

6

核工程丛书

# 核动力装置的蒸汽循环

W. R. 伍頓著 方可人譯

## 内 容 提 要

本书系“核工程丛书”的第六册,专述与核动力装置有关的蒸汽循环问题以及所获得的热值的效率。全书共分三章,包括蒸汽循环、气体冷却和石墨减速的核动力装置以及水冷却和水减速的核动力装置;最后还列有大量的附录,作为选择蒸汽循环系统时参考之用。

本书可供反应堆工程技术人员阅读,亦可供从事反应堆工程的科学研究人员及核工程专业的学生作为参考之用。

*Nuclear Engineering Monographs*

STEAM CYCLES FOR NUCLEAR POWER PLANT

W. R. Wootton

Temple Press Limited

核工程丛书(6)

核动力装置的蒸汽循环

方可人 译

---

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出033号

---

上海市印刷三厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本850×1168 1/32 印张2 10/32 排版字数55,000

1964年2月第1版 1964年8月第1次印刷

印数1-2,200

统一书号 13119·582 定价(科六) 0.40元

## 序

在一系列具有不同輸出(包括最大輸出)的动力装置中已經很好地利用蒸汽作为中間介质来产生动力(無論是使用煤炭、油类及气体等普通燃料的燃燒或者是象鈾之类的核燃料的裂变所产生的)。在采用普通鍋炉的动力装置中,人們已經掌握了利用蒸汽方面的丰富知識,諸如近代采取的利用很高的蒸汽压力和温度,再热以及給水預热的方法。最高效率的获得直接取决于蒸汽的品质。由于高效率的結果,使电站所消耗的燃料的成本减到最小,因此,为了节约燃料起見,建造投資較高的电站往往还是有利的。

对于核动力装置来說,由于这是一門嶄新的科学,因而可以利用的知識毕竟是有限的。但是無論如何,从提供相等的热值来看,核燃料是比較价廉的,正因为这样,要求获得高效率的意义也就显得比較次要了。于是,就很少注意到本来應該受到注意的有关蒸汽应用方面的研究工作。然而,因为核动力装置的主要成本通常是很高的,获得高效率后相应地可以提供較高的輸出——对于給定的核热量輸入——这样就有助于分散主要成本。因此,这亦就是需要对与核反应堆密切有关的蒸汽循环作詳細分析的理由。

在核动力装置中所运用的各种原理,大部分也就是与普通蒸汽动力装置有关的那些原理,但是,在它們的应用上却存在着某些主要的差別。例如,在采用普通鍋炉的动力装置的情况下,蒸汽压力的选择是比較自由的,但是在核动力装置中,情况就不是那样。本书的目的是企图用基本的方法来說明核动力装置蒸汽循环选择中所涉及的許多問題,同时对于各种变量的探索提供方便的方法。

因为二氧化碳已经被选择为英国商业用的气体冷却、石墨减速型反应堆的冷却剂,所以在书末列入了二氧化碳的焓值表。

W. R. 伍頓

1958年10月

# 目 录

## 序

第一章	蒸汽循环 .....	1
第二章	气体冷却、石墨减速的核动力装置 .....	3
第三章	水冷却、水减速的核动力装置 .....	24
附录一	反应堆气体出口温度和蒸汽动力装置可达到的总热效率之间的关系 .....	33
附录二	蒸汽表 .....	35
附录三	莫尔图 .....	41
附录四	温熵图 .....	49
附录五	蒸汽涡轮机 .....	53
附录六	热交换器热平衡计算的典型例题 .....	58
	二氧化碳的焓值表 .....	63
索 引	.....	66

# 第一章 蒸汽循环

在不久的将来,大规模地利用核能来产生动力,看来将依靠蒸汽作为中间介质。这是由于在核反应堆发展的现阶段,已经有可能从核反应堆中获得比较低的温度的结果。蒸汽循环在适当的温度下可以提供合理的效率,并且随着所能利用的温度的提高,还可以提供更引人注意的效率。图1<sup>[1]</sup>表示最简单的蒸汽循环在较高的温度下所可能获得的效率,倘若采用了利用再热及超临界压力的更复杂的循环,则可以期望获得更高的效率。

