

热力机车牵引热工应用技术

黄问盈 孙振声 主编

中 国 铁 道 出 版 社

1994年·北京

致 读 者

本书由铁路科技图书出版基金资助出版。

这项基金是1992年由铁道部出资设立的，意在资助一些对铁路现代化建设很有价值但印数较少的铁路科技图书，能够顺利出版。

中国铁路现今成了制约国民经济发展的“瓶颈”，不仅路网建设规模远远不能满足需要，而且技术装备陈旧落后。为了确保国民经济真正走上持续、快速、健康发展的轨道，中国铁路必须有一个历史性的新发展，铁路的科技水平必须有一个全面的大提高，这已成为国人的共识。铁道部制定了科技兴路的宏伟规划，铁路广大科技人员正团结协作，奋力攻关，记载种种科技成果的铁路科技图书也更多地产生出来。在这种情况下，铁道部设立这项出版基金，将不仅促进铁路科技出版事业的繁荣，而且对铁路科技事业的发展也会产生深远影响。

关于铁路科技图书出版基金的使用，铁道部在下达的有关文件中作了如下规定：由出版基金资助的科技图书应为印数少且出版社难以负担的亏损图书，并必须具备下列条件之一：

1. 发展高速铁路、准高速铁路方面的应用技术图书；在提高列车速度、密度、重量及行车安全方面有价值的应用技术图书；以及在铁路现代化经营管理方面有创新的图书。

2. 学术思想新，内容具体实用，对铁路科技发展具有较大推动作用的应用基础理论专著；密切结合铁路现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和重大开拓使用价值、密切结合铁路现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补铁路专业领域空白且读者面较窄的应用技术图书，以及铁路工程技术人员急需的水平高印量小的工具书。

5. 对发展我国铁路事业有价值的译著，及有特殊价值的科技论文集。

我们这个“铁路科技图书出版基金评审委员会”，也是根据文件精神组成的。评审委员会在铁道部领导下开展工作，由铁道部各部门负责人和有关专家组成，负责掌握出版基金的使用方向；严格按照资助条件评审所受理的图书选题；决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。

鉴于评审委员会成立的时间尚短，对于怎样用好这笔有限的因而更显得珍贵的基金，使其发挥出最大效能，还需要在实践中进一步探索，不断总结改进。我们热切地希望全路广大科技工作者、专家学者对基金的评审工作给予更多的关心和支持。

铁路科技图书出版基金评审委员会

1993年11月

第一章 燃料与燃烧计算

1 燃料的分类

被人类有目的地通过燃烧而获得能量利用的物质通称为燃料。燃烧的化学反应虽然复杂，但也只涉及原子之间的变化，即外围电子的重新组合。

通过核反应（核裂变或核聚变）而获得能量利用的物质称为核燃料，核反应涉及原子核内中子和质子的相互结合变化，故其能量变化很大，超出常规燃料 10^6 数量级之多。

燃料是能源的重要组成部分，并主要来源于太阳的能量。太阳对地球的辐射能量约为 $1.73 \times 10^{17} \text{W}$ （相当每年 $5.456 \times 10^{24} \text{J}$ ），其中极小部分（万分之几）通过植物光合作用转化贮存，并通过食物链关系在动物中聚集，经过地壳的急剧变化和漫长的岁月变迁，动植物残骸形成现有的化石燃料，包括煤炭、石油、天然气、油页岩、煤矸石等，连同薪材一起，构成天然燃料，属于一次能源。经加工转化，属于二次能源的燃料有：固态的木炭、焦炭、型煤、煤粉等；液态的汽油、煤油、酒精、柴油、重油、煤浆等；气态的煤气、石油气、沼气、氢气等。

除薪材外，大多数燃料不能再生利用，称为非再生能源，可见能源的开发、利用与节约不可偏废，从实际出发，节能有时更为重要，甚至被喻为与煤、油、天然气及水电并列的“第五常规能源”。

由于石油供应在21世纪将出现更大矛盾，世界能源（石油）形势日益严峻，不少国家在代用燃料研制和寻求新能源方面做了很多工作，例如加醇的石油制品，由作物提取的醇类，如乙醇和植物油类甚至可以单独使用。

新能源的开发利用包括太阳能、风能、地热能、海洋温差、波浪能、潮汐能、生物能、氢能、核聚变以及化学固体燃料等。如以六亚甲基四胺（由甲醇、空气、水及氨合成）与液氨为主要成分的六甲四固体燃料，其发热量比煤几乎高一倍，燃烧时无烟无灰无毒无味，被誉为第三能源。利用生物秸秆（麦糠、纤杆、锯末、酒渣等）炭化或粉碎后加入少量六亚甲基四胺等，制成块状、球状或蜂窝状的秸秆化学固体燃料，发热量与煤相当，可用火柴点燃，可望进入人民生活日用及工业锅炉领域。

2 标准燃料与换算燃料

标准燃料是指低位发热量 $Q_{net,ar} = 29300 \text{kJ/kg}$ (7000kcal/kg) 的燃料[有时气体燃料用 29300kJ/m^3 (7000kcal/m^3)，液体燃料用 42000kJ/kg (10030kcal/kg) 作为标准值]。

标准燃料消耗量 E_s 与实际燃料消耗量 E 的关系是

$$E_s = K_k \cdot E \quad (1-1)$$

式中 K_k ——燃料热当量($K_k = Q_{net,ar}/29300$)，固体燃料 K 值一般小于1，而液体燃料一般大于1，见表1-1。

燃料的低位发热量与热当量

表 1-1

燃 料	原 油	汽 油	柴 油	重 油	原 煤	焦 碳	洗 精 煤
$Q_{net, ar}$	kJ/kg	41870	43120	42710	41870	20930	28470
	kcal/kg	10000	10300	10200	10000	5000	6800
K_i		1.4286	1.4714	1.4571	1.4286	0.714	0.971
燃 料	洗 中 煤	液化石油气	天 然 气	城市煤气	焦 炉 气	蒸 汽	电
$Q_{net, ar}$	kJ/kg	8370	44800	38980	16750	18000	3770
	kcal/kg	2000	10700	9310	4000	4300	900
K_i		0.285	1.529	1.330	0.571	0.614	0.129
							11840 ^①
							2828 ^②
							0.404

