

# 不同压缩比和气门升程曲线的阿特金森循环研究

## The research of Atkinson with different compression ratio and different valve lift

尚上 尹伊郡 刘金玉

一汽技术中心

**摘要:** 本文利用GTPower软件模拟计算研究了不同压缩比和气门升程曲线的阿特金森循环的特点，着重分析了高压缩比与阿特金森循环之间的关系，以及不同升程的阿特金森循环气门升程曲线性能。计算结果表明小负荷仅采用阿特金森循环不提高压缩比，由泵气损减少带来的油耗下降也相当可观。另外，采用阿特金森循环后发动机点火前缸内混合气的温度和压力较传统发动机有明显下降，这有利于抑制爆震提高压缩比，但不利于冷启动时的燃烧稳定性和排放。高升程的阿特金森气门升程曲线并不能改善油耗或是提高动力性。

**关键词:** 阿特金森循环，不同压缩比，不同气门升程，GTPower

**Abstract:** This paper uses GTPower simulation to study the character of Atkinson cycle with different compression ratio and different valve lift and analyze the relationship between Atkinson cycle and high compression ratio and the performance of different Atkinson valve lift. The calculation results show a significant pump loss decrease and fuel consumption reduction with Atkinson cycle without high compression ratio at low load. Also the mixture temperature before ignition obviously goes down with Atkinson cycle. It is good for knock control but bad for cold start. The high valve lift doesn't show any benefit at fuel consumption and power performance.

**Key words:** Atkinson, different compression ratio, different valve lift, GTPOWER

### 1 简介

阿特金森循环是近些年来汽油机降低油耗技术措施里的一个热门研究方向，目前一些国外厂商的量产发动机里已经采用的这项技术措施，并且获得了不错的整车油耗。这些量产的阿特金森循环发动机一般都会配合高压缩比来获得更好的燃烧经济性。但是否阿特金森循环就一定需要配合高压缩比来使用？而不同升程的阿特金森循环对油耗的影响又有多少？这篇文章就是试图通过GTPower软件模拟计算来分析阿特金森循环与高压缩比之间的关系，以及不同负荷采用不同升程的阿特金森循环气门型线的特点。

### 2 计算方法和模型

模拟计算基于一汽 CA4GA13 1.3L 气道喷射自然吸气发动机的计算模型。

#### (一) 计算工况

考虑到不同工况点采用阿特金森循环的差异，计算选取了一个小负荷点（2000rpm2barBMEP）和一个中高负荷点（2500rpm7.5barBMEP）两个工况点进行模拟计算。

## (二) 计算参数

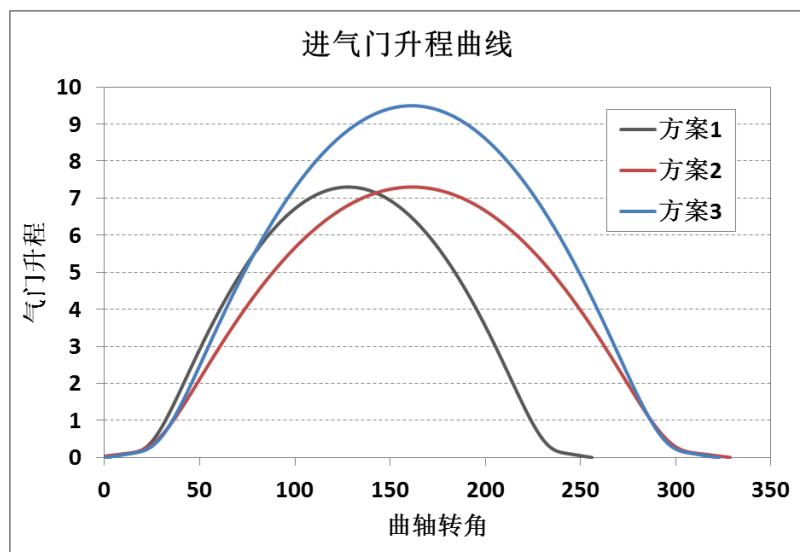
### ① 压缩比

计算对比了一个传统压缩比（压缩比 10）和一个高压缩比（压缩比 13）的阿特金森循环特点。

### ② 气门升程曲线

计算对比了 3 种不同进气门升程曲线：方案 1 为原机气门升程曲线，方案 2 和方案 3 为阿特金森循环的气门升程曲线。其中方案 2 将方案 1 的包角扩大但升程不变，方案 3 在方案 2 的基础上进一步提高了升程。各方案气门升程曲线对比如右图所示。

