



气体透平直接循环高温气冷堆安全分析方法及应用

Safety Analysis Method and its Application to Gas Turbine High-temperature Gas Cooled Reactor

万 力/WAN Li, 傅激扬/FU Ji-yang

清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

[摘要] 介绍了当前气体透平直接循环高温气冷堆的系统安全方法及其在 2 种不同堆型(球床堆和柱状堆)中的应用,并给出了柱状堆的一些瞬态计算结果。

[关键词] 高温气冷堆; 气体透平; 安全分析; Relap5

[文献标识码] A

[中图分类号] TL353+.1, TL364+.2

[文章编号] 1000-7857(2006)07-0030-05

Abstract: This article introduces the safety analysis method for two kinds of gas turbine high-temperature reactor (Prismatic-type HTR and Pebble-bed type HTR), and presents transient analysis results of emergency for GTHTR300.

Key Words: high-temperature gas cooled reactor; gas turbine; safety analysis; Relap5

CLC Numbers: TL353+.1, TL364+.2

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)07-0030-05

1 前言

高温气冷堆用氦气作冷却剂,石墨作慢化材料,采用包覆颗粒燃料和全陶瓷的堆芯结构材料。高温气冷堆具有安全性好、发电效率高、小容量模块化建造等特点,正好适应了全球正在兴起的电力系统非管制化发展趋势对发电厂的要求^[1]。中国和日本均已建成高温气冷实验堆。

按照石墨燃料组件的结构形式,高温气冷堆可分为 2 种。一种是柱状堆(Prismatic or block-type HTR),将颗粒燃料弥散在石墨基体内做成圆柱形燃料元件棒,再将元件棒按一定形式插入六角形石墨块的孔穴中,组成六角形燃料柱,燃料柱首尾相接串连成六角棱柱状燃料组件。整个堆芯由六角棱柱状燃料组件组成。另一种是球床堆(Pebble-bed type HTR),将颗粒燃料弥散在石墨基体内做成球形芯体,然后再覆盖一层石墨外壳。堆芯就是由这样的球状燃料元件堆成的。反应堆运行时,新的燃料球从反应堆顶部加入,烧过的燃料球依靠其本身自重,从反应堆的圆锥形底部卸出,经燃耗分析检测后,将没有烧透的燃料球送回堆芯继续使用,这样的好处是不用停堆换料^[2-3]。

气体透平直接循环高温气冷堆设计方案,是将气轮机(通常是氦气)与高温气冷堆(通常是模块式)相结合,利用流出高温堆的高温工质来直接推动气轮机进行高效率发电。作为非常有潜力的第四代核能系统的堆型之一,气体透平直接循环高温气冷堆得到了世界一些核能技术发达国家的重视^[4]。其中南非的 PBMR 项目起步最早,目前已经开工;美国和俄罗斯合作,初步完成了 GT-MHR 项目的设计^[5-6];日本正在为 GTHTR 300 设计方案进行功能

模拟试验^[7];我国清华大学在 HTR-10 的基础上,开展了 HTR-10 GT(Gas Turbine)项目的研究^[8-10]。

2 反应堆安全分析

反应堆安全分析研究反应堆及其回路系统在各种事故工况下的瞬态过程。通过安全分析,可以确定反应堆在各种瞬态工况下的热工水力学特性,提出所需的各种安全保护系统及其动作的整定值和动作时间,指定合理的运行规程,并对反应堆稳态设计提出修正。

反应堆安全分析比较复杂,需要对它的物理过程建立起一系列计算模型。早期对堆内热工水力过程的机理了解不深,理论分析和实验研究都不充分,加上反应堆的运行经验也很少,所以计算模型比较粗糙。出于安全考虑,在设计中留有较大的裕量,经济性不高。在 20 世纪 60 年代之后,随着核能的发展,对反应堆的安全性和经济性的要求越来越高,推动了热工水力分析的发展。对于事故分析,所考虑的工况越来越全面、深入,分析模型日益精细,尤其对于人们比较关心的大破口和小破口事故进行了大量的实验研究和理论研究,建立了许多先进的物理模型和数学模型,并在此基础上编写了一些通用事故分析程序,如 Relap5、RETRAN 等。其中 Relap5 计算程序是 Idaho 国家工程实验室(INEL)为美国核管会(NRC)开发的一个轻水堆瞬态分析程序,可用于规程指定、审评计算、事故减缓措施的评价、操作员规程评价和实验计划的分析等方面。Relap5 可以对轻水堆系统中诸如大破口失水事故、小破口失水事故、控制棒误操作、旁路阀误操作、未能紧急停堆的预计瞬变以及给水丧失、发电机负荷丧失、全厂停

