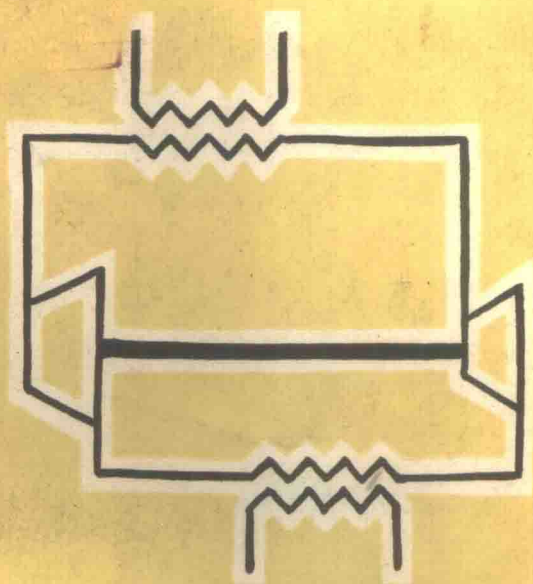




А.И. 米哈伊洛夫 В.В. 鲍里索夫 Э.К. 卡利宁

封闭循环气体涡轮装置

科学出版社

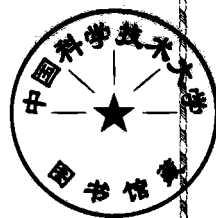
封閉循环气体涡轮裝置

(原理和計算)

A. И. 米哈伊洛夫 B. B. 鮑里索夫

Э. К. 卡利宁著

曹孝瑾 馬同泽譯



科 学 出 版 社

1964

А. И. МИХАЙЛОВ, В. В. БОРИСОВ, Э. К. КАЛИНИН
ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ ЗАМКНУТОГО
ЦИКЛА

(теория и расчет)

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

Москва 1962

內 容 簡 介

书中作了关于封闭循环气体涡轮装置的文献总结,列出了封闭循环气体涡轮装置的设计方法,并对以各种气体作为工质的叶片机械级的设计提出了一些推荐资料,列出了换热设备的计算方法并指出了降低其重量和尺寸的途径,以二氧化碳、氮和氦为工质进行了具体的计算和分析。书末附有计算用气动函数表。

本书可供原子能动力、叶轮机等方面的设计、科研、教学工作者和工程技术人员参考。

封閉循环气体涡轮装置

А. И. Михайлов等著

曹孝瑾 馬同泽译

科学出版社出版

北京朝阳门大街 117 号

北京市书刊出版业营业许可证出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1964 年 10 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1964 年 10 月第一次印刷 印张: 5 1/2

印数: 0001—3,250 字数: 144,000

统一书号: 15031·163

本社书号: 3076·15

定价: [科七] 0.95 元

目 录

緒論	1
第一章 封閉循环气体渦輪发动机的热力計算	13
1. 确定沿封閉循环气体渦輪发动机通道的气流参数	13
2. 封閉循环气体渦輪发动机的有效功和有效效率	20
3. 循环参数对封閉循环气体渦輪发动机的有效功和有效效率的 影响	24
第二章 封閉循环气体渦輪发动机中的回热与气体中間 冷却	28
第三章 工质的性质对气体渦輪发动机循环主要参数的 影响	32
第四章 封閉循环气体渦輪发动机的叶片机械	40
1. 軸流式压缩机	40
2. 渦輪压缩机軸轉速的确定	53
3. 軸流式渦輪	58
第五章 封閉循环气体渦輪发动机的換热設備	69
1. 冷却器計算方法	70
2. 回热器計算方法	79
第六章 借强化通道中的放热以减小封閉循环气体渦輪裝置中換 热設備的尺寸和重量的可能性	91
1. 問題的提出	91
2. 問題的現况	94
3. 管道中人工扰动流体方法的选择和基础	102
4. 对流动之定性图形的直观观察	124
附录	127
参考文献	170

緒 論

战前年代科学和生产发展中的成就为出現第一批能工作的新型发动机——气体涡轮¹⁾創造了前提。这些气体涡轮是固定式装置，它們大部分是由瑞士公司制造的。

然而，气体涡轮的空前蓬勃发展开始于第二次世界大战以后。在这个时期，为了急剧提高飞机的飞行速度和高度，展开了紧张的工作。为了这个目的需要建造具有大功率和小重量的发动机，而显著提高活塞式航空发动机功率的尝试遭到了巨大的困难。