注: ① kJ/(kW·h); ② kcal/(kW·h)

换算燃料同时计入了燃料转化效率的影响, 为当前铁路统计之用。

换算燃料消耗量 E_h 与实际燃料消耗量 E 的关系是

$$E_h = K_i \cdot E \quad (1-2)$$

式中 $K_i = Q_{net, ar} \cdot \eta_h / 29300$ —— 燃料技术当量。

其中 η_h —— 燃料转化效率, 蒸汽机车为锅炉总效率, 内燃机车为柴油机效率, 燃气轮机为燃气轮机效率等。

因为 η_h 是变化值, 与机车类型、燃料品种及平均工况有关, 故 K_i 亦非常量, 如图 1-1 所示为前进型机车用煤的技术当量与供汽率的关系。

为了实用方便, 常将 η_h 取为定数, 这样技术当量仅与燃料品种有关, 这种处理方式对评价不同条件下的机务基层单位耗能情况, 存在一定偏差。

3 中国煤炭分类

3.1 分类指标符号

煤的分类指标用下列符号表示:

V_{daf} —— 干燥无灰基挥发分(%);

H_{daf} —— 干燥无灰基氢含量(%);

$G_{R.I.}$ (简记 G) —— 烟煤的粘结指数;

Y —— 烟煤的胶质层最大厚度(mm);

b —— 烟煤的奥亚膨胀度(%);

P_M —— 煤样从透光率(%);

$Q_{gr, maf}$ —— 煤的恒湿无灰基高位发热

量(MJ/kg)。

3.2 分类参数

3.2.1 煤炭分类标准按煤的煤化程度及工艺性能进行分类, 并采用煤的煤化程度参数来区分无烟煤、烟煤和褐煤。

3.2.2 无烟煤煤化程度的参数采用干燥无灰基挥发分和干燥无灰基氢含量作为指标, 以此来区分无烟煤的小类。

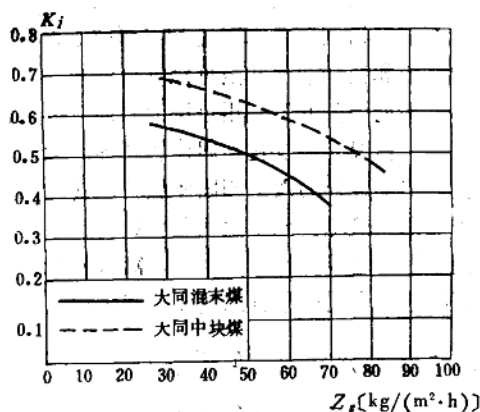


图 1-1 前进型机车用煤的技术当量

3.2.3 采用两个参数来确定烟煤的类别。一个是表征烟煤煤化程度的参数，另一个是表征烟煤粘结性的参数。

烟煤煤化程度参数采用干燥无灰基挥发分作为指标。烟煤粘结性的参数根据粘结性大小不同选用粘结指数、胶质层最大厚度(或奥亚膨胀度)作为指标，以此来区分烟煤中的类别。

3.2.4 褐煤煤化程度的参数采用透光率 P_M 作为指标，用以区分褐煤和烟煤，以及褐煤中划分小类。并采用恒湿无灰基高位发热量为辅来区分烟煤和褐煤。

3.3 煤类的划分

3.3.1 各类煤用两位阿拉伯数码表示。十位数系按煤的挥发分分组，无烟煤为0，烟煤为1~4，褐煤为5。个位数，无烟煤类为1~3，表示煤化程度；烟煤类为1~6，表示粘结性；褐煤类为1~2，表示煤化程度。

3.3.2 煤炭分类总表

煤炭分类总表见表1—2。

煤炭分类总表 表 1—2

类 别	符 号	数 码	分 类 指 标	
			$V_{d,f}(\%)$	$P_M(\%)$
无 烟 煤	WY	01, 02, 03	≤ 10.0	—
烟 煤	YM	11, 12, 13, 14, 15, 16 21, 22, 23, 24, 25, 26 31, 32, 33, 34, 35, 36 41, 42, 43, 44, 45, 46	> 10	—
褐 煤	HM	51, 52	$> 37.0^{①}$	$\leq 50^{②}$

注：① 凡 $V_{d,f} > 37.0\%$ 、 $G \leq 5$ ，再用透光率 P_M 来区分烟煤和褐煤。
② 凡 $V_{d,f} > 37.0\%$ 、 $P_M > 50\%$ 者为烟煤， $P_M > 30 \sim 50\%$ 的煤，如恒湿无灰基高位发热量 $Q_{d,f,ad}$ 大于24 MJ/kg (5700 cal/g)，则划为长焰煤。

3.3.3 中国煤炭分类简表

中国煤炭分类简表见表1—3。

中国煤炭分类简表 表 1—3

类 别	符 号	包括数码	分 类 指 标					
			$V_{d,f}(\%)$	G	$Y(\text{mm})$	$b(\%)$	$P_M^{②}(\%)$	$Q_{d,f,ad}^{③}(\text{MJ/kg})$
无 烟 煤	WY	01, 02, 03	≤ 10.0					
贫 煤	PM	11	$> 10.0 \sim 20.0$	≤ 5				
贫 瘦 煤	PS	12	$> 10.0 \sim 20.0$	$> 5 \sim 20$				
瘦 煤	SM	13, 14	$> 10.0 \sim 20.0$	$> 20 \sim 65$				
焦 煤	JM	24 15, 25	$> 20.0 \sim 28.0$ $> 10.0 \sim 28.0$	$> 50 \sim 65$ $> 65^{①}$	≤ 25.0	(< 150)		
肥 煤	FM	16, 26, 36	$> 10.0 \sim 37.0$	(> 85) ^①	> 25.0			
1/3焦煤	1/3JM	35	$> 28.0 \sim 37.0$	$> 65^{①}$	≤ 25.0	(≤ 220)		

