

# Requirements for the Excess Air Coefficient to Avoid Flameout in Diesel Engine

Wenpeng Liu\*, Liang'an Jin, Zhansheng Gao

Dalian Naval Academy, Dalian Liaoning  
Email: \*[www163comlwp2009@163.com](mailto:www163comlwp2009@163.com)

Received: Mar. 16<sup>th</sup>, 2015; accepted: Mar. 28<sup>th</sup>, 2015; published: Apr. 3<sup>rd</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

As the most widely used and important power plant at present, due to the decrease of excess air coefficient (EAC), the dynamic performance of diesel engine often receives great influence even direct flameout. According to the relationship between EAC and main parameters such as mean effective pressure and mean exhaust temperature, based on the thermodynamic calculation about fuel combustion process in cylinder, this paper analyses the requirements for the EAC to avoid flameout in diesel engine and provides the method of calculating the critical EAC, and thus we can give further elaboration to the phenomenon that with the loss of EAC, the power performance reduces, the thermal load increases and the combustion quality reduces in theory; especially when EAC is less than the critical value, the diesel engine will face flameout and can't maintain normal work. The conclusion has practical significance to the further study of diesel engine theory and application, the reliability increase under all kinds of different conditions.

## Keywords

Diesel Engine, Excess Air Coefficient, Avoid Flameout

---

# 柴油机过量空气系数的防熄火要求

刘文鹏\*, 金良安, 高占胜

海军大连舰艇学院, 辽宁 大连  
Email: \*[www163comlwp2009@163.com](mailto:www163comlwp2009@163.com)

---

\*通讯作者。

收稿日期：2015年3月16日；录用日期：2015年3月28日；发布日期：2015年4月3日

## 摘要

柴油机这一当前应用最广泛的重要动力装置,往往由于过量空气系数降低而影响动力性能甚至直接熄火。本文根据柴油机过量空气系数与其平均有效压力、排气平均温度等主要参数的关系,基于缸内燃料燃烧过程的热力学计算,对柴油机过量空气系数的防熄火要求进行分析,给出了柴油机防熄火的临界过量空气系数理论值求解方法,从而在理论上进一步阐述了随着过量空气系数的降低,柴油机的动力性降低、热负荷增加、燃烧质量下降的现象;特别是当过量空气系数低于临界值时,柴油机会熄火,无法维持正常工作。所得结论对柴油机理论与应用的深入研究,提高其在各种不同条件下工作的可靠性具有实际意义。

## 关键词

柴油机, 过量空气系数, 防熄火

## 1. 引言

自柴油机于 1892 年被发明后,由于其热效率高、经济性好、功率范围广、机动性好,在交通运输和大型生产上普遍采用柴油机作为动力装置[1]。柴油机的正常工作依赖于吸入适量的空气,但是吸入空气量往往受到环境因素或突发事件的影响。比如在高原环境下,高海拔空气稀薄使柴油机进气能力下降;柴油机的进排气管受损或其他特殊条件也会导致进气量减少。此时为尽量减少功率降低程度,需要提高循环供油量,导致柴油机在低过量空气系数下运转,其性能严重下降,难以保证其正常运行甚至熄火。目前,大多是在高海拔背景下研究过量空气系数与柴油机性能的关系,内容也主要是柴油机性能的变化情况以及如何采取措施缓解性能下降的趋势,而对过量空气系数降低导致柴油机熄火的研究较少。

过量空气系数会影响柴油机的燃烧过程,而燃烧过程的好坏会直接影响柴油机的性能指标。由于柴油机喷雾、压缩和燃烧过程都是在狭小的空间和极短的时间内完成的,特别是缸内的燃烧过程具有复杂的物理和化学反应,因而对柴油机缸内燃烧过程的研究有很大的难度。本文主要从理论上分析过量空气系数降低对柴油机性能的影响,并建立燃烧过程模型来计算柴油机防熄火的临界过量空气系数。