收稿日期: 2006-04-26

作者简介: 万 力,男,北京海淀区清华园路清华大学核能与新能源技术研究院,助理研究员,主要从事反应堆结构分析方面的研究;
E-mail: liwan@tsinghua.edu.cn



电、核电站汽轮机脱扣等进行模拟,即几乎所有的热工水力瞬变和事故谱。Relap5 可以模拟多种部件模型,如容器、管道、泵、阀、安注箱、电加热器、汽轮机、分离器、蓄压箱、控制系统部件等。此外,还可以对一些特殊过程建立分析模型,如流道面积突变、流道分支、壅塞流、硼跟踪、不凝气体迁移等引起的效应^[11]。Relap5 采用了大量应用实例和多个国家的实验数据进行比较验证,是目前应用最广泛的核电站安全分析软件。由于气体透平直接循环高温气冷堆的独特系统结构,为水堆(包括压水堆、沸水堆、重水堆等)开发的通用反应堆瞬态事故分析软件已不再适用。

3 球床高温气冷堆分析

荷兰的 ACACIA (AdvanCed Atomic Cogenerator for Industrial Applications) 项目计划通过一个小型核电站来代替传统的热源。高温堆(HTR)是一个非常合适的方案,它的革新之处在于,冷却剂直接从反应堆流向能量转换系统(ECS)。氦气作为冷却剂,就意味着需要采用气体透平和压缩机,因此,ECS的热工动力循环是直接布来登循环(direct Brayton cycle)^[12]。ACACIA 的总体结构如图 1 所示,布来登循环如图 2 所示。由于德国对球床高温气冷堆进行了大量的研究,因此球床高温气冷堆在欧洲更加受欢迎。

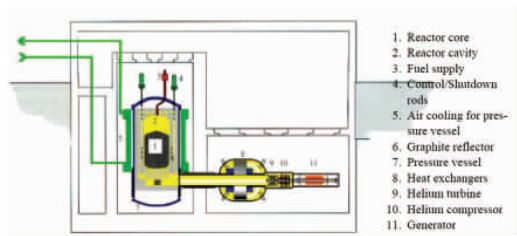


图 1 ACACIA 的总体结构^[13]

Fig. 1 The layout of ACACIA plant^[13]

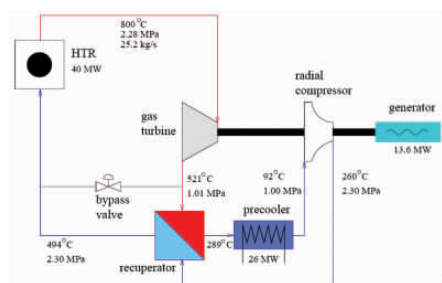
图 2 ACACIA 的布莱登循环图^[13]

Fig. 2 The schematic Brayton cycle of the ACACIA plant^[13]

对于球床高温气冷堆,如果考虑精确的堆芯模型,其动态安全特性的计算方法如图3所示。其中 Wims7 程序用于创建核数据库。Panther 程序用于计算反应堆中稳态的,以及随时间变化的能量分布,并考虑热工水力学反馈。Thermix-Direkt 程序用于在柱坐标系下计算由于热量的对流、辐射和传导而引起的球床温度分布。其中 Thermix 程序用于计算 HTR 球床内的热量传输;Direkt 程序用于计算堆芯内随时间变化的气体温度分布;Talink 程序用于控制不同的瞬态分析软件之间数据的传输。通过 Talink 软件,将其他几个独立的分析处理过程连接起来。主要的热工水力学计算中采用 Relap5/mod 3.2 程序,利用 Relap5 中的控制系统,可以模拟很多热工水力部件^[13]。Relap5 广泛应用于轻水堆核电站事故工况分析。它采用了均质两相流模型,分别对水和汽应用质量守恒、动量守恒和能量守恒方程,以及流体与固体间的热传递。高温气冷堆的冷却剂通常只有氦气,是单相的,热工水力学模型比水堆要简单,因此分析时可以采用 Relap5 软件。同时作为被广泛使用的通用软件,Relap5 已经通过了大量试验和标准考题的验证。