那时唯一能解决在航空中急剧提高功率这一问题的发动机是气体涡轮发动机，特别是它的变型——涡轮喷气式和涡轮螺旋桨发动机。此外，涡轮喷气发动机还开辟了克服飞行速度的声障（这是具活塞式发动机的飞机所根本达不到的）的道路。

气体涡轮发动机的这种潜力保证了迅速地把它們用在航空上。在极短的时期內，几乎所有的軍用飞机、然后是大部分民用客机都装备了涡轮喷气或者涡轮螺旋桨发动机。

在航空上采用气体涡轮发动机不仅可以走出前述飞行速度上的絕境，并且还标志着航空发展上的新紀元。

在其它动力部門中，气体涡轮的采用进行得非常慢。

然而在最近十年中，气体涡轮装置开始日愈广泛地应用于各个不同的动力部門。了解一下在1958年举行的两次国际气体涡轮會議的結果，就可以清楚地看出在不同的动力部門中采用气体涡轮的过程及其应用的远景。这两次会议一次是在华盛顿、另一次是在蒙斯(Mons)(比利时)举行的。

分析在这些會議上所作的报告表明，虽然气体涡轮装置还处

1) газовая турбина 通常譯成燃气輪机，因为所用的工质是燃气。但本书中时論的工质不是燃气，而是其它气体，如氢、氮、二氧化碳，所以譯成气体涡轮。——譯者注

于初始阶段,但由于它的性能和发展前途,现在已经成功地应用于工业和技术的不同部门中。有意义的是,在五年中(从1952年底到1957年底),投入运行的气体涡轮装置增加了七倍,在资本主义国家的工业部门中达到了317台,其总功率为二百五十万马力,单机功率为1150到30400马力。

气体涡轮装置作为机械能源被用在机车和海洋船舶上、用来发电、用在冶金工业和化学工业中以及其它方面。它们使用各种不同的燃料。

运行经验表明,气体涡轮装置具有非常高的工作可靠性。在个别情况下最大被迫停车时间不超过1%,而一般不超过0.1%。

大部分气体涡轮装置是自动工作的,一部分是半自动的。

气体涡轮装置在船舶、冶金工业、化学以及其它一些部门中的运行经验表明,这种装置的效能已被证实是完全满意的,进一步加以采用是完全合适的。

气体涡轮装置很好地表明了可以作为功率不大的辅机来带动辅助发电机、泵以及其它设备。

由我们的观点来看,在蒙斯举行的会议上埃舍尔-维斯公司(Escher Wyss)(瑞士)科学研究所所长库特·克累尔(Curt Keller)教授的报告特别令人感到兴趣。这是因为埃舍尔-维斯公司是建造封闭循环气体涡轮装置的首创者,并且在这方面具有世界上最丰富的经验。据克累尔说,1958年以前该公司以及它在美国、英国和西德的分公司已经设计了14台封闭循环的装置。

在所有这些装置中涡轮进口的温度介于 650°C 与 700°C 之间。循环最大压力为25—50大气压,最小压力为6—12大气压。

第二次世界大战以前在苏黎世(Zürich)和圣德尼(Saint Denis)建造的最早的装置(功率分别为2,000千瓦和12,000千瓦)构造很复杂。最近的气体涡轮装置的构造无论在主要机构部分或者是其余各个部件都大大简化了。

新型装置的运行结果良好。例如在拉文斯堡(Ravensburg)的一台功率为2300千瓦的装置就以煤作为燃料顺利地工作了12,000

小时,并由冷却器取得热量用于室内供暖。埃舍尔-维斯公司还制造了功率为12,000千瓦、带有燃烧煤粉的空气预热器的一台装置,这台装置安装在苏联的卡希拉(Кашира)。还为英国和日本制造了几台功率为2500千瓦的装置。

在上述14台装置中,有埃舍尔-维斯公司为日本海军设计的功率为10000马力的第一台军舰用封闭循环气体涡轮装置。

克累尔教授在上述报告中强调指出,以最高的效率将某种形式的能量转变为机械能过去一直是、将来也永远是设计师的主要任务。原子能动力装置的建造现在正好进入这样的发展时期,获得高效率已经成为主要问题之一。

