

氢 发 动 机

〔苏〕 В. И. 赫麦罗夫 著
Б. Е. 拉夫罗夫

王 震 华 译

王 丰 校

662840

新 时 代 出 版 社

氢 发 动 机

〔苏〕В. И. 赫麦罗夫 Б. Е. 拉夫罗夫 著

王震华 译

王 丰 校

校 者 序

在人类历史上，石油和天然气的发现可以追溯到几千年以前。但是，石油生产作为一个独立的工业体系出现，才不过一百多年。随着各种工业的发展，石油工业得到了不断的发展，目前石油工业无论在国防建设或经济建设中，均占有极其重要的地位。石油产品既是各种运输动力装置的主要燃料，更是各种军用发动机的重要燃料；在农业方面，石油工业除了提供化肥及农药等石油化学产品之外，还为各种农业动力机械供给各种汽油、煤油、柴油及润滑油脂等石油产品；此外，石油和天然气也在冶金、机械制造、建筑材料、化工、纺织和造纸等国民经济的各个部门都得到了广泛的应用。目前人类对石油的消耗量仍在不断地增加，据国外 1979 年的资料报导，在资本主义和第三世界国家，原油的消费量平均每天约三千二百万桶。从已查明的石油和天然气资源来看，以这种消耗速率计算，预计石油再过五十年将要枯竭，而天然气大约再过七十年也将耗尽。这就是说，到下个世纪中叶，迄今为止人们所知道的远古时代贮藏的燃料就要用完，人类将面临能源危机，实际上西方世界开始面临着一场严重的能源恐慌。石油经济将渡过它的黄金时代而出现危险的信号！

解决能源问题的途径，概括起来说是靠开源和节流。所谓开源就是开发新的能源，它是解决能源问题的根本出路；而节流则是最有效地利用现有的燃料，是解决能源问题的重要途径。目前，被开发的能源主要有：太阳能、氢能、地下

热、海洋能（其中包括潮汐动力、海水低温差发电、海浪的动能以及化学和生物能等）、风能、核能、煤的气化与液化和油页岩等，此外还有尚未利用的水力资源。地下热、煤和油页岩由于其蕴藏量是有限的，不可能从根本上解决能源问题。太阳能、海洋能和核能都有共同的缺点，就是受到天气、时间、季节和地区等条件的限制，同时它们也不能作为各种移动装置如汽车、火车、轮船、各种飞机、战舰和坦克等的动力源。

科学家们预言，取代石油地位的将是氢燃料。用氢作为内燃机燃料的想法始非今日，早在四十多年前就有人用氢与碳氢化合物的混合物作为内燃机的燃料，并进行过大量的研究工作。在二十世纪三十年代的文献中还可以看到，以氢的形式把能量贮藏起来的设想。一些有“远见卓识”的科学家，就曾经对氢发动机的发展作了杰出的论述。但是在那个矿物燃料的使用不受什么限制的年代里，这些光辉的思想几乎受不到人们的重视。直到1964年，在氢能开发方面取得较大的成果后，有的国家才提出了研制氢发动机，自从美国科技人员成功地把氢作为“土星五号”登月火箭发动机的燃料以来，这种曾经使不少研究人员感到可怕的物质，才成为极有希望的新物质。

氢能的主要优点是：

1. 取之不尽用之不竭

生产氢能的方法很多，其中最理想的方法是用太阳能将水直接分解来制取。据天文学家计算，太阳能目前处在“青、壮年”时代，它大约还可能“活”五十亿年。在地球表面的水资源，其总量达十五亿立方米，仅生物体内所含有的水分，就比迄今为止地球上所开采的总的石油产量还要多。同

时，氢燃烧后产生的水蒸气又可重新恢复为水，这种循环使氢成为最理想的能源。

2. 用途广泛

氢既可以作为火力发电站或燃料电池的燃料，又可以作为各种农业动力机械、运输装置以及军用装备的燃料。可以取暖和加热各种设备，也可以把它转化为氨、乙炔、联氨、甲烷以及其他碳氢化合物或新型燃料，氢还可以代替焦炭作为还原剂用于炼铁。制造氢时所产生的大量氧可供钢铁和其他工业使用。在发电过程中发生电力过剩时，可用多余的电能来电解水生产氢和氧。氢能通过压缩或液化后贮藏起来，必要时用来发电，以适应高峰负荷的需要。此外，用氢来代替煤或石油，不需要对现有的技术设备作很大的改变。例如，对现有燃烧碳氢燃料的汽车发动机，稍加变动就可以燃烧氢。