### ③ 基本假设和计算方法

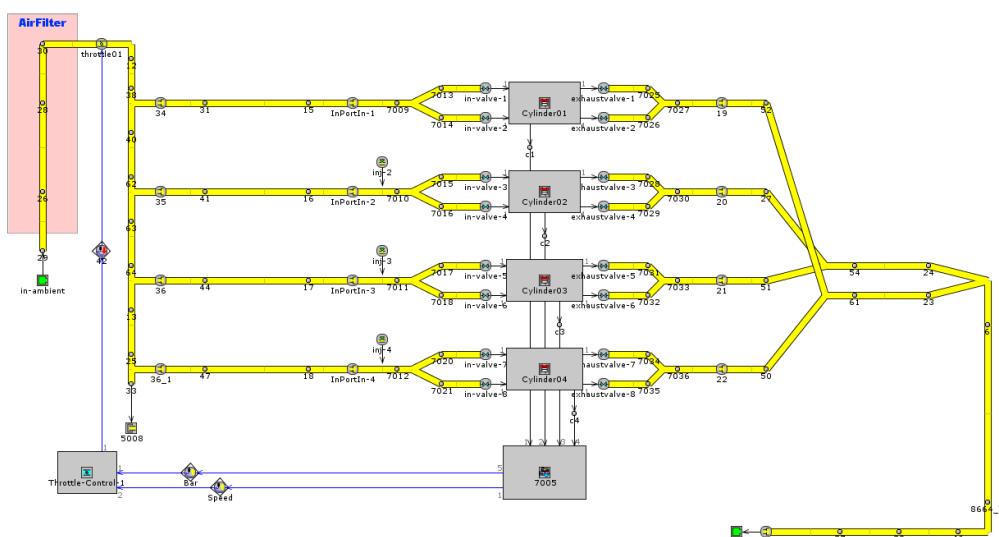


由于 GTPower 对燃烧预测的局限性，模拟计算时假定了燃烧放热率不随气门升程曲线和相位变化。

考虑到缸内残余废气对燃烧稳定性影响，方案 2 和方案 3 的气门升程曲线在选择相位时除了考虑油耗以外，同时还需兼顾残余废气量，使残余废气系数与传统发动机相当。另外，为方便对比计算结果，气门升程曲线方案 2 和方案 3 采用的阿特金森循环相位一致。

### ④ 计算模型

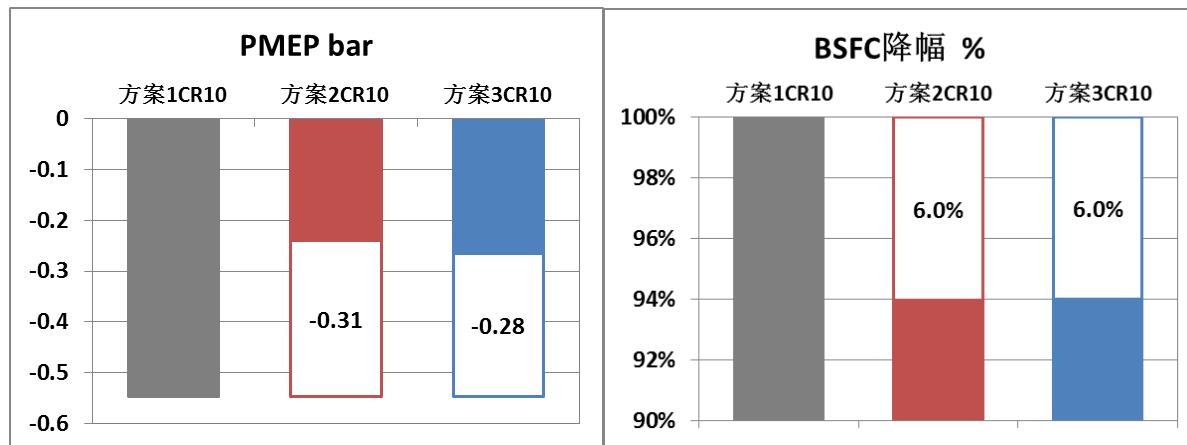
计算模型采用了 ControllerThrottle 模块来控制节气门调节负荷点。具体模型如下图所示。