在这方面,当具有高温反应堆时,封闭循环气体涡轮装置有很大的前途。

按照克累尔的意见,封闭循环的原子能气体涡轮装置可以成功地和蒸汽原子能动力装置相竞争,这是由于它的下列优点:

- 1) 直接利用反应堆的热,并且冷却剂同时也就是涡轮中的载热剂。在这种装置中不需要中间换热器;
- 2) 在装置中可以应用各种气体;
- 3) 即使是大功率的装置,也可以具有不大的尺寸;
- 4) 由于调节压力¹⁾,装置在宽广的负荷范围内都具有高效率;
- 5) 装置只需要少量的水供冷却用;
- 6) 作为固定式²⁾装置应用时,可以顺利地 and 中心供热网相连接。

除了上述优点外,气体涡轮装置还具有下列性能:

- a) 装置是所有原动机中最通用的;
- б) 在任何温度下,装置容易起动,并且很快可以承受负荷;
- в) 和柴油机及蒸汽涡轮相比,尺寸小而重量轻;
- г) 装置不需要给水处理;
- д) 润滑油需要量少;

1) 用改变循环中的气体压力的方法来改变装置的功率。——译者注

2) 非运输式。——译者注

е) 固定式气体涡轮装置的效率现在已经可以和同样功率的蒸汽涡轮的效率相比,甚至还比后者高一些,并且随着温度的增高气体涡轮装置的这一优越性也增长得更快(图1);

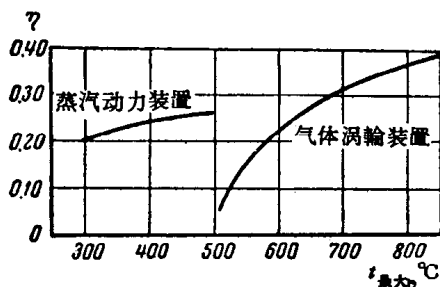


图1 蒸汽动力装置及气体动力装置(气体涡轮装置)的效率和涡轮前温度的关系

ж) 气体涡轮装置的管理操作人员比蒸汽涡轮少。气体涡轮装置容易自动化;

з) 在操作管理简单的条件下,装置的工作可靠性并不比蒸汽涡轮和柴油机差(根据已有的经验);

и) 装置的机动性大。

气体涡轮装置,特别是原子能气体涡轮装置的所有这些优点引起了人们把它作为具有非常广泛用途的动力装置的日益增长的兴趣。

这里应该指出,尽管有一切上述列举的优点,普通的封闭循环气体涡轮装置到目前为止还没有得到广泛应用。这是因为在这种气体涡轮装置中的火力加热器相当笨重和复杂。此外,为了得到涡轮前气体的高温,火力加热器中传热面的壁温必须更高,这大大限制了循环中气体最高温度的提高。

在原子能气体涡轮装置中这个缺点就消失了,因为气冷反应堆代替了火力加热器。原子能反应堆是原子能动力装置的任何方案中不可缺少的部件,因此,从这一点来看,它们差不多处在相同的条件下。

但是,如果建造封闭循环原子能气体涡轮装置中可靠而又经济的气体涡轮部分的现实性已经为许多顺利地工作着的带有火力加热器的装置所证实,那么反应堆的情况就不同了。现在暂时还没有可以用于原子能气体涡轮装置的气冷反应堆在运行,但是,这并不意味着现在不可能建造它们。

大家知道,美国和英国的第一批反应堆是用气体冷却的。

但是,在建造第一批核反应堆的时期(1940—1950年),几乎没有注意获得高温的问题,因为那时认为铀是十分廉价的,并且在单位重量中具有如此大量的能量,以致于没有必要力求得到高效率。

低的效率,除了增加燃料消耗以外,还会导致机器、反应堆等的尺寸增大,这一事实往往被忽视了。

此外,物理学家最初主要感兴趣的不是获得高温载热剂的问题,而是冷却反应堆的问题。

当在反应堆建造中取得了初步成就,并且出现了建造原子能动力装置的问题时(50年代初期),拥有的仅仅是低温反应堆,因此第一批原子能动力装置是用蒸汽的。第一批蒸汽原子能动力装置的工作经验表明,主要应该通过提高效率的途径、也就是通过提高反应堆温度的途径来改进它。