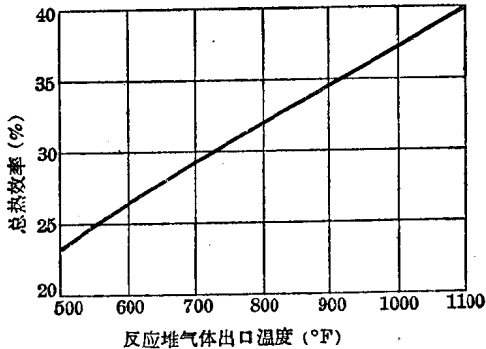


图1 反应堆气体出口温度和所能获得的蒸汽循环总热效率之间的关系

蒸汽循环应用于核动力的热源时,带来了本身所特有的各种问题;但是这些问题都没有超出正统的热力学范围。这些问题的解决需要掌握热机,蒸汽性质图表(附录二),莫尔图(附录三)和温熵图(附录四)方面的知识。然而,在下面的论述中所采取的措施

[1] 关于图1来源的说明见附录一(第33页)。

理内容的方式是力求使过去对这方面不太熟悉的讀者亦能够获得实用的知識。

在本书中企图着重討論气体冷却、石墨减速型反应堆以及与其有关的蒸汽循环，因为这种型的反应堆在英国正在被广泛地采用着；同时亦略为概括地討論了沸騰和不沸騰两种形式的水冷却、水减速型反应堆，因为这些类型亦已經作为商业上的变型而出現。最后簡短地提到了液态金属冷却的反应堆。

## 第二章 气体冷却、石墨 减速的核动力装置

卡德尔豪尔型核动力装置包含有一座用气体冷却的反应堆，冷却气体在闭合系统中不断地通过反应堆活性区和热交换器循环着，而热量则是用来产生蒸汽和驱动涡轮机的。气体处于压力下，由鼓风机进行循环，因此可以证明，这些鼓风机所消耗的功率与压力的平方成反比。一座核反应堆，不论属于什么型式，存在着两种互相矛盾的因素；一方面它代表着输出热量的高度压缩（在体积上），而另一方面由于结构材料上的一些严格限制，目前还必须对温度加以适当的限制。与此同时，上述情况就使得将热量从反应堆中转移到蒸汽动力装置成为一个困难的问题。对于气体冷却反应堆来说，情况就格外如此，在目前的設計中，大约有 10% 的动力装置的功率输出是由鼓风机所消耗掉的。

气体冷却、石墨减速的反应堆活性区的几何形状是考虑了核物理和工程二方面的问题而确定的。于是，有可能使一个给定的活性区具有宽广的热功率输出范围，而仍使最热的燃料元件的表面温度保持不变。当流经反应堆的气体流量不变时，降低进入反应堆的气体温度，就能够增加热功率输出。当进入反应堆的气体温度不变时，增加气体的流量亦具有同样的效果。在图 2 中表示了压力为 200 磅/吋<sup>2</sup> 绝对值的卡德尔豪尔型反应堆的各种特性。图中列出了热功率输出的范围（在这种情况下，从 100 到 250 兆瓦），以及相应的气体温度、流量和压力损失，这些数值都满足了燃料元件表面最高温度 450°C 的要求。这些特性的推导，在 W. B.



