipe} \quad (7)$$

$$\xi_{pipe} = \begin{cases} \frac{64}{Re} & Re \leq 2320 \\ \frac{64}{Re} + \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \frac{Re - 2320}{5680} & 2320 < Re \leq 8000 \\ \frac{64}{Re} + \frac{0.3164}{Re^{0.25}} & 8000 < Re \leq 10^5 \\ \frac{64}{Re} + 0.0054 + \frac{0.3964}{Re^{0.3}} & Re > 10^5 \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $G_{ref}$  为流过侧反射层冷却剂通道的流量,  $\text{kg/s}$ ;  $\rho_{ref}$  为冷却剂通道内气体的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $A_{ref}$  为冷却剂通道的截面积,  $\text{m}^2$ ;  $\xi$  为摩擦阻力系数;  $\zeta_a$  为附加阻力系数, 对于侧反射层冷却

剂通道,  $\zeta_a$  取 0.005 99;  $\xi_{pipe}$  为冷却剂通道的摩擦阻力系数。

若记  $f = G_{core}/G_{in}$ , 气体按不可压缩理想气体考虑, 则联立式(1)~(8)即可迭代求得  $G_{in}$ 。

考虑到在自然循环建立前且在堆芯燃料温度较高时注入气体, 选取在事故发生后第 51 h 从装料管注气。求解  $G_{in}$  所用的参数列于表 1。

表 1 求解注气流量所需的参数

Table 1 Parameter required to solve mass flow of injected gas

参数	数值
注气温度, $\text{K}$	308
装料管截面积 $A_{in}$ , $\text{m}^2$	0.003 318 3
堆芯高度 $H_{core}$ , $\text{m}$	11
侧反射层冷却剂通道长度 $H_{ref}$ , $\text{m}$	15
堆芯孔隙率 $\epsilon_g$	0.39
燃料元件直径 $d_{fuel}$ , $\text{m}$	0.06
堆芯气体平均温度, $\text{K}$	1 285
冷却剂通道内气体平均温度, $\text{K}$	786
堆芯流量占注气流量的比例 $f$	0.06

经计算得到, 若注入  $35^\circ\text{C}$  的氦气, 则所需注气流量为  $0.13 \text{ kg/s}$ ; 若注入  $35^\circ\text{C}$  的氮气, 则所需注气流量为  $1.2 \text{ kg/s}$ 。这里得到的注气流量是在忽略了装料管重力压降、摩擦压降、堆芯顶部顶反射层、冷氦联箱等压力损失的情况下得到的估计值, 为后续分析计算提供参考。

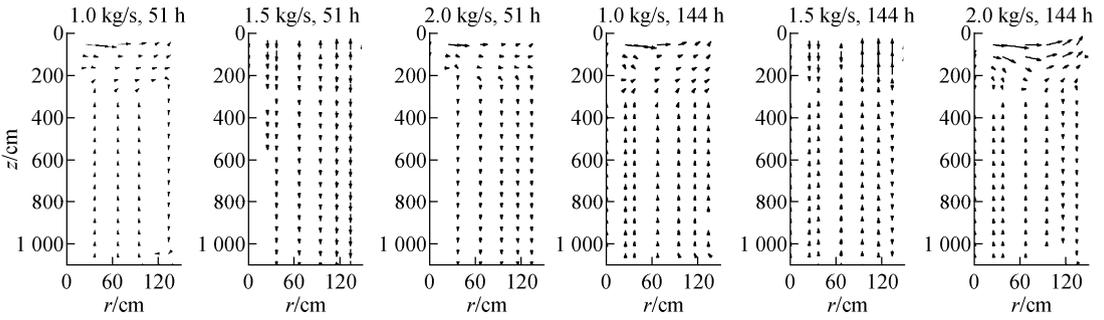
## 2 结果分析

在通过初步理论分析得到所需注气流量的基础上, 利用 TINTE-TIIXUW 程序, 重点分析注入不同流量的氮气和氦气对进气事故后果的影响。

### 2.1 注入氮气

由前文得到, 若从装料管注入的氮气可流经堆芯到达堆芯底部, 则注气流量约为  $1.2 \text{ kg/s}$ 。为完整分析注入惰性气体流量对事故后果的影响, 从装料管注入氮气的流量分别选取为  $1.0$ 、 $1.5$  和  $2.0 \text{ kg/s}$ 。图 2 示出不同注气流量时堆芯的流场分布。