已显示出的增高反应堆温度的可能性以及特别是气冷反应堆的优点把在原子能动力装置中应用气体涡轮装置提到日程上来了。

我们用几个例子来说明目前反应堆建造中的趋势。

在英国原子能局的第五个年度报告中(1958/59年)清楚地表明了靠提高主要是气冷的反应堆中(英国继续偏重这种反应堆)载热剂的温度来改善经济指标的趋势。原子能局报告的第31节中说,在英国,是从提高工作温度的角度研究具有石墨减速剂的气冷反应堆的。最近期间的任务是将反应堆出口处的气体温度提高到 550°C ,下一步是到 750°C 。这保证了原子能动力装置有更高的效率,并且可以增大反应堆的功率。在第32节中指出,随着象快中子反应堆和高温气冷反应堆等改进型的反应堆投入运行,投资可能进一步减少。

在同一报告的第73节中报导说,原子能局详细地研究了水上船舶用的改进型气冷反应堆。

在文兹凯尔(Windscale)正安装着这种型式的原型堆。正在顺利地进行着紧张的工作以使石墨具有防止气体和裂变产物渗透

的性能。在溫弗里思·希爾思(Winfrith Health)正在建造一个反应堆外的大迴路以研究高溫下气体和石墨的相互作用。所有这些都是为了解决分裂残余物对載热剂迴路的污染和选择冷却反应堆的气体的問題。

研究在高溫和强烈輻射下材料性能的試驗在进行着。

正紧张地研究着这些反应堆中的传热过程。

在美国^[1]也很注意气冷反应堆。自 1957 年起,原子能委员会进行了一系列的电站用气冷反应堆的研究。以后和一些公司签订了設計和建造供电站用的功率为 26,000—98,000 千瓦的这种反应堆的合同。在这些反应堆中,氦被选作載热剂。

曾經研究过建造顆粒燃料反应堆的可能性,这种反应堆的燃料是含有鈷作为再生核燃料物质的石墨-鈷小球。选用氦作为載热剂。研究的結果良好。

“巴布考克和維耳考克斯”公司(Babcock and Wilcox Co.)正在研究建造燃料以悬浮物状态存在于气体載热剂中的这种反应堆的可能性。“通用电气公司”(General Electric)的两个部正在研究改进了的商船用廉价輕型反应堆,其中以气体作为載热剂。“通用原子”(General Atomic)公司[聖地亚哥市(San Diego),加利福尼亚州]將設計和制造反应堆,而“电船”部(Electric Boat Division)[格罗通(Groton),康涅狄格州]設計和制造发动机。作为整个系統的基础的是高溫气冷反应堆和封閉循环气体渦輪。选用石墨作減速剂,而載热剂用氦^[1]。

“華盛頓原子能报告”杂志(Washington Atomic Energy Report)^[2]引用原子能委员会負責工作人員的声明写道,在建造具有竞争能力的原子能船舶的工作計劃中預定將帶有封閉循环气体渦輪裝置的气体反应堆作为較远的将来的系統(和沸騰反应堆相比)。这种系統(MGCR)的主要优点为高的热效率、輕巧、构造簡單以及反应堆的自动調节。

这种反应堆的研究自 1958 年开始。其目的是查明在船舶上采用原子能气体渦輪裝置的技术上和經濟上的合理性。

最初的设计规定用氦作载热剂和用铍作减速剂。循环效率为 37%，循环最高温度为 816°C。

正在进行释热元件、换热器和机构的研究，以期能在最短期内建造原型堆。

1959 年 11 月在汉堡举行了船用原子能装置会议^[3]，由 14 个西方国家来的 750 名代表出席了这次会议，会上提出了 34 篇报告。

在美国专家们的报告中，给出了轴功率为 30,000 马力的各种类型船用原子能动力装置的比较性评价，这个评价是考虑了发展前途而作出的。

在比较时，以装在萨凡那号(Savannah)上的原子能动力装置作为具有水-水反应堆的蒸汽涡轮原子能动力装置的基础，而封闭循环原子能气体涡轮装置的基础是目前正在美国建造的、功率为 20,000 马力的商船用装置，并且考虑了它们的发展前途。

