

DOI: 10.7652/xjtuxb201407006

# 不同喷油提前角下双燃料发动机的 燃烧特性和稳定特性

孙璐, 刘亦夫, 曾科

(西安交通大学内燃机研究所, 710049, 西安)

**摘要:** 针对天然气、柴油双燃料发动机,研究了不同引燃油提前角下双燃料发动机的燃烧和循环变动特性。结果表明:给定引燃油量,喷油提前角提前,缸内最大压力增大,缸内最大压力出现时刻提前;双燃料发动机的放热率特性曲线存在2个波峰,喷油提前角提前有助于引燃柴油完全燃烧,使得引燃能量更大,整体混合气燃烧更充分,放热持续时间缩短,放热速度加快;随着喷油提前角的提前,缸内最大压力和最大压升率显著增大,缸内最大压力的循环变动的变化不明显,最大压升率的循环变动的变化显著;缸内最大压力和平均指示压力与缸内最大压力对应的曲轴转角密切相关且随喷油提前角的提前向上止点移动,缸内最大压升率与其对应曲轴转角的相关性随着喷油提前角的提前而削弱;随着喷油提前角的提前,最大压力和平均指示压力的循环变动系数减小,喷油提前角为 $20^\circ$ 时最大压力循环变动系数最大,为 $5.4\%$ ,给定喷油提前角下平均指示压力的循环变动系数均小于 $4\%$ 。

**关键词:** 循环变动特性;双燃料;柴油;天然气;发动机

**中图分类号:** TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)07-0029-05

## Combustion Performance and Stability in Dual Fuel Engine with Different Pilot Diesel Injection Timings

SUN Lu, LIU Yifu, ZENG Ke

(Internal Combustion Engine Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The combustion performance and stability of a dual fuel engine fueled with diesel and natural gas at different pilot diesel injection timings are investigated. The results show that the profile of in-cylinder pressure is advanced, the peak pressure gets greater and appears earlier, and there exist two peaks of heat release rate in dual fuel engine; the advanced pilot diesel injection timing facilitates complete combustion of pilot diesel to supply more ignition power; the whole heat release rate is elevated with earlier pilot diesel injection timing; the peak pressure and the maximum rate of pressure rise increase dramatically with the earlier pilot diesel injection timing, the change of the cyclic variation of peak pressure is un conspicuous, while the change of the cyclic variation of the maximum rate of pressure rise increases with earlier injection timing. The peak pressure and indicated mean effective pressure show a correlation with the crank angle corresponding to peak pressure, the distribution moves towards the top dead center with earlier pilot diesel injection timing, and the interdependence of maximum rate of pressure rise and its corresponding

收稿日期: 2013-10-17。 作者简介: 孙璐(1986—),女,博士生;刘亦夫(通信作者),男,讲师。 基金项目: 国家重点基础研究计划资助项目(2011CB707200)。

网络出版时间: 2014-04-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140416.1749.012.html>

crank angle is weakened. The cyclic variations get the maximum (5.4%) at 20° before top dead center. The cyclic variations of indicated mean effective pressure are all bellow 4%.

**Keywords:** cyclic variation; dual fuel; diesel; natural gas; engine

随着当代汽车工业的发展,化石燃料已经过度消耗且给环境带来了重大的污染。为了缓解日益严峻的环境问题,降低石油等原始燃料的消耗,天然气便成为一种备受关注的内燃机替代燃料。目前,天然气在汽车工业的应用主要有两种:火花塞点燃和双燃料引燃,其中点燃式天然气发动机已经得到了广泛的应用。

双燃料发动机是基于柴油发动机技术发展起来的,其燃料采用压燃方式。柴油易于压燃,作为点火源,压燃着火后的引燃燃料是天然气,这种双燃料发动机可以进一步减少排放<sup>[1]</sup>。双燃料发动机可以由柴油发动机改装而成,改装过程中仅需增加一套天然气进气系统,所以双燃料发动机既保持了柴油原有的压缩比和较高的热效率,而且由于天然气的应用又使得 PM 和 NO<sub>x</sub> 排放减少。天然气的高辛烷值(NOR)为 130,采用它可以降低爆震的发生。