当从装料管注入  $35^\circ\text{C}$  小流量的  $\text{N}_2$  时, 大部分的  $\text{N}_2$  流到侧反射层冷却剂通道内, 降低了侧反射层冷却剂通道内气体的温度, 且  $\text{N}_2$  的分子量较大, 注气后增加了形成自然循环的驱动

图2 不同 $N_2$ 注气流量时堆芯流场分布Fig. 2 Flow field distribution of reactor core with different  $N_2$  mass flows

力,一旦注气立即形成自然循环,反而加速了自然循环的建立。因此由图2可知,在51 h注入 $1.0 \text{ kg/s}$   $N_2$ 时,注气后立即形成了自然循环。在51 h注入 $1.5 \text{ kg/s}$   $N_2$ 时,克服了堆芯球床的阻力,混合气体在堆芯球床区域向下流动。但随着侧反射层冷却剂通道温度的降低,在某一时间后,侧反射层冷却剂通道内混合气体和堆芯内混合气体的密度差足以克服沿程阻力时,又重新建立了自然循环,即144 h时 $1.5 \text{ kg/s}$ 的堆芯流场。注入 $2.0 \text{ kg/s}$   $N_2$ 时的情况与注入 $1.5 \text{ kg/s}$ 时的情况类似。图3为注入不同流量 $N_2$ 时,反应堆内石墨总氧化量随时间的变化。

如图3所示,相比未注入 $N_2$ 时的情况,在51 h以 $1.0 \text{ kg/s}$ 注入 $N_2$ 时,反应堆内的总氧化量反而增加,而以 $1.5 \text{ kg/s}$ 或 $2.0 \text{ kg/s}$ 注入 $N_2$ 时,反应堆内的总氧化量减小。这是由于在51 h注入 $1.0 \text{ kg/s}$   $N_2$ 时,立即形成自然循环,相比未注气时,提前进入了长期氧化阶段,因此

反应堆内的总氧化量增加。在51 h以 $1.5 \text{ kg/s}$ 注入 $N_2$ 时,流过堆芯的气体可到达堆芯底部,抑制了自然循环的形成,相当于延缓了进入长期氧化阶段的时间。而一段时间后,随着侧反射层冷却剂通道内气体温度的降低,当冷却剂通道和堆芯内气体的密度差形成的驱动压头足以克服沿程阻力时,仍会形成自然循环,因此反应堆内的石墨氧化量最终仍会缓慢增加。但相比未注气的情况,一方面延缓了自然循环的建立,另一方面降低了堆芯和底反射层的温度,因此虽然氧化量逐渐增加,但是仍低于未注气时的总氧化量。以 $2.0 \text{ kg/s}$ 注入 $N_2$ 时,直到144 h还未形成稳定的自然循环,因此氧化量极小。在144 h注入不同流量 $N_2$ 时反应堆的温度和氧化量列于表2。

由表2可知,从降低燃料温度的角度,只要注入低温的氮气,均可有效降低燃料最高温度和平均温度;从减小石墨氧化量的角度,只有注入 $2.0 \text{ kg/s}$   $N_2$ ,方可保证既减小总的氧化量又减小堆芯局部最大氧化量;未注气时, $CO_2$ 大部分变为 $CO$ ,注入 $N_2$ 后,由于降低了堆芯的平均温度, $C/CO_2$ 反应速率降低,生成的 $CO$ 减少。因此从减小可燃气体生成量的角度而言,注入低温的 $N_2$ 均可减少可燃气体的生成量。

## 2.2 注入氦气

由前文分析结果可知,从装料管注入的He流量在 $0.13 \text{ kg/s}$ 以上时,流过堆芯部分的He才可到达堆芯底部。本文以氦气为注入气体,注气流量分别选取 $0.005$ 、 $0.05$ 和 $0.5 \text{ kg/s}$ ,利用TINTE-TIIXUW程序分析从装料管注入不同流量的He对DEGB事故的缓解效果。图4为在51 h和144 h注入不同流量氦气时堆芯的流场分布。

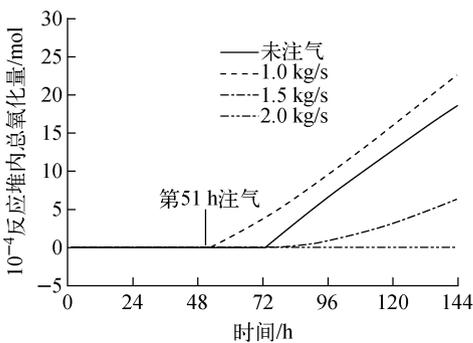
图3 不同 $N_2$ 流量时反应堆内总氧化量随时间的变化Fig. 3 Total graphite oxidation of reactor versus time with different  $N_2$  mass flows

