

小缸径涡流室柴油机用喷油嘴的研究

刘胜吉, 王 建, 于子冬, 汤 东, 尹必峰

(江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212003)

摘 要: 该文分析了目前国产涡流室柴油机的机型现状, 通过理论计算分析指出用一种结构参数的喷油嘴不能满足不同气缸工作容积涡流室柴油机的匹配要求, 提出为优化柴油机动力性、经济性、排放、噪声及可靠性等综合性能, 喷油过程必须有合理的喷油持续期, 应根据柴油机循环喷油量的大小选用不同结构参数和流量的喷油嘴进行匹配试验。文中分析了针阀流通面积、针阀运动的泵吸容积、压力室容积的大小与柴油机循环喷油量的关系, 以及它们对喷油过程和柴油机性能的影响。结合国内生产实际情况, 给出了一个轴针式喷油嘴系列设计方案, 并用试制样品初步进行了试验, 试验结果表明柴油机的燃油消耗率、排气烟度明显降低, 性能得到了优化提高。

关键词: 柴油机; 喷油嘴; 设计; 性能

中图分类号: TK421⁺. 2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)03-0124-04

1 引言

近年, 我国内燃机工业发展迅速, 特别是内燃机产品品种的增多, 基本能满足不同社会需求的匹配要求, 避免了动力机组匹配中功率过剩或不足的问题。随着科学技术的发展, 柴油机直喷燃烧技术得到了普遍的应用, 单缸柴油机中缸径 95 mm 的机型多采用了直喷燃烧技术, 而多缸柴油机缸径为 80 mm 已有批量生产的直喷机型, 这些工作使柴油机在使用中取得了明显的节能效果^[1]。但是在农用柴油机中, 对缸径小于 95 mm 的单缸机及缸径为 75、80、85 mm 的多缸柴油机中仍普遍采用涡流室式燃烧系统, 且缸径愈小, 柴油机的性能相对越差, 表现在燃油耗高、排气冒黑烟、运行噪声大、怠速运转不稳定等, 使柴油机出厂返修率增多。柴油机的运行噪声、黑烟排放已成为严重的社会公害, 国外对这类涡流室柴油机已开展了大量的研究工作^[2,3], 国内在涡流室柴油机与喷油系统匹配上也作了许多研究工作^[4-6], 作者多年研究表明: 喷油嘴与柴油机的匹配不合理仍是国产小缸径涡流室柴油机性能差的主要原因之一。本文是作者对此研究的一个总结。

2 喷油嘴与涡流室柴油机的匹配计算与分析

我国缸径 95 mm 的涡流室柴油机共有 30 多个基本机型^[7]。气缸直径在 60~95 mm 之间, 气缸排量为 0.170~0.851 dm³ (L), 标定功率从 1.5~10.0 kW 不等, 标定转速在 2 000~3 600 r/min, 依据这些参数, 计算得出部分不同型号柴油机标定工况的循环喷油量见图 1。不同排量柴油机标定工况最小循环喷油量为 8.4 mm³/循环, 而最大循环喷油量为 49.8 mm³/循环, 后者是前者的 5.9 倍。但是这些机型目前国内都使用 ZS4S1 型喷油嘴, 图 2 是该喷油嘴流通特性^[8]。当针阀升程达

最大值时, 喷油嘴几何流通面积为 0.47 mm², 实际流通面积为 0.32 mm²。

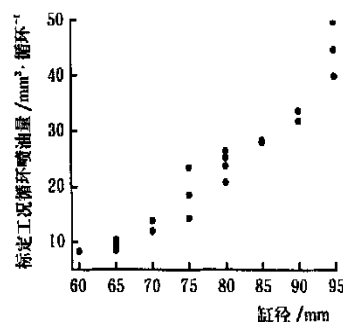


图 1 国产涡流室柴油机缸径与标定工况循环喷油量的关系

Fig 1 Relationship between cylinder bore of domestic swirl combustion chamber diesel engine and fuel delivery per cycle per cylinder in declared working condition