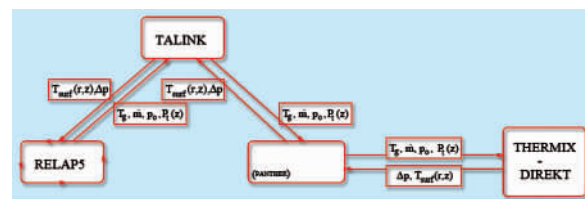


图 3 ACACIA 的分析结构^[13]

Fig. 3 Detailed calculational model for the HTR^[13]

4 柱状高温气冷堆分析

日本原子力研究所(JAERI)从1960年后期开始了高温气冷堆的技术研究,在大洗研究所建成了30 MW高温气冷实验堆(HTTR)。该堆采用六角形燃料棒,石墨作慢化剂,1998年获得最大出口温度950℃,2001年获得出口温度850℃的满功率运行。在HTTR设计和运行经验的基础上,JAERI开始气体透平高温气冷堆项目(GTHTR 300)。该项目计划在2010年建设安全、经济的、有竞争力的商用反应堆。其低浓缩铀燃料的燃耗度较高(112 GWd/t),燃料换料周期为2年。GTHTR 300采用气体透平直接循环系统,出口温度850℃,提供电能约300 MW。GTHTR 300及其相关气体透平技术的研究在2001~2007年展开^[6,14,15]。

GTHTR300 采用气体透平直接循环方式(其总体结构见图 4, 布来登循环见图 5), 在 Relap5 中没有透平和压缩机的水动力学部件模型, 需要对 Relap5 软件进行修改, 定制专门计算气体透平直接循环高温气冷堆的分析模块。Relap5 软件本身具有开放性^[11], 泵(Pump)部件在物理特性上与透平和压缩机类似, 可以在 Relap5 中对泵部件的属性定义进行修改, 使之能够模拟透平和压缩机。JAERI 与 CSAJ 公司合作, 为直接循环高温气冷堆安全分析定制了 Relap5 软件。分析采用点堆中子动力学模型。

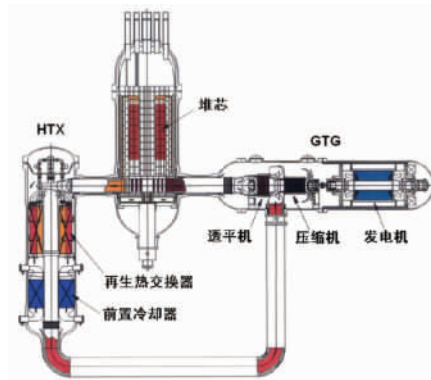


图4 GTHTR 300 的总体结构^[15-18]

Fig. 4 The layout of GTHTR 300 plant^[15-18]

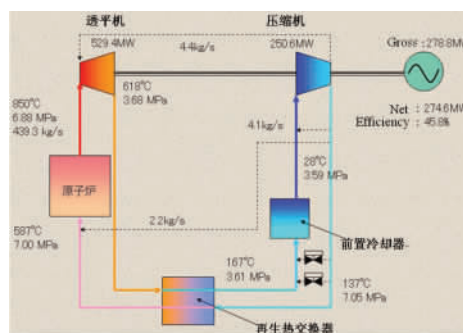
图 5 GTHTR 300 的布来登循环图^[18]

Fig. 5 The schematic Brayton cycle of the GTHTB 300 plant^[18]

瞬态分析的内容包括 RPV/PCV 间二重管内管破断、RPV/PCV 间二重管内外管破断、30%功率运行过程中控制棒误拔出、发电机负荷突然丧失、旁路控制阀误开启、前置冷却器冷却水管破断、控制棒导管破断事故、氦气供给阀误开启等。本文给出了二重管破裂的 3 种事故工况下的反应堆动态特性分析结果。

4.1 二重管内管小破口分析

4.1.1 分析条件

RPV/PCV 间的二重管内管瞬时出现小裂口, 裂口直径约为 0.1 m (内管截面积为 1.58 m^2), 氦气冷却剂从内管流入外管。在破裂的瞬间, 透平和压缩机保持机能。如果满足以下条件之一: ① 反应堆输出高于 696 MW; ② 反应堆出口冷却剂温度高于 890°C ; ③ 1 次冷却剂压力低于 1.2 MPa, 则系统控制棒紧急落棒制动。