3. 氢燃料的性能优于碳氢燃料

氢的发热量每千克为 $28900\text{kcal}^{\bullet}$ ，约为煤油或汽油发热量的二点八倍多。氢的重量密度很大，这对各种运输动力机械也是个很突出的优点。氢燃烧后生成物具有更高的温度，氢的火焰传播速度比矿物燃料的火焰传播速度快得多。氢的另一重要特点是，它比煤油或汽油具有更宽的着火界限，即氢与空气的混合比例，在很大范围内变化时均可点燃。氢混合气最小点火能量为 0.02mJ ，只为汽油混合气点火能量的十分之一。这些特点对于工作状态经常改变的航空涡轮喷气发动机是极其有利的。上述优点也使得氢发动机具有更大的功率和更好的经济性。

● $1\text{kcal} = 4186.8\text{J}$ 。——译者

4. 对环境不产生污染或只产生轻微的污染

燃烧碳氢燃料的各种发动机，它们所排出的废气中，含有大量的一氧化氮、一氧化碳、二氧化碳和硫的氧化物等有害气体，严重地影响人们的身体健康和自然环境，氢与氧燃烧后唯一的生成物是水蒸气，它既不污染环境，又可直接归还于大自然，因此不会破坏大自然的循环规律。而氢与空气燃烧后，也只产生少量有害气体一氧化氮，一台氢燃料内燃机排出的一氧化氮，仅为目前一般车辆的二百分之一，况且还可采用新技术使其进一步减少。

既然氢具有上述优越性，为什么迄今还不能大量利用呢？影响氢能开发速度的原因有下列几点：

1. 氢的价格昂贵

目前全世界生产氢所用的原料百分之九十以上是天然气，仅百分之几的氢是用电解水来制取的，前一种方法消耗大量的矿物燃料，不能更新能源，后一种方法虽经人们的不断努力，将电解水制取氢的效率从百分之六十提高到百分之八十三，但由于发电效率不高，故总效率仅为百分之二十到三十。因此，用这种方法生产的氢价格很高（约为煤油价格的二十倍），由于煤的蕴藏量还很丰富，因此，用煤来变换氢作为过渡的氢能源特别引人注目。总之，降低生产氢的成本是决定氢能够利用的关键。

2. 贮藏和运输困难

氢是一种爆炸性气体，它的分子直径很小，极易从容器中泄漏出来。加之氢与空气混合后，最小点火能仅为 0.02mJ ，这已是肉眼所不能察觉的，因此，轻易造成危险，甚至静电也可能引起爆炸。但是，应该指出的是，煤油混合气的爆炸下限的体积百分数约为 1% ，而氢混合气爆炸下限的体积百

分数为 4 %，此外，由于氢的密度小而且扩散快，所以其危险性也并不像想像的那样可怕。

氢的分子量最小，密度也很小，因此氢在贮藏和运输过程中必须进行高压压缩或者液化，这就产生了容器的强度和重量等问题。为确保容器的安全，用作定期检查的费用就占氢成本的一半。氢的沸点极低，为摄氏零下二百五十二点九度，仅次于氦的沸点，为了把液态氢保持在沸点以下，必须解决热绝缘问题，以及如何控制氢受热而蒸发的数量等问题。保持液态氢需要复杂的低温容器，即使如此，也只能作短期的贮存。因此，如何保证高压氢气和液态氢长期安全贮藏、运输是氢能利用未能得到较大进展的另一个重要原因。

氢能重新被人们重视，是从二十世纪七十年代开始的，构成这种情况的历史背景，当然是能源危机和环境污染。近年来，国外对氢的研究工作出现了极其活跃的局面。目前已发现一些金属化合物具有独特的吸收氢的能力，这些金属化合物的原子的晶格能吸收大量的氢，其作用就像海绵吸水一样。一个装有金属氢化物的氢容器所含氢气的量，要比普通容器多装纯氢几十倍。可以认为，由于化学家的辛勤劳动，已经初步解决了氢安全而且经济地贮藏的问题。在氢的生产方法方面，各国科学工作者正在进行大量的研究。目前生产的方法有：光化学分解水制氢；生物化学分解水制氢；热化学法以及高温高压水电解法制氢等。

一九七八年，美、日两国开始建造利用太阳能和海水来生产氢的工厂，计划一九八四年投入生产，氢的日产量为六百吨。在氢发动机的研制方面也取得了可喜的成果。燃烧氢的发动机，其扭矩、功率和效率各项性能指标均超过一般的汽油发动机。洛克希德飞机公司已开始研究氢燃料发动机，