目前,针对天然气、柴油双燃料发动机,国内外均开展了相关的研究,包括运用试验及数值模拟的方法对燃烧过程和排放特性的研究。Stefano 等人的研究表明,双燃料发动机的 PM 和 NO<sub>x</sub> 排放明显减少,但是 HC 和 CO 排放升高,同时提出了一维与三维结合的数值模型,给出了不同时刻缸内的温度和压力分布<sup>[2]</sup>。Weaver 等人研究指出,双燃料发动机可以在获得与柴油机相近的热效率的前提下,明显降低 PM 和 NO<sub>x</sub> 排放<sup>[3]</sup>。Srinivasan 等人给出了进气温度和引燃油量对各种特性的影响<sup>[4-5]</sup>。林志强等人揭示了引燃油量和过量空气系数等因素对燃烧特性的影响,发现柴油引燃天然气可以在较稀的情况下实现稳定着火和燃烧<sup>[6-7]</sup>。

天然气、柴油双燃料发动机具有特殊的燃烧过程和循环变动特性,但针对放热规律和循环变动特性的系统性研究较少。双燃料发动机的放热规律与其他燃烧方式存在明显的区别,深入研究可以为揭示复杂的燃烧过程提供参考。循环变动特性是对发动机稳定性判断的一个量化标准<sup>[8]</sup>,在点燃式天然气发动机中已经进行了大量的探讨<sup>[9]</sup>,但是在双燃料发动机中尚缺乏系统性研究。本文在一台由单缸柴油机改装成的天然气、柴油双燃料发动机上,对不同喷油提前角下的燃烧特性和循环变动特性进行了研究。

1 试验装置和方法

图 1 为试验台架布置。试验用发动机由一台四冲程、单缸、水冷发动机改装而成。发动机经由扭矩仪与一台电涡流测功机相耦合,缸压通过安装在气缸顶部的缸压传感器测得。曲轴转角  $\beta$  每隔 0.5° 采集一次缸压信号,每个测试工况采集 200 个循环,以便于分析发动机的循环变动特性。此外,燃烧特性用 200 个循环的平均缸压来分析。

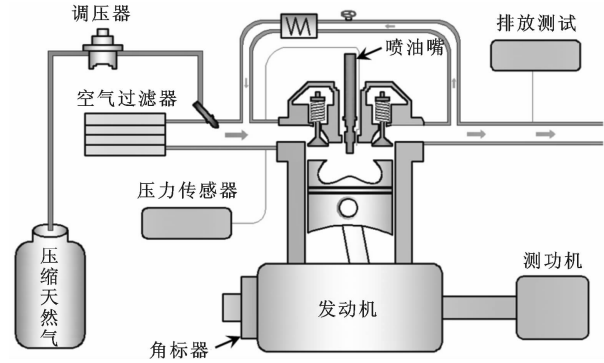


图 1 试验台架布置

试验用天然气为陕北天然气,主要成分为甲烷,甲烷的体积分数为 96.16%。试验用天然气和柴油的性能参数如表 1 所示,试验所用发动机参数如表 2 所示。

表 1 试验用天然气和柴油的性能参数

| 燃料特性                      | 天然气  | 柴油   |
|---------------------------|------|------|
| 着火点/(°)                   | 532  | 316  |
| 理论空燃比/kg·kg <sup>-1</sup> | 17.2 | 14.5 |
| 高热值/MJ·kg <sup>-1</sup>   | 55.5 | 44.8 |
| 低热值/MJ·kg <sup>-1</sup>   | 50.0 | 42.8 |

表 2 试验用发动机参数

| 参数                   | 数值及类型 | 参数                       | 数值及类型 |
|----------------------|-------|--------------------------|-------|
| 燃烧缸类型                | ω     | 柴油喷嘴数                    | 4     |
| 缸径/mm                | 100   | 喷射压力/MPa                 | 20    |
| 行程/mm                | 115   | 天然气供给方式                  | 比例阀   |
| 连杆长度/mm              | 190   | 功率/kW                    | 11    |
| 压缩比                  | 18    | 额定转速/r·min <sup>-1</sup> | 2 300 |
| 工作容积/cm <sup>3</sup> | 903   |                          |       |

2 试验结果与分析

试验工况:转速为 1 600 r/min,引燃油量为 4.5 g/min,天然气的替代率(基于热值)为 85.1%。本文研究高负荷(制动平均有效压力为 0.64 MPa)下不同喷油提前角对燃烧特性和稳定特性的影响,稳定性采用循环变动特性进行量化分析。