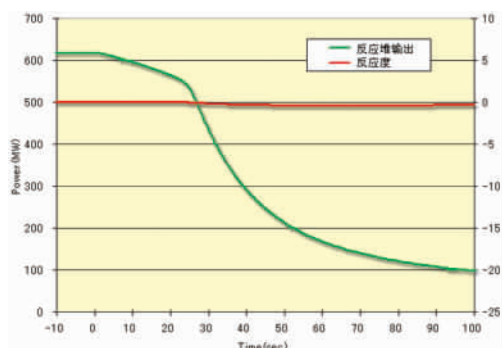


图 6 反应堆输出功率和反应性

Fig. 6 The output power and reactivity of the reactor core

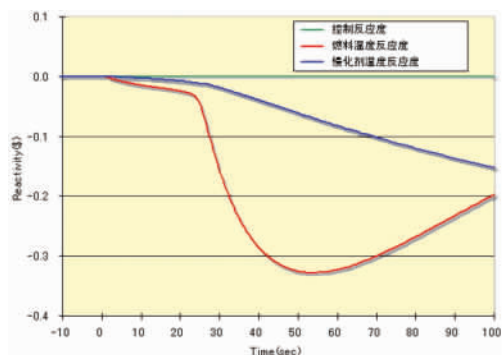


图 7 控制、燃料温度和慢化剂温度反应性

Fig. 7 Control reactivity, fuel temperature reactivity and moderator temperature reactivity

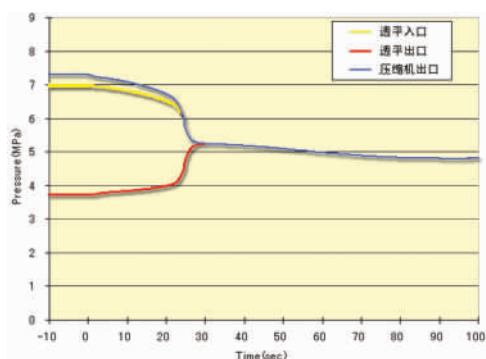


图 8 透平入口和出口以及压缩机出口的压力

Fig. 8 Temperature at the inlet and outlet of turbine, and the outlet of compressor

4.1.2 分析结果

控制棒无制动。反应堆的输出随时间增长而降低, 燃料最高温度约 1469°C (时间约为 44 s)。透平和压缩机的冷却剂流量逐渐减少, 大约在 25 s 左右迅速降到最低值附近, 相应的透平的压缩比也逐渐增加, 压缩机的压缩比逐渐降低, 在 25 s 左右趋近于 1.0。图 6~8 给出了二重管内管瞬时出现小裂口工况下能量、反应性、温度、压力等物理量随时间变化的历程。

4.2 二重管外管小破口分析

4.2.1 分析条件

RPV/PCV 间的二重管外管瞬时出现小裂口, 裂口直径约为 0.2 m (外管截面积为 2.138 m^2), 氦气冷却剂流出。在破裂的瞬间, 透平和压缩机保持机能。如果满足以下条件之一: ① 反应堆输出高于 696 MW; ② 反应堆出口冷却剂温度高于 890°C ; ③ 1 次冷却剂压力低于 1.2 MPa, 则系统控制棒紧急落棒制动。

4.2.2 分析结果

控制棒无制动。反应堆的输出随时间增长稍有增加, 在 20 s 以后大幅度降低, 燃料最高温度约 1477°C (时间约为 41.2 s)。透平和压缩机的冷却剂流量逐渐减少, 大约在 21 s 左右迅速降到最低值附近。相应的透平的压缩比也逐渐增加, 压缩机的压缩比逐渐降低, 在 22 s 左右趋近于 1.0。图 9~11 给出了二重管内管瞬时出现小裂口工况下能量、反应性、温度、压力等物理量随时间变化的历程。

4.3 二重管内外管同时小破口分析

4.3.1 分析条件

RPV/PCV 间的二重管内外管同时瞬时出现小裂口, 内管裂口直径约为 0.1 m (内管截面积为 1.58 m^2), 外管裂口直径约为 0.2 m (外管截面积为 2.138 m^2), 氦气冷却剂流出。在破裂的瞬间, 透平和压缩机保持机能。如果满足以下条件之一: ① 反应堆输出