表 2 144 h 注入不同流量  $N_2$  时反应堆的温度和氧化量Table 2 Temperature and graphite oxidation with different  $N_2$  mass flows at 144 h

参数	数值			
	未注气	1.0 kg/s	1.5 kg/s	2.0 kg/s
反应堆内总氧化量, mol	186 300	228 200	62 380	333.3
堆芯基体石墨氧化量, mol	140 100	136 300	54 360	249.9
底反射层石墨氧化量, mol	45 800	67 750	1 727	8.4
堆芯局部最大氧化量, mol/m <sup>3</sup>	16 760	18 660	18 220	100
出口处 CO 的摩尔分数	0.265	0.009	0.004 2	0
出口处 CO <sub>2</sub> 的摩尔分数	0.037	0.011	0.003 7	0
燃料最高温度, °C	1 210	1 083	1 082	1 108
燃料平均温度, °C	870	714	673	622
侧反射层冷却剂通道平均温度, °C	517	449	388	343

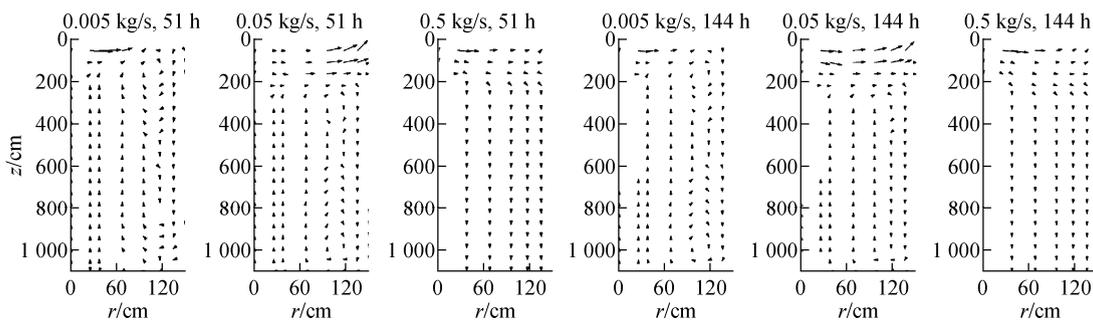


图 4 不同 He 注气流量时堆芯流场分布

Fig. 4 Flow field distribution of reactor core with different He mass flows

由图 4 可知,在 51 h 注气、注气流量为 0.005 kg/s 和 0.05 kg/s 时,堆芯由于存在温差,形成了局部对流,但与侧反射层冷却剂通道之间并未形成整体的自然循环。注气流量为 0.5 kg/s 时,从堆芯流场分布可看出,从装料管注入的气体,流过堆芯的那部分流量可克服堆芯球床阻力到达堆芯底部,抑制了自然循环的形成。在 144 h、注气流量为 0.005 kg/s 和 0.05 kg/s 时,堆芯仍存在局部对流,未与冷却剂通道形成整体的自然循环。注气流量为 0.5 kg/s 时,堆芯的气体流向仍向下,也未形成自然循环。可看出,即使氦气的注气流量仅为 0.005 kg/s,144 h 时也未形成稳定的自然循环。

由上述分析可知,如果选择氦气作为注入气体,即使从装料管注入氦气的流量很小,直到 144 h 时,也未与侧反射层冷却剂通道内的气

体形成稳定的自然循环。这是由于注入氦气后,堆芯和侧反射层冷却剂通道内几乎全部为氦气,氦气的分子量较小,而堆芯和冷却剂通道间的温差也减小,因此驱动压头减小,抑制了自然循环的建立。

表 3 为注入不同流量的氦气时反应堆的温度和氧化量。由表 3 可知,从降低燃料温度的角度,注入 3 种氦气流量均可降低燃料的平均温度,注入较大流量(0.5 kg/s)的氦气才可降低堆芯燃料最高温度。注入小流量(0.005 kg/s 或 0.05 kg/s)的氦气时,虽然燃料最高温度高于未注气时的燃料最高温度,但与设计限值 1 620 °C 相比仍有很大的差距。从降低反应堆内石墨氧化量和减少可燃气体生成量的角度,注入 3 种氦气流量均可有效减少石墨氧化量和可燃气体的生成量。

