

特种发动机

UNUSUAL ENGINES

朱仙鼎 主编

机械工业出版社

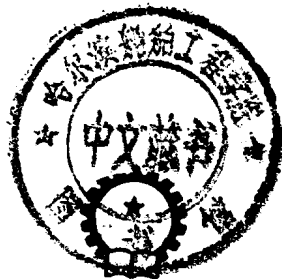
TKD5

360660

2190

特 种 发 动 机

主 编 朱仙鼎
副主编 王景枯
编 者 梁肇基 顾 瑛
郭一鸣 李炳泉
丁伯宽 施其华



机 械 工 业 出 版 社

(京)新登字054号

内 容 简 介

人类的进步与文明,是建立在无数“发明”的基础上的。动力机械的出现,推进了社会的发展。本书纵谈古今动力机械一系列重大发明,广收博集各种形式的动力机械方案及典型实例,加以分析对比,并探讨其前景。

全书共有十章,另有二则附录,“发明家应具有 的素质”和“尽快取得科研成果的诀窍”。各章均有参考文献,书后备有名词索引。

本书通过对特种发动机的全面介绍,不仅丰富了读者在动力机械方面的知识,而且告诉了读者认识事物、探索未知的方法,使读者更好地向大自然的未知世界进军,为人类作出更多的发明创造。

本书可供从事发动机开发、设计的技术人员、大专院校有关专业师生及发明爱好者参考。

特 种 发 动 机

主 编 朱仙鼎

副主编 王景枯

编 者 梁肇基 顾 诚

郭一鸣 李炳泉

丁伯宽 施其华

责任编辑:李旭涛 责任校对:韩 晶

封面设计:方 芬 版式设计:乔 玲

责任印制:王国光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第1117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

开本 850×1168¹/₃₂·印张9³/₄·插页4·字数267千字

1992年7月北京第1版·1992年7月北京第1次印刷

印数 0.001~2.000·定价:14.50元

ISBN 7-111-02880-5/TK·114

序 言

发动机的出现是人类的福音，蒸气机引起了工业革命，而新型发动机的发明创造，促进了社会的发展。几百年来，发动机以它的卓越性能和多种用途，已经渗透到人类生活的各个领域。尤其是汽车，以它惊人的数量、完美的造型、舒适的内部设施、机动灵活等特点，深受人们喜爱，同时又以快速和高效，加快人们的生活节奏。发动机飞轮的转动，缩短了时空的距离。当今这个五彩缤纷的世界，假如没有了发动机，那将是不可想象的。

在常规发动机获得广泛应用之后，特种发动机就成为不满现状而致力于改革的发明家所响往的领域，这是一个对创造者充满着诱惑力的天地，许多人为此奉献了毕生精力。历史上不仅出现过许多特种发动机专利，其中不乏成功之作，例如有些特种发动机能在特殊的场合，发挥常规发动机所不能比拟的作用。因此介绍各种独具匠心的发动机结构和工作原理，寻找它们的规律，探讨它们的前景，无疑是件有益的事情。

由上海机械学院王柏年教授推荐，上海内燃机研究所高级工程师朱仙鼎先生主编的《特种发动机》一书，集百余年来特种发动机理论探索和结构分析之大成，可供发动机设计、研究人员和发明爱好者参考。书中可以看到发动机的过去、现在和未来，还可以看到许多形形色色的新奇发动机方案和构思。能使读者开阔眼界、丰富知识，也可从中吸取经验教训。

李 渤 仲

1991年10月

目 录

第1章 绪论	1
1 动力机的水平标志着生产力的水平	1
2 内燃机在竞争中不断完善自身而取胜	4
3 回顾过去,展望未来	10
第2章 发动机的热力循环	14
1 热力循环	14
2 可逆热力循环	15
3 蒸汽循环	17
4 内燃机循环	20
5 燃气轮机循环	25
6 涡轮增压内燃机循环	26
7 其它几种复合循环	29
8 热气机循环	31
第3章 功率传输机构	33
1 活塞式发动机功率传输机构的发展概况	33
2 内燃机对功率传输机构的要求	41
3 各种可能的内燃机功率传输机构的归纳与分析	46
4 曲柄连杆机构及其派生形式	52
第4章 自由活塞发动机	58
1 气垫式自由活塞发动机	58
2 液压式自由活塞发动机	64
第5章 旋转式发动机	73
1 概述	73
2 旋转式发动机分类	80
3 三角转子发动机基本原理及其参数的选择	84
4 三角转子发动机的结构和主要工作系统	105
5 三角转子发动机的发展动向	129