## 2. 过量空气系数降低对柴油机性能的影响

过量空气系数降低会导致燃料的不完全燃烧,尤其是使用结构复杂、碳链较长的劣质高粘度燃料油时情况会更严重。当过量空气系数降低接近于 1 的时候,因燃料不完全燃烧不仅会使柴油机的效率下降,由于剩余燃料的热分解还会析出游离碳粉使排气管冒黑烟,使气缸磨损增加,对柴油机的寿命产生有害影响[2]。当过量空气系数继续降低时,会导致油气过浓,着火延迟期变长,燃烧过程拖后,使柴油机的性能降低,甚至导致柴油机熄火[3]。

下面主要分析过量空气系数降低对柴油机的动力性和热负荷产生的影响。

### 2.1. 对动力性的影响

柴油机的过量空气系数  $\alpha$  为其气缸内吸入的实际空气量与喷入气缸内燃料完全燃烧时所需要的理论空气量之比[4]。对于增压柴油机,平均有效压力  $p_e$  ( $10^5$  Pa)与过量空气系数的关系如下[5]:

$$p_e = \frac{3.485\eta_e\eta_v p_k H_u}{\alpha L_0 T_k} \quad (1)$$

可得:

$$\eta_e = p_e \alpha \frac{L_0 T_k}{3.485\eta_v p_k H_u} \quad (2)$$

$\eta_e$ ——有效效率;

$\eta_v$ ——容积效率;

$p_k$ ——增压空气压力,  $10^5$  Pa;

$H_u$ ——燃料低热值, kJ/kg;

$T_k$ ——增压空气热力学温度, K。

由式(2)可见, 平均有效压力与过量空气系数呈反比关系, 在过量空气系数降低的情况下, 为了保证有效效率不变, 需要提高  $p_e$ , 但是  $p_e$  的提高受到柴油机的热负荷和机械强度的限制; 同时, 为了保证柴油机工作的耐久性和可靠性,  $p_e$  的进一步提高也会受到限制。因此过量空气系数降低后柴油机的有效效率减小, 动力性降低。

## 2.2. 对热负荷的影响

排气平均温度  $t_T$  ( $^{\circ}\text{C}$ )与过量空气系数的关系如下[5]:

$$t_T = \frac{(1-q_w)H_u + \alpha\varphi L'_0 c_{pk} t_s - \eta_i H_u}{(1+\alpha\varphi L'_0) c_{pt}} \quad (3)$$

$\varphi$ ——扫气系数;

$\eta_i$ ——指示热效率;

$L'_0$ ——燃烧 1 kg 燃料所需的理论空气量, kg/kg;

$c_{pk}$ ——空气的定压比热, kJ/(kg· $^{\circ}\text{C}$ );

$c_{pt}$ ——燃气的定压比热, kJ/(kg· $^{\circ}\text{C}$ );

$t_s$ ——增压空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$q_w$ ——冷却液带走热量的百分数。

由式(3)可见, 柴油机的排气平均温度主要由  $\alpha\varphi$  决定, 在扫气系数一定的情况下过量空气系数对平均排气温度的影响较大。以高海拔环境为例, 研究表明, 排气平均温度随海拔高度的变化率较大, 随着海拔的升高, 大气压力减小, 过量空气系数降低, 柴油机的排气平均温度迅速增加[6]。过量空气系数降低导致排气平均温度增加的主要原因是: 随着过量空气系数的降低, 为了保证柴油机的进气量不变, 需要提高涡轮增压器的转速, 一方面, 涡轮增压器转速的提高无法完全抵消环境因素导致的进气量减少; 另一方面, 由于提高了涡轮增压器的转速, 导致压气机的后出口温度升高。这样, 柴油机进气量减少导致涡轮增压器转速提高, 但是过量空气系数降低, 致使燃料燃烧不充分, 燃料在缓燃期和急燃期阶段无法完全燃烧, 后燃现象严重, 从而导致排气平均温度升高, 柴油机的热负荷增加。