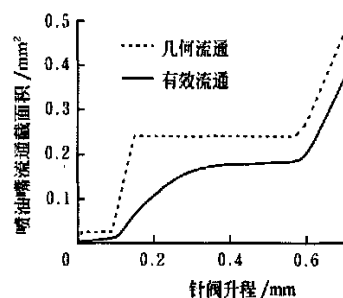


图 2 ZS4S1 喷油嘴的流通特性

Fig 2 Flow characteristics of ZS4S1 nozzle

柴油机所需喷油嘴流通面积 f (mm²) 按下式^[9]计算

$$f = \frac{6n_b V_b \times 10^{-3}}{\mu \varphi W} \quad (1)$$

式中 μ ——喷油嘴流量系数, 一般 $\mu = 0.6 \sim 0.7$; φ ——柴油机喷油持续期, 对涡流室柴油机, 从优化性能考虑, 一般推荐 $\varphi = 25 \sim 30$ A; V_b ——柴油机标定工况循环喷油量, mm³/循环; n_b ——柴油机标定工况转速, r/min; W ——喷油持续期内喷油的平均流速,

收稿日期: 2002-10-25 修订日期: 2003-04-06

基金项目: 江苏省教育厅基金资助项目 (99KJB470003)

作者简介: 刘胜吉, 男, 教授, 江苏镇江 江苏大学汽车与交通工程学院, 212003. Email: liusj@ujs.edu.cn

m/s_0 由下式计算

$$W = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_b}} \quad (2)$$

式中 ρ_b ——燃油的密度, 对柴油 $\rho_b = 825 \sim 850 \text{ kg/m}^3$; Δp ——喷油持续期内的平均有效喷油压力, $P_{a0} \Delta p$ 与喷油系统嘴端最大喷油压力有一定的关系, 作者推荐用图 3 的嘴端最大喷油压力 p_{\max} 与平均有效喷油压力 Δp 的关系得出 Δp 值, 对国产柴油机, 随着缸径增大, 嘴端最大喷油压力约在 $25 \sim 35 \text{ MPa}$ 变化。应用上述计算方法, 不同缸径柴油机匹配所需的喷油嘴最大几何流通面积计算结果见图 4。对照图 2 和图 4 可以看出, ZS4S1 型喷油嘴流通面积对缸径为 95 mm 左右柴油机而言已属偏大, 文献[10]曾进行试验优化, 结果是最大针阀升程为 0.5 mm 较合适。将 ZS4S1 型喷油嘴用于更小缸径的机型上显然是不合理的。喷油嘴流通面积偏大, 必然造成柴油机工作时, 喷油持续期减少, 着火延迟期喷油量增多, 使柴油机工作粗暴, 最大压力和压力升高率大, 柴油机噪声大; 另一方面喷油持续期短, 柴油机燃烧在上止点附近完成, 有利于动力性、经济性的提高, 但太短的喷油持续期必然使喷油压力降低, 喷雾质量下降, 这不利于混合气的形成和燃烧, 又会使得动力性、经济性变差, 因此根据喷油系统与柴油机匹配参数, 针阀升程和流通面积对此有一最佳值; 更为不利的是: 对柴油机中小负荷、低怠速运转时, 由于流通面积大, 柴油机循环喷油量小, 造成针阀升程不能全开。针阀运动的

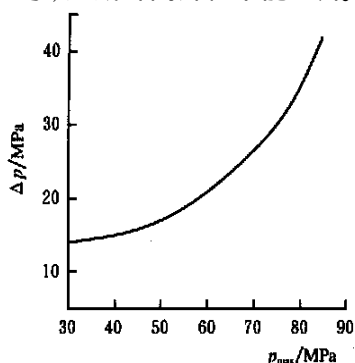


图3 平均有效喷油压力 Δp 与最大喷油压力 p_{\max} 的关系

Fig 3 Relationship between mean effective injection pressure Δp and maximal injection pressure p_{\max}