6 其它形式的旋转式发动机	138
第6章 热气机	145
1 热气机的发展史	145
2 热气机的工作原理	146
3 热气机的结构类型	149
4 热气机的构造	151
5 热气机的工质	160
6 热气机的基本特点	163
7 热气机的主要问题	166
8 热气机的应用前景	167
第7章 常规发动机的特种技术	172
1 电子控制技术	172
2 气波增压技术	179
3 分层充气发动机	182
4 绝热发动机	187
5 可变机构内燃机	198
第8章 非常规燃料发动机	210
1 概述	210
2 非常规燃料	212
3 醇类燃料在各国的发展概况	223
4 多种燃料发动机	226
5 双燃料发动机	232
6 醇类燃料发动机	237
7 氢发动机	243
8 煤粉发动机	244
第9章 回热式发动机	256
1 理想的热力分析	256
2 发动机的控制	259
3 基本结构	260
4 设计要点	263
5 回热式发动机的优缺点	270
第10章 新奇发动机	272

1	光发动机	272
2	激光发动机	273
3	声热发动机	274
4	微波发动机	274
5	离子发动机	275
6	六冲程发动机	275
7	往复气缸式二冲程发动机	275
8	空气喷射式二冲程发动机	276
9	牟立特(MCC) 发动机	277
10	晴山喜七郎发动机	279
11	射流燃烧室发动机	280
12	丰田TGP稀燃发动机	281
13	无连杆发动机	282
14	无曲轴发动机	282
15	陶瓷发动机	283
16	非金属发动机	283
17	太阳能斯特林发动机	284
18	木材发动机	284
19	广谱燃料发动机	285
20	电控蒸汽发动机	285
附录		287
1	发明家应具备的基本素质	287
2	尽快取得研究成果的诀窍	291
名词索引		301

第1章 绪 论

“特种发动机”是在动力机的发明和发展过程中，在一定的历史阶段，对当时流行结构以外的动力机的统称。例如在蒸汽机极盛时代，活塞式内燃机可算是一种特种发动机；可是在活塞式内燃机极盛的今天，它就变成了**“常规发动机”**，而其他形式的动力机（包括结构新颖的蒸汽机在内）则成为**“特种发动机”**了。由此可见，“特种发动机”的概念具有时代性、相对性和动态性。

我国是动力机原理及其许多传动结构的故乡，但古老的中国没有产生出先进的动力机械。这当然有其政治、经济和社会的种种原因。今天，我们回顾、总结和分析动力机的发明和发展的历程，以借鉴当前，启示日后，尤其是对未来动力机的预测，是十分必要的。因为只有认真总结历史上的经验教训和充分分析当前的现状和发展趋势的基础上，才能正确地确定我们的主攻方向，全面地部署我们的力量。

1 动力机的水平标志着生产力的水平

在原始社会，动力机就是劳动者本身的肌肉。

在奴隶社会，动力机就是由奴隶们构成的人力机。

在封建社会，人们广泛地利用了畜力、风力和水力等自然力，这些力构成了当时的种种动力机。

在近代的资本主义社会，才采用了机械动力。16世纪末，资本主义生产方式在欧洲兴起。新兴的资本主义带来了创造新动力机的迫切要求和物质条件；中世纪的作坊向社会化大生产演变，开矿、冶金、机器制造和纺织业等的蓬勃发展，使原来的人力、畜力、风力和水力不敷应用了。开矿首先要求通风和排水，这就

