

高等学校试用教材

机车柴油机原理

北方交通大学

高等学校试用教材

机车柴油机原理

北方交通大学 主编

中国铁道出版

1981年·北京

高等学校试用教材

机车柴油机原理

北方交通大学 主编

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 15.75 字数: 387 千

1981年1月第1版 1981年1月第1次印刷

印数: 0001—4,000册 定价: 1.65元

前 言

本教材是根据1978年机车柴油机专业教材编写会议所制订的“机车柴油机原理教学大纲”的要求编写的。讲授时数为90学时。

本教材以机车柴油机为主,结合近几年来国内外中、高速大功率废气涡轮增压柴油机发展的特点,系统地阐明柴油机原理的基本理论、基本概念和基本试验方法。结合电子计算技术的应用,深入地讨论了柴油机工作过程、燃料喷射与燃烧及废气涡轮增压系统的有关设计计算问题。对目前同类教材中没有具体涉及到的柴油机实际循环模拟热计算、燃料系统喷油规律计算、燃烧过程放热规律理论及废气涡轮脉冲转换器计算等进行了较详细的阐述。为了加强试验研究手段,本书对柴油机示功图的测录、分析、整理计算等方面,单独进行了叙述。书中所引用的试验资料与计算数据,基本上反映了国内外机车柴油机发展的最新技术成果。

根据国务院及教育部的有关规定,本教材采用国际单位制。在个别试验图表中,为保持原数据的精确性,仍沿用原单位制。

本教材内容共分八章,由西南交通大学及北方交通大学合编。第一、二、六章由北方交通大学包志国编写;第三、四、五章由西南交通大学魏道远编写;第七、八章由北方交通大学顾世其编写。

全书由北方交通大学主编,承西南交通大学魏道远同志审阅,其中第四章及第八章还分别征求了上海铁道学院戚文星、陈鸿奎两同志的意见。对于他们的热情帮助,谨表示感谢。

编 者

1980年4月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 柴油机的燃料	7
第三节 柴油的燃烧热化学	9
第四节 工质的比热容	13
第二章 柴油机工作过程热计算	18
第一节 柴油机理想循环热计算	19
第二节 柴油机实际循环近似热计算	25
第三节 柴油机实际循环模拟热计算	52
第三章 换气过程及燃烧过程的分析	65
第一节 换气过程的分析	65
第二节 换气过程的损失	69
第三节 换气质量的评定及影响因素	71
第四节 提高充量系数的措施	76
第五节 柴油机的燃烧过程	79
第六节 柴油机燃烧过程的放热规律	87
第七节 废气的成分和烟度	92
第四章 柴油机燃料的喷射	98
第一节 燃料系统的组成及其基本工作原理	98
第二节 燃料系统的喷射过程及其特性	111
第三节 喷油泵的结构参数及其对柴油机性能的影响	120
第四节 喷油器的结构参数及其对柴油机性能的影响	130
第五节 燃料系统的不正常喷射及穴蚀	136
第五章 可燃混合气的形成与燃烧室	141
第一节 可燃混合气的形成	141
第二节 燃烧室的分类	146
第三节 开式燃烧室	148
第四节 预燃室式燃烧室	153
第五节 燃烧室的比较和选型	157
第六章 柴油机示功图的分析、机械损失及热平衡	163
第一节 示功图的修正	163
第二节 示功图的整理计算	166
第三节 柴油机机械损失的分析及其测定	171
第四节 柴油机热平衡	174

第七章 柴油机的特性及调节	178
第一节 柴油机的固有特性	178
第二节 柴油机的调速特性	182
第三节 柴油机与从动机械的联合工作特性	195
第四节 联合调速器	196
第八章 柴油机增压	201
第一节 概述	201
第二节 废气涡轮增压器	202
第三节 增压系统的选择	219
第四节 废气涡轮增压器的工作过程计算	230
第五节 废气涡轮增压器和柴油机的特性配合	232
第六节 增压柴油机的特点	239
第七节 柴油机功率的标定及修正	242

第一章 绪 论

第一节 概 述

利用物质的物理化学反应（例如：燃料的燃烧、原子核反应、太阳能的利用等等）所产生的热能转变为机械能的动力机械，称为热机。热机可分外燃机及内燃机两类。工质在热机的外部接受热能后，进入热机内部作功的热机，称为外燃机。例如：蒸汽机、蒸汽轮机、燃气轮机等。工质在热机的内部接受热能直接作功的热机，称为内燃机。内燃机又按所用的能源不同而分为汽油机、煤气机和柴油机等。目前内燃机车所用的动力装置，几乎都是柴油机。

一、柴油机基本工作原理

图 1—1 是柴油机的简单示意图。

活塞 2 在气缸 1 内作上下往复运动，通过连杆 3 把运动转变为曲轴 4 的回转运动。气缸盖 5 上装有进气门 6、排气门 8 及喷油器 7。

当活塞由上向下运动时，外界的新鲜空气经过进气门被吸入气缸，而后在活塞向上运动时，对这部分新鲜空气进行压缩，使空气的温度和压力都有较大的升高。这样的空气与从喷油器喷入气缸的柴油混合，能使柴油自行着火燃烧，放出热能，使工质的温度与压力急剧升高，而后，工质在气缸内膨胀，推动活塞向下运动作功。工质的膨胀功经连杆由曲轴输送出去。这就是柴油机把燃料的热能转变成机械功的简单过程。为了使这一能量的转变过程能连续不断地进行下去，在工质膨胀后，活塞必须由下向上运动，将废气从排气门排出气缸，为再次吸入新鲜空气，进行下一个热能转换过程作准备。由此可见，柴油机要完成一次能量转换（即一个工作循环），必须经过进气、压缩、燃烧膨胀作功和排气四个过程。为了进一步分析工作循环，先介绍一些常用的术语。