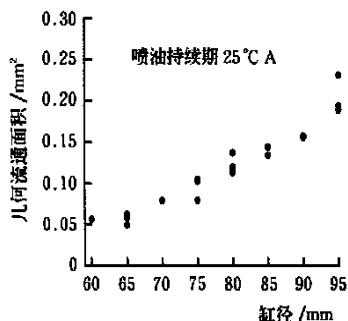


图4 不同缸径柴油机匹配用喷油嘴几何流通面积的计算结果

Fig 4 Calculated results of geometric area of nozzle hole matched diesel engine with different cylinder bore

泵吸作用使盛油槽腔内压力波动, 针阀有颤动发生, 使循环喷油量和燃烧不稳定, 导致柴油机转速波动大, 这是小缸径柴油机(如 16Q、165 型柴油机)怠速不稳的主要原因之一。

上述分析表明, ZS4S1 型喷油嘴从匹配基本参数——最大几何流通面积考虑已不能满足国产涡流室柴油机匹配要求, 应对其进行改进设计, 以满足国内小缸径涡流室柴油机的匹配要求。作者经分析计算, 考虑便于组织生产等因素, 提出了 3 种不同参数和流量的喷油嘴形成一个系列(表 1)的方案。表中序号 1 为原 ZS4S1 型喷油嘴的改进型, 将针阀升程从 0.7 mm 改为 0.5 mm , 其优越性已被试验所证实, 针阀升程变小同时减少了针阀落座冲击力, 这对提高可靠性也是有利的, 它可满足缸径 $85 \sim 95 \text{ mm}$ 柴油机匹配。序号 2、3 的针阀直径用 5 mm , 通过改变针阀的头部尺寸设计达到减少喷油嘴最大流量的目的, 头部设计以优化整机综合性能为目标, 应注意头部形状对喷雾质量的影响及尽可能减少压力室容积, 考虑到喷油嘴的可靠性, 目前国内生产的质量控制、成本和已有机型的零件互换, 轴针头部直径仍用 1 , 针阀偶件仍为 S 系列尺寸。最终设计参数尺寸由试验决定。

表 1 推荐的轴针式喷油嘴的一个系列主要参数

Table 1 Recommended major parameters of the pintle nozzle

序号	针阀直径 /mm	针阀升程 /mm	几何流通 面积/ mm^2	适应缸径 /mm
1	6, 5	0.5	0.20~0.23	85~95
2	5	0.4	0.12~0.14	75~85
3	5	0.3	0.07~0.09	60~75

3 新型喷油嘴与柴油机匹配试验与结果分析

由于 ZS4S1 型喷油嘴生产历史长久, 加上它的加工工艺复杂, 工序多, 在新设计油嘴前, 作者曾通过磨削方法减小针阀升程, 在喷油泵试验台上和 165 型柴油机上进行了先期匹配试验^[11], 取得结果后, 对表 1 中的序号 3 型喷油嘴进行设计和加工试制, 再在 165 柴油机上进行了匹配试验, 试验达到了预期的效果。

试验时进行了 3 种喷油嘴偶件的试验, 它们是针阀直径 6 mm 的 ZS4S1 型喷油嘴(简称 6 油嘴); 针阀直径 5 mm 升程减到 0.5 mm 的改进 ZS4S1 型喷油嘴(简称 5 油嘴), 再者是在 5 针阀直径, 头部形状重新设计, 减小流通面积和压力室容积, 并减小针阀升程, 相当于表 1 中序号 3 的喷油嘴(简称 5 新油嘴)。前两种喷油嘴的试验结果对比见图 5, 5 两种喷油嘴试验结果对比见图 6。

前两种油嘴对比燃油消耗率明显降低, 标定功率 2.18 kW 时, 燃油消耗率差值为 $16.0 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 超负荷工况 2.45 kW 烟度差值为 0.5 FSU , 而两种 5 油嘴对比燃油消耗率差值在标定功率点又下降了 $12.4 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 且超负荷工况烟度从 4.7 下降到 2.8 FSU , 差值达 1.9 FSU 。用 5 新油嘴与 6 油嘴相比, 燃油消耗率下降达 8.9% , 特别是烟度明显下降, 说明