需要巨大的动力。可是，在深窄的地下，一切风力、畜力、水力和其他自然力都难以胜任或无能为力。人们迫切地需要新的动力机。

近代内燃机的首次尝试就是火药机。大家知道，火药是我国四大发明之一。唐代孙思邈于公元850年首次记录了黑火药的配方，13~14世纪火药通过阿拉伯传至欧洲，在路易十四的“三十年战争”中得到大规模的使用。宋太祖开宝年间（公元969年~970年），岳义方和冯继升发明了用火药推动的火箭。宋高宗时（公元1132年），陈规发明用火药作动力的“火枪”。大约在公元1332~1351年，我国制成了世界上第一尊大炮，名曰“神飞”铜炮，上刻“射穿百里，声动九天”。欧洲关于火箭和大炮的知识和技术是在以后经伊斯兰教国家和马可波罗传过去的。火药在炮筒内爆炸，把炮弹推射出去，好比在内燃机气缸里完成了一个冲程。往复式内燃机的主要结构是往复活塞和曲柄连杆机构。往复活塞式风箱由我国首创，在使用了1400年以后才传至欧洲。曲柄连杆机构早在东汉初年（公元前31年）杜诗发明一种叫做“水排”的水力鼓风设备中就有其雏形；三国时魏人马钧发明的龙骨水车，就采用了一种曲柄连杆机构，它在中国应用了一千多年后

才传至欧洲。最迟到1313年，我国发明了轧棉机，它不仅采用了曲柄连杆机构，而且还应用了惯性飞轮原理。由此可见，我国古代劳动人民对热机的发明作出了卓越的贡献。但尽管如此，限于各时代的生产水平，毕竟没有发明出近代的内燃机。1673~1680年，荷兰物理学家柯·惠更斯（Christian Huygens）首先提出了真空活塞式火药内燃机的方案。它是利用火药燃烧的高温燃气在气缸内冷却后形成真空而带动活塞作功的（如图1-1），

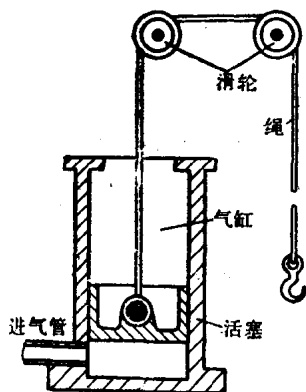


图 1-1 火药内燃机

第一次把燃气与活塞直接联系起来,实现了“内燃”。1690年惠更斯的朋友和助手,一位法国医生德·巴本 (Deni Papin) 在不断试验火药机失败以后,毅然放弃了火药机而设计了相当于真空原理的用水蒸汽作工质的活塞式发动机,成为近代蒸汽机的直接祖先。蒸汽机用煤做燃料,采用外燃的方法,无论从技术原理来说,还是就当时的生产条件来说,巴本开辟的这一新途径都是合理的。于是就立即引起广泛的研究和改进,终于在1705~1711年英国人纽科门 (New Comen) 制成了矿井抽水用真空式蒸汽机 (效率不到1%); 1776年他的同胞瓦特 (Watt) 发明了水汽分离冷凝器,大大完善了蒸汽机。虽然其效率仅3%,但已够当时工业实用了。从此开始了一个蒸汽机的时代。蒸汽机掀起了影响深远的工业革命,把资本主义生产方式推向第一个高潮。在一百年左右的时间里,蒸汽机在不断改进中较好地满足了社会各方面的需要。到了19世纪中叶,蒸汽机作为唯一的动力机而达到了它的顶峰。

正是在蒸汽机登峰造极的过程中,人们逐渐从切身经验和理论分析中认识到蒸汽机的前途是有限的。它具有一系列固有的缺点:

(1) 热效率低,当时蒸汽机的热效率一般只有5~8%,最高也不过10~13%;

(2) 结构笨重,体积大,不适应迅速发展的交通运输业的需要;

(3) 操作不便,需作较长时间预热,才能发动起来;

(4) 安全性差,经常发生锅炉爆炸事故;

(5) 造价昂贵,中小企业无力添置或更新。

在资本主义从自由竞争走向垄断的过程中,蒸汽机因上述五大缺点而逐渐被企业家抛弃。当时,谁能率先找到新的动力机来代替蒸汽机就意味着谁在竞争中取胜。恩格斯说过,社会一旦有技术上的需要,则这种需要就会比十所大学更能把科学推向前进。尽管当时的内燃机在性能上尚不能与蒸汽机匹敌,但也立即

