增压方式对两冲程发动机进排气行为特征影响机理分析

Influence of Boosting Type on the Intake and Exhaust Gas-Exchange Process for Two Stroke Engines

陈龙华　张玉银

上海交通大学 汽车工程研究院 汽车发动机研究所

摘　要: 两冲程发动机进排气行为特征对发动机性能起着重要影响，进排气压力与气缸压力的耦合关系直接决定进排气流动速度和流量。本研究将着重讨论曲轴箱增压和机械增压两种增压方式对两冲程发动机进排气过程压力波动、进排气流速和流量变化过程等的影响，揭示不同增压方式下两冲程发动机进排气行为变化规律。

关键词: 发动机，两冲程，进排气，GT-SUITE

Abstract: The Intake & Exhaust gas flow behavior of two stroke engines plays an important role on engine performance. Intake & exhaust gas flow velocity and flow rate are directly depended on the relationship between intake & exhaust pressure and cylinder pressure. This study will mainly discuss the influence of intake boosting type, which are crankcase boosting and supercharger boosting, on intake & exhaust pressure wave, gas velocity and mass flow rate, in order to find out the difference of intake boosting type on the intake & exhaust gas behavior in a two stroke engines.

Key words: Engine, Two-Stroke, Intake & Exhaust, GT-SUITE

1 概述

两冲程发动机由于做功频率是四冲程发动机的两倍，并且一般扫气道式两冲程发动机不需要正时机构、配气机构等复杂部件。所以和四冲程发动机相比，两冲程发动机具有功率密度大、比重量轻等优点，广泛应用在众多军用和民用领域[9]。绝大部分两冲程发动机采用进气曲轴箱增压辅以化油器或曲轴箱电喷的供油方式，这给两冲程发动机带来了几个技术难点。第一是油耗高、排放差，由于两冲程发动机强制排气过程中进气口一直处于打开状态，所以必然会有一部分进气混合气会随着气流排出排气管形成未燃碳氢，一方面升高了燃油消耗率，另一方面也使尾气排放变差。第二是润滑困难，使用曲轴箱增压，则不能采用湿式润滑方式，一般需要将润滑油掺入燃油一起进入曲轴箱进行润滑，但是润滑油会随燃油一起进入气缸燃烧产生额外的非常规排放物（如硫化物等），并且一部分润滑油还会在扫气过程随混合气排出排气管，形成颗粒排放物[8-9]。针对两冲程发动机油耗和排放问题，学术界和工业界一直在尝试很多新技术的应用。随着机械增压技术和汽油缸内直喷技术的发展，两冲程发动机的三个主要缺点看到了解决的可能，使用机械增压，则曲轴箱内可以采用湿

式润滑，并且机械增压方式的增压比灵活可控，总给气量可大幅超过曲轴箱容积；采用汽油缸内直喷，可完全避免燃油在扫气过程排出排气管，既降低燃油消耗，同时也优化了排放。

采用汽油缸内直喷改善两冲程发动机油耗和排放，国内外已经有了大量理论和试验研究[8-9]，但使用机械增压取代曲轴箱增压的研究却罕见报道，特别是不同进气增压方式对两冲程发动机进排气过程气流压力、速度、流量等行为特征的影响，目前尚属空白。本研究在一台三缸两冲程 0.75L 排量汽油直喷发动机基础上，对比研究曲轴箱增压和机械增压两种增压方式对进排气过程压力波动、气体流动和气缸充气过程进行比较分析，揭示增压方式对两冲程发动机进排气行为特征影响机理和发动机性能指标的影响趋势。对比研究的前提是曲轴箱增压与机械增压的有效进气量相同、空燃比相同，对比工况为 2500rpm，4000rpm 和 6000rpm 三个转速全负荷。图 1 是用 GT-SUITE v7.0 搭建的分析模型。曲轴箱增压比 1.45，机械增压最大增压比 2.5，排气口打开时间 92degATDC，进气口打开时间 113degATDC。