霍耳著的“反应堆传热”(“核工程丛书”的第3册)的第二章中进行

了广泛的讨论。

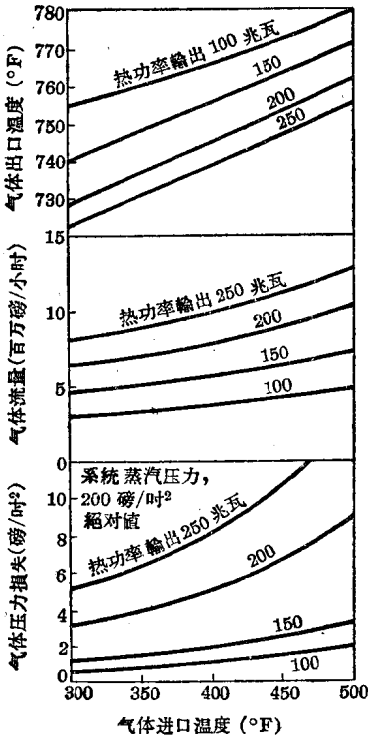


图2 典型的气体冷却、石墨减速反应堆的各种特性

从图2最上面的曲线可以看出,当热功率输出最小时,气体的出口温度就达到最高值.这正是我们预期的,因为气体流经反应堆活性区的速度降低了;这样,气体就以较多的时间和燃料元件相接触,从而更为紧密地接近到燃料元件的温度.从最下面的曲线亦可以看出,当热功率输出为最小时,通过反应堆的压力损失为最小,这亦是因为气体速度降低的缘故.于是,在这些情况下,相应的蒸汽循环的热效率将是最高;这不仅是因为温度的缘故(高热效率始终与高温联系在一起),而且亦是因为冷却剂循环器所消耗的功率为最少.另一方面,

当反应堆热功率输出为最大时,气体的出口温度就最低,与此同时,通过反应堆的压力损失为最大.这时,相应的蒸汽循环的热效率将为最低;虽然这样,动力装置的净电功率输出比起反应堆在仅仅100兆瓦的热功率输出下运行时当然要高得多.由于给定的反应堆的主要成本与热功率定额几乎无关,并且占整个核动力装置总成本中的一个可观的部分,可以预料,当电功率输出较高时,每瓦装置的投资成本就最低,同时单位输出的生产费用亦最小;而后者是与动力装置较低的热效率无关的.

蒸汽循环分析的主要目的之一,是为了对给定的反应堆活性

区的设计和运行条件作最佳的选择有所帮助。尤其是详细地考虑了下列各点：

- (a) 反应堆的热功率定额。
- (b) 进入反应堆的气体温度变动的影响。
- (c) 单压和多压蒸汽循环的应用。
- (d) 再热和给水回热的应用。
- (e) 气体压力损失在反应堆、热交换器和管道系统中的分配。
- (f) 在热交换器中位于“限制点”上的温度逼近。

### 单压蒸汽循环

在单压蒸汽循环中(图3)，可以达到的蒸汽压力(对于进入和离开反应堆的任何给定的气体温度)取决于给水温度以及气体与在热交换器蒸发段的气体出口处(A点)的水之间的温度逼近。最高的蒸汽压力是与最小的温度逼近和无给水加热相联系的。然而，前者在热交换器中对应着很大的换热表面，这不仅增加了主要成本，而且还增加了气体系统的压力损失，因而亦就增加了鼓风机所消耗的功率。如果相应的蒸汽压力不太低的话，那么可以预期，给水加热会对蒸汽循环效率产生常见的有利影响。图4(a)是某典型热交换器的温度-热量图；图中表示气体的进口温度为