图 2 为喷油提前角  $\theta$  对缸内压力的影响。由图 2 可以看出,喷油提前角提前,缸内压力上升提前且缸内最大压力增加显著。缸内最大压力随着喷油提前角的提前而向上止点移动。

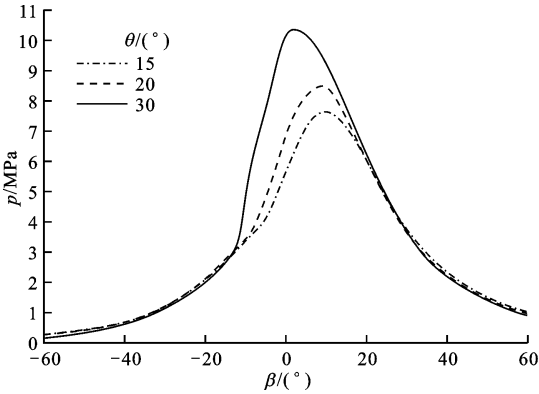


图 2 喷油提前角对缸内压力的影响

图 3 为喷油提前角对整个燃烧过程的放热率影响。由图 3 可以看出,随着喷油提前角的提前,放热率峰值提前。图中各放热率曲线的第 1 个波峰对应引燃柴油的放热率。在喷油提前角对双燃料发动机的燃烧特性影响研究中引燃油量是相同的,因此随着喷油提前角的提前,柴油的燃烧效率增大,引燃柴油的燃烧得以促进。这是因为喷油提前角提前可以为柴油提供更充裕的压缩时间,而引燃柴油充分燃烧可以为后续混合物的燃烧提供更多的点火能量和点火源,从而促进后续混合物的燃烧。由图 3 还可以看出,随着喷油提前角提前,放热率峰值增大,整

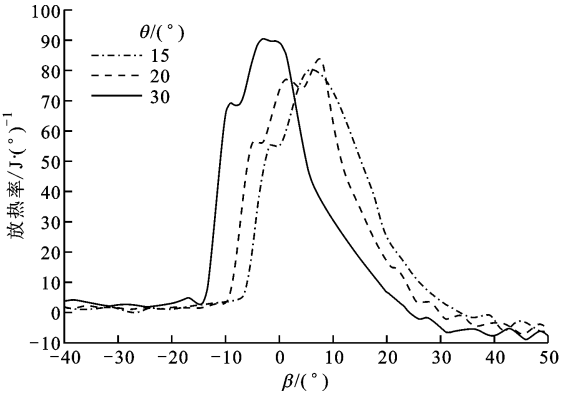


图 3 喷油提前角对对整个燃烧过程的放热率影响

个放热过程加快,更进一步说明喷油提前角提前,可以使得整个燃烧更加充分。

循环变动特性可以量化双燃料发动机的稳定特性,所以本文采用循环变动系数来表征,并定义为

$$\delta = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \times 100\%$$

式中: $\sigma_x$  为压力参数的标准差; $\bar{x}$  为压力参数的平均值。

图 4 为喷油提前角对缸内最大压力的循环变动的影响。由图 4 可以看出,喷油提前角为 30°时,缸内最大压力的循环变动最小,各个喷油提前角下缸内最大压力的循环变动均比较小。随着喷油提前角的提前,缸内最大压力显著增大,这与图 2 呈现的情况一致。循环变动的情况说明,降低最大压力循环变动可以增强燃烧。

图 5 为喷油提前角对缸内最大压升率的循环变动的影响。缸内最大压升率对应着缸内混合气的最大放热率。由图 5 可以看出,喷油提前角提前,缸内最大压升率显著提高,表明随着喷油提前角的提前,缸内燃烧放热率增大,这与图 3 的平均放热率的情况一致。缸内最大压升率的循环变动随着喷油提前角的提前而显著增大,对比缸内最大压力,最大压升