上止点和下止点 活塞在气缸内运动时，会出现两个特殊位置。当活塞距曲轴中心最远位置时，运动速度为零，该位置称为上止点，上止点是活塞向上运行时能达到的最高极限位置；当活塞距曲轴中心最近位置时，运动速度也为零，该位置称为下止点，下止点是活塞向下运行时能达到的最低极限位置。

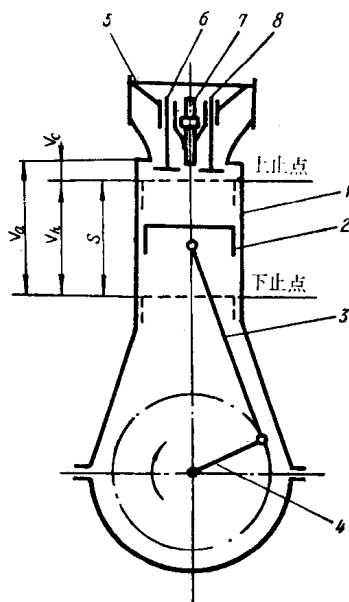


图 1—1 柴油机简单示意图

1——气缸；2——活塞；3——连杆；
4——曲轴；5——气缸盖；6——进气门；7——喷油器；8——排气门。

活塞行程 活塞从上止点运动到下止点，或由下止点运动到上止点所走过的行程，即上下止点间的距离，称为活塞行程，也称活塞冲程，通常以 S 表示。

燃烧室容积 活塞位于上止点时，由活塞、气缸以及气缸盖所包围的空间容积，称为燃烧室容积，以 V_c 表示。

气缸工作容积 活塞从上止点移动到下止点所走过的容积，称为气缸工作容积，又称活塞排量，以 V_h 表示。气缸工作容积可用下式计算：

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} S \quad \text{米}^3$$

式中 D ——气缸直径，米；

S ——活塞行程，米。

气缸总容积 气缸工作容积 V_h 与燃烧室容积 V_c 之和称为气缸总容积。它表明活塞位于下止点时，活塞顶上部空间的全部容积，用 V_a 表示：

$$V_a = V_h + V_c \quad \text{米}^3$$

压缩比 气缸总容积 V_a 与燃烧室容积 V_c 的比值，称为压缩比，以 ε 表示：

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_h + V_c}{V_c} = \frac{V_h}{V_c} + 1$$

压缩比表明进入气缸的空气在气缸里被压缩的程度。

根据柴油机完成一个工作循环时活塞上下运动的次数（冲程数），柴油机可分成四冲程柴油机和二冲程柴油机。现将它们的基本工作原理叙述如下：

（一）四冲程柴油机工作原理

图 1—2 是四冲程柴油机的实际工作过程示意图。图中表示出了各个过程中活塞、连杆、曲轴及气门的相对位置，并以 $P-V$ 坐标图表示气缸内工质压力与容积之间的变化关系。四冲程柴油机的工作循环是由活塞的四个行程来完成的。

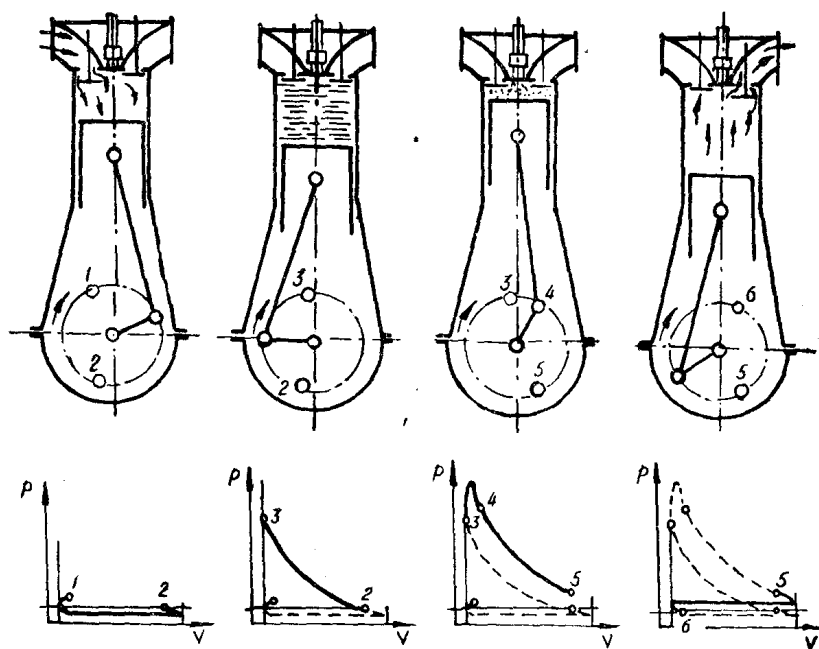


图 1—2 四冲程柴油机工作过程示意图

第一冲程 活塞由上止点向下止点运动，外界新鲜空气经进气门被吸入气缸，为柴油的燃烧准备足够的新鲜空气。必须注意：气门的开启和关闭并不是瞬时完成的，而是逐渐开启和关闭的，为了保证气缸内能尽可能多地充入新鲜空气，满足柴油燃烧时有充足的氧气，因此，进气门应在活塞位于上止点稍前的地方开启（图1—2中的点1），在下止点稍后的地方关闭（图1—2中的点2），这就使进气门有一个早开晚关的规律，进气过程在进气冲程前开始，在进气冲程后结束，可见进气冲程并不包括全部进气过程；此外，在进气过程中，因产生流动阻力损失，所以气缸内的工质压力比外界的空气压力要低一些。