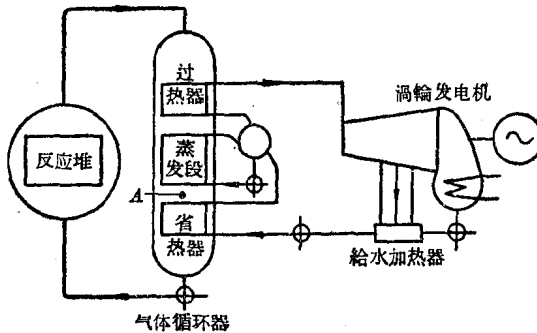


图3 单压蒸汽循环

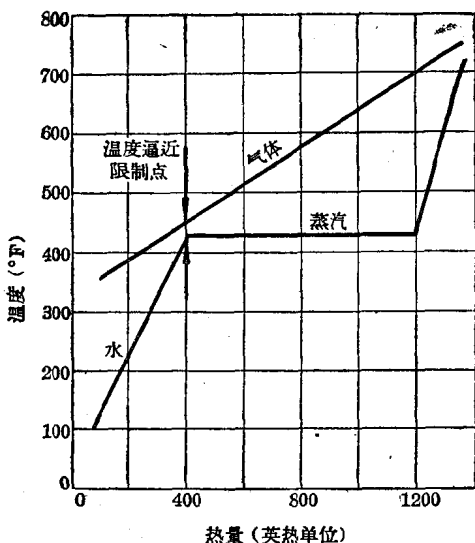


图 4(a) 不具有给水加热的单压循环的典型  
温度-热量图

350°F，出口温度为 750°F。进口温度为 100°F 的给水在省热器中提高到饱和温度，并且在这一点——限制点——上其温度低于气体温度的数值不超过 30°F。在 340 磅/吋<sup>2</sup>绝对值的恒定压力和 429°F 的温度下给水进行蒸发，然后蒸汽被过热到进入气体的温度 30°F 的范围内。从图上可以很明显地看出，蒸汽压力只可能是与所确定的饱和温度相对应的饱和压力值，在这种情况下，饱和温度被规定为比在限制点上的气体温度低 30°F。图 4(b) 是在同样的气体状态而给水的进口温度为 300°F 的温度-热量图。因为现在在省热器中所需要加入的热量是很少的，限制点就发生在较低的气体温度处。于是，进行蒸发的饱和温度就比较低，因此蒸汽压力亦比较低。

因为在气体温度、温度逼近、给水温度和可达到的蒸汽压力之间存在着确定的关系，于是可以作出一系列的曲线图来简化它们之间的相互关系。图 5(a) 是一个典型的例子，它是根据气体的进