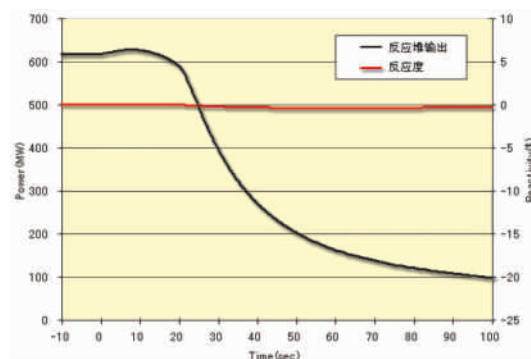


图 9 反应堆输出功率和反应性

Fig. 9 The output power and reactivity of the reactor core

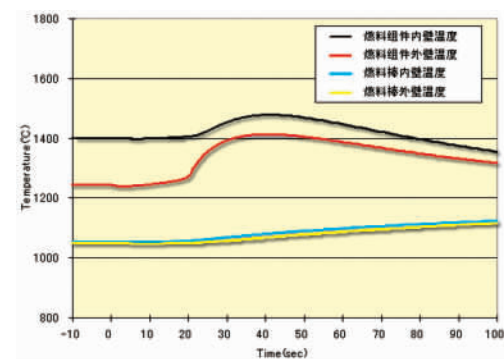


图 10 燃料组件和燃料棒的内外壁温度

Fig. 10 Temperature of the fuel assembly and fuel rod

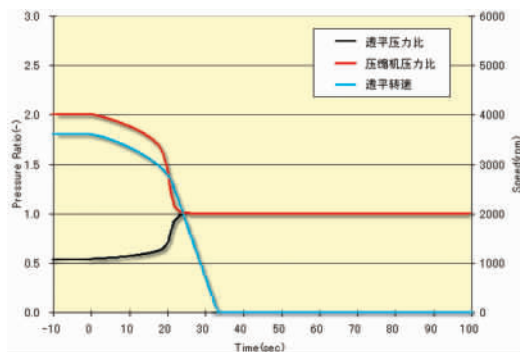


图 11 透平和压缩机的压力比以及透平转速
Fig. 11 The pressure ratio of the turbine and compressor, and the rotational speed of the turbine

高于 696 MW;② 反应堆出口冷却剂温度高于 890℃;③ 1 次冷却剂压力低于 1.2 MPa,则系统控制棒紧急落棒制动。

4.3.2 分析结果

控制棒无制动。反应堆的输出随时间增长而逐渐降低,燃料最高温度约 1 476℃(时间约为 34.4 s)。透平和压缩机的冷却剂流量逐渐减少,大约在 16 s 左右迅速降到最低值附近,相应的透平的压缩比也逐渐增加,压缩机的压缩比逐渐降低,在 17 s 左右趋近于 1.0。图 12~14 给出了二重管内外管瞬现同时出现小裂口工况下能量、反应性、温度、流量和压力等物理量随时间变化的历程。

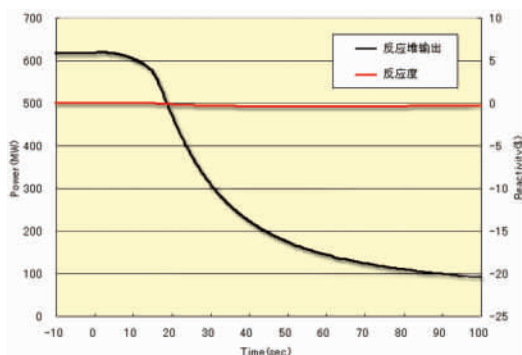


图 12 反应堆输出功率和反应性
Fig. 12 The output power and reactivity of the reactor core

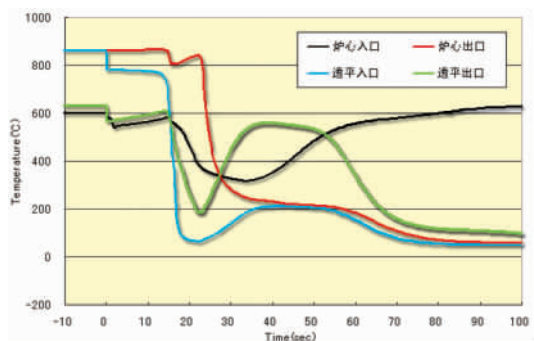


图 13 反应堆芯出入口等温度
Fig. 13 The temperature of the inlet and outlet of the reactor core