第二冲程 由于曲轴的转动，活塞由下止点向上止点运动，使气缸内工质受到压缩，因而工质温度及压力都得到提高，当活塞接近上止点时（图1—2中的点3），喷油器开始向气缸内喷入柴油，并与高温高压的压缩工质混合，大致在第二冲程快结束时，柴油开始自行着火燃烧。由此可见，第二冲程主要包括压缩过程，此外，还包括部分进气过程及部分喷油燃烧过程。

第三冲程 活塞由上止点向下止点运动，柴油继续由喷油器喷入气缸内（在图1—2中的点4时喷油结束），燃烧过程持续进行，工质的压力及温度急剧上升。在高温高压的工质作用下，推动活塞下行膨胀做功，与此同时，气缸内工质的压力和温度也相应下降，直至排气门开启（图1—2中的点5），已经作过功的废气由排气门排入大气，气缸内废气压力和温度迅速下降。这个冲程的特点是：它不但包括膨胀过程，还包括燃烧过程以及一小部分排气过程。排气门提前开启，是为了使气缸中废气能尽可能多地排除干净。

第四冲程 活塞由下止点向上止点运动，将气缸中的废气经排气门推出气缸外，排气门并不在这一冲程结束时关闭，而是在结束后关闭（图1—2中的点6），其原因也是气门的开关不是瞬时完成的，是逐渐开启和关闭的，为了使废气尽可能多地从气缸排出，排气门也应有早开晚关的规律。还需注意到，在第四冲程结束前，进气门已经打开（图1—2中的点1），这就为下一个工作循环做了准备，以后柴油机又重新开始第一冲程，并按上述循环顺序不断工作。

四冲程柴油机的实际工作循环包括了四个过程，即进气过程、压缩过程、燃烧膨胀做功过程及排气过程，而这四个过程是由活塞的四个行程（曲轴旋转两圈）来完成的，其中燃烧膨胀过程所作的功，除克服摩擦阻力及供给其它冲程消耗外，剩余的功向外输出。

（二）二冲程柴油机工作原理

二冲程柴油机的工作循环也包括进气、压缩、燃烧膨胀做功及排气四个过程，但这四个过程是由活塞的两个行程来完成的。它的进气过程和排气过程并不单独占有各自的行程，因而在结构上与四冲程柴油机略有不同。图1—3是二冲程柴油机的实际工作过程示意图。图中最突出的是增加了一个扫气泵 a ，用来将外界空气加压到110~130千帕；在气缸下部开有扫气孔 b （又称进气孔），扫气孔的开启和关闭是由活塞在气缸内移动的位置来控制的。图中的排气门如同四冲程柴油机一样，由专门机构（配气机构）来控制，有的二冲程柴油机没有排气门，而用开在气缸下部的排气孔来代替它。二冲程柴油机的工作原理如下：

第一冲程 活塞由下止点向上止点运动，扫气孔未被活塞遮闭之前，外界空气由扫气泵经扫气孔进入气缸，将气缸中上一循环的废气从排气门排出去，并充入新鲜空气，进行扫气，直至活塞遮闭扫气孔；当排气门被关闭时（图1—3中的点1），开始压缩过程，气缸中工质压力和温度升高，在活塞到达上止点前（图1—3中的点2），喷油器开始向气缸内喷入柴油，大致在第一冲程快结束时，柴油在高温的工质作用下自行着火燃烧。

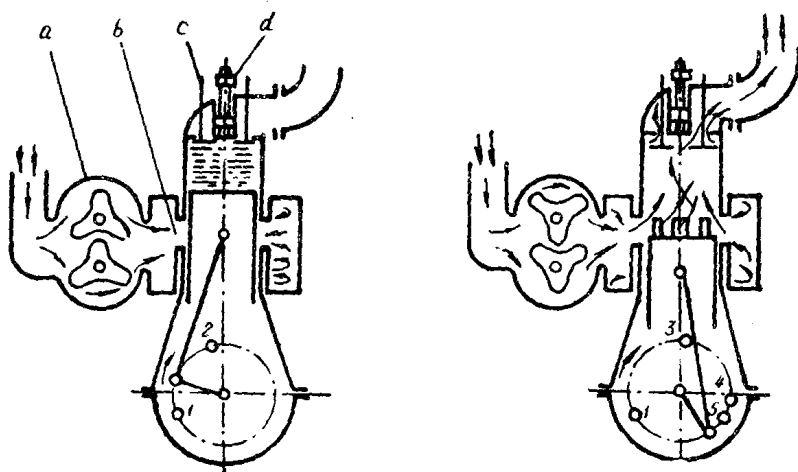


图 1—3 二冲程柴油机工作过程示意图

a——扫气泵；b——扫气孔；c——排气门；d——喷油器。

第二冲程 活塞由上止点向下止点运动，柴油继续由喷油器喷入气缸（图 1—3 中的点 3 时喷油结束），燃烧过程持续进行，工质的压力及温度急剧上升，在高压高温的工质作用下，推动活塞下行膨胀做功。与此同时，气缸内工质的压力和温度也相应下降，当膨胀进行到图 1—3 中的点 4 时，排气门开始打开，废气经排气门排出气缸，压力迅速下降。当活塞下移到让开扫气孔时（图 1—3 中的点 5），扫气空气又由扫气孔进入气缸，把废气清扫出去，直至扫气孔关闭为止。从扫气孔开启到关闭这一期间，进气过程与排气过程是同时进行的，称为扫气过程，又称换气过程。而后，柴油机又重新进行压缩过程，按上述循环顺序不断工作。