表3 144 h注入不同流量He时反应堆的温度和氧化量

Table 3 Temperature and graphite oxidation with different He mass flows at 144 h

参数	数值			
	未注气	0.005 kg/s	0.05 kg/s	0.5 kg/s
反应堆内总氧化量, mol	186 300	377	263.2	193.7
堆芯基体石墨氧化量, mol	140 100	356	242	173
底反射层石墨氧化量, mol	45 800	8.5	8.6	8.4
堆芯局部最大氧化量, mol/m <sup>3</sup>	16 760	187.2	138.5	98.3
出口处CO的摩尔分数	0.265	0	0	0
出口处CO <sub>2</sub> 的摩尔分数	0.037	0	0	0
燃料最高温度, °C	1 210	1 260	1 229	1 110
燃料平均温度, °C	870	857	808	629
侧反射层冷却剂通道平均温度, °C	517	497	489	347

### 3 结论

以HTR-PM热气导管双端断裂事故为研究对象,通过对比在事故发生第51 h注入不同流量的氮气和氦气时反应堆内的氧化量、温度等详细信息,综合考虑各因素,得出结论如下:

1) 注入气体为N<sub>2</sub>时,只有注入的流量足够大,如注入2.0 kg/s的N<sub>2</sub>,才可既降低燃料温度,又降低反应堆内的总氧化量和堆芯局部最大氧化量,有效缓解进气事故后果。

2) 注入气体为He时,若注入小流量的氦气,可减小形成自然循环的驱动压头,抑制自然循环的形成;若注入大流量的氦气,则氦气可从堆芯顶部流向底部,阻止了自然循环的建立。因此,注入氦气时,选择大流量或小流量,均可有效缓解进气事故的后果。

### 参考文献:

[1] 石磊,郑艳华. 球床模块式高温气冷堆失冷事故特性研究[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(增刊): 236-239.  
SHI Lei, ZHENG Yanhua. Characteristic behavior of pebble-bed modular high-temperature gas-cooled reactor during loss of forced cooling accidents[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(Suppl. ): 236-239(in Chinese).

[2] 刘鹏,郑艳华,石磊. 高温气冷堆进气事故中自然循环建立时间及影响因素分析[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(增刊): 342-346.  
LIU Peng, ZHENG Yanhua, SHI Lei. Analysis of onset time of natural circulation process and influence factor in air ingress accident of HTR [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(Suppl. ): 342-346(in Chinese).

[3] 刘鹏. HTR-PM进气事故研究及其关键特性分析[D]. 北京:清华大学核能与新能源技术设计研究院, 2016.

[4] YAN X L, TAKEDA T, NISHIHARA T, et al. A study of air ingress and its prevention in HTGR [J]. Nucl Technol, 2008, 163(3): 401-415.

[5] OH C H, KIM E S, NO H C, et al. Final report on experimental validation of stratified flow phenomena, graphite oxidation, and mitigation strategies of air ingress accidents[R]. USA: Idaho National Laboratory (INL), 2011.

[6] 刘宝亭. 10 MW高温气冷实验堆进气事故研究[D]. 北京:清华大学核能与新能源技术设计研究院, 1998.

[7] LIU P, CHEN Z, ZHENG Y, et al. Study on air ingress of the 200 MWe Pebble-bed Modular High Temperature Gas-cooled Reactor [J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, 98: 120-131.

[8] XU W, ZHENG Y, SHI L, et al. Oxidation analyses of massive air ingress accident of HTR-PM [J]. Science and Technology of Nuclear Installations, 2016, 2016(3): 1-9.

[9] 徐伟,郑艳华,石磊. 底反射层氧化对模块式高温气冷堆进气事故的影响分析[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(4): 694-699.  
XU Wei, ZHENG Yanhua, SHI Lei. Influence of bottom reflector oxidation on air ingress accident of HTR-PM [J]. At Energy Sci Technol, 2017, 51(4): 694-699(in Chinese).

[10] 徐伟. HTR-PM事故工况下石墨氧化分析[D]. 北京:清华大学核能与新能源技术研究院, 2017.

[11] KTA 3102.3 Reactor core design of high-temperature gas-cooled reactor, Part 3: Loss of pressure through friction in pebble bed cores[S]. [S. l.]: Sicherheitstechnische Regel des KTA, 1981.