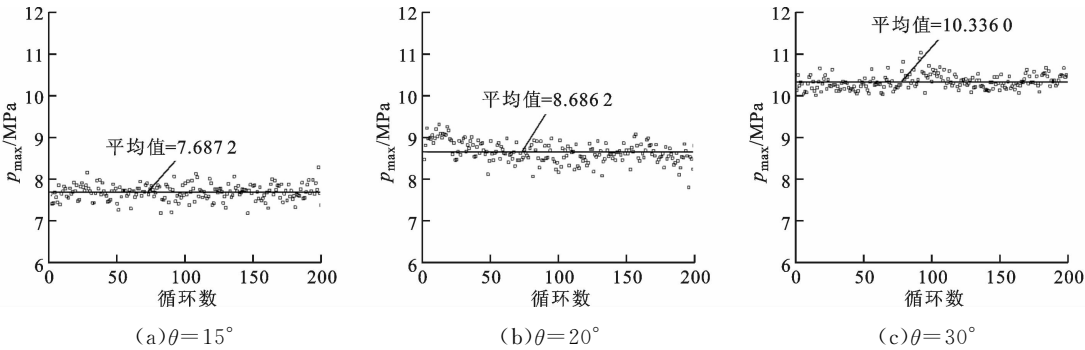


图 4 喷油提前角对缸内最大压力的循环变动的影响

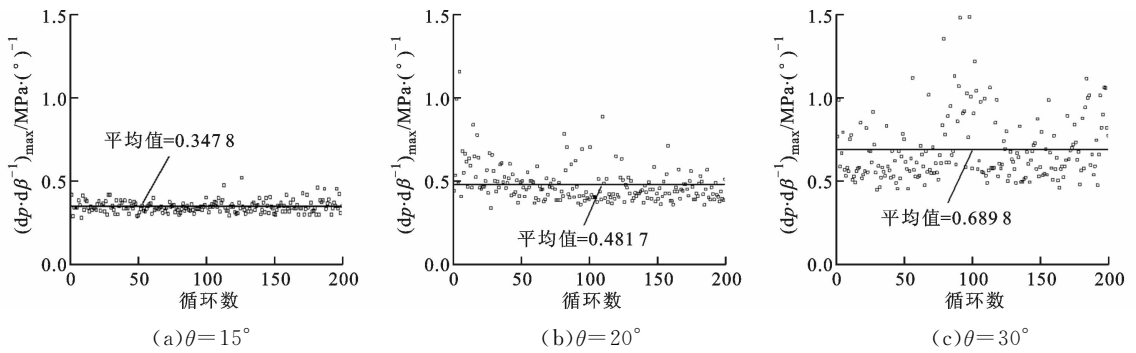


图 5 喷油提前角对缸内最大压升率的循环变动的影响

率的循环变动特性受喷油提前角的影响更明显。

综合缸内最大压力和最大压升率在不同喷油提前角下的变化,可以得出,随着喷油提前角的提前,整个缸内的燃烧更加剧烈。喷油提前角的提前可以促进引燃柴油和整个混合气完全燃烧。

图 6、7 分别为缸内最大压力和平均指示压力与缸内最大压力对应曲轴转角  $\beta_{p_{\max}}$  的关系。由图 6、7 可以看出:缸内最大压力和平均指示压力与  $\beta_{p_{\max}}$  均存在较好的关联性。较大的缸内最大压力和平均指

示压力的循环变动对应着较小的  $\beta_{p_{\max}}$ 。原因可以解释为,混合气燃烧充分且燃烧速率较快的循环,也就是放热率较大的循环,使得缸内最大压力提前到达。此时,活塞距离上止点较近,燃烧的等容度较大,传热损失较小,使得缸内最大压力和平均指示压力较大。由图 6、7 还可以看出,喷油提前角提前越多,其与缸内最大压力和平均指示压力的相关性越弱,但是减弱的程度并不明显。随着喷油提前角的提前,  $\beta_{p_{\max}}$  分布区域线性扩大,且向上止点移动,喷油提前