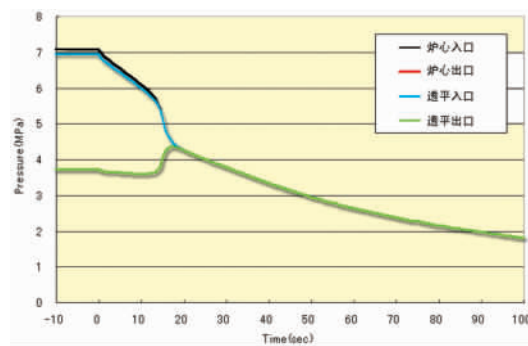


图 14 堆芯出入口等压力
Fig. 14 The pressure at the inlet and outlet of the reactor core

5 小结

介绍了当前气体透平直接循环高温气冷堆的系统安全方法及其在 2 种不同堆型(球床堆和柱状堆)中的应用。其中,球床高温气冷堆以荷兰的 ACACIA 为例,柱状高温气冷堆以日本的 GTHTTR 300 为例。由于水堆的安全分析软件 Relap5 具有很好的开放性,因此这 2 种堆型高温气冷堆的热工水力学分析都基于 Relap5。本文给出了柱状堆 GTHTTR 300 的一些瞬态计算结果,包括二重管内管的小破口、外管的小破口以及内外管小破口 3 种事故工况。分析结果表明,采用这种分析方法是可行的。但同水堆一样,直接透平高温气冷堆的模拟分析结果也需要实验来验证。

(致谢:感谢日本原子力研究所大洗研究所国富一彦博士和片西昌司主任研究员的帮助。)

参考文献 (References)

- [1] 吴宗鑫. 我国高温气冷堆的发展[J]. 核动力工程, 2000(21): 39-43.
- [2] 郭国伟编. 核反应堆工程设计[M]. 北京: 原子能出版社, 1997.
- [3] 卢银娟, 杨宇, 石侠民. 球床模块式高温气冷堆的研究及发展现状[J]. 核电站, 2002(11): 1-8.
- [4] WILLIAM K. Terry. Modular pebble-bed reactor project, laboratory-directed research and development program [R]. FY 2001 annual report.
- [5] Modular Pebble Bed Reactor Project [R]. University Research Consortium, Annual Report, INEEL/EXT-2000-01034, MIT-ANP-PR-075, 2000.
- [6] KAZUHIKO KUNITOMI, SHOJI KATANISHI. Safety philosophy of the GTHTTR300[C]. In: SMIRT 17, Prague, Czech Republic, August 17-22, 2003.
- [7] 王捷. 高温气冷堆氦气透平循环热工特性的初步研究 [J]. 高技术通讯, 2002(12): 91-95.
- [8] 彭学创, 朱书堂, 王捷. 高温气冷堆氦气透平直接循环的实际特性研究[J]. 核科学与工程, 2005(25): 301-306.
- [9] 王捷. 高温气冷堆技术背景和发展潜力的初步研究 [J]. 核科学与工程, 2005(25): 325-330.
- [10] 林立志, 杨小晶, 林雷. 高温气冷堆核电站——新型的核能发电技术 [J]. 核能技术, 2004(8): 30-31.
- [11] INFORMATION SYSTEMS LABORATORIES. INC. Nuclear safety analysis division. Relap5 user manual [C]. Rockville, Maryland: Idaho Falls, Idaho. Information systems laboratories. 2001.
- [12] Kikstra J F. Modelling, design and control of a cogenerating nuclear gas turbine plant [D]. Delft: Delft University of Technology, 2001.

万 力,等: 气体透平直接循环高温气冷堆安全分析方法及应用

- [13] EWOUT VERKERK. Dynamics of the pebble-bed nuclear reactor in the direct brayton cycle [D]. Delft: Delft University of Technology, 2001.
- [14] KAZUHIKO KUNITOMI, SHIGEAKI NAKAGAWA, SHUSAKU SHIOZAWA. Safety evaluation of the HTTR [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 233: 235-249.
- [15] KAZUHIKO KUNITOMI, SHOJI KATANISHI, et al. Japan's future HTR-the GTHTR300 [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 233: 309-327.
- [16] KAZUHIKO KUNITOMI, SHOJI KATANISHI, et. al. R&D on the

power conversion system for gas turbine high temperature reactors [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 233: 329-346.