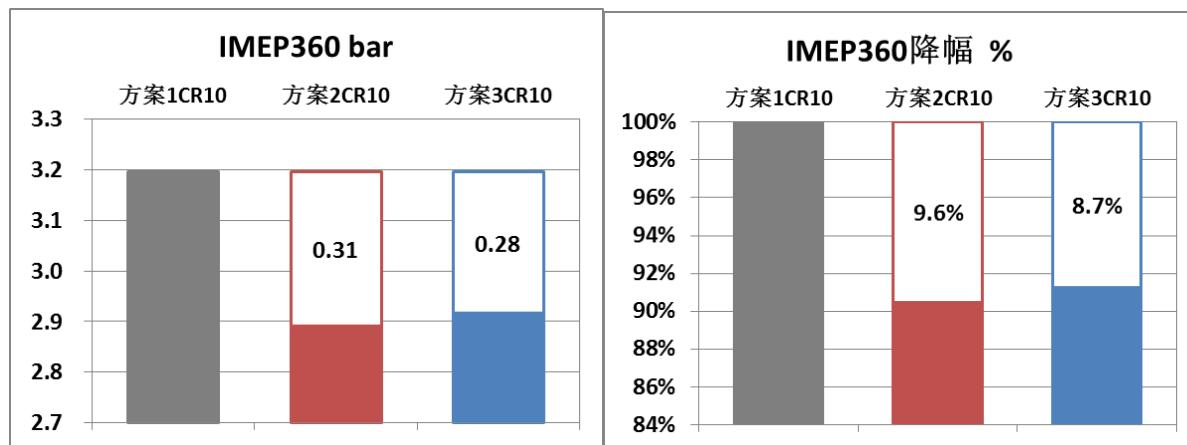
## 3 计算结果

### (一) 2000rpm 2bar BMEP 计算结果

下图是压缩比 10 时 3 种气门升程曲线的计算结果对比。可以看到与传统气门升程曲线方案 1 相比，仅通过阿特金森循环来降低泵气损，依然可以获得不错的比油耗。其中方案 2 和方案 3 的泵气损失分别下降了 0.31bar 和 0.28bar，可以看到采用较低升程的方案 2 泵气损失比高升程的方案 3 具有优势，但这个泵气损的优势并未体现到比油耗（BSFC）上，两个方案的比油耗都降低了 6%。

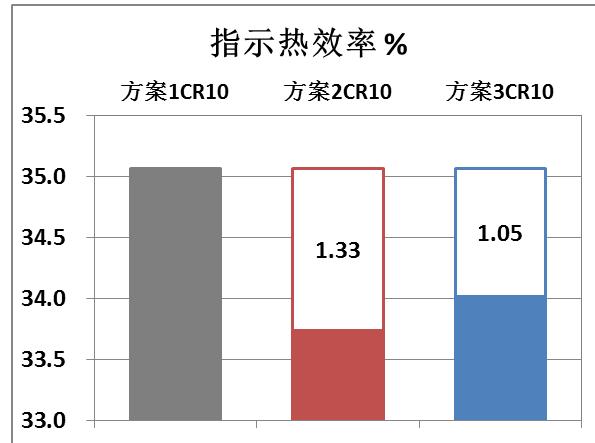


再对比指示有效压力 (IMEP360)，由于泵气损的降低方案 2 和方案 3 的指示有效压力分别降低了 0.31bar 和 0.28bar，分别降低了 9.6% 和 8.7%。由于计算设定的燃烧放热率相同，因此对应的比油耗降幅应当与指示有效压力降幅相同，但计算结果却显示方案 2 和方案 3 的比油耗降幅明显低于指示有效压力降幅，两者相差大约 3%。