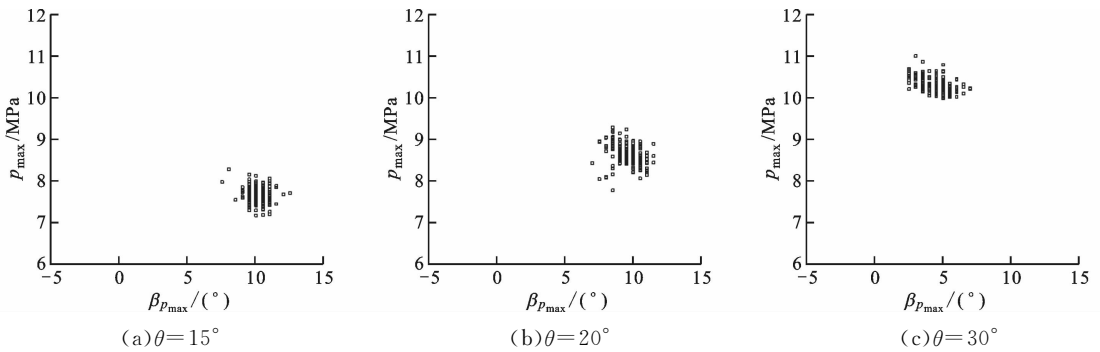


图 6 缸内最大压力与  $\beta_{p_{\max}}$  的关系

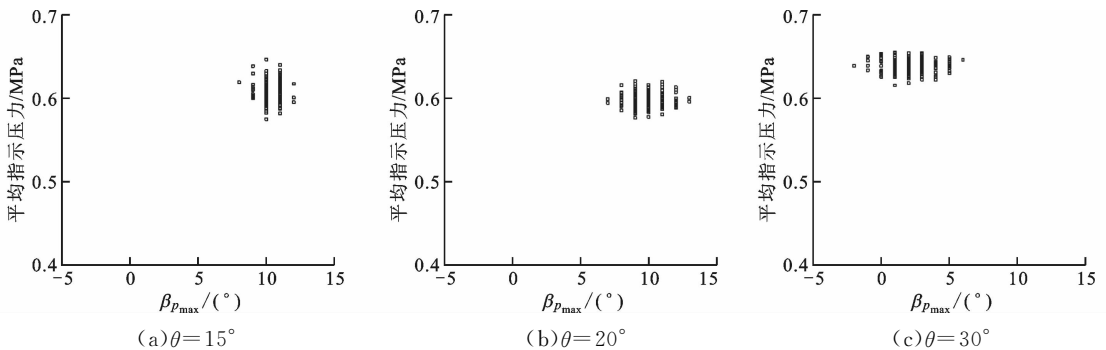


图 7 平均指示压力与  $\beta_{p_{\max}}$  的关系

角为  $30^\circ$  时,部分最大压力已出现在上止点附近。

图 8 为缸内最大压升率与其对应曲轴转角  $\beta_{(dp/d\beta)_{\max}}$  的关系。由图 8 可以看出,随着喷油提前角的提前,缸内最大压升率与  $\beta_{(dp/d\beta)_{\max}}$  呈现发散关系,