续上表

类别	符号	包括数码	分类指标					
			$V_{d,1}(\%)$	G	$Y(\text{mm})$	$b(\%)$	$P_M^{(2)}(\%)$	$Q_{d,1,net}^{(3)}(\text{MJ/kg})$
气肥煤	QF	46	>37.0	$(>85)^{(1)}$	>25.0	(>220)		
气煤	QM	34 43, 44, 45	$>28.0 \sim 37.0$ >37.0	$>50 \sim 65$ >35	≤ 25.0	(≤ 220)		
1/2中粘煤	1/2ZN	23, 33	$>20.0 \sim 37.0$	$>30 \sim 50$				
弱粘煤	RN	22, 32	$>20.0 \sim 37.0$	$>5 \sim 30$				
不粘煤	BN	21, 31	$>20.0 \sim 37.0$	≤ 5				
长焰煤	CY	41, 42	>37.0	≤ 35			>50	
褐煤	HM	51 52	>37.0 >37.0				≤ 30 $>30 \sim 50$	≤ 24

注：① 对 $G>85$ 的煤，再用 Y 值或 b 值来区分肥煤、气肥煤与其他煤类。当 $Y>25.0\text{mm}$ 时，应划分为肥煤或气肥煤；如 $Y<25.0\text{mm}$ ，则根据其 $V_{d,1}$ 的大小而划为相应的其他煤类。按 b 值划分类别时， $V_{d,1}\leq 28.0\%$ ，暂定 $b>150\%$ 的为肥煤； $V_{d,1}>28.0\%$ ，暂定 $b>220\%$ 的为肥煤或气肥煤。如按 b 值和 Y 值划分的类别有矛盾时，以 Y 值划分的类别为准。

② 对 $V_{d,1}>37.0\%$ 、 $G\leq 5$ 的煤，再以透光率 P_M 来区分其为长焰煤或褐煤。

③ 对 $V_{d,1}>37.0\%$ 、 $P_M>30\sim 50\%$ 的煤，再测 $Q_{d,1,net}$ ，如其值 $>24\text{MJ/kg}(5700\text{cal/g})$ ，应划分为长焰煤。

4 煤的各种基准间的换算

4.1 煤质分析各指标代表符号的意义

由于煤质分析的项目繁多，同时收到基、空气干燥基、干燥基、干燥无灰基和干燥无矿物质基之间的测定结果又有不同程度的差异，因此各测试项目常用不同符号来表示，并用不同英文小写字母组成的右下角标分别表示每个项目的基准，如 ar 表示收到基（相当应用基 y ）、 ad 表示空气干燥基（相当分析基 f ）、 d 表示干燥基（相当干燥基 g ）、 daf 表示干燥无灰基（相当可燃基 r ）、 $dmmf$ 表示干燥无矿物质基。分析项目的代表符号多用英文字母的大写正体来表示，如 C 和 H 分别代表煤的碳和氢含量。此外有些煤质分析项目的代表符号的右下角还常标出有特定意义的英文字母，如 t 代表“全”，所以 S_t 代表全硫， M_t 代表全水分。又如 gr 代表“高位”， net 代表“低位”， b 代表“弹筒”，所以 Q_{gr} 就代表煤样的高位发热量。煤质分析中主要符号的意义见表1—4。

分析化验指标的名称及其代表符号

表 1—4

指标名称	水分	灰分	挥发分	发热量	焦油率	密度	目视透光率
代表符号	M	A	V	Q	T	d	P_M

指标名称	碳	氢	硫	磷	氮	氧	腐植酸	褐煤蜡
代表符号	C	H	S	P	N	O	H_a	E_a

4.2 煤质分析结果各种基准之间的换算公式

$$x_{ar} = x_{ad} \cdot \frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}} \quad (1-3)$$

$$x_d = x_{ad} \cdot \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (1-4)$$

$$\text{或 } x_d = x_{daf} \cdot \frac{100 - A_d}{100} \quad (1-4')$$

$$x_{daf} = x_{ad} \cdot \frac{100}{100 - (M_{ad} + A_{ad})} \quad (1-5)$$

$$\text{或 } x_{daf} = x_d \cdot \frac{100}{100 - A_d} \quad (1-5')$$

当煤样中碳酸盐二氧化碳 $\text{CO}_{2,ad}$ 含量大于2%时,则

$$x_{daf} = x_{ad} \cdot \frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad} - \text{CO}_{2,ad}} \quad (1-6)$$

$$\text{或 } x_{daf} = x_d \cdot \frac{100}{100 - A_d - \text{CO}_{2,d}} \quad (1-6')$$

上述各公式中的 x 可为灰分 A 、挥发分 V 、全硫 S_t 、发热量 Q 、碳 C 、氢 H 、氮 N 、氧 O 或磷 P 等项目。但公式(1-3)不适用于低位发热量 Q_{net} 的换算,因为换算低位发热量时还须考虑水分的汽化热,故低位发热量 Q_{net} 按下列公式换算

$$Q_{net,ar} = (Q_{gr,ad} - 206H_{ad}) \times \frac{100 - M_t}{100 - M_{ad}} - 23M_t \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-7)$$

$$\text{或 } Q_{net,ar} = (Q_{net,ad} + 23M_{ad}) \times \frac{100 - M_t}{100 - M_{ad}} - 23M_t \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-7')$$

$$\text{或 } Q_{net,ar} = Q_{gr,ar} - 206H_{ar} - 23M_t \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-7'')$$