使用氢发动机的飞机，其飞行速度为每小时六千四百公里，飞行高度大约是十四万米。

诚然，用氢来代替石油，人类还需付出长期艰苦的劳动，氢的大量而有效的生产方法，以及它在高密度下安全、便利的运输方法，还有待于继续研究和改进。但是，社会生产的需要，将促进这些问题的解决。用氢作动力燃料将越来越具有现实意义，光辉灿烂的氢能时代一定会较快地到来。

《氢发动机》一书，介绍了苏联哈萨克加盟共和国动力科学研究所 B. И. 赫麦罗夫等人在研究氢发动机方面的成果。我们把这本书介绍给读者，希望它能在我国开发和使用氢能源方面起到一定的作用。

王 丰 于北航

序

近来谈到能源发展前景时，越来越多地提到氢的运用。

氢作为中间能质 (Энергоноситель)，具备许多有利的性质。制氢的原料储备是无限的，而所有已知的能源都可以用来制氢。氢可以在各种物态下贮存，也可以用管道运输。氢能代替所有传统的石油燃料和天然气，不用附加特殊装置。

运输行业用氢作燃料时，其良好性质尤其明显。在航空和汽车运输中用氢作燃料，从根本上解决了排气有毒的问题，同时也为广泛地在用传统发动机的运输工具上利用核能和太阳能开辟了途径。正是上述情况促使近年来对氢发动机的兴趣急剧增加。

本书专门论述活塞式氢发动机。书中谈到对这种发动机工作过程的最新认识，指出用氢作这类发动机燃料的特点，以及发挥其优越性的办法。

本专著是作者根据自己对活塞式氢发动机工作过程的详尽研究写成的。书中提到对氢发动机工作过程的评价及对其特点的见解，都有充分的根据。对活塞式氢发动机，以及这类发动机可能实现的最佳参数和特性，提供了十分全面的认识。

本书不仅给专业人员提供了有用的资料，而且还希望激发他们中间有更多的人来积极研究氢发动机。

院士 巴尔敏 (В.П. Бармин)

目 录

符号	1
第一章 氢能源（代绪论）	3
氢能源产生的前提	3
氢作为能质的可能性	6
生产氢的工艺和经济性	9
过渡到氢能源的可能途径	16
第二章 作为发动机燃料的氢	20
发动机中使用氢的历史	20
氢作为发动机燃料的性能	26
第三章 氢发动机的理论循环	33
理论计算的主要前提	33
计算公式和计算方法的某些特点	34
理论循环热力计算结果的分析	40
第四章 实验研究的技术和方法	49
实验用的发动机	49
试车台和测试技术	52
实验方法和测量数据的处理	56
第五章 氢发动机的工作过程	60
发动机的供氢系统（内混气和外混气）	60
混合气成分对工作过程进行情况的影响	72
速度工况和提前点火角的影响	83
氢的抗爆震性	87
第六章 氢发动机——它应该是什么样的	93
参考文献	98

符 号

- ε —— 压缩比
- n —— 发动机转速
- P_0 —— 外界压力
- P_a —— 气缸内气体开始被压缩时的压力
- P_c —— 气缸内气体被压缩后的压力
- P_z —— 气缸内气体的最大压力
- P_b —— 排气阀打开时气缸内气体的压力
- P_i —— 进气时气缸内气体的压力
- $P_{\bar{i}}$ —— 平均指示压力
- T_0 —— 外界空气温度
- T_a —— 气缸内气体开始被压缩时的压力
- T_c —— 气缸内气体被压缩后的压力
- T_z —— 气缸内对应于最大压力的气体温度
- $T_{\max}$ —— 气缸内气体的最高平均温度
- T_b —— 排气阀打开时气缸内气体的温度
- k —— 绝热指数
- R —— 气体常数
- L_0 —— 完全燃烧时空气和气体燃料的容积比
- α —— 余气系数
- η_v —— 气缸充气系数
- η_T —— 热效率(КПД)
- η_i —— 指示热效率