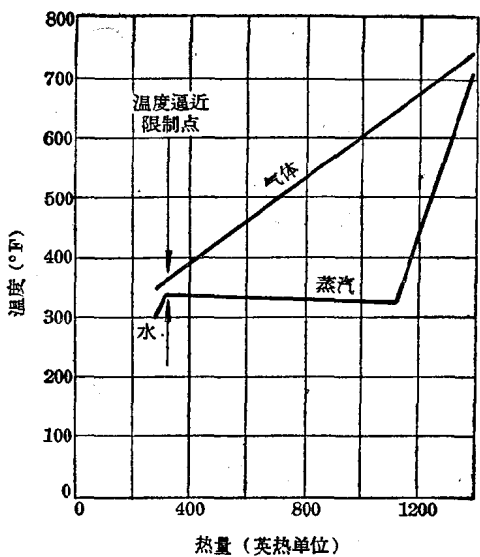


图 4(b) 具有给水加热的单压循环的典型温度-热量图

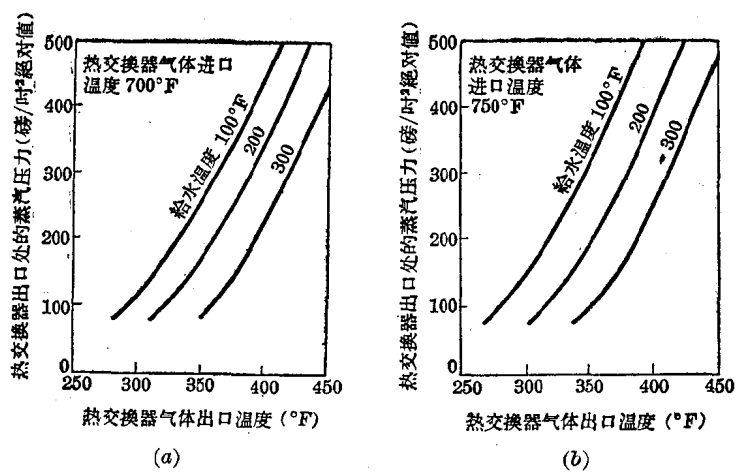


图 5 单压循环下热交换器气体进口和出口温度、给水温度与可达到的蒸汽压力之间的典型关系

口温度为  $700^{\circ}\text{F}$  和温度逼近为  $30^{\circ}\text{F}$  (在以上提到的限制点和在过热器的出口点上) 繪出的。假定气体是二氧化碳。从图上可以看出, 例如, 如果气体在  $350^{\circ}\text{F}$  下离开热交换器, 則对于  $100^{\circ}\text{F}$  的給水, 就有可能产生  $260$  磅/吋<sup>2</sup> 绝对压力的蒸汽, 或者对于  $200^{\circ}\text{F}$  的給水, 則仅仅可能产生  $165$  磅/吋<sup>2</sup> 绝对压力的蒸汽。图 5(b) 是另外一組属于同一类型的典型曲綫; 它是根据气体的进口温度为  $750^{\circ}\text{F}$  和相同的温度逼近而繪出的。現在如果气体在  $350^{\circ}\text{F}$  下离开, 則对于  $100^{\circ}\text{F}$  的給水就有可能产生  $320$  磅/吋<sup>2</sup> 绝对压力的蒸汽, 或者对于  $200^{\circ}\text{F}$  的給水产生  $195$  磅/吋<sup>2</sup> 绝对压力的蒸汽。

准备上述一系列的曲綫图不需要化費多少時間, 而且亦并不困难。其中提出各种温度逼近的組合的目的在于从热交换器設計的观点来确定最佳方案。显然, 这和所討論的加热表面的型式以及它的結構是有关的。由于这个問題的討論已經超出本书的范围, 因而作出这样的解釋就已經够了: 为了进行蒸汽循环的分析起見,  $20^{\circ}\text{F}$  到  $30^{\circ}\text{F}$  的温度逼近从經濟观点上看来应当是可以实行的。

現在可以作出第二組曲綫图, 并且依据蒸汽循环的总效率来进一步說明与任何給定反应堆的进口及出口气体温度相对应的可获得的各种蒸汽状态。图 6(a) 和 6(b) 是对于蒸汽温度为  $700^{\circ}\text{F}$  和  $800^{\circ}\text{F}$  所繪出的典型例子。在这些图解中, 已經作出了这样一些假設: 冷凝器的真空度为 29 吋汞柱; 渦輪机干級效率比为  $86\%$ ; 湿級比值 (当然, 当蒸汽压力升高时, 由于在渦輪机排汽装置中湿汽含量的增加, 这一比值是下降的) 則正如討論莫尔图的附录三中所描述的那樣是有变化的; 同时, 机械、电气和其他的损失合計在一起为  $5\%$ 。

根据图 5 和图 6, 就有可能考虑例如当給定的气体温度为  $730^{\circ}\text{F}$ , 而在热交换器中冷却到  $340^{\circ}\text{F}$  时反应堆的情况。在图 5(a) 和 5(b) 之間进行內插后, 当所供給的給水温度是  $100^{\circ}\text{F}$  时,