在报道所述的封闭循环原子能气体涡轮装置设计中，选用氦作工质，装置是单回路的，具有自由动力涡轮、高压和低压压缩机以及变螺距可倒转的螺旋桨。原子能气体涡轮装置有回热和中置冷却。循环最高温度 830°C，最大压力为 75 大气压，压缩比为 2.6。燃料为浓缩到 5% 的氧化铀。减速剂为氧化铍，反射体为石墨。圆柱形活性区的尺寸为 184 × 184 厘米。

表 1 中给出了几种 1965 年设计的原子能动力装置的比较以及它们在 1975 年的发展远景。

可见按照美国专家们的评价，即使从经济观点来看，封闭循环的原子能气体涡轮装置也是最合算的。原子能气体涡轮装置的其它优点我们已经在前面分析过了。根据表 1，在差不多相同的投资下，原子能气体涡轮装置的运行费用将比所有其它的原子能动力装置少。

值得指出，美国在长时期内忽视了气冷反应堆，只是英国取得的成就才迫使美国认真地研究它。

原子能委员会第 26 号报告中报导了“H. K. 费尔古松”公司

表 1 原子能动力装置的比較

原子能动力装置	1965年原子能动力装置的效率 (%)	1965年燃料循环 价 格 (美分/馬力·小时)	1975年原子能动力装置的效率 (%)	改进的 基 础	1975年燃料循环 价 格 (美分/馬力·小时)
具有气体反应堆 MGCR 的封閉循 环原子能气体涡轮 装置	35	0.204	42	达到更高 的气体温度 和压力	0.179
具有气体反应堆 MGCR 的原子能 蒸汽涡轮装置	31	0.218	38	同上	0.188
具有沸腾反应堆 BWR 的原子能蒸 汽涡轮装置	27.4	0.251	31	蒸汽的核 过热	0.227
具有水-水反应 堆 RWR 的原子 能蒸汽涡轮装置	23.6	0.446	32	二次加热 和給水預 热	0.358
原子能蒸汽涡轮 装置 (具有有机 載热剂反应堆 OMR)	24	0.305	29	改善燃料 循环和給 水預热	0.262

(H. K. Ferguson Co.) 在美国建造了一个实验用的多用途气冷反应堆, 这将是美国第一个民用动力反应堆。它是由“凱塞工程师”公司(Kaiser Engineers)和“阿利斯·哈尔麦尔斯制造”公司(Allis-Chalmers Manufacturing)設計的。反应堆将具有由放在不銹鋼套內的、稍加濃縮的氧化鈾构成的释热元件。石墨将作为減速剂, 高压下的氦被选作載热剂。反应堆建造在橡树岭(Oak Ridge), 預定在1962年建成。反应堆将用来进行广泛的实验, 并作为电功率为22,000千瓦的原型动力装置。

原子能委员会报导, 它已經和“費城电气”公司(Philadelphia Electric)及“通用动力”公司(General Dynamics)签订了合同在皮奇·博登(Peach Bottom)(宾夕法尼亚州)建造一个高温气冷反应堆。

在原型反应堆中将应用含有濃縮鈾及散布于石墨基体中的碳化鈷、由燃料和減速剂构成的复合元件。

預定在第一个活性区中, 这些元件大概将装在不銹鋼套內。

裝置的初始電功率為 28,500 千瓦。以後等到裝在石墨套中的元件研究成功，這些元件將立即被裝在石墨套中的元件所代替。這時電功率將增加到 40,000 千瓦。燃料與減速劑的合併保證了非常大的傳熱面，而石墨套使反應堆有可能在很高的溫度下運行。大的傳熱面和高溫相結合就有可能大大縮小反應堆的尺寸與功率之比。

原子能委員會和一些公司共同研究了以重水作為減速劑的氣冷反應堆，這個反應堆將以天然鈾作為燃料。原型堆將具有電功率 50,000 千瓦。預定建於皮爾斯(佛羅里達州)。

據“應用原子”(Applied Atomies)雜誌^[4]報導，1960 年 7 月 22 日在艾達霍 (Idaho) 的國家反應堆試驗站，實驗氣冷反應堆 GCRE-1 達到了設計功率。反應堆在 1850 千瓦熱功率下工作了 48 小時。

這個反應堆在全功率下的試驗成功是在建造第一個封閉循環原子能氣體渦輪裝置的道路上重要的一步。這個獨一無二的系統研究了差不多五年。

建立反應堆 GCRE-1 是“航空噴氣通用公司”(Aerojet General Corporation) 根據原子能委員會和美軍工程兵部的訂貨而執行的科學研究和試驗設計計劃中所預定的，這個計劃的目的在於研製出軍用流動原子能電站。這種原子能電站的原型 (ML-1) 已在 1961 年建成。