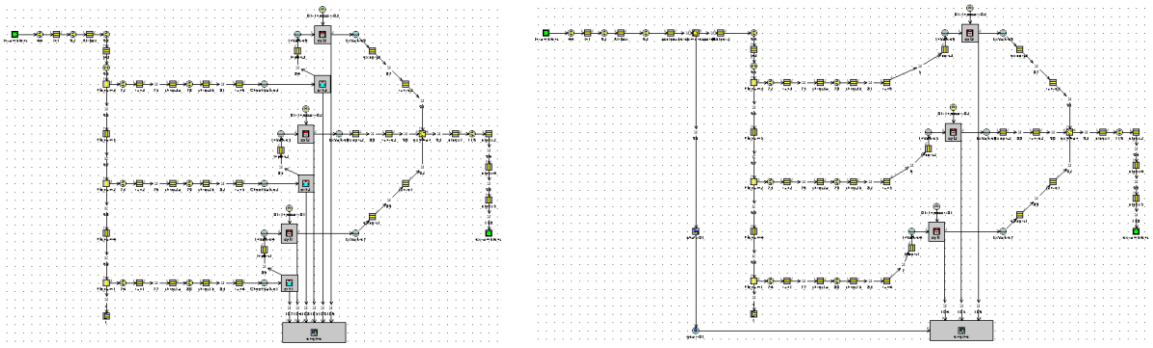


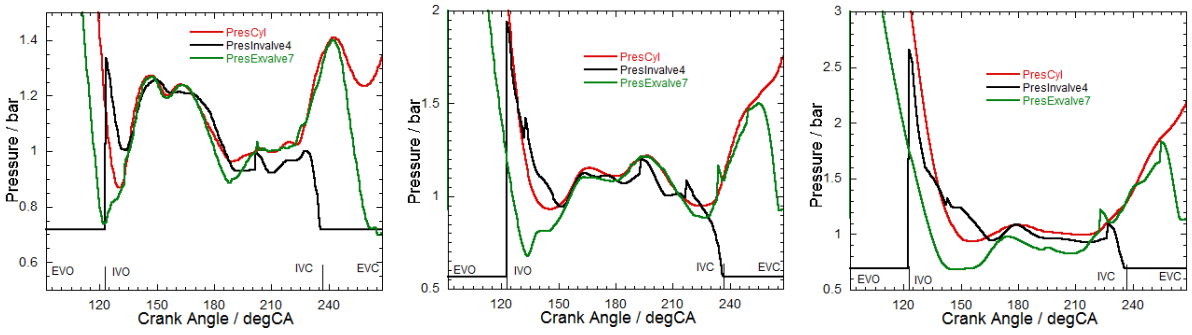
图 1. 曲轴箱增压 GT-POWER 模型（左）和机械增压 GT-POWER 模型（右）

2 增压方式对两冲程发动机进排气行为影响机理

两冲程发动机的进排气过程主要由进排气扫气口瞬时压力与缸内瞬时压力的差值推动。从一维 N-S 动量方程可知，气体速度随时间的变化率（即加速度）与压力梯度正相关，压力升高则气流加速度增大，压力降低则气流加速度减小[1-7]。两冲程发动机进气过程就是靠进气压力大于气缸压力时产生的正推力推动的，排气过程也是由气缸压力高于排气压力时产生的正推力推动的。本文将首先对比分析不同增压方式对两冲程发动机进排气压力波动过程影响，然后在此基础上讨论进排气流动过程差异，最后总结基于不同进排气过程引起的发动机性能变化。