各种基准的固定碳(FC)含量可分别用下列公式求算

$$\text{FC}_{ar} = 100 - (M_t + A_{ar} + V_{ar}) \quad (1-8)$$

$$\text{FC}_{ad} = 100 - (M_{ad} + A_{ad} + V_{ad}) \quad (1-9)$$

$$\text{FC}_d = 100 - (A_d + V_d) \quad (1-10)$$

$$\text{FC}_{daf} = 100 - V_{daf} \quad (1-11)$$

各种基准间的相互转化见表1-5。

各种基准间的相互转化表

表 1-5

欲求 已知	空气干燥基 ad	收到基 ar	干燥基 d	干燥无灰基 daf	干燥无矿物质基 $dmmf$ ①
空气干燥基 ad		$\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}$	$\frac{100}{100 - M_{ad}}$	$\frac{100}{100 - (M_{ad} + A_{ad})}$	$\frac{100}{100 - (M_{ad} + MM_{ad})}$
收到基 ar	$\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$		$\frac{100}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - (M_{ar} + A_{ar})}$	$\frac{100}{100 - (M_{ar} + MM_{ar})}$
干燥基 d	$\frac{100 - M_{ad}}{100}$	$\frac{100 - M_{ar}}{100}$		$\frac{100}{100 - A_d}$	$\frac{100}{100 - MM_d}$
干燥无灰基 daf	$\frac{100 - (M_{ad} + A_{ad})}{100}$	$\frac{100 - (M_{ar} + A_{ar})}{100}$	$\frac{100 - A_d}{100}$		$\frac{100 - A_d}{100 - MM_d}$
干燥无矿物质基 $dmmf$ ①	$\frac{100 - (M_{ad} + MM_{ad})}{100}$	$\frac{100 - (M_{ar} + MM_{ar})}{100}$	$\frac{100 - MM_d}{100}$	$\frac{100 - MM_d}{100 - A_d}$	

注: ① MM 为矿物质含量(%)

5 煤的主要特性

5.1 发热量 (热值)

煤的发热量是表征各种特性的综合重要指标。除直接测定外, 还可利用元素分析或工业分析结果计算。

煤炭科学研究院北京煤化学所陈文敏等人推荐计算烟煤发热量的公式如下^{(1-31)①}

(1) 利用工业分析计算中国烟煤空气干燥基高位发热量 $Q_{gr,ad}$ 的经验公式

$$Q_{gr,ad} = K_1(100 - M_{ad} - A_{ad}) - 25.09A_{ad} - (167.3M_{ad})^{②} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-12)$$

式中 K_1 ——系数, 与煤的 V_{daf} 含量及焦渣特征(CRC)有关, 见表1-6。

K_1 值与 V_{daf} 及CRC的关系表

表 1-6

$V_{daf}(\%)$ CRC	>10~15	>15~19	>19~23	>23~29	>29~33	>33~37	>37~42	>42~55
1	353.3	342.9	330.3	326.2	317.8	311.5	311.5	309.4
2	355.4	353.3	342.9	336.6	334.5	328.3	324.1	319.9
3	357.5	357.5	353.3	345.0	340.8	336.6	334.5	328.3
4	359.6	359.6	357.5	353.1	347.1	342.9	338.7	332.4
5~6	359.6	359.6	359.6	357.5	353.3	349.2	345.0	340.8
7~8	359.6	359.6	363.8	361.7	359.6	357.5	351.3	347.1

也可用下式计算

$$Q_{gr,ad} = 36255 - 54.3V_{ad} - 395.7A_{ad} - 679.0M_{ad} + 173.6CRC \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-12')$$

式中 CRC——煤的焦渣特征。

(2) 利用工业分析计算烟煤空气干燥基低位发热量 $Q_{net,ad}$ 的经验公式 (GB2589-81)

$$Q_{net,ad} = 418.2K'_1 - 4.182(K'_1 + 6)(M_{ad} + A_{ad}) - 12.54V_{ad} - (167.3M_{ad})^{②} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-13)$$

式中 K'_1 ——系数, 与煤的 V_{daf} 含量及焦渣特征 (CRC) 有关, 见表1-7。

(3) 利用工业分析计算中国烟煤空气干燥基低位发热量 $Q_{net,ad}$ 的新公式

$$Q_{net,ad} = 35860 - 702.0M_{ad} - 395.7A_{ad} - 73.7V_{ad} + 173.6CRC \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-14)$$

为进一步提高计算精度, 可将我国烟煤划分为 $V_{daf} > 37\%$ 和 $V_{daf} \leq 37\%$ 两组, 分别推荐计算公式为

$$Q_{net,ad} = 35350 - 690M_{ad} - 400A_{ad} - 70V_{ad} + 109CRC \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-14')$$

(适用于 $V_{daf} > 37\%$ 的各种烟煤, 包括气煤、长焰煤和气肥煤)

$$Q_{net,ad} = 35880 - 680M_{ad} - 400A_{ad} - 80V_{ad} + 200CRC \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-14'')$$

注: ① 指书后所附参考文献号, 下同。

② 只在计算 $V_{daf} < 35\%$, 同时 $M_{ad} > 3\%$ 的不粘煤类才减去最后一项括号内的数值。

(适用于 $V_{daf}>10\% \sim 37\%$ 的各种烟煤)

K_1' 值与 V_{daf} 及CRC的关系表

表 1—7

$V_{daf}(\%)$ CRC	>10~ 13.5	>13.5 ~17	>17~20	>20 ~23	>23 ~29	>29 ~32	>32 ~35	>35 ~38	>38 ~42	>42
1	84.0	80.5	80.0	78.5	76.5	76.5	73.0	73.0	73.0	72.5
2	84.0	83.5	82.0	81.0	78.5	78.0	77.5	76.5	75.5	74.5
3	84.5	84.5	83.5	82.5	81.0	80.0	79.0	78.5	78.0	76.5
4	84.5	85.0	84.0	83.0	82.0	81.0	80.0	79.5	79.0	77.5
5~6	84.5	85.0	85.0	84.0	83.5	82.5	81.5	81.0	80.0	79.5
7	84.5	85.0	85.0	85.0	84.5	84.0	83.0	82.5	82.0	81.0
8	—	85.0	85.0	85.5	85.0	84.5	83.5	83.0	82.5	82.0

5.2 挥发分产率、固定碳和燃料比

煤在高温(900℃)无氧状况下7min后分解的液体(汽态)和气体的数量(减去煤中水分)占试验煤量的百分数称为挥发分。去除水分、灰分和挥发分后的残留物称为固定碳。

煤的燃料比是指煤的固定碳含量与挥发分产率之比,是表征煤化程度的一个指标,随着煤化程度的深化而增高,无烟煤的燃料比为9~49,贫煤为4~9,瘦煤为4~6.2,焦煤为2.3~4.6,气煤为1.1~2.3,长焰煤为1~1.7,褐煤为0.6~1.5。