新油嘴使柴油机燃烧更为完善及时。减少了社会公害,黑烟的降低对于大棚作业的动力机械来说特别重要。

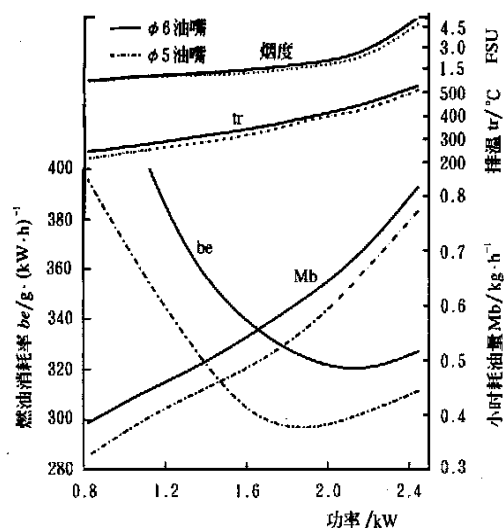


图5 用不同针阀直径喷油嘴的165柴油机负荷特性 ($n = 2600 \text{ r/min}$)

Fig 5 Constant speed characteristics of 165 diesel engine with the nozzle with different needle diameters ($n = 2600 \text{ r/min}$)

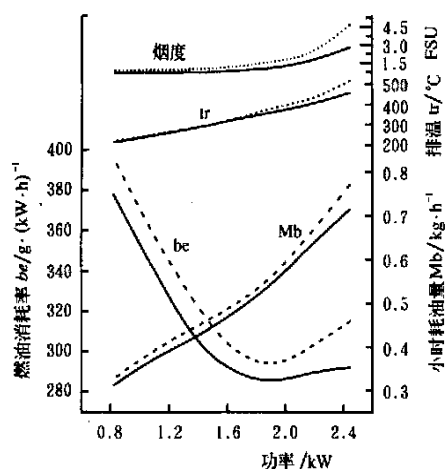


图6 用不同喷油嘴的165柴油机负荷特性 ($n = 2600 \text{ r/min}$)

Fig 6 Constant speed characteristic of 165 diesel engine with the different nozzle ($n = 2600 \text{ r/min}$)

新油嘴节能减污染的机理原因有三:一是流通面积的减少使柴油机工作时针阀升程能达最大值,喷油过程稳定,喷射压力提高,有利于燃油雾化,油气混合均匀。喷油持续期有一个合理的数值,对 $\phi 6$ 油嘴测试其喷油持续期仅为 $9.6 \text{ A}^{[11]}$,而 $\phi 5$ 新油嘴试验测得的喷油持续期达 18.9 A ;二是原 $\phi 6$ 油嘴即使在柴油机最大油量时,针阀也不能全开,针阀升程上下抖动,喷油泵压油产生的能量在盛油槽内被针阀的泵吸作用过程吸收,不能用于燃油喷射,以 $Q 7$ 升程计, $\phi 6$ 油嘴泵吸容积达 19.8 mm^3 ,是165柴油机标定工况燃油量的2.4倍,而用 $\phi 5$ 油嘴 $Q 3 \text{ mm}$ 针阀升程时,泵吸容积仅为 5.9 mm^3 ,这有利于减少因针阀上升引起泵吸作用产生的压

力降低,这也是表1中序号2、3喷油嘴不采用 $\phi 6$ 针阀直径的主要原因之一。三是计算得出 $\phi 6$ 油嘴压力室容积达 3.8 mm^3 ,是165柴油机标定工况燃油量的37%,而 $\phi 5$ 油嘴压力室容积仅为 2.3 mm^3 ,与标定油量相比占23%, $\phi 5$ 新油嘴压力室容积更小,压力室容积内的燃油是喷射结束后流入燃烧室内燃烧的,这部分油雾化差,是HC、黑烟产生的主要原因之一^[12],压力室内的燃油占喷油量比值大,必然影响燃油消耗率。改进后的喷油嘴经喷油特性测试,结果表明能满足柴油机匹配要求,喷油特性测试分析将另文讨论,柴油机排放物及噪声的影响将在后续工作中继续进行。