在中小企业的小型发电站中获得了广泛欢迎。

社会对新动力机有了要求，但要实现尚需一定的条件。19世纪中叶，冶金和机器制造工业都达到了新的水平。1855年英国人贝士姆（Bessemer）发明了酸性转炉炼钢法；1878年英国人托马斯（Thomas）用碱性炉衬转炉炼钢，成功地使生铁去磷；1880年德国人威·西门子（Wilhelm Siemens）创造了电弧炉炼钢。从1775年到1845年间，各种机床（包括立式转塔车床、镗床和铣床等）均已先后发明并用于生产。正是这些条件为制造更高性能的动力机提供了足够的物质基础。

动力机的发展离不开燃料。当时在欧洲，煤仍是主要的燃料，但是自1792年英国人威廉·梅尔多克发明从干馏煤中获得可燃煤气以来，照明煤气的应用已是很普遍的事了。1859年第一口现代石油喷井在美国宾夕法尼亚州泰特斯维尔村喷油，为大量开采石油开辟了道路。不过当时石油的开采主要还是为了提炼煤油、润滑油和锅炉用油，至于汽油和柴油等仍被看作一种易燃易爆危险品，要运至郊外地坑中烧掉。然而，不久石油及其各种产品就以跃进姿态登上了历史舞台，供新一代动力机选用了。

社会的需要和物质基础都具备了以后，意味着孕育在母腹中的新型动力机即将临产了。内燃机的构思虽在蒸汽机之前，而它的诞生和社会应用却在蒸汽机之后，这就充分说明了动力机的水平标志着社会生产力的水平，有着强烈的时代性。

2 内燃机在竞争中不断完善自身而取胜

自从巴本抛弃火药机，开创蒸汽机事业以后，蒸汽机作为空前的技术进步得到人类的普遍欢迎和应用。但如前所述，在蒸汽机旭日东升之初，更先进的技术已在悄悄地孕育着。各种各样的动力机方案不断被呈现在人类面前。可是当时的蒸汽机来势凶猛，其他动力机方案在初露头角的时候就被压了下去。然而，新生力量终究是压不住的，内燃机在沉默了一百年之后，又冒出头来，开始了新的征途。

1794年英人罗伯特·斯却里塔 (Robert Street) 参考了瓦特蒸汽机的杠杆原理, 提出了一种燃用松节油或柏油的内燃机。他的功绩在于首次提出了燃料与空气混合的原理。1799年法国化学家莱蓬 (Lebon) 提出了另一个混合气式内燃机, 他的功绩是首次建议采用照明煤气作燃料, 并用电火花点火。这些创议在当时并没有引起人们的重视, 因此只不过是纸上谈兵而已。

1820年英人塞歇尔 (W. Cecil) 发表了关于以所谓氢煤气为燃料的内燃机报告, 并在实验室里获得了每分钟60转的成绩。虽然他最终未获成功, 但内燃机毕竟动起来了。

1833年英人莱特 (W. L. Wright) 提出了所谓“爆发”发动机专利, 第一次摆脱了真空发动机的框子, 直接利用燃烧压力推动活塞做功。可是该专利未能实施。

1857年意大利恩·巴尔桑奇 (Engenio Bersanti) 和马特依西 (Matteucci) 试验了当时称为“自由活塞”发动机, 第一次实现了爆发作功。它并不采用曲柄连杆机构, 而是活塞与输出轴之间采用齿条-齿轮装置联接。当活塞承受爆发压力时, 齿条与齿轮脱开, 活塞自由上行而与输出轴无关, 活塞上行的高度取决于爆发能量的大小, 上行到某一高度后便停止, 动能转为活塞的势能, 接着便排气。这种发动机爆发膨胀急速而充分, 同时输出轴又避免了直接承受爆发力。这种结构尽管可行, 但显然不如蒸汽机上久经考验的曲柄连杆机构合理而有效。