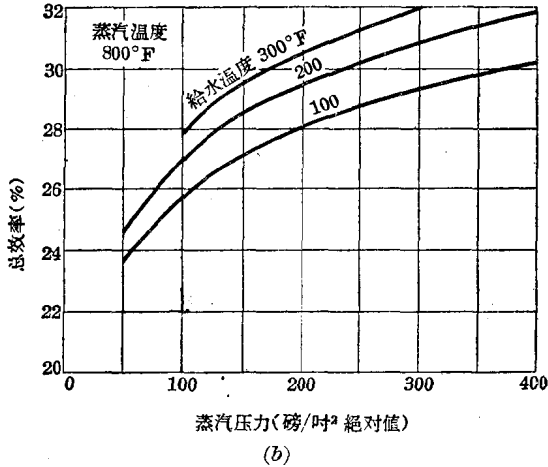
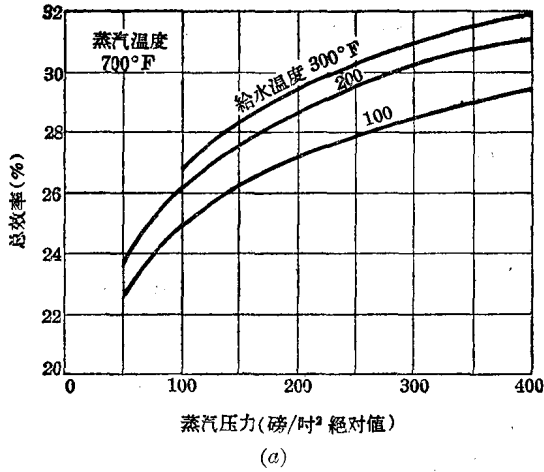


图6 蒸汽压力、给水温度和蒸汽循环总效率之间的典型关系

就可以获得 260 磅/吋<sup>2</sup> 绝对值的蒸汽压力。由图 6(a) 可以看出，蒸汽循环的总效率——连接热交换器及涡轮机的蒸汽管道系统上允许有微小的压力降——为 27.8%。反之，倘若所供给的给水温度是 200°F，则蒸汽压力将为 150 磅/吋<sup>2</sup> 绝对值。蒸汽循环总效率将是 27.7%。上述例子足以说明过去曾经提到过的下列事实，即：

給水加热沒有提供从問題的草率研究中所期望的有益效果，以及由于較高的給水温度所产生的任何优点都被相应的比較低的蒸汽压力所抵消掉。然而給水加热仍具有实际的用途，关于这一問題将在后面提到。

当我们回顾到选择循环系統的主要目的是为了获得最大的淨电功率輸出，即在除去鼓风机以及其他輔助設備所消耗的功率后的

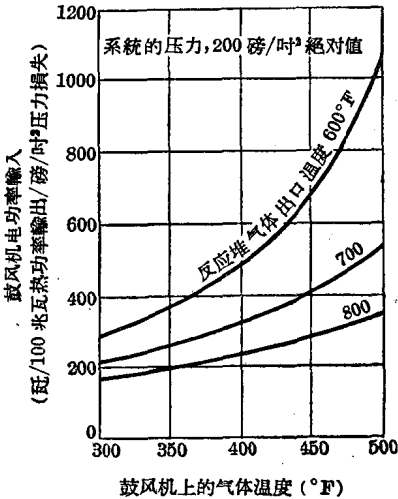


图7 鼓风机所消耗的功率与反应堆气体进口及出口温度之間的关系

的輸出功率时，那么在这种方式下可获得的蒸汽循环的总效率就意味着是不大的。回到图2就可以看到，上面所利用的特殊例子——当气体进口温度大約是350°F<sup>[1]</sup>时，反应堆所提供的气体温度为730°F的那种情况——是与250兆瓦的热功率輸出、8.8兆磅/小时的气体流量以及反应堆中6.2磅/吋<sup>2</sup>的气体压力降相联系的。試假定气体

压力損失的分配在反应堆中为60%，而在外部回路(包括热交换器)为40%；在系統中总的压力損失为10.3磅/吋<sup>2</sup>。当所涉及的压力比不大时，根据这些数据就可以如下地計算出鼓风机所消耗的功率：

$$8.8 \times 10^6 \times 10.3 \times 0.985 \times \frac{144 \times 0.746}{1.98 \times 10^6 \times 0.80} = 6100 \text{ 瓩.}$$

这简单地是容积流量和压力降的乘积。在反应堆进口处(鼓风机通常就是放置在这里的)，气体的比容为0.985呎<sup>3</sup>/磅。式中所包含的其他常数则是因为考虑到总的鼓风机效率(这里假設等