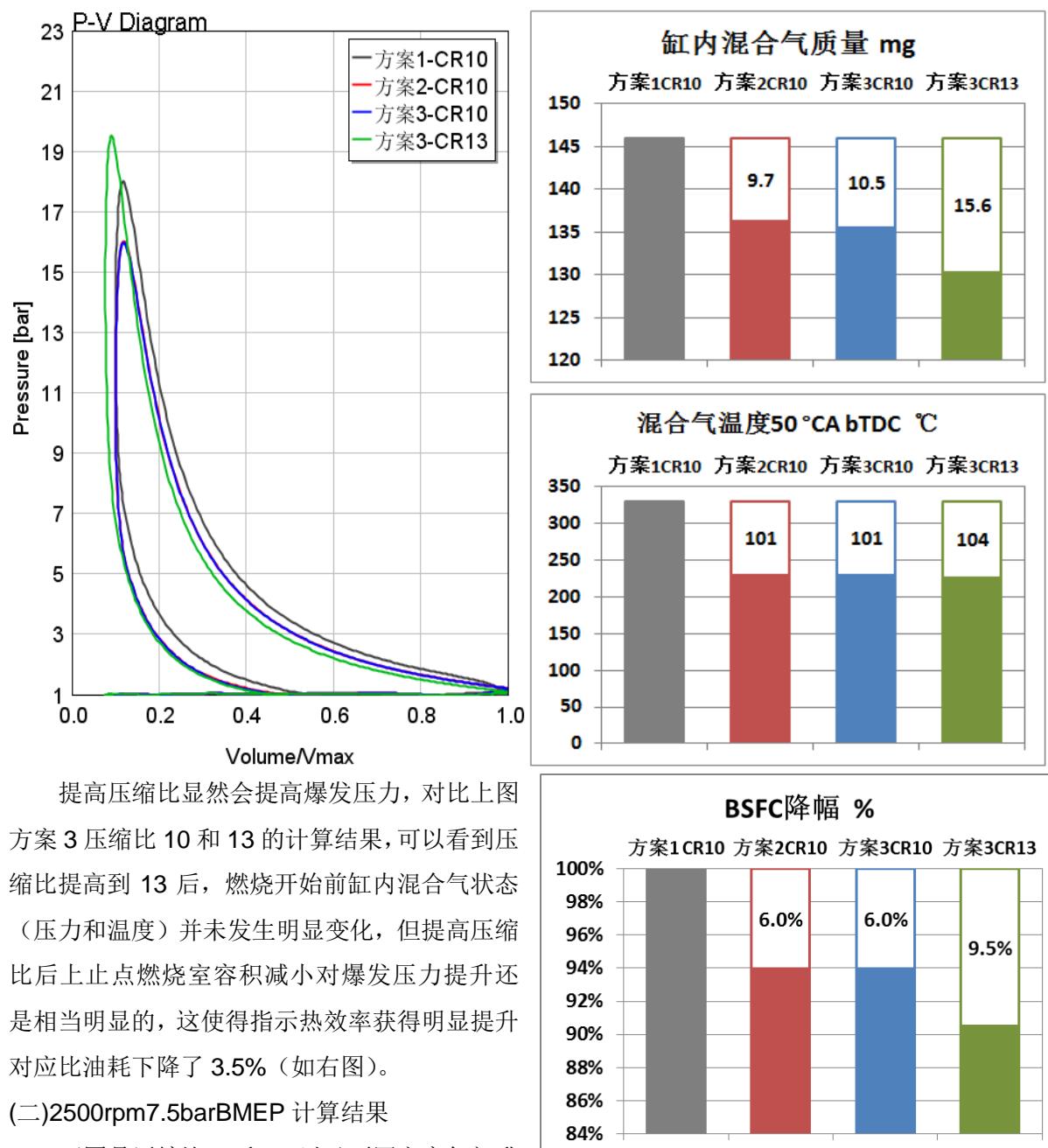


对比指示热效率可以发现，虽然 3 种气门升程曲线的燃烧放热率相同，但指示热效率却不同（如右图）。采用阿特金森循环后，方案 2 和方案 3 的指示热效率分别降低了 1.33 和 1.05 个百分点，降幅分别为 3.8% 和 3%，显然比油耗降幅小于指示有效压力降幅是由于指示有效功降低造成的。