简单地说，二冲程柴油机的第一冲程初期进行扫气过程，后期进行压缩过程；第二冲程初期进行燃烧膨胀做功过程，后期进行扫气过程。这样，在曲轴旋转一圈的两个行程内就能完成一个工作循环。

机车用二冲程柴油机除上述直流气门（气孔式）换气形式外，也采用直流气孔换气形式，这种换气方案如图 1—4 所示。新鲜空气的充入气缸和废气的排出气缸，都采用设在气缸两端由上、下两个活塞所控制的气孔来进行。上、下两个活塞用连杆分别与上、下两根曲轴连接，上、下两根曲轴间用一垂直传动轴连接起来，功率由下曲轴输出。在这种柴油机中，每一气缸内都有两个活塞作对向运动，照这种方案布置的柴油机，称为对动活塞式柴油机。柴油机运转时，为了增加新鲜空气量，上、下活塞的运动彼此错开一个角度，一般控制扫气孔的活塞，比控制排气孔的活塞落后 $5 \sim 14^\circ$ ，即排气孔端的活塞到达外止点（对动活塞式柴油机的上、下止点用内、外止点来代替）

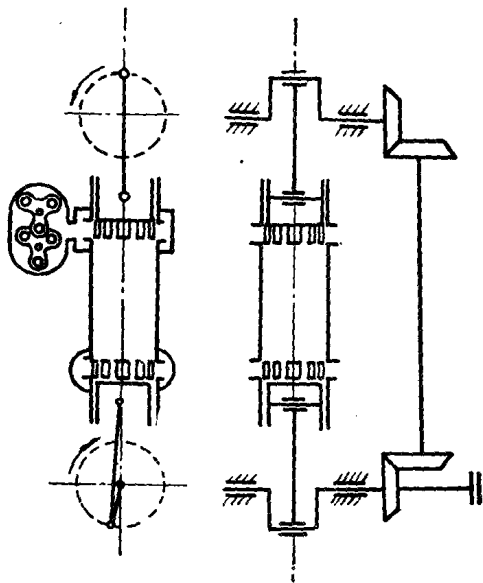


图 1—4 直流气孔式二冲程柴油机示意图

时, 扫气孔端的活塞还在外止点前 $5 \sim 14^\circ$ 。由于排气孔能在气缸壁整个圆周上布置, 所以它的换气质量比直流气门式好, 但它的排气端活塞的热负荷较大, 柴油机较高, 结构也较复杂。

二、柴油机的应用与分类

柴油机从发明到现在将近一个世纪。由于它具有热效率高、功率范围宽广、单位功率重量轻、燃料消耗量少、起动方便、操作简单及运行安全等优点, 所以在国民经济的许多部门被广泛应用。

在工业上, 应用在柴油发电站、矿山掘进机械、建筑工程机械、装卸起重机械、船舶运输、铁路运输、汽车运输等动力机械中;

在农业上, 应用在拖拉机、排灌机械、农副产品加工等动力机械中;

在国防上, 应用在坦克、装甲车、各种军舰、快艇、潜艇等动力装置中。

为满足工农业生产、交通运输、国防工业等各方面的不同要求, 柴油机在结构型式及工作方法上应具有不同的特点。

(一) 根据完成工作循环的冲程数, 可分成四冲程柴油机和二冲程柴油机。

(二) 根据进入气缸的空气压力可分成:

1. 非增压柴油机 新鲜空气未经压缩直接被吸入气缸; 或空气虽经压缩后被送入气缸, 但只是为了清除废气。这种柴油机称为非增压柴油机。

2. 增压柴油机 预先经过压缩的新鲜空气被送入气缸, 使气缸内的空气量显著增加。这种柴油机称为增压柴油机。

目前机车用柴油机几乎全部采用增压柴油机。

(三) 根据柴油机曲轴转速的统计数据, 通常将柴油机分为低速、中速和高速三类。当柴油机曲轴转速小于 750 转/分时, 柴油机称为低速柴油机; 当转速在 750~1350 转/分之间时, 称为中速柴油机; 当转速大于 1350 转/分时, 称为高速柴油机。

考虑到摩擦损失与活塞平均速度 C_m 米/秒有关, 因此常常又根据活塞平均速度对柴油机进行分类:

1. 低速柴油机 $C_m < 6$ 米/秒

2. 中速柴油机 $6 < C_m < 11$ 米/秒

3. 高速柴油机 $C_m > 11$ 米/秒

机车柴油机都采用中、高速柴油机。

柴油机的活塞平均速度可由下式计算:

$$C_m = \frac{2Sn}{60} = \frac{Sn}{30} \text{ 米/秒}$$

式中 n —— 柴油机曲轴转速, 转/分;

S —— 活塞的行程, 米。

(四) 根据气缸中心线位置可分为:

1. 直立式柴油机 气缸中心线垂直布置。

2. V型柴油机 气缸中心线排列为“V”字型。

3. 对动活塞式柴油机 气缸中心线垂直布置, 但气缸内有两个活塞作相对运动。

4. 其它类型柴油机其中有卧式、H型、△型、X型及星型等柴油机。

机车柴油机大多都采用直立式、V型以及对动活塞式柴油机，其中以V型柴油机为多。

(五) 根据柴油机的用途可分为：

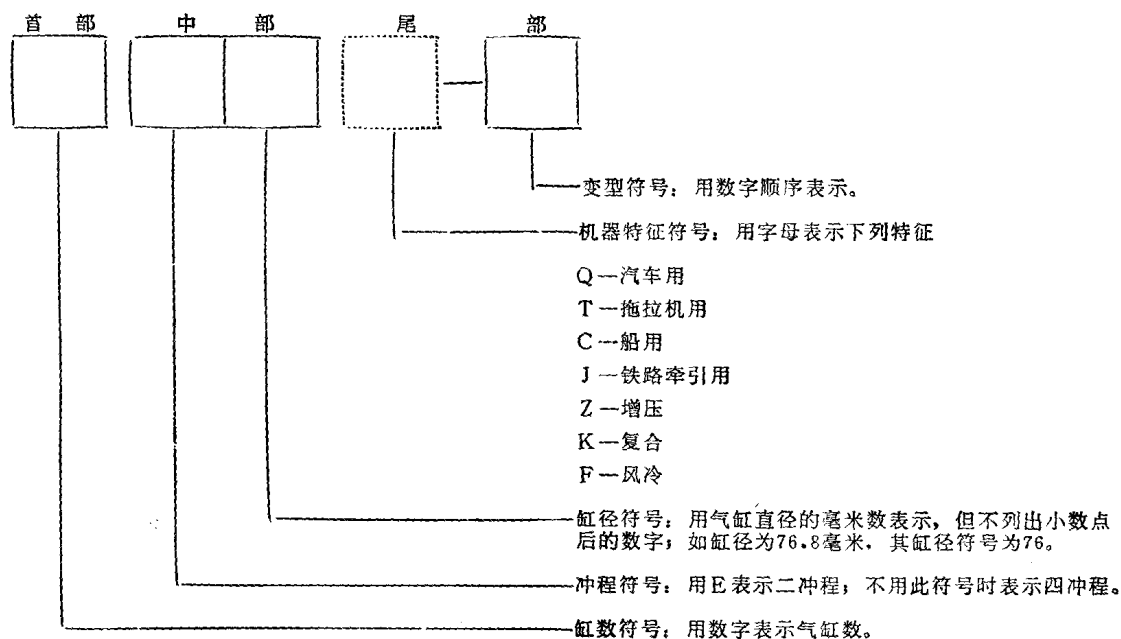
1. 固定式柴油机 应用在发电站、空气压缩机、抽水泵等作动力的柴油机。
2. 船舶柴油机 应用在舰船上作主机的柴油机。
3. 机车柴油机 应用在机车上作动力装置的柴油机。
4. 汽车拖拉机柴油机 应用在载重、牵引汽车、农用拖拉机、装卸运输机械上的柴油机。

机车对柴油机的主要要求是：运用可靠、操纵简便、功率大、经济性能高、维修方便、大修期长、结构简单、紧凑、轻巧、受铁路机车车辆限界限制、生产成本和维修费用低廉等。

三、柴油机型号、旋转方向和气缸编号的编制规则

柴油机的型号、旋转方向和气缸编号由国家标准统一规定。

根据国家标准GB725—65，柴油机型号由阿拉伯数字和汉语拼音文字的首位字母组成。为避免字母重复，可借用其它汉语拼音字母，但不得用其它文字或代号。柴油机型号依次由三部分组成：首部为缸数符号，用数字表示气缸数；中部为机型系列代号，由冲程符号和气缸直径符号组成，冲程符号用字母表示，缸径符号用数字表示；尾部为变型符号，用数字顺序表示，与前面符号用短横隔开，必要时，在短横前可增加机器特征符号，机器特征符号用字母表示。柴油机型号的排列顺序及符号规定如下：



现以机车柴油机型号的顺序及符号编制示例如下：

16200Z-2——表示16缸，四冲程，缸径为200毫米，增压柴油机，第二种变型产品。

10L207——表示10缸，二冲程，缸径为207毫米，非增压柴油机。

根据国家标准GB726—65，柴油机的旋转方向规定为：

确定柴油机旋转方向时，其观察视向规定由功率输出端朝自由端看（相对于功率输出端的另一端为柴油机的自由端）。凡输出端顺时针方向旋转者称之为“右转”；凡输出端逆时针方向旋转者称之为“左转”。多轴式柴油机其旋转方向应以主要输出轴确定。

根据国家标准GB726—65，柴油机气缸编号方法规定为：

由功率输出端朝自由端看，以垂直于输出轴中心线的水平线为基准，从该水平线的右端逆时针方向依次计数，最先遇到的一列气缸为Ⅰ列，以后依次为第Ⅱ列、第Ⅲ列……等等。

不论柴油机的气缸排列型式如何，均应由自由端开始向功率输出端方向依次进行气缸编号；整合柴油机的气缸号码应为连续的顺序号。

V型柴油机，最右边的一列气缸由自由端开始编为1，2，3，…… n ；左边的一列气缸由自由端开始编为 $n+1$ ， $n+2$ ， $n+3$ ，…… $2n$ 。

根据以上规定，12240 Z 柴油机的气缸编号为：

输出端	左	12	11	10	9	8	7
	右	6	5	4	3	2	1

第二节 柴油机的燃料

柴油机的燃料是柴油。柴油是从石油中提炼出来的。我国石油资源非常丰富，石油工业的迅速发展为柴油机的广泛应用提供了广阔的前景。

柴油在燃烧时发出的热量高，灰分少，它的价格也便宜。由于它是液体状态，因此也便于运输和储存。

柴油的化学成分主要是碳氢化合物的混合液，还有少量氧、硫、氮、水和形成灰分的矿物质等。柴油的主要化学元素碳、氢、氧的质量百分比一般为：碳（C）占87%；氢（H）占12.5~12.6%；氧（O）占0.4~0.5%。柴油的分子量随混合液中碳氢化合物成分不同差异较大，一般在180~280之间。柴油的沸点为250~360°C。