[1] 因为在鼓风机中的压缩功，这个温度比热交换器的出口温度高10°C。

于 80%) 以及要将乘积化为瓦的结果。鼓风机所消耗的功率, 可以从图 7 中方便地读出。图 7 的根据是认为鼓风机总效率(包括电动机损耗)为 80%, 而系统压力为 200 磅/吋<sup>2</sup> 绝对值。鼓风机所消耗的功率大小表现为气体中的热量, 这种热量必须加入到反应堆的热功率输出中去, 以获得到达蒸汽循环的总热功率输入。现在, 可以如下地求出在上述特殊例子中的净电功率输出:

反应堆热功率输出(兆瓦)	250
由鼓风机在 95% 的效率下加入的热量(兆瓦)	5.8
	-----
输入蒸汽循环的热量(兆瓦)	255.8
在 27.8% 的效率下的总电功率输出(兆瓦)	71
鼓风机功率输入(兆瓦)	6.1
	-----
	64.9
在 5% 的效率下的其他辅助设备的功率输入(兆瓦)	3.3
	-----
净电功率输出(兆瓦)	61.6
	-----
净热效率(%)	24.6

在任何特殊情况下, 给水加热的效果可以用上述方法来确定,

图 8 是当反应堆的热功率输出为 250 兆瓦的典型结果。当在反应堆进口处的气体温度提高时, 则提高给水温度是稍有益处的; 当气体温度是 350°F 或更低一些时, 没有给水加热的循环就更为有效; 当气体温度在 400°F 时, 给水温度为 200°F 是比较有利的; 而当气体温度为

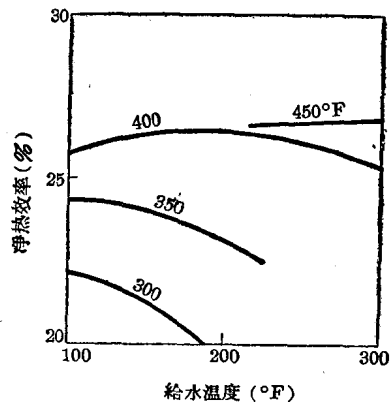


图 8 给水加热对蒸汽循环效率的影响



450°F, 則給水溫度可以是 300°F.

圖 9 表示對於任何給定的反應堆輸出功率和氣體的進口溫度, 在考慮到給水加热的效果下, 所獲得的探討最合適的蒸汽循環

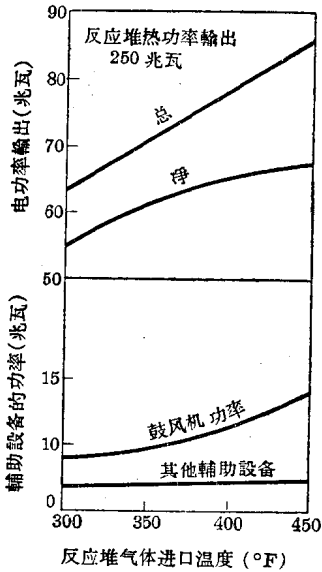


圖 9 反應堆氣體進口溫度  
和淨電功率輸出之間的  
典型關係

最合適的蒸汽工況的“一覽表”; 然後對他的設計進行評價。在作出最後選擇以前, 很多的實際考慮調整了所得出的結論。其中例如, 在反應堆中氣體壓力的損失相對於外部回路中氣體壓力損失的分配影響的研究, 到現在為止被推測性地假設為 60:40。

前面, 在說明蒸汽循環分析的程序上為了簡化起見, 採用了給定的反應堆結構的例子。然而, 說得更確切一些, 這項工作是為了幫助選擇反應堆本身的結構。反應堆設計者以燃料元件作為設計的依據, 並且充分地利用了一系列具有不同直徑通道的燃料元件的特性, 這些特性是通過實驗裝置進行實驗的結果而得出的。根