通过对 P-V 图进行分析可以发现，采用阿特金森循环后发动机爆发压力明显降低，其指示热



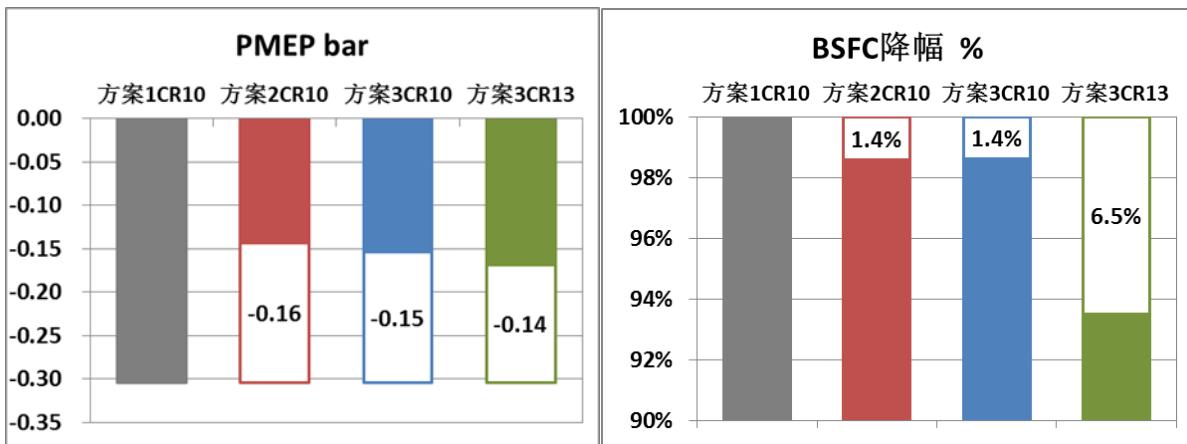
效率也随之降低。进一步对燃烧开始前缸内的混合气状态进行分析可以发现这主要是由于以下 2 方面原因：一个原因是采用阿特金森循环后由于泵气损降低发动机指示功减少，所需的缸内混合气明显减少，采用的燃烧放热率相同时对应的爆发压力也就会随之降低。另一个原因是阿特金森循环进气迟闭，发动机实际压缩较低，混合气被压缩程度小，燃烧开始前混合气温度和压力较低（如下图），这也会降低爆发压力。