1千克柴油在完全燃烧时放出的热量，称为柴油的热值。热值分高热值与低热值。高热值是指燃料完全燃烧时放出的热量，它包括燃烧产物中水蒸汽的潜热，该潜热只有在水蒸汽凝结后才可以利用。低热值是指燃料完全燃烧时放出的热量，但不包括燃烧产物中水蒸汽的潜热。

柴油机所用柴油的热值都是指低热值，并以 H_L 表示，它的一般数值为：

$$H_L = 41860 \sim 43300 \text{ 千焦/千克}$$

柴油根据粘度和比重的不同可分为轻柴油和重柴油两种。中、高速柴油机一般用轻柴油，大型低速柴油机一般用重柴油。机车柴油机都用轻柴油。国产轻柴油的国家标准见表1—1。表中列出的项目都是柴油的质量指标，下面对这些指标略加说明。

十六烷值 十六烷值是评定燃料自燃性的指标。柴油机要求柴油具有良好的自行着火性能，即自燃性能。柴油的着火性能好，柴油机工作时就平稳、起动容易。鉴定柴油发火性能的好坏可用柴油的十六烷值来评定。柴油的十六烷值高，则柴油机工作柔和、平稳、起动容易、经济性好、零部件寿命长；柴油的十六烷值低，则柴油机工作粗暴、零部件磨损快、经济性差。十六烷值过高也不利于柴油机的工作，因为柴油来不及与压缩空气混合而燃烧，产生游离碳，排气冒黑烟，柴油消耗大，工作粗暴，磨损加快。

轻 柴 油 (GB252—64)

表 1—1

项 目	质 量 指 标					试 验 方 法
	+ 10号	0 号	10号	20号	35号	
十六烷值 不低于	50	50	50	45	43	GB386—64
馏程						GB255—64
50%馏出温度 ℃ 不高于	300	300	300	300	300	
90%馏出温度 ℃ 不高于	355	355	350	350	—	
95%馏出温度 ℃ 不高于	365	365	—	—	350	
粘度 (20℃)						GB266—64
恩氏°E	1.2~1.67	1.2~1.67	1.2~1.67	1.15~1.67	1.15~1.67	
运动 厘沲	3.0~8.0	3.0~8.0	3.0~8.0	2.5~8.0	2.6~7.0	GB265—64
10%蒸余物残炭 % 不大于	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	GB263—64
灰 分 % 不大于	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	SYB2612—62
硫 含 量 % 不大于	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	GB380—64
机械杂质	无	无	无	无	无	SYB2403—62
水 分 % 不大于	痕 迹	痕 迹	痕 迹	痕 迹	无	GB260—64
闪点 (闭口) ℃ 不低于	65	65	65	65	50	GB261—64
腐蚀 (铜片)	合 格	合 格	合 格	合 格	合 格	GB378—64
酸度 毫克KOH/100毫升 不大于	10	10	10	10	10	GB258—64
凝点 ℃ 不高于	+ 10	0	- 10	- 20	- 35	SYB2601—62
水溶性酸和碱	无	无	无	无	无	GB259—64
实际胶质 毫克/100毫升 不大于	70	70	70	70	70	SYB2103—60

注：1. 由含硫0.3%以上的原油制得的轻柴油，硫含量允许不大于0.5%；由含硫量0.5%以上的原油制得的轻柴油，其硫含量允许不大于1%。

2. 由催化裂化法制得的+10号、0号、10号轻柴油十六烷值允许不低于45。

3. 浊点不准高于凝点指标7℃，有水分痕迹的轻柴油，其浊点测定须先行脱水。

选用正十六烷 ($C_{16}H_{34}$) 和 α -甲基萘 ($\alpha-C_{11}H_{10}$) 这两种发火性能截然不同的碳氢化合物，按不同的体积比配制标准燃料来测量柴油的十六烷值。正十六烷最容易发火，人为地定其十六烷值为100； α -甲基萘最不容易发火，定其十六烷值为零。当被测定的柴油发火性能与所配制的标准燃料发火性能相同时，标准燃料中所含正十六烷的体积百分数就是被测柴油的十六烷值。例如，20号柴油的十六烷值是45，即表示20号柴油的发火性能与含45%正十六烷和55% α -甲基萘的标准燃料的发火性能相同。

一般中、高速柴油机所用柴油的十六烷值在45~60之间为好。

蒸发性能 蒸发性能是指柴油在某一温度范围内的蒸发速度与数量。它对柴油与空气混合的速度有很大影响，从而影响整个燃烧的完善程度、起动性能、工作可靠性和经济性等。蒸发性能好的柴油能较快地与空气混合燃烧，但蒸发速度太快、蒸发量太大时，会使燃烧粗暴，工作可靠性差，经济性也差。一般高速柴油机的混合气形成时间短，要求柴油的蒸发性能好些。此外，燃烧室结构的不同对蒸发性能的要求也不同。

柴油的质量指标中是以柴油的馏程来评定柴油的蒸发性能的。馏程表示柴油在各温度范

围内蒸发成分的百分比。例如，20号柴油在温度不高于 300°C 时，柴油应蒸发掉50%；在温度不高于 350°C 时，柴油应蒸发掉90%。如果在该蒸发量时，所需温度超出规定范围，则说明柴油的蒸发性能低。