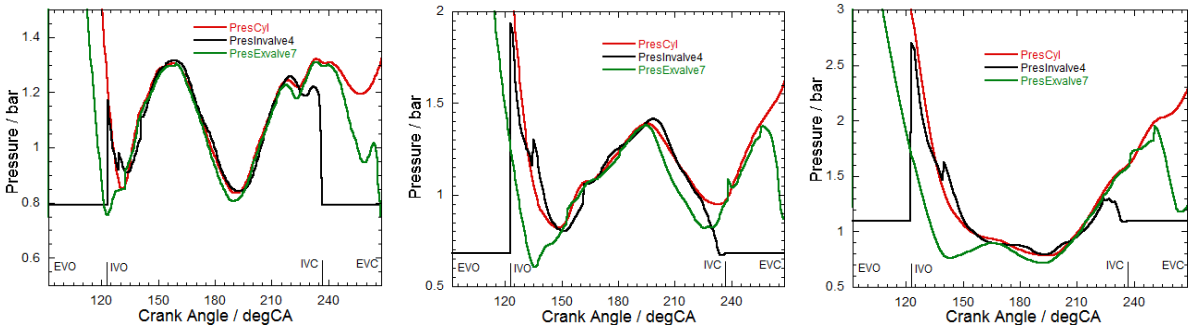
2.1 增压方式对两冲程发动机进排气压力波动过程影响分析

两冲程发动机活塞从上止点下行过程中，到达 EVO 时刻会首先打开排气口，开始自由排气过程，之后从进气口打开 IVO 到进气口关闭 IVC 阶段都处于强制排气过程，同时也是进气过程。从图 2 和图 3 可见，中低转速工况下两种增压方式的进排气压力波在强制排气过程都有一个压力波峰，这是由进气过程引起的，但随着转速的增加，压力波传播速度变快，进气气流惯性的作用越来越弱，所以该段压力波峰的幅值会随转速增加而减小，在高速工况（6000rpm）进气波峰甚至来不及形成。



2500rpm　　4000rpm　　6000rpm

图 2. 曲轴箱增压模式下不同转速进排气压力波动曲线



2500rpm　　4000rpm　　6000rpm

图 3. 机械增压模式下不同转速进排气压力波动曲线

对进气过程而言，进气相对气缸正压差表明进气气流加速度为正，正压差开始的时刻，气流速度开始正向升高，而在每一段进气正压差结束即将开始负压差时，进气气流正加速度为零并开始转为负加速度，所以进气气流也在进气正加速度为零的时刻达到峰值并开始减速。从曲轴箱增压（图 2）和机械增压（图 3）两种方式下进气压力和气缸压力波动曲线可知，不同转速工况下，进气压力大于气缸压力的持续期不同，进气压力和气缸压力差也会随转速变化。表 1 是对两种增压方式下进气压力与气缸压力的比较统计，随着转速增加，两种增压方式下进气压力超过气缸压力的开始时刻逐渐延迟，曲轴箱增压的进气正压差总持续期随转速增加而缩短，而机械增压的进气正压差总持续期随转速变化趋势不明显，且在三个转速下都明显长于曲轴箱增压模式。从压差对比结果可知，曲轴箱增压式两冲程发动机进气正压差持续期大部分发生在下止点之前，而机械增压式两冲程发动机进气正压差持续期可以坚持到下止点之后较长一段时间。这表明，曲轴箱增压式两冲程发动机大部分进气充量是在下止点之前完成进入气缸的，而机械增压式两冲程发动机在下止点之后还会连续进气。这与两种增压方式的原理有关，曲轴箱增压模式下，流入气缸的进气量取决于曲轴箱的有限容积，伴随着进气口打开后的连续进气过程，曲轴箱内气体含量逐渐减少，压力下降，而经过下止点之后，曲轴箱容积会随活塞上行而增大，气体膨胀减压，很难长时间维持超过气缸压力；与曲轴箱增压模式不同的是，机械增压模式下流入气缸的进气量理论上最高可以达到数倍于气缸容积，并且活塞到达下止点的时刻正是进气口流通面积最大、进气阻力最小的时候，所以下止点之后仍然会有大量进气流入气缸。

表 1 进气压力大于气缸压力时间统计

转速	曲轴箱增压	机械增压

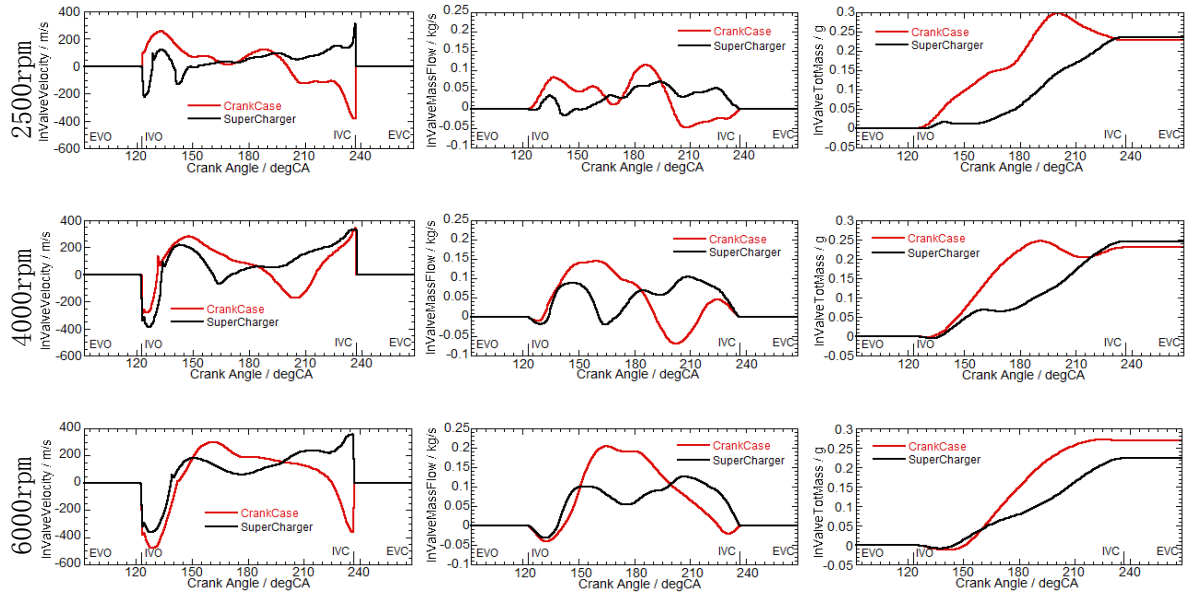
rpm	开始时刻 degATDC	持续期 deg	最大压差 bar	开始时刻 degATDC	持续期 deg	最大压差 bar
2500	123	12	0.251	127	7	0.105
	150	8	0.024	154	40	0.038
	169	20	0.055	217	8	0.02
4000	128	22	0.221	132	15	0.247
	214	11	0.105	171	12	0.035
				195	16	0.066
6000	138	28	0.269	135	22	0.265
	178	2	0.004	175	31	0.05