对非增压柴油机的分析类似, 由上述分析可以看出, 过量空气系数降低会导致柴油机性能下降。由于过量空气系数的降低, 柴油机的空燃比降低, 气缸内的混合气过浓, 致使燃烧恶化。另外, 过量空气系数的降低还会导致柴油机在压缩过程终点时的缸内温度和压力降低, 使滞燃期延长, 循环效率下降, 进而导致柴油机的性能下降[7]。

### 3. 过量空气系数的防熄火要求分析

#### 3.1. 模型建立

为了方便对柴油机防熄火的临界过量空气系数进行分析，现对一单缸柴油机进行建模，并做出如下假设[8]：

- 1) 缸内工质的状态是均匀的，即缸内各物理量在空间上保持均匀；
- 2) 缸内工质在各瞬时均达到热力学平衡态，并将循环工质简化为空气，其比热容为定值，工质的状态由热力学方程、理想气体状态方程决定；
- 3) 忽略柴油机实际工作过程的摩擦阻力及进、排气阀的节流损失；
- 4) 在膨胀和压缩过程中忽略气体与气缸壁之间的热交换，简化为可逆绝热过程；
- 5) 将燃料燃烧放热的过程简化为工质从高温热源可逆吸热的热力学过程；
- 6) 气缸内没有完全燃烧的燃料不发生热分解，同时忽略剩余燃料对燃烧终了温度的影响。

对于单缸柴油机来说，当进气量减少，过量空气系数下降，导致燃料燃烧不充分，燃烧产生的气体膨胀压力不足以推动活塞维持柴油机运转时，柴油机将会因为动力不足无法带动负荷而熄火。柴油机的负荷可以用其阻力矩来表示，可以通过测量某一工况下曲轴的输出转矩  $M_e$  作为其阻力矩，为了维持运转至少需要对活塞产生的压力为[5]：

$$p_m = \frac{300M_e\tau}{9550V_s} \quad (4)$$

$p_m$  ——柴油机带动负荷时应对其活塞作用的最小压力， $10^5$  Pa；

$M_e$  ——测得的阻力矩，N·m；

$\tau$  ——行程数；

$V_s$  ——气缸工作容积，L。

柴油机的过量空气系数  $\alpha$  为：

$$\alpha = \frac{L}{BL_0} \quad (5)$$

$B$  ——柴油机喷出燃料的质量，g；

$L$  ——气缸实际吸入的空气量，g；

$L_0$  ——单位质量燃料完全燃烧所需空气量，g/g。

当进气量  $L$  减少导致过量空气系数  $\alpha$  降低使燃料燃烧产生的气体膨胀压力小于  $p_m$  时，柴油机将停止运转而熄火。

#### 3.2. 气体膨胀压力计算

下面对燃料燃烧产生的气体膨胀压力进行计算，计算分为两个过程：绝热压缩过程和绝热燃烧过程。

绝热压缩过程：从气缸吸气结束到活塞运行到上止点的压缩过程。气缸吸入空气后与油气混合均匀，视为标准状态下的理想气体，即：

$$p_0V_s = n_0RT_0 \quad (6)$$

$p_0$ 、 $T_0$  为标准情况下的大气压( $10^5$  Pa)和大气温度(K)， $n_0$  为混合气物质的量(mol)，等于燃料、氧气、氮气的物质的量之和。

由于忽略了与外界的热交换，柴油机压缩混合气的过程可以视为绝热压缩过程，即[8]：

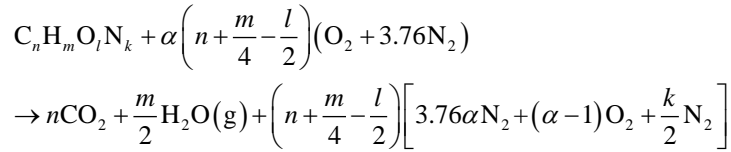
$$p_0V_s^\gamma = p_1V_1^\gamma \quad (7)$$

$$V_s T_0^\sigma = V_1 T_1^\sigma \quad (8)$$

其中,  $\gamma$  为比热容比,  $\gamma = (\sigma + 1) / \sigma$ ,  $\sigma$  为总自由度除以 2;  $V_1$  为压缩结束时混合气的体积,  $V_1 = V_s / \varepsilon$ ,  $\varepsilon$  为柴油机的压缩比。由(7) (8)两式可以计算得到压缩终了时混合气的压力  $p_1$  和温度  $T_1$ 。