流动性 柴油的流动性好坏，直接影响到柴油在燃料系统中的流动性能及雾化质量。柴油的流动性是以它的粘度和凝点来评定的。

粘度是表示柴油在受外力作用时，柴油分子间的阻力大小。柴油粘度过大会使柴油流动困难、雾化质量差、与空气混合不均匀，因而燃烧不好，柴油机功率下降，经济性能差。粘度太小会造成输油功率消耗大、燃料系统密封性差、油束射程减小，同样会使柴油机功率及经济性能下降。柴油的粘度可用恩氏粘度($^{\circ}\text{E}$)或运动粘度来计量。恩氏粘度是指200毫升的柴油在指定温度下(轻柴油为 20°C ，重柴油为 50°C)，自恩氏粘度计流出的时间与200毫升蒸馏水在同样温度下流出粘度计的时间的比值。运动粘度是指一定体积的柴油流过毛细管粘度计所需要的时间与粘度计毛细管常数的乘积，单位为厘沱。

柴油的粘度是随温度变化的，温度增高，粘度减小，温度降低，粘度增加。当温度下降到使柴油凝固而失去流动性时，此时的温度称为凝点。我国的轻柴油规格的牌号就是根据凝点不高于 $+10^{\circ}\text{C}$ 、 0°C 、 -10°C 、 -20°C 、 -35°C 相应编为+10号、0号、10号、20号、35号五个牌号。例如，20号柴油的凝点不高于 -20°C 。选用柴油牌号时，一般要求凝点比柴油机工作的外界环境温度低 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 以上。因此，机车柴油机所选用的柴油应根据机车运行地区季节气温而变更。

腐蚀性 柴油除主要成分碳、氢、氧外，还含有硫及硫化物、无水溶性酸碱、水分、有机酸等有害成分与杂质，它们对燃料系统、气缸、活塞组等金属可能产生腐蚀作用。为此，必须将这些有害成分控制在最小的范围内：含硫量不应大于0.2%；无水溶性酸碱、水分只能有很少一点痕迹或一点也没有；有机酸控制在一定的酸度内，即中和100毫升柴油中全部有机酸所需要的氢氧化钾不大于10毫克。这样，才能保证柴油对金属的腐蚀性最小，柴油中的硫及硫化物在燃烧时，会产生亚硫酸及氧化物，能腐蚀金属及形成坚硬物质，加剧零部件磨损。

积碳性和磨损性 柴油的积碳性指柴油在燃烧时形成结碳的倾向。当出现积碳时，会破坏活塞组的正常工作，使喷油器的喷孔堵塞、气门卡死。柴油的结碳性用残炭值来评定。残炭值是指柴油加热蒸发时所形成的焦碳渣的质量百分数。轻柴油中由于残炭值太小，为精确起见，用10%蒸余物的残炭量(即柴油含碳量的10倍)来表示。此外，柴油中的机械杂质与灰分都会加剧柴油机零部件的磨损。因此，柴油中不允许有机械杂质，溶解于柴油中的有机酸与无机酸盐类燃烧成的灰分必须尽可能少，轻柴油的灰分含量不大于0.025%，重柴油的灰分不大于0.04~0.06%。

结胶性 柴油在温度较高或在空气及阳光的作用下被氧化生成胶状沉淀物，使燃料系统的流动截面减小，甚至堵塞。柴油的结胶性用胶质来评定。胶质是用100毫升柴油经氧化而生成的胶状沉淀物的毫克数来表示的。轻柴油的胶质不大于70毫克。

第三节 柴油的燃烧热化学

研究柴油机工作过程时，必须先了解柴油燃烧的化学反应，确定完全燃烧时所需要的空气量及化学反应时分子变化情况。

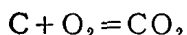
柴油的燃烧就是柴油中的主要化学元素碳、氢成分和柴油中的氧及空气中的氧发生化学反应的过程。在实际燃烧过程中，柴油不可能达到理想的完全燃烧，即其燃烧产物不全是二氧化碳 CO_2 及水蒸汽 H_2O ，而还可能产生部分一氧化碳 CO 、游离碳 C 、氢 H_2 以及其它碳氢化合物等不完全燃烧产物。在研制柴油机时，都希望柴油能实现完全燃烧。因此，柴油机燃烧过程中，柴油的燃烧都作为完全燃烧来研究。

一、燃烧所必需的理论空气量

柴油的主要成分是碳、氢、氧。假设 1 千克柴油中各主要成分的质量为：碳 g_c 千克，氢 g_H 千克，氧 g_o 千克，则

$$g_c + g_H + g_o = 1 \text{ 千克}$$

首先研究一下 g_c 千克碳在燃烧时的情况。它在燃烧（即氧化反应）时，生成二氧化碳 CO_2 ，化学反应式为：



此式表明，一个碳分子 C 和一个氧分子 O_2 化合生成一个二氧化碳分子 CO_2 。每个分子都有自己的分子量，如果以千克作为分子量的单位，那么一个碳分子的分子量为12千克，一个氧分子的分子量为32千克，一个二氧化碳的分子量为44千克，所以，用质量表示的化学反应式为：

$$12 \text{ 千克 C} + 32 \text{ 千克 O}_2 = 44 \text{ 千克 CO}_2$$

若碳为 1 千克时，则：

$$1 \text{ 千克 C} + \frac{32}{12} \text{ 千克 O}_2 = \frac{44}{12} \text{ 千克 CO}_2$$

但在 1 千克柴油中，碳只占 g_c 千克，所以， g_c 千克碳氧化时需要的氧及生成的二氧化碳数量为：

$$g_c \text{ 千克 C} + \frac{32}{12} g_c \text{ 千克 O}_2 = \frac{44}{12} g_c \text{ 千克 CO}_2$$