且最大压升率越大,说明喷油提前角提前越多,缸内燃烧剧烈程度越强。

图 9 为喷油提前角对平均指示压力的影响。由图 9 可以看出,随着喷油提前角的提前,平均指示压

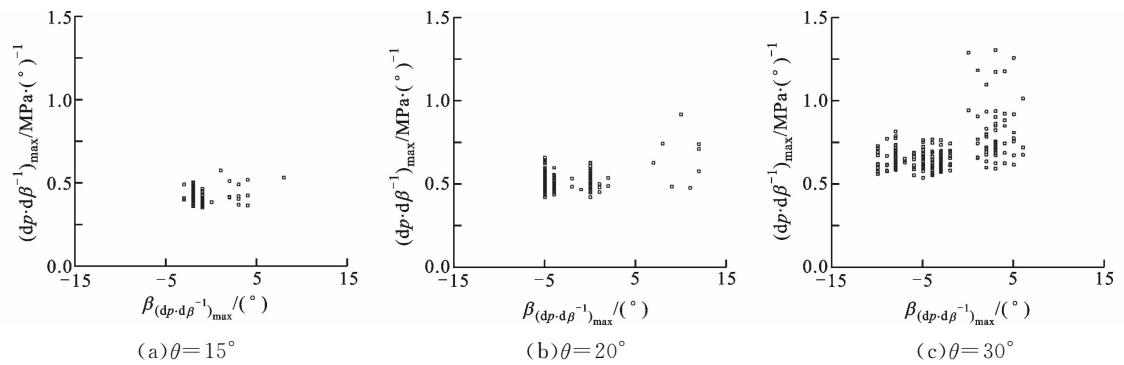


图 8 缸内最大压升率与  $\beta_{(dp/d\beta)_{\max}}$  的关系

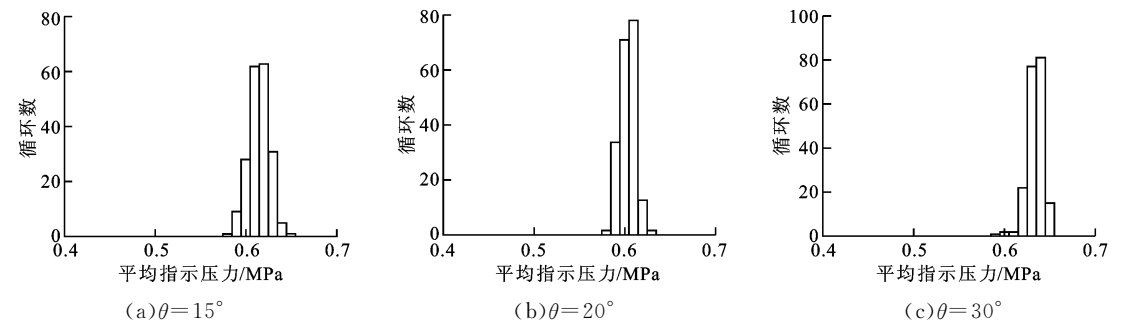


图 9 喷油提前角对平均指示压力的影响

力增加且分布集中,也就是说随着喷油提前角的提前,平均指示压力的循环变动减小,表明随着喷油提前角的提前,平均指示压力集中在一个较高且较为集中的区域。

图 10 为喷油提前角对循环变动系数的影响。由图 10 可以看出:随着喷油提前角的提前,最大压力循环变动系数减小,当喷油提前角为  $20^{\circ}$  时,最大压力的循环变动系数最大,为 5.4%;平均指示压力的循环变动系数随着喷油提前角的提前而降低,在给定 3 个喷油提前角中,平均指示压力的循环变动系数均小于 4%。平均指示压力的循环变动系数是评价车辆操作性能的主要参数,一般认为此值超过 10% 会导致车辆操作性能恶化,所以在给定工况下,由双燃料发动机的循环变动特性显示出发动机的稳

定性比较理想。

### 3 结 论

本文通过试验研究了喷油提前角对柴油引燃天然气的双燃料发动机燃烧和稳定特性的影响。研究结果如下。

在给定的引燃油量下,喷油提前角越小,缸内最大压力增大且更接近上止点。放热率曲线存在 2 个峰值,第 1 个对应引燃柴油的燃烧,随着喷油提前角的提前,柴油燃烧更加完全且能提供更多的点火能量,这有利于混合气的燃烧,整体放热更快。

缸内最大压力和最大压升率随着喷油提前角的提前显著提高,喷油提前角对缸内最大压力的循环变动特性影响不大,对最大压升率的循环变动影响显著,且随喷油提前角的提前而明显增大。缸内最大压力和平均指示压力与  $\beta_{p_{\max}}$  存在较好的相关性,随着喷油提前角的提前,  $\beta_{p_{\max}}$  向上止点移动;最大压升率与  $\beta_{(dp/d\beta)_{\max}}$  的相关性随喷油提前角的提前而减弱。平均指示压力随着喷油提前角的提前而分布在一个相对集中且数值较大的区域。

缸内最大压力的循环变动系数在喷油提前角为  $20^{\circ}$  时存在最大值,平均指示压力的循环变动系数随着喷油提前角的提前而减小。

(下转第 130 页)

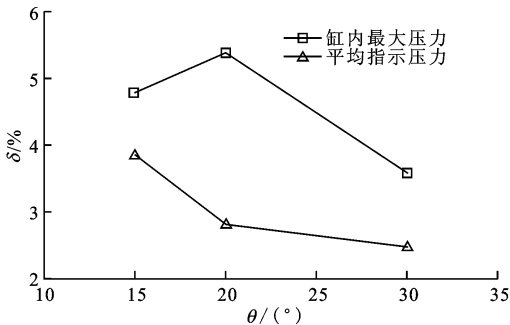


图 10 喷油提前角对循环变动系数的影响