5.3 煤灰成分及其熔融性

煤灰是煤中矿物质燃烧后生成的金属与非金属的氧化物和盐类(如硫酸钙),其中以 SiO_2 、 Al_2O_3 为主,占70%以上,其余为 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 SO_3 等,还有微量的V(钒)、Mo(钼)、Th(钍)、U(铀)、Ge(锗)、Ga(镓)等氧化物。

煤灰熔融温度一般指灰锥软化温度 T_2 ,我国机车用煤的 T_2 多大于1250℃。应当指出,结渣(瘤)现象与煤的灰分含量有很大关系,常见煤灰熔融温度高灰分也高的煤比熔融温度低的煤容易结渣。

5.4 煤的结焦性

煤的焦渣特征(CRC)分类表

表 1—8

CRC	焦 渣 粘 结 情 况	胶质层最大厚度 $Y(\text{mm})$
1	粉状	0
2	粘着,轻碰即成粉状	0
3	弱粘着,手指轻压碎成小块	0
4	不熔融粘结,手指重压裂成小块	5~10
5	不膨胀熔融粘结,焦渣为扁平饼状,表面银白色金属光泽	10~16
6	微膨胀熔融粘结,表面银白色光泽,并有小泡,手指压不碎	10~16
7	膨胀熔融粘结,有银白色金属光泽,膨胀高度 $\geq 15\text{mm}$	12~20
8	强膨胀熔融粘结,有银白色金属光泽,膨胀高度 $\geq 15\text{mm}$	18~36

煤的结焦性包括胶质层最大厚度 Y 、罗加指数、奥亚膨胀度以及煤的焦渣特征等。
煤的焦渣特征，指测定挥发分后残留物的结焦性能，通常划分为8类，见表1—8。

5.5 煤的粒度与限下率

煤的粒度分级见表1—9。

煤的粒度分级表 表 1—9

序 号	1	2	3	4	5	6
粒度名称	特大块	大块	中块	小块	粒煤	粉煤
符 号	T	D	Z	X	L	F
粒度尺寸(mm)	>100	50~100	25~50	13~25	6~13	<6

限下率指小于该级粒度下限的煤量百分率。

根据试验数据整理，粉煤含量（含末率）对机车锅炉的影响甚大，一般而言，含末率增加1%，锅炉总效率平均降低约0.2~0.3%，相对减少0.3~0.4%。

6 机车用煤的质量要求

蒸汽机车锅炉的构造比较特殊，对煤质要求较高，须使用 $V_{daf}>20\%$ 的长焰煤、弱粘煤、气煤和不适于炼焦的肥煤，以便于点燃。这些煤燃烧时火焰长，使锅炉在短时间内达到额定出力，以保证运行速度和牵引力。机车用煤的灰分 A_d 小于24%， $Q_{net,ar}$ 大于20930kJ/kg（5000kcal/kg），由于蒸汽机车锅炉的通风力强，煤粉易被吹跑或从炉条间隙漏落，所以应该使用6~50mm的粒煤和块煤。此外，灰熔点 T_2 要大于1200℃，略有粘结性，硫分 S_{ad} 以不超过1%为宜。

根据蒸汽机车的构造特点和运用条件，以及煤炭供应品种的实际可能，蒸汽机车用煤的质量要求（GB4063—83），见表1—10。

为了就近取材，扩大机车用煤品种及节约煤炭，应采用不同煤种经人工配制的混煤，例如：褐煤或无烟煤与气煤和肥煤相配，贫煤与肥煤相配等。有时为改善燃烧及结渣现象，也可采用其他煤种相配。此外，应尽可能使煤炭颗粒化、成型化，即煤炭分粒级使用，优先使用动力块煤，并因地制宜的采用型煤。

蒸汽机车用煤质量要求 表 1—10

项 目	技 术 要 求	鉴 定 方 法
类 别	1. 用煤品种为长焰煤、弱粘煤、气煤、肥煤 2. 具备运入多种煤配烧的铁路区段： (1) 焦煤、瘦煤可与其他类别煤配烧，在不能运入其他类别煤的区段，经试验合格可单烧 (2) 不粘煤可配烧，在不能运入其他类别煤的区段，经试验合格可单烧	中国煤炭分类(以炼焦煤为主)方案、
粒 度	1. 6~50mm ① 2. 块煤供应数量不足的煤矿，可暂供应： (1) 原煤 含矸率≤1% (2) 混煤 粒度 0~50mm 3. 块煤限下率按煤炭产品规格的规定	GB189—63 《煤炭粒度分级》

项 目	技 术 要 求	鉴 定 方 法
挥发分 $V_{d,ar}(\%)$	20	GB212—77 《煤的工业分析方法》
灰分 $A_d(\%) \leq$	24	GB212—77 《煤的工业分析方法》
煤灰熔融性 $T_2(^\circ\text{C}) \geq$	1200	GB219—74 《煤灰熔融性的测定方法》
硫分(长隧道及隧道 群区段) $S_{d,ar}(\%) \leq$	1	GB214—83 《煤中全硫的测定方法》
低位发热量 ^② $Q_{net,ar}$ (kJ/kg)/(kcal/kg)	1. $\geq 20930 \sim < 23930 / (\geq 5000 \sim < 5500)$ 2. $\geq 23030 \sim < 25120 / (\geq 5500 \sim < 6000)$ 3. $\geq 25120 / (\geq 6000)$	GB213—79 《煤的发热量测定方法》

注：① 包括6~50mm间各粒级的块煤或湿块煤。

② 低位发热量分为三个等级，可根据铁路运输量与资源条件确定。

7 机车用型煤的要求与规格

将粉煤（一般小于3mm）压制成一定形状的燃料称为型煤，可供工业及生活用。型煤的基煤可用单一煤种，也可用几种煤配合，成为混煤型煤。

几乎所有煤种都可成为型煤原料。机车用型煤一般以气煤或肥煤为基煤，加入粘结剂（如焦油沥青）热压而成。必要时也可加入部分劣质煤。应当指出，粘结剂应考虑供应条件以及环保和价格问题。有些煤种（如褐煤）可以少用粘结剂甚至不用粘结剂，直接热压成型。为了减少中间环节，工业炉窑可以采用炉前成型，直接烧用的方法。