裝置 ML-1 是可運輸的(拆成部件)，它的全重小於 38 噸，電功率為 400 千瓦，活性區的設計工作期限為一年。在運到安裝地點後需要 12 小時以使裝置達到準備運行狀態。在停止運行後，反應堆冷卻的時間為 24 小時。

1960 年 9 月在維也納的國際原子能機構會議上，在布雷通 (Bratton) 的報告中^[6]研究了裝置 ML-1。這次會議是關於小型和中型動力反應堆的。在上面提到的報告中說，已經建成了全尺寸的裝置模型。在原子能氣體渦輪裝置 (ML-1) 中選用氮作工質。

ML-1 的氣體渦輪部分是在實驗氣體渦輪裝置 GTTF 上進行

試驗的。这个实验气体涡轮装置于 1959 年 12 月在福特·貝耳瓦 (Fort Belvoir) 投入运行, 功率为 400 千瓦, 以氮作为工质, 按封闭循环运行, 用换热器模拟反应堆。

据“航空一周”(Aviation Week) 杂志^[5]报导, 航空冲压式发动机的托利 II-A 型 (Tory II-A) 反应堆的控制系统正准备进行试验。这个反应堆的 300×300 厘米的圆柱形活性区是水平放置的。用空气冷却, 最大空气流量约为 450 公斤/秒。

反应堆装有独特的调节系统。该系统由 12 根对称分布、水平安装的圆柱棒构成。其中的八根含有能强烈吸收中子的材料, 装在 120° 角的扇形内, 它们围绕活性区分布, 转动它们就改变了对中子的吸收。其余四根棒的调节是用将它们插入或抽出活性区的方法实现的。反应堆功率为 10,000 千瓦。

在“通用动力公司”的纯粹与应用科学实验室 (John Jay Hopkins Laboratory for Pure and Applied Science) 中实现了预定用来研究船用气冷反应堆 MGCR 核特性的活性区内的第一个連鎖反应^[7]。这个实验室将研究供民用的、以氧化铍作减速剂的反应堆。

最初用石墨作为减速剂。经过不长时期的运转后, 部分石墨将被不同数量的氧化铍所代替。活性区蜂房形的特殊结构保证了在得到所需的燃料和减速剂的分布方面有很大的灵活性。把燃料和减速剂散布在具有 1600 个以上通道 (截面为 2.5×5 厘米)¹⁾ 的栅格中, 将可以得到在功率方面超过目前所研究的反应堆结构形式的核系统。整个设备是一个每边为 2.74 米的立方体, 由用钢结构支承的铝架构成。

采用铀-铝箔燃料 (铀是高度浓缩的)。在以后的试验中也计划采用贫铀箔。在设备的中心预定安排一个特殊的区域, 用来估计释热元件和调节棒的精确几何模型和核模型, 并且比较它们的普通结构活性区当量。对于这些实验, 活性区的专门部分可以取

1) 原文如此, 但可能有误。根据“应用原子”^[7]所载, 通道截面为 1×6 吋, 约合 2.5×15 厘米。——譯者注

下,并且,为了实验,在这个地方可以放入事先装配好的其它释热元件和调节棒的模型。

MGCR 系统使高温气冷反应堆和封闭循环气体涡轮结合起来。这种原子能气体涡轮装置可能的总效率为 40% (当选用氧化铀作燃料、氧化铍作减速剂和氦作载热剂时)。反应堆内燃料的价格不贵,并且反应堆具有安全而尺寸小的结构。

建造这个原子能气体涡轮装置的计划是为了与船用普通发动机和其它型式船用核发动机相比能取得经济上的优势,并且为了将来能进一步降低运行费用。

由这些报导可见,建造供原子能气体涡轮装置用的、气体出口温度为 700—800°C、可靠、尺寸小而且工作寿命长的反应堆的现实性是不可怀疑的了,况且这种反应堆已经在设计和建造中。反应堆设计之一示于图 2 上。