- [17] KAZUHIKO KUNITOMI, SHOJI KATANISHI, et. al. Reactor core design of Gas turbine high temperature reactor 300 [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 230: 349-366.
- [18] YAN X, KUNITOMI K, T. NAKATA, et al. GTHTR300 design and development [J]. Nuclear Engineering and Design, 2003, 222: 247-262.

(责任编辑 李慧政)

·封面文字说明·

动物新物种被证实可由异种杂交而来

6月15日,英国《自然》杂志发表的一篇研究论文表明,分属两个不同物种的蝴蝶通过杂交产生了一个蝴蝶新物种(Nature, vol 441, p 868)。这是生物学家首次发现动物的新物种可由异种杂交的方式产生,此前只发现过植物的新物种可由异种杂交而来。

按照通常的理解,不同的物种就意味着生殖隔离,也就是说,不同物种之间无法繁殖出具有生殖能力的后代。骡子是由2个不同的物种——马和驴——交配出来的,但它并不能生育自己的后代,这就是生殖隔离的一种表现。然而,巴拿马史密松热带研究所和哥伦比亚安第斯大学的一组生物学家却发现了一个例外。

他们发现,在美洲中部和南部有一种名为 *Heliconius heurippa* 的蝴蝶是另外2种蝴蝶——*H. cydno* 和 *H. melpomene*——杂交而来的。*H. cydno* 蝴蝶的翅膀上有黄色的条纹,*H. melpomene* 蝴蝶的翅膀上有亮红色的条纹,而杂交出的 *H. heurippa* 蝴蝶翅膀上则同时具有黄色和红色的条纹。

研究人员在实验室中将 *H. cydno* 蝴蝶和 *H. melpomene* 蝴蝶杂交,仅仅经过3代就得到了外形与自然界中非常相近的 *H. heurippa* 蝴蝶。而这里有一个关键性的问题是,这种新得到的蝴蝶是否会反过来与 *H. cydno* 蝴蝶或 *H. melpomene* 蝴蝶杂交,从而使得物种向原来的状态倒退。为了弄清楚这一点,研究人员让 *H. heurippa* 蝴蝶在3种蝴蝶中选择自己的配偶,结果发现,雄性 *H. heurippa* 蝴蝶选择与同种雌蝶交配的可能性比其他2种雌蝶交配的可能性高出了75%-90%。*H. heurippa* 蝴蝶倾向于选



择与自己的同类交配,这表明它们已经具有了生殖隔离的特点。

有趣的是, *H. heurippa* 蝴蝶是完全通过花纹来选择配偶的。当研究人员向它们展示绘有与不同种蝴蝶花纹相似的图片时, *H. heurippa* 蝴蝶显示出了与真实蝴蝶接触过程中相同的被取悦程度。研究人员还发现,假如把雌性 *H. heurippa* 蝴蝶翅膀上的红色或者黄色斑点盖住,那么就会发现它对雄性 *H. heurippa* 蝴蝶不再具有吸引力。在野外,这种性偏爱对物种的繁殖有着极大的影响。

2006年早些时候,另一组研究人员曾发表研究结果,称 *H. cydno* 对颜色的偏好来源于特定基因的控制(Proceedings of the National Academy of Sciences, vol 103, p 6575)。这或许意味着, *H. heurippa* 这一新物种产生之初,它们也在基因的控制

制之下对同种蝴蝶产生偏好。

在以前的认识中,新的物种是从谱系中分化出来的,而《自然》杂志此次发表的研究则可能预示着自然界中由异种杂交产生新物种也是一种普遍现象。当然,也有一些生物学家对该研究的结论表示谨慎,他们认为还需要更多的基因数据才能确定 *H. heurippa* 真的是一个新物种。

本期封面图片是研究人员在实验室中培育出的 *H. heurippa* 蝴蝶照片,由新华社提供。实验室中的 *H. heurippa* 蝴蝶与野外的同种蝴蝶十分相似,但翅膀上条纹的颜色还是有些差别,野外 *H. heurippa* 蝴蝶的条纹更明显地显示出红、黄两色。

(本刊记者 黄永明)