η_e ——有效热效率

γ ——废气系数

β_c ——理论分子容积变化系数

β ——实际分子容积变化系数

A ——功的热当量

H_u ——燃料的低热值

h_u ——燃料混合气的热值

m ——当 α 给定时，一摩尔氢所需的空气摩尔数

u ——气体的内能

N_i ——发动机的指示功率

N_e ——发动机的有效功率

g_i ——燃料的指示消耗率

g_e ——燃料的有效消耗率

$^{\circ}\Pi.K.B$ ——曲轴转角（以度为单位）

θ ——提前点火角

$\varphi_{\text{ж}}$ ——开始燃烧周期（以 $^{\circ}\Pi.K.B$ 为单位）

$\varphi_{\text{ж}}$ ——可见燃烧周期（主燃烧周期）（以 $^{\circ}\Pi.K.B$ 为单位）

ξ_r ——对应于循环中 T_{max} 点的有效放热系数

$\xi_{b'}$ ——排气阀开始打开的有效放热系数

B.M.T——上死点

H.H.T——下死点

第一章 氢能源（代绪论）

氢能源产生的前提

为什么会产生对某种新能源的需要呢？对任何一种新的复杂系统的需要，一般都是在许多促进因素的影响下产生的，系统愈大愈复杂，则促使该系统产生的因素也愈广泛，愈多种多样。氢能源也是这样一种系统，所以有些作者也把氢能源称为“氢经济系统”。然而氢能源这种新系统的需要是由哪些因素引起的呢？

目前人类掌握的燃料能源资源能够充分满足任何规模的生产，而且能够用相当久。例如，以煤的预测储量来讲，如果把它当作唯一的能源，为了满足全世界的需要，足够用二百年到五百年。用于增殖反应堆的铀储量，足够保证人类几千年的能源需要^[1]。

每年木材生长量也超过目前世界能量需要量的五倍。尽管如此，现在世界上仍经历一场能源危机。问题在于，到目前为止，决定燃料平衡结构变化的唯一动力就是经济因素。因此，近六十年来，世界燃料能源平衡表中石油和天然气的比重越来越大，现在靠这两种燃料解决了世界上70%的能量需要。

与煤和铀不同，石油和天然气的世界蕴藏量是非常有限的。根据许多方面的估计，如考虑到能量消耗量的增长，现有的蕴藏量只够用二十年，最多用五十年就要耗尽。石油和

天然气不仅是能源，而且是制造很多化工产品如塑料、合成蛋白等的高效原料。用石油和天然气大规模生产许多产品的制造工艺已经掌握，当然把石油和天然气保留下来供长期生产这些产品用是非常重要的。

在选择先开发哪年已探明的能源资源时，经济因素也是决定性的因素。虽然在燃料的勘探、开采和运输方面的技术不断地进步，但获得这些燃料的费用却是与日俱增。

世界上燃料能源资源的分布也很不平均，而且其消费量在世界上也分布得很不平均。能源资源的绝大部分是发达国家使用，然而在目前燃料能源分布的结构条件下，绝大多数的发达国家都不能靠本国资源来保证自己的需要。世界上三分之一以上的能源需要是靠进口来满足的。

1975 年一半以上开采出来的石油都进入了国际市场，目前西欧、美国和日本的石油进口量就占世界石油总进口量的 80% 以上。在这种使用能源资源的结构条件下，根据专家们的估计，资本主义国家每年石油输入量将达到七亿到十亿吨，超过石油输出国的输出能力^[2]。

目前世界上燃料能源的消耗情况大致分布如下：约 20% 用来获得电能；约 2% 用于运输（汽车运输、航空、海运和河运、铁路运输等）；约 30% 用于 500 到 1500°C 高温加热的工业，如冶金、化工和其他部门，甚至有些燃料也用作还原剂和原料。

燃料能源资源的大多数使用部门都要专用一种固定的能质（Энергоноситель），例如许多使用部门根本就不能用煤来代替液体燃料。

使用燃料能源最广泛的部门是电力部门，它可以使用所有的各种能源资源。热电站比较容易改用煤来代替石油。为

了降低石油的需求量，就有必要对各种燃料能源资源的使用部门排一下队。世界市场上石油不断涨价，就为燃料消费中更多地采用一些技术经济指标较低的燃料，尤其是煤，创造了有利的经济形势。直接用煤代替石油，只能在比较小的范围内实现。因此，只有用煤生产出使用性能与天然气和石油液体燃料相类似的碳氢燃料，才能在这基础上进一步改进燃料能源消费结构，以便更多地使用煤。要用核能来代替目前燃料能量消耗中的传统能源，困难就更多了，眼前只能用核能生产出占燃料能源消耗量 20% 的电 能。