毫无疑问,第一批这种型的反应堆以及原子能气体涡轮装置本身将在最近 3—5 年内投入运行。

建造高温气冷反应堆的现实性以及封闭循环原子能气体涡轮装置与带有蒸汽涡轮的原子能装置相比的优越性引起了人们对原子能气体涡轮装置的巨大兴趣。

最近几年在国外的刊物上登载了许多不同的供船舶、电站、飞机用以及为一些其它目的用的原子能气体涡轮装置设计。这些设计大部分在我国 (指苏

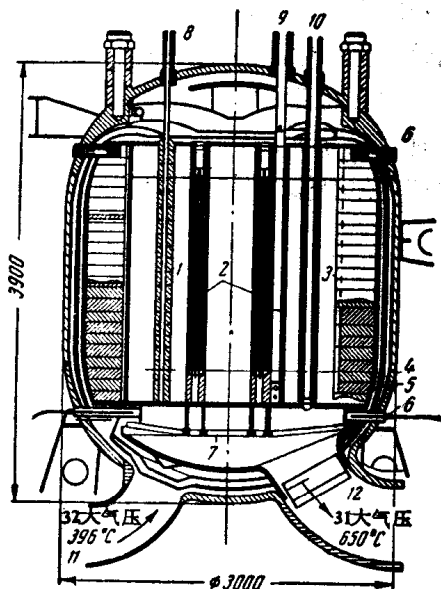


图 2 气冷原子能反应堆

1—减速剂; 2—燃料元件; 3—反射体; 4—壳体; 5—遮热板; 6—支承螺栓; 7—栅格; 8—调节棒; 9—事故防护棒; 10—放气管; 11—进气口; 12—出气口

联)的文献中已有叙述并为大家所熟悉。大部分的设计中都描述了以氦作为工质的单回路原子能气体涡轮装置。在有些设计中选用氮或混合气体作为工质。

因此,现在就已经可以看到,原子能气体涡轮装置——这是在不久的将来最通用和最有发展前途的发动机。特别对于水下油船、货船和客船来说它是最诱人的。刊物上在愈益经常地讨论建造这种船只的合理性。对这些船只来说,它将是大功率、尺寸较小、能在水下、在任何风暴时、在冰下以及在其它场合保证高速航行的唯一发动机。

但是,尽管在刊物上有很多不同的封闭循环原子能气体涡轮装置设计以及这种发动机发展前途的资料,很多有关计算、工质选择以及封闭循环气体涡轮装置整体设计和它的个别部件设计的问题在国内外的文献中还阐述得不够充分。对于改进封闭循环气体涡轮装置和它的部件的方法,在刊物上阐述得更其不够。

本书的目的就在于部分地填补文献中关于封闭循环气体涡轮装置的这方面的空白点,并且向读者介绍有关工质选择、计算封闭循环气体涡轮装置和它的部件的某些问题以及改进这些部件的途径。

第一章

封閉循环气体涡轮发动机的热力计算

发动机热力计算的目的是计算沿发动机通道的气流参数和确定发动机的基本参数：通过发动机的气体流量、有效效率、最佳增压比。此外，为了确定发动机的主要尺寸和制作发动机特性曲线（它能够确定在不同工况下发动机的性能），发动机热力计算的数据是必不可少的。

目前应用的发动机热力计算方法建立在工作过程实验原理的基础上。它的实质在于在计算中引入相应的系数来计及实际过程和理想过程的差别。这些系数通常根据实验数据选定。

1. 确定沿封闭循环气体涡轮发动机通道的气流参数

在确定气流参数时，不研究速度、温度和静压沿发动机截面的实有变化将是很方便的，所以计算按照滞止气流的参数进行。滞止过程被认为是绝热的。计算的结果给出气流在完全滞止下的温度和压力值（我们略去用来表示滞止气流参数的标符）。

通过发动机的气体流量、叶片机械的型式和级数、冷却器和换热器（或是气体反应堆，如果是计算单回路原子能气体涡轮装置的话）的构造形式都不影响气流参数的计算方法。气体涡轮动力装置元件的构造只影响用以计及损失的那些系数的值，所以，只有在选择这些系数的数值时才应该考虑装置元件的型式。

图3上示出了实现封闭循环气体涡轮动力装置的可能方案之一——采用回热和压缩过程中的气流中间冷却以提高有效效率的气体涡轮装置方案。

在按照上述方案制成的气体涡轮发动机中，工作过程按下面