对于排气过程，两种增压方式的排气压力波变化趋势比较接近。两冲程发动机排气过程推动力主要由排气相对气缸的负压差形成，排气压力越小于气缸压力，则排气过程越顺畅。如果排气压力大于气缸压力，形成排气正压差，则会产生排气流动负加速度，排气速度减小甚至为负，负排气速度会引起排气回流。在下止点之前，排气回流的成分主要是缸内废气，而下止点之后特别是 IVC 前后排气回流的成分主要是进入气缸的新鲜空气。从图 2 和图 3 两种增压方式下排气压力与气缸压力变化曲线可知，排气负压差基本形成于 EVO~IVO 的自由排气阶段和 IVC~EVC 的后期阶段，在 IVO~IVC 的强制排气和进气阶段，排气压力偶尔会有短暂超过气缸压力产生排气正压差的时期。两种增压方式下，自由排气阶段排气负压差会持续到 IVO 之后一段时间，且随转速增加而延长，说明两冲程发动机缸内燃烧废气大部分是在这一阶段排出排气管的。另外，通过详细比较强制排气过程排气压力和气缸压力的波动情况发现，三个转速工况下，下止点前，机械增压模式的排气正压差比曲轴箱增压模式下的显著，这会阻碍缸内废气排出并增加残余废气率；而下止点之后，曲轴箱模式的排气正压差比机械增压模式下的更明显，这将使后期进入排气管的新鲜充量流回气缸。

2.2 增压方式对两冲程发动机进排气流量特性影响分析

根据两冲程发动机进排气过程压力波动的分析，可以预知两种增压方式的进气流动过程会有较大差异，而排气流动过程则略有不同。图 4 是不同增压方式下各转速工况进气过程气流速度、进气流量和进气总量的对比。由于两种增压方式下进气正压差开始时刻都随转速增加而延迟，这将在 IVO 之后形成进气负压差，从而引起缸内废气流入进气道，从流速和流量曲线可以看出，转速越高，进气口打开后的进气回流越显著，曲轴箱增压模式在低速工况不存在进气口打开后的回流，而机械增压模式在三个转速工况都会产生进气口打开后的回流。从进气正压差持续期分析结果可知，曲轴箱增压模式下进气正压差持续期大部分发生在下止点之前。从图 4 可以看出，对于曲轴箱增压模式，超过一半的进气量发生在下止点之前，在下止点之后由于进气负压差时间较长，都会产生负进气流速并引起进气回流；只有 4000rpm 中速工况在 IVC 之前会有一段由进气正压差形成的少量进气进入气缸；随着转速升高，第一段进气正压差持续期增加，并且进气压力高于气缸压力也更加显著，所以流速和流量峰值也越大，这也致使 IVC 之前负进气流速持续期随转速增加而缩短，进气回流量减