现在正在研究高温核反应堆，这种反应堆能用核能代替冶金和化工中传统的能质^[3]。核反应堆也能用来产生低温热量，供取暖和其他低温工艺过程使用。要想进一步用核能排挤传统燃料，只有用核能生产出某些中间能质才能实现。这种中间能质可能是利用核能加工煤而得到的碳氢燃料，也可能是利用核能分解水而得到的氢。

中间能质能够协调各种能源用户的特殊要求和各种能源原料的物理化学性能，就好像按用户要求的性能把能源资源统一起来。显然，中间能质的使用性能越具有通用性，就越有发展前途。此外，中间能质还应保证能便于运输，便于分发给用户和便于贮存，并且还应该具有一定的环保性能。人类早就广泛使用的一种中间能质就是电力。这种能质具有能转变为其他形式的能量和输送迅速等独特的特点，也具有用户所要求的环保性能。但是电能不能贮存，也无法供给远离输电线的孤单的用户。此外，原始能源资源转变成电能的转换比（效率）只有 30~40%，最多只能提高到 50%。由于这些原因，在目前燃料能量消耗中，转换成电力的能源资源消耗量只占 20% 左右。看来虽然还有增加的趋势，但期望

电力成为通用能质是没有根据的。氢却能最大限度地满足对通用中间能质的要求。

氢作为能质的可能性

氢是自然界中分布最广的一种元素，约占地球质量的1%。氢无色、无嗅、无毒，具有很高的发热量，单位质量的发热量为120mJ/kg(28640kcal/kg)。氢的导热系数高，粘度小，在气体中它的扩散速度最大。

作为化学元素来看，氢是较好的还原剂之一，能生成金属的氢化物。国民经济中广泛运用的许多产品都含有氢的成分。氢离子具有很高的活性，是用于电化学点火的理想物质。氢作为燃料时，其环保性能是难得可贵的，氢燃烧后只生成水和氮的氧化物，而且只要适当地组织其燃烧过程，就能将这些氮的氧化物的生成量降到最小。

氢和天然气一样，可以用管道运输和分送到用户。由于氢的密度小和粘度小，用同样的管道，压差也不变，能输送的氢的容积要比天然气大1.7倍^[4]。但是，由于氢的单位容积发热量小，输送的能量却比天然气小12%，而气体加压站所消耗的功率却增加1.5倍，因此输送氢的费用看来比输送天然气的费用高40~50%。根据初步估计，用管道输送氢时，每一千公里的能量消耗量占被输送的氢能量的1%，而费用不超过其成本的10%^[3]。这样的指标是输电线路不可能达到的。

液氢也可能用管道输送，同时还能起超导输电线路的冷却剂作用。但是远距离用管道输送液氢是不利的，因为管道的绝热成本太高。

氢和天然气一样，能贮存在天然地下贮槽里，法国已经

有用天然地下贮槽贮存含 50% 氢的气体的经验。此外，氢可以贮存在用液体封住的贮气罐中，液氢可以贮存在低温容器中，氢也可以制成金属氢化物的形式贮存起来，氢还能贮存在溶液中。甚至只要提高输送氢气的管道系统中的压力，也可以把氢短期贮存在这管道系统里。氢能以各种物态的形式贮存起来的特性，为利用各种能源和向许多用户提供能量开辟了新的途径。

电力系统方面，利用氢作为中间能质，就有可能根本解决电力生产和用户需求的协调问题。可以想像出这样一种电力系统，该系统可以将生产出来的多余电能制成氢贮存起来，以保证用初始能源的发电站按基本工况工作，而负荷中的变化部分由专门的机动发电站来负担，该发电站用制氢系统贮存起来的氢工作。

氢用作能质，为利用那些远离用户又难于运输的有机燃料开辟了新的途径。根据已掌握和正在研究的一些技术，有可能用任何一种有机燃料生产出氢，然后用管道输送到用户集中的地区。用这种方案利用边远地区的燃料，可以解决许多环保问题，当然也可以解决生产和需求的协调问题。

是否能有效地使用核能（核裂变和核聚变所产生的能量）和太阳能，很大程度上取决于如何解决能量生产和需求的协调问题。氢作为能质，既能解决能量贮存问题，又能解决能量输送问题。不久的将来，在海上会出现以最佳工况工作的核能氢站和太阳能氢站。它们生产出来的氢（可能还有氧）或制成液氢用油船运往大陆，或以气态用管道输送到大陆。这种能量供应系统在环保方面是理想系统。用电化学发电机发电时，不仅能得到电能，而且还同时得到大量淡水（每生产 1MW/h 电能，同时能得到 0.4m³ 的淡水^[6]）。