内燃机整机的探索和发展与其零部件的逐步完善是分不开的, 其中特别重要的是活塞环。以前, 作为热机而最初出现的是纽科门蒸汽机, 在这种所谓瓦特蒸汽机的先驱中, 采用皮革来作密封, 到19世纪初期, 才出现金属密封环。当时, 这种金属环大部分做成分开式的, 因其本身无弹性, 故须同时采用弹簧给它以弹力。这种想法直到现在仍被利用着, 炭精环、聚四氟乙烯环或具有外胀式衬环的铸铁环就是根据上述设想制成的。经过多年的研制, 1855年约翰·拉姆斯博顿 (John Ramsbottom) 制成了现代的本身具有弹力的整体式活塞环。其初期产品虽然原始而且昂

贵,但历史的发展表明了这种拉姆斯博顿环使密封效果大为改善,从而使混合气在燃烧前的压缩成为可能。这就为进一步近代内燃机理论的提出创造了条件。

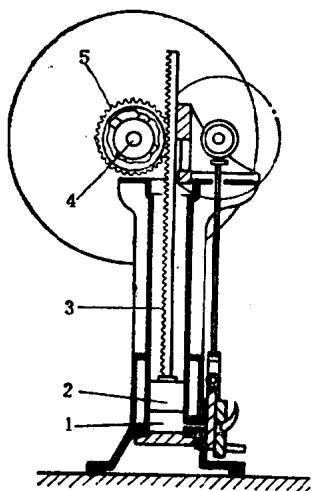


图 1-2 兰诺 (Lenoir) 煤气机

1—燃烧室 2—活塞 3—齿条
4—输出轴 5—齿轮

经过如上70多年的摸索、改进和经验累积,1860年法国人兰诺 (Lenoir) 终于研制成功第一台足以实用的煤气机(图1-2)。他没有提出新方案,只是把当时已取得的各项成就巧妙地结合起来。他首次采用了自涨式弹力环,克服了实际制造上的重重困难,完成了一部二冲程、无压缩、电火花点火的煤气机。它的外形和许多结构都与蒸汽机相类似。热效率仅4%,点火装置也不可靠,但它毕竟运转起来了,很受中小企业的欢迎。

这是内燃机第一次投入批量生产。到此为止,虽有了自涨式活塞环,但无论是真空机还是爆发机,燃料混和气都是不进行压缩的。因为对混和气在燃烧之前预先进行压缩要消耗额外功率,出于当时的认识水平上,发明家们都力求避免对混和气进行压缩。后来随着数以百计的兰诺发动机投入使用,人们掀起了研究内燃机的热潮。大量的使用实践使人们逐步发现预先对混合气进行压缩可以提高热效率。1862年法国铁路工程师包·德·罗沙 (Beau de Rochas) 在对内燃机热力过程进行理论分析之后,提出了提高内燃机效率的四项要求:(1)单位气缸容积的冷却面积应尽量小;(2)膨胀开始前缸内压力应尽可能高;(3)膨胀时活塞的速率尽可能快;(4)膨胀范围应尽可能大。为此,他提出四项措施:(1)要在活塞的向外行程内吸入新鲜混合气;(2)在接着的向内行程内进行压缩;(3)在上止点前附近点火,在下一个向外行程内膨胀;(4)在下一个向内行程内排除废气。很明显,这是一

次认识上的飞跃，他第一个提出了近代发动机等容燃烧的四冲程循环原理。可惜他的理论当时发表在法国一家地方刊物上，许久才被人发现。1876年德国人涅·奥托(Nicolaus August Otto)终于研制成功第一台现代四冲程往复式内燃机(见图1-3)。这是一台单缸、卧式、4PS[⊖]等容燃烧的煤气机。压缩比为2.5左右，采用曲柄连杆机构。结构小巧，运转平稳，热效率达12~14%。奥托的四冲程内燃机很快得到了大量推广，性能也不断提高，1880年功率已达15~20PS，1893年达到200PS；而且热效率也迅速提高，1886年达到15.5%，1894年提高到20%以上。奥托因此获得了“内燃机发明人”的声誉。其实，在他之前，1872~1873年，德国钟表工人哈·雷特曼(Reithmann)曾经研制成功一台四冲程煤气机，与奥托打过专利权的官司。普鲁士法庭否定了奥托的发明权，但由于雷特曼只是一名贫苦的工人，无力及时地推进自己发明的发动机而被埋没了。1881年英国人德·克拉克(Dugald Clerk)创造了第一台近代二冲程煤气机。既然有二冲程和四冲程，那么是否可有三冲程、六冲程呢？可以，在内燃机的发明史上，出现过这样的“特种发动机”，但都被实践所否定。