绝热燃烧过程: 由于柴油机处于临界状态下, 燃料燃烧产生的压力与带动负荷所需的压力相等, 所以认为燃烧过程混合气体积不变, 视为绝热定容燃烧过程。

燃料燃烧的化学方程式为[5]:



由热力学的基尔霍夫定律可得[8]:

$$Q_{V,T_2} - Q_{V,T_1} = \int_{T_1}^{T_2} \sum_P n_j C_{V,j} dt - \int_{T_1}^{T_2} \sum_R n_i C_{V,i} dt \quad (9)$$

$Q_{V,T_2}$  和  $Q_{V,T_1}$  为燃烧的热效应(J),  $n_j$ 、 $C_{V,j}$  和  $n_i$ 、 $C_{V,i}$  分别为第  $j$  种生成物及第  $i$  种反应物的摩尔数(mol)及定容摩尔热容(J/mol·K)。结合燃料燃烧的化学方程式, 由式(9)可以计算得到燃烧终了时混合气的温度  $T_2$  (需用试算法确定), 再由理想气体状态方程  $p_2 V_1 = n_2 R T_2$  可以计算得到燃烧终了时气体的膨胀压力  $p_2$  (燃烧结束后混合气总物质的量  $n_2$  为燃烧生成物与剩余燃料的物质的量之和)。

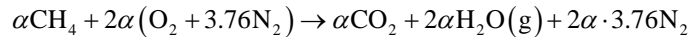
在临界状态下燃料燃烧产生的气体膨胀压力等于柴油机带动负荷对其活塞作用的压力, 即:

$$p_2 = p_m \quad (10)$$

由式(10)可以反推出此时的过量空气系数  $\alpha_{\min}$ , 即柴油机防熄火的临界过量空气系数。

### 3.3. 实例分析

为了方便计算和分析, 现假设柴油机所使用的燃料为  $CH_4$ , 由于过量空气系数  $\alpha < 1$ , 燃料有剩余, 燃烧的化学方程式为:



设缸内有 1 mol 的  $CH_4$ , 用标准状况下的热力学数据近似计算  $CH_4$  的燃烧过程[8], 有:

$$\begin{aligned} Q_{V,T_2} - Q_{V,T_1} & \approx -\Delta H^0 = -(\alpha \Delta H_{f,CO_2}^0 + 2\alpha \Delta H_{f,H_2O}^0 - \alpha \Delta H_{f,CH_4}^0) \\ & = -\alpha [-393522 + 2 \times (-241826) - (-74873)] = 802301\alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \int_{T_1}^{T_2} \sum_P n_j C_{V,j} dt - \int_{T_1}^{T_2} \sum_R n_i C_{V,i} dt \\ & \approx \alpha (H_m - H_m^0)_{CO_2} + 2\alpha (H_m - H_m^0)_{H_2O} + 2\alpha \times 3.76 (H_m - H_m^0)_{N_2} \end{aligned}$$

式中,  $\Delta H^0$  为生成焓,  $H_m$ 、 $H_m^0$  分别为物质的摩尔焓和标准摩尔焓, 其中标准摩尔焓已知, 可得:

$$\alpha (H_m - 9364)_{CO_2} + 2\alpha (H_m - 9904)_{H_2O} + 2\alpha \times 3.76 (H_m - 8670)_{N_2} = 802301\alpha$$