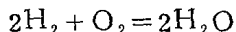
此式说明， g_c 千克的碳在燃烧时，需要供给它 $32g_c/12$ 千克的氧气，燃烧后能产生 $44g_c/12$ 千克的二氧化碳。

在以上计算中，氧气、二氧化碳都是用千克作为计算单位的，但也可以用“千克摩尔”数作为单位。所谓“千克摩尔”，就是指以千克作单位在数值上等于某气体元素的分子量。千克摩尔是物质的量单位。它是某气体元素分子量的倍数。例如，1 千克摩尔氧气，就是指它的质量是氧气分子量的一倍，氧的分子量是32，所以，它的质量就是32千克。因此，要求某气体元素的“千克摩尔”数时，只要将该气体的质量除以它的分子量，即可得到该气体在此质量时的“千克摩尔”数。

采用“千克摩尔”作为物量的单位的目的在于计算方便，因为 1 千克摩尔的任何理想气体，在标准状态下体积是相同的，都等于22.4立方米。这就是说，“千克摩尔”不但可以作为质量单位，也可以作为体积单位。“千克摩尔”换算成质量单位时，只要乘以气体分子量；换算成体积单位时，只要乘以22.4立方米。

这样， $32g_c/12$ 千克氧气的“千克摩尔”数应为 $32g_c/12/32 = g_c/12$ 千克摩尔； $44g_c/12$ [千克]二氧化碳的“千克摩尔”数应为 $44g_c/12/44 = g_c/12$ 千克摩尔。

现在, 再研究一下柴油中 g_H 千克氢在燃烧时的情况, 它的化学反应式为:



此式表明, 两个氢分子和一个氧分子化合, 生成两个水蒸汽分子。以质量表示的化学反应式为:

$$4 \text{ 千克 } \text{H}_2 + 32 \text{ 千克 } \text{O}_2 = 36 \text{ 千克 } \text{H}_2\text{O}$$

1 千克氢在氧化时, 需要的氧气和生成的水蒸汽为:

$$1 \text{ 千克 } \text{H}_2 + \frac{32}{4} \text{ 千克 } \text{O}_2 = \frac{36}{4} \text{ 千克 } \text{H}_2\text{O}$$

氢在 1 千克柴油中只占 g_H 千克, 所以

$$g_H \text{ 千克 } \text{H}_2 + \frac{32}{4} g_H \text{ 千克 } \text{O}_2 = \frac{36}{4} g_H \text{ 千克 } \text{H}_2\text{O}$$

此式表明, g_H 千克的氢在燃烧时, 需要供给它 $32g_H/4$ 千克 (或 $g_H/4$ 千克摩尔) 氧气, 并能生成 $36g_H/4$ 千克 (或 $g_H/4$ 千克摩尔) 水蒸汽。

经过以上的分析可以看出, 1 千克柴油完全燃烧时, 其中 g_c 千克的碳需要消耗 $32g_c/12$ 千克 (或 $g_c/12$ 千克摩尔) 的氧; g_H 千克的氢需要消耗 $32g_H/4$ 千克 (或 $g_H/4$ 千克摩尔) 的氧。但必须注意到, 柴油中除了有 g_c 千克碳、 g_H 千克氢外, 还有 g_o 千克氧, 它在柴油燃烧时, 首先与碳、氢化合。因此, 1 千克柴油完全燃烧时理论上需要外界供给的氧气量应为:

$$\text{O}_2' = \frac{32}{12} g_c + \frac{32}{4} g_H - g_o = \frac{8}{3} g_c + 8g_H - g_o \quad \text{千克氧/千克柴油}$$

或

$$\text{O}_2 = \frac{g_c}{12} + \frac{g_H}{4} - \frac{g_o}{32} \quad \text{千克摩尔氧/千克柴油}$$

这些氧气都要从空气中得到, 而空气主要是由氧气和氮气组成。按质量计算, 空气中含氧量约为23%, 含氮量约为77%。那么, 燃烧1千克柴油理论上所需要的空气量用 L'_0 表示, 则,

$$L'_0 = \frac{1}{0.23} \left(\frac{8}{3} g_c + 8g_H - g_o \right) \quad \text{千克空气/千克柴油} \quad (1-1)$$

若按“千克摩尔”数计算, 空气中含氧的“千克摩尔”数与它在空气中所占的体积数相同, 约为21%, 氮约占79%。那么, 燃烧1千克柴油理论上所需要的空气“千克摩尔”数用 L_0 表示, 则

$$L_0 = \frac{1}{0.21} \left(\frac{g_c}{12} + \frac{g_H}{4} - \frac{g_o}{32} \right) \quad \text{千克摩尔空气/千克柴油} \quad (1-2)$$

空气的分子量约为28.95, 那么, L_0 与 L'_0 之间的关系为:

$$L'_0 = 28.95 L_0 \quad \text{千克空气/千克柴油} \quad (1-3)$$

如果将 L_0 换算成体积的单位时, 并以 L'_0 表示, 则

$$L'_0 = 22.4 L_0 \quad \text{米}^3 \text{空气/千克柴油} \quad (1-4)$$

轻柴油的成分一般可认为是: $g_c = 0.87$, $g_H = 0.126$, $g_o = 0.004$, 代入上述各式, 即可求得 $L_0 = 0.495$ 千克摩尔空气/千克柴油, $L'_0 = 14.33$ 千克空气/千克柴油, $L'_0 = 11.1$ 米³空气/千克柴油。

在柴油机实际工作过程中, 柴油与空气很难达到完全均匀混合的程度。为了保证柴油与空气的混合尽可能充分均匀, 必须有较多的空气充入气缸。这样, 燃烧1千克柴油实际上所