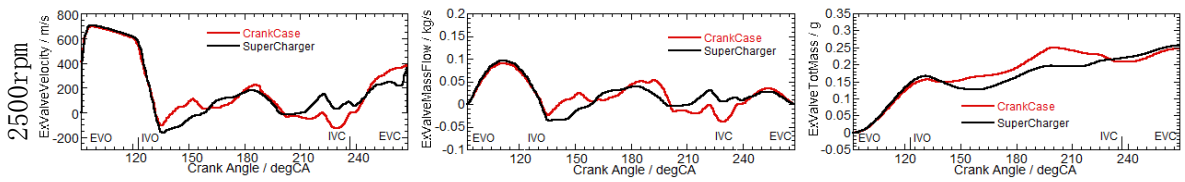
小。曲轴箱增压模式下第一段进气正压差持续期明显长于机械增压模式下第一段进气正压差持续期，因而下止点之前最大进气速度明显高于机械增压模式。对于机械增压模式，下止点之前由于进气正压差开始时刻随转速增加明显滞后，所以机械增压模式两冲程发动机进气过程都会呈现先回流后进气的特点，很大一部分进气正压差持续期发生在下止点之后，从图 4 可知，下止点之后进气流速始终为正，可以保持连续进气无回流，超过一半的进气量是在下止点之后完成的。由于机械增压模式三个转速工况下第一和第二段进气正压差间隔较长，期间的进气负压差阶段会明显减小进气流速，在中低转速工况甚至会形成轻微回流。

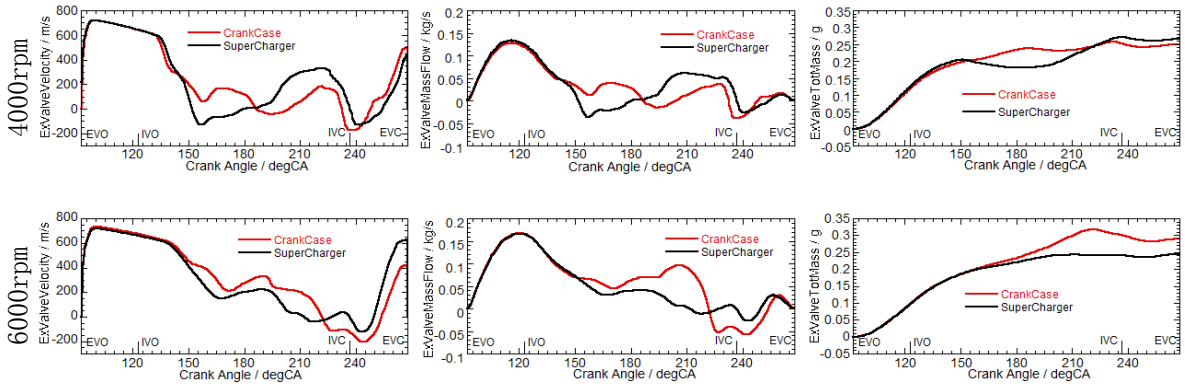


进气流速　　进气质量流量　　进气总质量

图 4. 两种增压方式下进气流动特性

曲轴箱增压与机械增压模式下排气压力和气缸压力波动趋势比较接近，所以排气流动规律也基本相似。从图 5 排气流速、流量和总排气量对比结果可知，两种增压方式下，排气口打开后，缸内废气都会在极短的时间内以最高 700m/s 音速排出排气管，这一高速排气过程会持续到 IVO 之后，并且转速越高，这一过程持续越久，从流量曲线上可以看出大部分缸内废气都是在这一过程排出气缸的。进气口打开后，随着进气正压差的建立以及排气管的压力反射作用，排气和气缸压力开始回升。受进气流动特性的影响，机械增压模式在下止点之前排气正压差持续期比曲轴箱增压模式明显，所以机械增压模式在下止点之前排气回流更显著，特别是中低转速工况，这会减小废气排出量并增加缸内废气率。活塞经过下止点之后，由于曲轴箱增压模式大部分新鲜充量已经进入气缸，排气回流阻力减小，排气正压差过程比机械增压模式明显，所以曲轴箱增压模式在 IVC 之前的排气回流量大于机械增压模式，这会使部分进入排气管的新鲜空气加入气缸，从而提高充气效率。