机车用型煤应满足下列技术要求：

(1) 低位发热量 $Q_{net,ar}$ 不少于24MJ/kg (5700kcal/kg)（个别机务段可按具体情况规定）；

(2) 干燥基灰分 A_d 不大于20%（个别机务段型煤灰分超过20%时，要保证干线机车实现65kg/(m²·h)以上的供汽率）；

(3) 可燃基挥发分不小于25%，燃料比大于1.8；

(4) 煤灰软化温度 T_2 应大于1300℃；

(5) 中等粘结性（弱粘结或中等粘结）；

(6) 含硫量 $S_{d,ar}$ 应小于1%；

(7) 体形合宜，表面光滑，无大飞边，粒度均匀，每个型煤质量以不超过32g为宜；

(8) 燃烧性能好，能热裂变形，不结渣挂瘤；

(9) 一定强度（抗压性能每个型煤不低于0.7kN，落下强度不低于85%，转鼓强度不低于90%，卸车后含粉率不大于5%，通过加煤机后破碎率不大于25%），并耐磨、耐水（24h水浸不变）、耐晒及不风化；

(10) 燃用后各种排放浓度（包括CO、SO₂、烟色浓度、苯并芘等）不超过原基煤的烧用结果。

8 石油液体燃料

石油制品是内燃机的主要燃料。

石油液体燃料按原油在蒸馏炼制过程中的馏出温度大致可分为：汽油（40~80℃）、煤油（160~250℃）、轻柴油（180~350℃）、重柴油（280~380℃）、重油（>350℃）及渣油（>400℃）。为增加柴油产量，可使馏程扩展到约150~440℃而生产出宽馏分柴油。

汽油用于航空和汽车发动机，柴油广泛用于机车与舰艇的中高速、船用低速大功率柴油机以及民用中低速和固定式柴油机。应当指出，为更好地利用石油资源，柴油重质化应用值得注意，如发展高速车用柴油机代替部分车用汽油机，高速柴油机燃油中掺入一定的重质馏分（不恶化燃烧和性能指标），部分机车柴油机燃用重柴油，船用低速大功率柴油机燃用重油或重柴油等。作为一种很有前途的节能技术，双燃料发动机的研制取得了进展，这种发动机用柴油起动后，转换为主要燃用天然气或精细水煤浆等燃料。

石油液化燃料一般特性见表1—11。

石油液体燃料一般特性

表 1—11

燃 料	碳原子数	元素组分(质量%)			分子量	沸点(℃)	凝点(℃)
		C	H	O			
汽 油	5~14	85.5	14.5	—	95~120	<200	-56
煤 油	11~17	86.0	13.7	0.3	160~180	180~300	
柴 油	14~23	87.0	12.6	0.4	180~250	250~360	-35~10
重 油	16~30	87.0	12.5	0.5	220~280	250~360	27~45
苯 C ₆ H ₆	6	92.25	7.75	—	78.1		
甲醇 CH ₃ OH	1	37.5	12.5	50	32	64.5	-98
纯酒精(乙醇) C ₂ H ₅ OH	2	52.2	13	34.8	46.1	78.4	-114
燃 料	闪点(℃)	着火温度(℃)	十六烷值	辛 烷 值	低位发热量 (MJ/kg)	相对密度	用 途
汽 油	-43~-45	220~260	0~8	80~95	44~44.4	0.72~0.78	航空及车用汽油机
煤 油					43	0.78~0.84	喷气式发动机煤油机
柴 油	74~85	~258	40~65	20~30	42.5~43	0.83~0.92	高速柴油机
重 油	130~280				40~42	0.88~0.95	低速柴油机
苯 C ₆ H ₆							
甲醇 CH ₃ OH	11	470	3	95	19.7	0.796	
纯酒精(乙醇) C ₂ H ₅ OH	21	392	8	94	26.8	0.79	

石油液体燃料由多种烃类（不同分子量、不同结构形式的碳氢化合物）组成，包括：

- (1) 烷烃C_nH_{2n+2}
- (2) 烯烃C_nH_{2n}
- (3) 炔烃C_nH_{2n-2}

- (4) 环烷烃 C_nH_{2n} ·
 (5) 芳烃 C_nH_{2n-6} (苯系) C_nH_{2n-12} (萘系)

9 柴 油

9.1 对柴油的基本要求

- (1) 低凝点, 合适的粘度, 不含水分和机械杂质, 以保证供油和喷雾;
 (2) 含硫量小, 不超过0.2%, 以防腐蚀;
 (3) 合适的十六烷值, 自燃性低, 压缩着火后燃烧性能良好, 保证柴油机运转平稳;
 (4) 常温储存过程中生成胶质及燃烧后积炭的倾向小。

9.2 柴油的重要特性

柴油的重要特性有以下各项:

(1) 发热量

柴油各种烃类中氢燃烧后产物水是未凝结的汽态并随废气排入大气, 故常采用低位发热量。石油液体燃料的低位发热量 Q_{net} 为

$$Q_{net} = 0.3408C + 1.2017[H_0] + 0.09278S \quad (\text{MJ/kg}) \quad (1-15)$$

式中 C 、 $[H_0]$ 、 S ——燃料中碳、自由氢及可燃硫的质量百分数, 自由氢 $[H_0] = H - 0.126O$

其中 H 、 O ——燃料中氢和氧的质量百分数。

柴油的低位发热量还可处理为相对密度、芳烃含量或其十六烷值的线性关系如下:

$$Q_{net} = 55.25 - 14.91d \quad (\text{MJ/kg}) \quad (1-16)$$

式中 d ——柴油的相对密度, 指15.56℃ (60°F) 的柴油质量与同体积同温度下纯水质量之比。

$$Q_{net} = 43.64 - 26.23A \quad (\text{MJ/kg}) \quad (1-17)$$

式中 A ——柴油中芳烃含量 (%)。

$$Q_{net} = 41.21 + 27.17CN \quad (\text{MJ/kg}) \quad (1-18)$$

式中 CN ——柴油的十六烷值。

(2) 十六烷值

十六烷值表示燃油的着火性能, 是柴油最主要的质量指标。取着火性好的正十六烷 $C_{16}H_{34}$ 的十六烷值为100, 着火性差的 α ——甲萘 $C_{11}H_{16}$ 的十六烷值为0, 以正十六烷和 α ——甲萘组成混合油与实际柴油试验着火性能相同者的正十六烷含量百分数为该柴油的十六烷值。