即:

$$H_{m,CO_2} + 2H_{m,H_2O} + 2 \times 3.76 H_{m,N_2} = 896671.4$$

上式左边各项均与温度  $T_2$  有关, 所以需用试算法确定:

Table 1. The trial calculation data

表 1. 试算数据

温度 $T_2/K$	$H_{m,CO_2} / J$	$H_{m,H_2O} / J$	$H_{m,N_2} / J$	$\sum / J$
2000	100811.2	82694.7	64808.5	753560.5
2100	106856.4	87845.6	68412.5	797009.6
2200	112927.3	93057.9	72031.5	840719.9
2300	119022.2	98326.7	75664.0	884668.9
2400	125139.6	103647.3	79309.1	928838.6

由表 1, 温度  $T_2 = 2300 \text{ K}$  时的和与结果最接近, 所以燃烧终了时温度近似为  $2300 \text{ K}$ , 混合气总物质的量  $n_2 = (\alpha + 2\alpha + 2\alpha \times 3.76) + (1 - \alpha) = 1 + 9.52\alpha$ ; 设气缸容积  $V_s = 2 \text{ L}$ , 压缩比为 20, 则此时混合气的体积  $V_1 = 0.1 \text{ L}$ ; 设柴油机所带负荷  $p_m = 8 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 则由  $p_2 V_1 = p_m V_1 = n_2 R T_2$  可得此时的临界过量空气系数  $\alpha_{\min} = 0.33$ 。

上述分析表明, 当已知柴油机的负荷时, 可以计算得到此时柴油机防熄火的临界过量空气系数, 当过量空气系数下降至临界值以下时, 柴油机将因无法带动负荷而熄火。

#### 4. 结束语

本文分析了过量空气系数与平均有效压力、排气平均温度等柴油机性能参数的关系, 对柴油机内燃料燃烧的过程进行了建模计算, 得到了柴油机防熄火的临界过量空气系数的理论值。分析表明, 在低过量空气系数下, 无法保障柴油机的正常工作, 在低于临界过量空气系数时柴油机会熄火。

柴油机在实际运行时, 对过量空气系数的要求会更严格, 临界过量空气系数也会比理论值更大。一方面, 当过量空气系数降低后, 会导致燃料燃烧不充分, 柴油机会冒黑烟, 这对柴油机本身的动力性、排放性、可靠性都会造成很大的影响; 另一方面, 在建立模型时本文做出了很多假设, 由于柴油机在实际运行时, 不可避免的与外界有热交换过程, 所以整个过程并不是绝热的, 而且没有完全燃烧的剩余燃料会在高温下产生热分解, 还有实际运行过程中会产生摩擦损失等等。所以在实际中为了保证柴油机不熄火, 其临界过量空气系数比理论值要大。

#### 参考文献 (References)

- [1] 孙建新 (2006) 船舶柴油机. 人民交通出版社, 北京.
- [2] 周明华 (1995) 船用涡轮增压柴油机的过量空气系数 $\alpha$ 与运行管理. *航海技术*, **6**, 38-41.
- [3] 路锋, 郭猛超 (2011) 特殊环境增压柴油机燃烧特性计算. *机床与液压*, **23**, 66-70.
- [4] 田文国, 叶荣华 (2008) 过量空气系数与柴油机性能(英文). *中国航海*, **1**, 57-62.
- [5] 陈绍纲 (1992) 轮机工程手册. 人民交通出版社, 北京.
- [6] 申立中, 毕玉华, 张韦, 雷基林, 颜文胜, 杨永忠, 张宁 (2005) 不同海拔下增压及增压中冷柴油机的燃烧过程. *燃烧科学与技术*, **6**, 524-529.
- [7] 高荣刚 (2012) 高原环境下大功率柴油机燃烧性能分析及功率恢复研究. 硕士学位论文, 北京交通大学, 北京.
- [8] 沈维道, 蒋智敏, 童钧耕 (2001) 工程热力学. 第三版, 高等教育出版社, 北京.