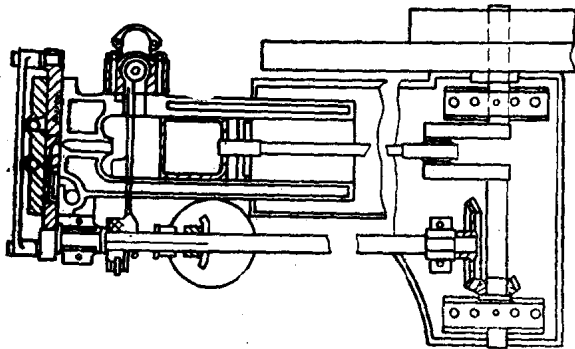


图 1-3 奥托 (Otto) 的曲柄连杆机构四冲程内燃机

[⊖] 1PS=0.735kW，下同。

至此为止所发明的内燃机几乎全部都是煤气机，因为照明煤气是当时应用最广泛，最易取得的能源，但它具有下列三大缺点：

- (1) 热值较低，约 $4200\sim 5000\text{kcal}\ominus/\text{m}^3$ ；
- (2) 煤气机的效率低，一般仅为20%左右；
- (3) 受到煤气管道供应系统或庞大煤气发生炉的束缚。

在奥托完善了发动机的本体之后，如何克服这三大缺点便成为主要矛盾了。19世纪末叶，石油工业蓬勃发展起来，比煤气热值高一倍以上的汽油和柴油等产品一天天惹人注目，这样就逐渐把汽油机和柴油机推上了历史大舞台。汽油的挥发性强，易于配成混合气，首先冲在前头。从19世纪30年代就不断有人进行摸索，葛·戴姆勒 (Gottlieb Daimler) 于1883年终于集汽油机之大成制成了第一台现代四冲程往复式汽油机。它的显著特点还在于首创立式发动机，另一个特点便是高速。当时所有内燃机转速没有超过 $200\text{r}/\text{min}$ 的，而戴姆勒汽油机的转速一跃而为 $800\sim 1000\text{r}/\text{min}$ (见图1-4)。从此，内燃机犹如猛虎添翼，马力大、重量轻、体积小、效率高，特别适用于交通运输。1886年，汽油机装车运行成功，1887年装船运行成功。紧接着，1890年英国人阿·斯托尔特 (Akroyd Stuart) 在英国人普雷斯特曼 (Priestman) 的煤油机基础上制成烧球式煤油机，1892年德国人鲁道夫·狄赛尔 (Rudolf Diesel) 提出以煤粉为燃料的压燃式发动机的设计 (见图1-5，该图中进排气门已被略去)。该设计为四冲程，在压缩冲程终点由气缸头上不断转动着的转阀1定时供应煤粉，转阀的工作情况如右边的放大图所示。图1-5a为煤粉进入煤槽7，图1-5b为煤槽开始与气缸相通 (压缩终点)，图1-5c为煤粉靠自重落入气缸燃烧，图1-5d为煤槽与气缸切断。煤槽7中的燃料量则由煤斗上每循环开启一次的阀2的开度来控制，阀2由凸轮3通过杠杆4及5传动，调速器通过杆6拉动杠杆4对阀2的开启