柴油的十六烷值主要取决于不同烃类的含量。含烷烃和环烷烃越多(即芳烃越少), 则其十六烷值越高, 也意味氢碳原子数比 (H/C 值) 越大, 其发热量也越高。

由于芳烃的密度较大, 芳烃含量越少, 柴油密度越小, 其苯胺点越高。苯胺点指相同体积的苯胺 $C_6H_5NH_2$ 与柴油能互相完全溶解的最低温度 (°C)。柴油的苯胺点越高, 着火性能越好。

十六烷指数 (柴油指数) 表示柴油着火性能与其相对密度和苯胺点之间关系, 按下式计算

$$CNI = (1.8B + 32) \left(\frac{1.415}{d} - 1.315 \right) \quad (1-19)$$

式中 CNI ——柴油的十六烷指数；

B ——柴油的苯胺点 ($^{\circ}\text{C}$)；

d ——柴油的相对密度。

柴油的十六烷值在40~70之间时，可按下式近似计算十六烷值 CN

$$CN = 0.77CNI + 10 \quad (1-20)$$

柴油的十六烷值过低，着火性能差，起动困难，滞燃期长，容易引起爆燃，使柴油机性能恶化，甚至损伤构件。十六烷值高的柴油，着火性好，着火延迟时间短，适合中高速柴油机。但十六烷值过大，不仅浪费，还因在燃烧中容易裂化，排放炭烟增多。一般转速为1100~2000r/min的柴油机选用十六烷值为45~50的柴油，转速>2000r/min的高速柴油机用十六烷值更大的柴油，低速柴油机可选用十六烷值较低的柴油。

(3) 馏程

燃油的馏程指蒸馏温度与该温度下馏出的容积百分数的关系曲线。50%馏出温度低，表示柴油的蒸发性好，利于燃烧，容易启动。90%、95%馏出温度标志柴油中不易挥发的重馏分量。

(4) 粘度

柴油的粘度影响过滤性、流动性、雾化程度以及油束喷射深度等。柴油粘度低，容易雾化，但粘度过低，可能破坏高压油泵柱塞副之间的润滑状态。

燃油的粘度主要取决于其烃类组分、碳原子数和温度。烃类中，烷烃的粘度较小，环烷烃次之，芳烃较大。燃油的运动粘度基本上随其温度上升而呈线性下降趋势。

(5) 闪点与着火温度

闪点指燃油表面的油气与大气压力下的空气混合后，在明火接触下首次闪火的最低温度。闪点是燃料贮运和使用时的安全指标，闪点高的柴油不易引起火灾，利于储存和运输，但柴油机不易起动。

燃料在常压下能自行着火并能自行持续燃烧的最低温度称为着火温度（自燃温度），燃料中烷烃的着火温度较低，环烷烃次之，芳烃较高。

一般燃料的闪点低于着火温度。闪点越高二者之差也越大。

(6) 凝点与冷滤点

燃油在低温下逐渐析出石蜡质部分，形成结晶，失去透明性时的温度为冷滤点，这时滤清元件容易堵塞，甚至断油。温度继续下降，柴油开始失去流动性时的温度为凝点，这时柴油已无法流动供应。凝点与冷滤点是评定柴油在滤清器中流动性能的指标。我国柴油的牌号是对应其凝点的。

燃油的凝点与冷滤点与其沸点及烃类组成有关。沸点越高，含石蜡质（烷烃）越多的燃油，其凝点和冷滤点也越高，可以添加降凝剂来降低柴油的凝点。冷滤点一般较凝点高1~3 $^{\circ}\text{C}$ ，但加降凝剂后，差别就更大些。

应当指出，商品柴油的凝点定得越高，其产量也越高，对于宽馏分柴油尤其如此。

9.3 我国轻柴油的技术条件

我国轻柴油的技术要求见表1—12。

我国轻柴油的技术要求 (GB252-87)

表 1-12

项 目	优 级 品					一 级 品					合 格 品					试验方法
	10号	0号	-10号	-20号	-35号	10号	0号	-10号	-20号	-35号	10号	0号	-10号	-20号	-35号	
碱值, g/l/100g	6					—					—					SY 2114
颜色, 色号	3.5					3.5					—					GB 6540
馏速安定性沉淀, mg/100mL	—					2.0					—					SY 2125
实际胶质, mg/100mL	—					—					70					GB 509
硫含量, %	0.2					0.5					1.0					GB 380
硫酸碱含量, %	0.01					0.01					—					GB 1792
水分, %	痕迹					痕迹					痕迹					注①或GB 260
酸度, mg KOH/100mL	5					5					10					GB 258
10% 蒸余物残炭, %	0.3					0.3					0.4					GB 268
灰分, %	0.01					0.01					0.02					GB 508
铜片腐蚀, (50℃, 3h), 级	1					1					1					GB 5096
水溶性酸或碱	无					无					无					GB 259
机械杂质	无					无					无					注①或GB 511
运动粘度(20℃), mm ²	3.0~8.0					2.5~8.0					3.0~8.0					GB 265
凝点, ℃	10					10					10					GB 510
冷滤点, ℃	12					12					12					SY 2413
闪点(闭口杯法), ℃	65					65					65					GB 261
十六烷值	45					45					45					GB 386
馏程: 50%馏出温度, ℃ 90%馏出温度, ℃ 95%馏出温度, ℃ 密度(20℃), kg/m ³	300 355 365 实测					300 355 365 实测					300 355 365 实测					GB 6536

注: 1 将油样注入100mL玻璃量筒中, 在室温(20±5℃)时观察, 应当透明, 没有悬浮和沉降的水分及机械杂质, 有杂质时, 按GB 260和GB 511进行测定。
2 由中间基原油生产或没有催化组分的各号轻柴油十六烷值允许不小于40。