上述改进的另一个特点是推广应用方便,目前小缸径柴油机处于微利生产状态,任何增加成本、维修中互换性差的改进都将受到大阻力,国内在此方面已有用P系列油嘴的报道,但成本增加较多,且与现生产安装尺寸不能互换,这不利于农业生产用机型的推广。我国这类单缸涡流室柴油机年产量有200多万台,本文的改进工作必然会对我国农机等行业取得明显的经济效益和社会效益。

4 结 论

1) 理论分析和实验结果都表明:ZS4S1型喷油嘴不能满足国产各种小缸径涡流室柴油机机型的匹配要求,喷油系统参数匹配不合理是影响我国涡流室柴油机综合性能提高的主要因素之一,需改进设计。

2) 经理论计算分析,本文给出了改进用轴针式喷油嘴系列的主要参数推荐值,并对一种样品试制,在165柴油机上进行了试验,结果表明:改进后的喷油嘴应用于小排量柴油机,有明显节油效果,并有效地降低了柴油机的排气烟度。

3) 本文研究工作仅是该项目的初步尝试,随着排放、噪声法规的严格执行,喷油系统与小缸径涡流室柴油机的匹配中还有大量工作有待今后进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 翁祖亮 我国内燃机产品与技术发展预测[J] 内燃机工程 1999, 20(3): 1~7
- [2] Yoshihiro Hotta, Kiyomi Nakakita, Mingji Inayoshi, et al Combustion Improvement for reducing exhaust emissions in DI diesel engine[Z] SAE 980503
- [3] Susumi Kohketsu, Kazutoshi Mori, Tetsuro Kato, et al Technology for low emission combustion noise and fuel consumption on diesel engine[Z] SAE 940672
- [4] 董尧清,朱锡芬,张健 PB27P型小型低惯量喷油器的总成的开发研究[J] 油泵油嘴技术, 1992, (3): 8~14
- [5] 董尧清,朱锡芬,张健 PBL16S型低惯量喷油器的开发研究[J] 油泵油嘴技术, 1992, (3): 25~32
- [6] 钟亚茜 1.5 kW 柴油机喷油系统研究[J] 小型内燃机, 1999, 28(2): 13~16
- [7] 《中国内燃机工业年鉴》编委会 中国2001年内燃机工业年鉴[M] 上海: 上海交通大学出版社, 2001
- [8] 刘胜吉 内燃机工作过程与电控技术[Z] 江苏理工大学讲义, 1999, 6, 177~186

- [9] 周龙保 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999, 153~156
- [10] 张维明 195 柴油机喷油系统几种因素对比油耗的影响[J]. 油泵油嘴技术, 1985, (1): 6~10
- [11] 刘胜吉, 汤 东 微型柴油机用喷油嘴的试验研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2002, 31(5): 1~3
- [12] Yoshinaka Takeda, Naoya Ishikawa, Masanori Komori, et al Diesel combustion improvement and emissions reduction using VCO nozzles with high pressure fuel injection[Z]. SAE 940899

Fuel injection nozzle used on small bore diesel engine with swirl combustion chamber

Liu Shengji, Wang Jan, Yu Zidong, Tang Dong, Yin Bifeng

(College of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212003, China)

Abstract The paper analyses the present conditions of the domestic small bore diesel engine with swirl combustion chamber, and points out that a single kind of nozzle cannot match with the swirl chamber diesel engine with different piston swept volumes, through theoretic analysis and calculation. In order to optimize power performance, fuel economy, exhaust emission, noise and reliability, diesel engine must have reasonable injection duration, and diesel engine with the different piston swept volumes should match the nozzle with different flux. Relationship between needle flux section, volume caused by needle's movement, section volume and fuel delivery per cycle per cylinder and their effect on injection and performance of diesel engine were analysed. A designing scheme for a series of needle nozzles according to domestic actual conditions, and experiment elementary with the sample were given. The test results show that the fuel economy and smoke of diesel engine are better and the whole performance is improved.

Key words: diesel engine; injection nozzle; design; performance