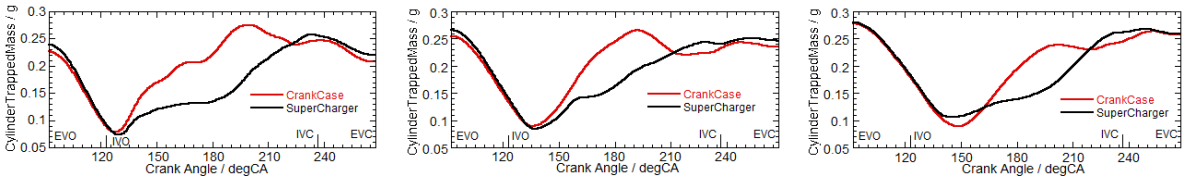


排气流速　　排气质量流量　　排气总质量

图 5. 两种增压方式下排气流动特性

2.3 增压方式对缸内有效进气量的影响分析

从两种增压方式进排气过程流动特性对比分析可知，在自由排气阶段，受排气相对气缸负压差的作用，缸内废气迅速排出气缸，这可由图 6 缸内有效质量曲线明显看出，两种增压方式缸内质量都在 IVO 之后达到最低值，由于排气负压差持续期和进气正压差开始时刻随转速的变化不同，气缸内质量到达最低点的时刻会随转速增加而滞后。随着 IVO 之后进气正压差的建立，进气量增加，缸内质量开始上升。不同增压方式下，缸内质量增加速率不同，曲轴箱增压模式在下止点前进气正压差持续期较长，所以缸内有效质量在下止点前增加速率明显大于机械增压模式，机械增压模式缸内质量大部分是在下止点之后积累起来的。随着活塞经过下止点之后的上行压缩，缸内压力升高，排气过程仍然持续，如果此时进气流率小于排气流率，则缸内有效质量会减小。曲轴箱增压模式三个工况下，缸内质量达到峰值后，由于进气流率减小，缸内有效质量开始降低，但在 IVC 之后受排气回流作用，一部分流出排气管的气体会返回到气缸。机械增压模式在下止点后进气正压差持续期较长，所以一直到 IVC，缸内有效质量都会连续上升。从 EVC 时刻缸内有效质量对比可知，中低转速工况下，机械增压模式缸内质量略大于曲轴箱增压模式，这是因为机械增压模式缸内残余废气率大于曲轴箱模式。



2500rpm　　4000rpm　　6000rpm

图 6. 两种增压方式下缸内有效质量

3 总结

采用 GT-SUITE 软件搭建的曲轴箱增压和机械增压两冲程发动机性能分析模型，对比分析了这两种增压方式下进排气压力波动过程差异、进排气流速和流量变化差异。不同增压方式下，两冲程发动机进排气过程会呈现出不同的行为特征：

(1).由于不同增压方式下进气相对气缸正压差的发生时刻和持续期不同，进气特性差异非常明显。曲轴箱增压模式大部分进气在下止点之前就进入气缸并有一部分进气会排出排气管，而机械增压模式大部分进气则是在下止点之后逐渐进入气缸的。实现相同充气效率的前提下，机械增压模式的扫气利用效率大于曲轴箱增压模式。

(2).不同增压方式排气特性较为相近，绝大部分缸内废气都是在自由排气阶段排出的。但不同增压方式下排气回流时刻不同，机械增压模式排气回流发生在下止点之前，这会增加缸内残余废气率；而曲轴箱增压模式排气回流发生在 IVC 附近，这将增加充气效率。

4 参考文献

[1] 李建文，单缸二冲程汽油机排气管结构形式与参数对排气压力频谱的影响。内燃机学报，1992，10(3)

[2] 耿爱农，罗光绎。小型二冲程汽油机排气压力波的计算。广西大学学报，1995，20(4)

[3] 王长林。进排气系统压力波模拟计算的发展。内燃机工程，1999，4

[4] 高文志，宋崇林，冯敬奇。增压柴油机进_排气管压力波动计算与分析。农业机械学报，2002，33(2)

[5] 王兴海，谢和宁，宁智。排气压力波对柴油机性能影响的分析。柴油机，2007，29(5)

[6] 杜巍，刘福水，李志杰。增压柴油机排气压力变化规律的实验研究。北京理工大学学报，2009，29(1)

[7] 朱骏，王绍明，崔毅，张有，杨卫东，黎程。增压 6 缸柴油机排气压力波变化规律的试验研究。内燃机工程，2011，32(2)

[8] John B. Heywood, Eran Sher. The two-stroke cycle engine : its development, operation, and design. SAE International, 1999.

[9] Gordon P. Blair. Design and simulation of two-stroke engines. SAE International, 1996.