$\ominus 1\text{cal} = 4.1868\text{J}$ ，下同。

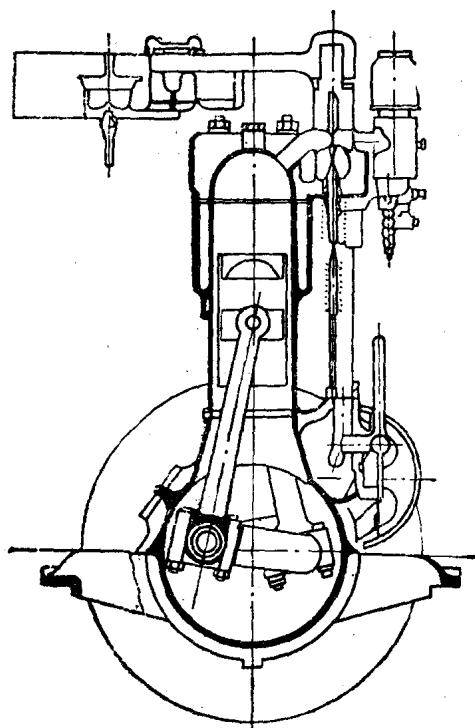


图 1-4 戴姆勒 (Daimler) 汽油机

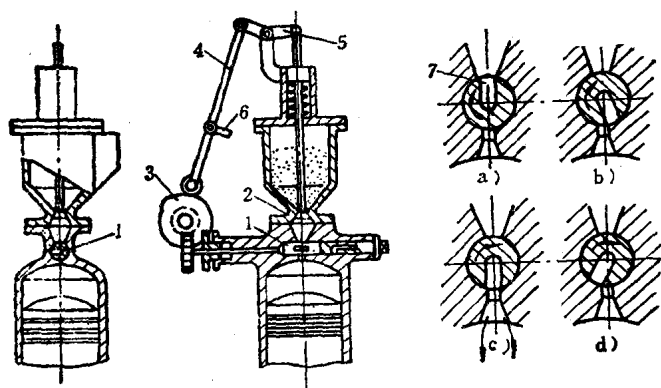


图 1-5 狄赛尔 (Diesel) 煤粉发动机原理图

1—转阀 2—阀门 3—凸轮 4、5—杠杆 6—拉杆 7—煤槽

进行自动调节以保证每转所需的煤粉量。狄赛尔用500孔/ cm^2 (约60目)的煤粉只能使这台煤粉机连续工作几分钟。后因大量未燃煤粉滞留在缸内使活塞咬死,导致一场严重的爆炸事故而被迫停止试验,唯一的成果是获得了第一张煤粉机示功图。从此,他排除了压燃式发动机燃用煤粉的可能性和必要性。5年后,即1897年,他最后研制成功完全靠压缩着火的,采用液体燃料的柴油机。到此,往复活塞式内燃机的发明已经全部完成了。随着逐步投入批量生产,其应用也逐渐广泛,几乎渗透到人类生活的各个领域。从而使自己由发明初期的特种发动机变成了常规发动机。对这种常规发动机,不同年代里的发明家们也搞出了很多发明专利对它进行细节改进,从而逐渐把它提高到目前这样的水平。

3 回顾过去,展望未来

往复活塞式内燃机的发明,以燃用松节油的1794年算起,到1897年发明柴油机为止,走过了整整103年艰苦奋斗的历程才告完成。这个历程告诉我们:

(1) 一项伟大的发明创造决不是靠某个先知先觉的“天才”一时灵感产生的,而是社会生产力发展的必然产物,是人类集体智慧的成果。在创制近代内燃机的一个世纪中,各种动力机方案何止千千万万,仅以留下记载的几百名发明人而言,就涉及欧美所有主要国家,深入社会各个阶层,有著名科学家,也有无名小人物,有小业主,也有工程师、技师和普通工人。他们的每一个发明都是在前人一系列局部革新之后产生的。不同年代的人们前赴后继,不断添砖加瓦,最后建成内燃机的高楼大厦。最著名的兰诺发动机和奥托发动机的成功就是最令人信服的证明。兰诺和奥托本人没有提出什么新的原理和结构。他们只是把前人累积起来的成果有效地综合起来,并通过长期的反复的科学实验才攀上技术高峰的。为什么许多发明几乎是同时独立完成的?为什么许多发明发生了专利权的争执?原来,他们本来就是互相借鉴,互相渗透,你中有我,我中有你的。说明了这些发明都具有深刻