表1—13是全国各地区风险率为10%的最低气温,用以估计使用地区的最低操作温度,对柴油机低温操作时的设备防寒、燃油系统设计以及柴油的生产、供销和使用提供参考。

轻柴油按质量分为优级品、一级品和合格品三个等级。

每个等级的轻柴油按凝点分为六个牌号:

- (1) 10号——用于有预热设备的高速柴油机;
- (2) 0号——适用于风险率10%的最低气温在4℃以上地区;

各地区风险率为10%的最低气温(℃)表

表 1—13

	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
河北省	-14	-13	-5	1	8	14	19	17	9	1	-6	-12
山西省	-17	-16	-8	-1	5	11	15	13	6	-2	-9	-16
内蒙古自治区	-43	-42	-35	-21	-7	-1	4	1	-8	-19	-32	-41
黑龙江省	-44	-42	-35	-20	-6	1	7	4	-6	-20	-35	-43
吉林省	-29	-27	-17	-6	1	8	14	12	2	-6	-17	-26
辽宁省	-23	-21	-12	-1	6	12	18	15	6	-2	-12	-20
山东省	-12	-12	-5	2	8	14	19	18	11	4	-4	-10
江苏省	-10	-9	-3	3	11	15	20	20	12	5	-2	-8
安徽省	-7	-7	-1	5	12	18	20	20	14	7	0	-6
浙江省	-4	-3	1	6	13	17	22	21	15	8	2	-3
江西省	-2	-2	3	9	15	20	23	23	18	12	4	0
福建省	-4	-2	3	8	14	18	21	20	15	8	1	-3
台湾省 ^①	3	0	2	8	10	16	19	19	13	10	1	2
广东省	1	2	7	12	18	21	23	23	20	13	7	2
广西壮族自治区	3	3	8	12	18	21	23	23	19	15	9	4
湖南省	-2	-2	3	9	14	18	22	21	16	10	4	-1
湖北省	-6	-4	0	6	12	17	21	20	14	8	1	-4
河南省	-10	-9	-2	4	10	15	20	18	11	4	-3	-8
四川省	-21	-17	-11	-7	-2	1	2	1	0	-7	-14	-19
贵州省	-6	-6	-1	3	7	9	12	11	8	4	-1	-4
云南省	-9	-8	-6	-3	1	5	7	7	5	-1	-5	-8
西藏自治区	-29	-25	-21	-15	-9	-3	-1	0	-6	-14	-22	-29
新疆维吾尔自治区	-40	-38	-28	-12	-5	-2	0	-2	-6	-14	-25	-34
青海省	-33	-30	-25	-18	-10	-6	-3	-4	-6	-16	-28	-33
甘肃省	-23	-23	-16	-9	-1	3	5	5	0	-8	-16	-22
陕西省	-17	-15	-6	-1	5	10	15	12	6	-1	-9	-15
宁夏回族自治区	-21	-20	-10	-4	2	6	9	8	3	-4	-12	-19

①台湾省所列的温度是绝对最低气温,即风险率为0%的最低气温。

- (3) - 10号——适用于风险率10%的最低气温在 -5°C 以上地区；
- (4) - 20号——适用于风险率10%的最低气温在 $-5\sim -14^{\circ}\text{C}$ 的地区；
- (5) - 35号——适用于风险率10%的最低气温在 $-14\sim -29^{\circ}\text{C}$ 的地区；
- (6) - 50号——适用于风险率10%的最低气温在 $-29\sim -44^{\circ}\text{C}$ 的地区。

鉴于当前柴油质量及现有机车柴油机结构特点，铁道部规定铁 道 内燃机车应使用“优级品”或“一级品”轻柴油，在两种油品未供应之前，暂允许使用“合格品”，但其十六 烷值 不得小于45。

9.4 柴油的选用

为合理充分利用资源，应合理选用不同牌号的柴油。一般原则是选用柴油的凝点应较使用地区和季节的最低气温低 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ ，以保证柴油的正常流动。

我国幅员广阔，纬度区间很大，海拔也相差几千米，而且四季分明，以致南北方、冬夏季，平高原之间温差悬殊。这就要求根据海拔纬度区间和季节选用柴油。

我国长江以南地区年平均气温在 10°C 以上，南方沿海地区平均气温更高。

一般而言，10号柴油可在南方沿海及有预热设备的高速柴油机使用；0号 柴油可在全国4~9月间使用，长江以南冬季也可使用；-10号柴油用于长城 以南冬季和长江以南严冬；-20号柴油用于长城以北冬季和长城以南、黄河以北严冬；-35号 柴油用于东北、西北严冬；-50号柴油用于特别严寒地区。

10 煤 浆

10.1 煤 浆 分 类

煤浆是一种煤基燃料，它是高浓度的煤粉($\geq 70\%$)与其他介质($\leq 30\%$ 油或水)和少量添加剂($0.5\sim 1.0\%$)的稳定混合粘稠的两相流体——浆体，可以象燃油似地雾化喷燃，形成火炬燃烧。是以煤代油的一种重要措施。

根据介质的不同，煤浆可分为油煤浆 (COM——Coal Oil Mixture)、油水煤浆 (COWM——Coal Oil Water Mixture)与水煤浆 (CWS——Coal Water Slurry 或 CWM——Coal Water Mixture) 三种。

根据浆体中煤粉的粒度与灰分含量不同，煤浆可分为：常用型（供外燃用）与超微粒度与灰分的特种煤浆（精细水煤浆供内燃用）。

考虑到油源供应问题和我国长期的“以煤为主”的能源政策，水煤浆理应得到优先广泛发展。

10.2 水煤浆的基本特性

10.2.1 为保证水煤浆的燃烧实用，水煤浆应具有高含碳量、低粘度、稳定性和可燃性。

10.2.2 常用水煤浆与相关燃料的特性

常用水煤浆与相关燃料的特性比较见表1—14。

10.2.3 常用水煤浆一般规格

常用水煤浆一般规格见表1—15。

10.2.4 粒度分布

小粒嵌入大粒之间，不仅提高了浓度，小粒和水混合对大粒起液体承载作用而减小粘