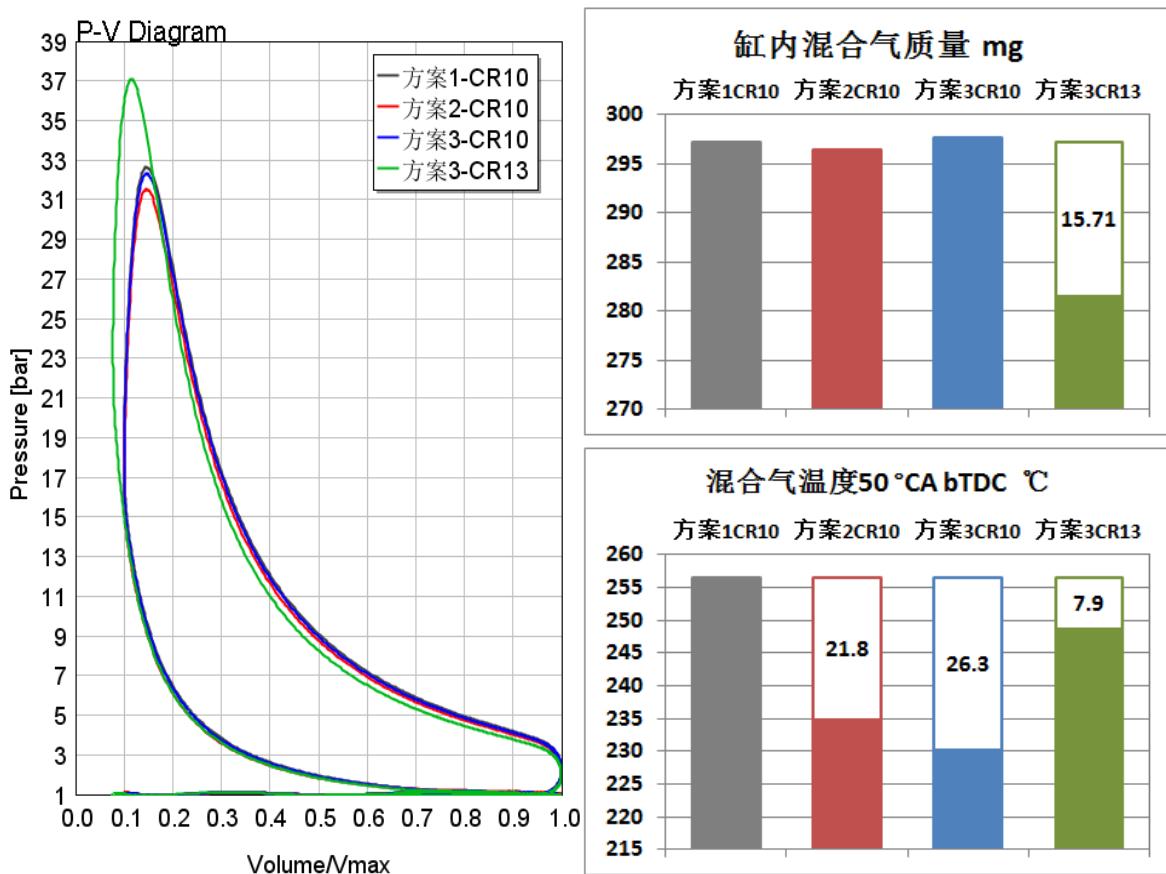
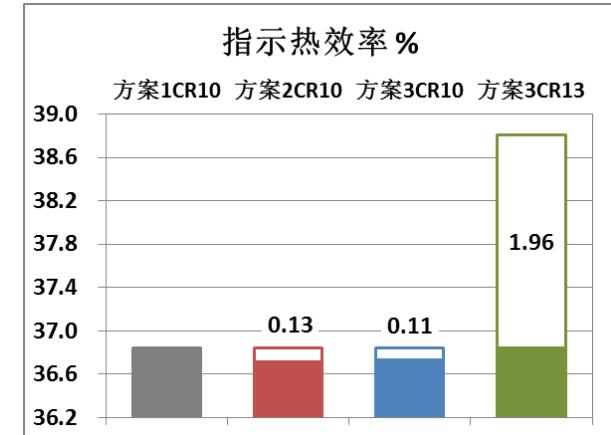
提高压缩比显然会提高爆发压力，对比上图方案 3 压缩比 10 和 13 的计算结果，可以看到压缩比提高到 13 后，燃烧开始前缸内混合气状态（压力和温度）并未发生明显变化，但提高压缩比后上止点燃烧室容积减小对爆发压力提升还是相当明显的，这使得指示热效率获得明显提升对应比油耗下降了 3.5%（如右图）。

## (二) 2500rpm 7.5barBMEP 计算结果

下图是压缩比 10 和 13 以及不同方案气门升程曲线计算结果。可以看到，采用阿特金森循环后泵气损降低了大约 50%，其中方案 2 低升程气门升程曲线的泵气损降幅略有优势，对比比油耗降幅，由于泵气损失对 7.5barBMEP 大负荷的比油耗影响较小，因此该工况比油耗仅降低了 1.4%，但这并未考虑到采用阿特金森循环后上止点前 50° CA 混合气温度降低对爆震的抑制作用。可以预见，如果考虑到混合气温度降低对爆震的抑制作用，比油耗的改善应当大于 1.4%，预计可以达到大约 2% 的水平。



对比不同气门升程曲线爆发压力，可以看到与 2000rpm 2bar BMEP 不同，方案 2 和 3 压缩比 10 时的爆发压力略低于方案 1，这是由于大负荷泵气损的变化对指示有效压力影响很小，因此缸内混合气质量相差不大，放热率相同时爆发压力也就相差不大。另外为实现 7.5bar BMEP 负荷，方案 2 和 3 的进气门关闭角不能像 2bar BMEP 时采用非常晚的迟闭角，因此实际压缩比降幅较小，点火前缸内混合气温度和压力比方案 1 并未有大幅下降，那么对爆发压力影响也就非常有限。综合上述原因 3 个方案的指示热效率相差并不大。

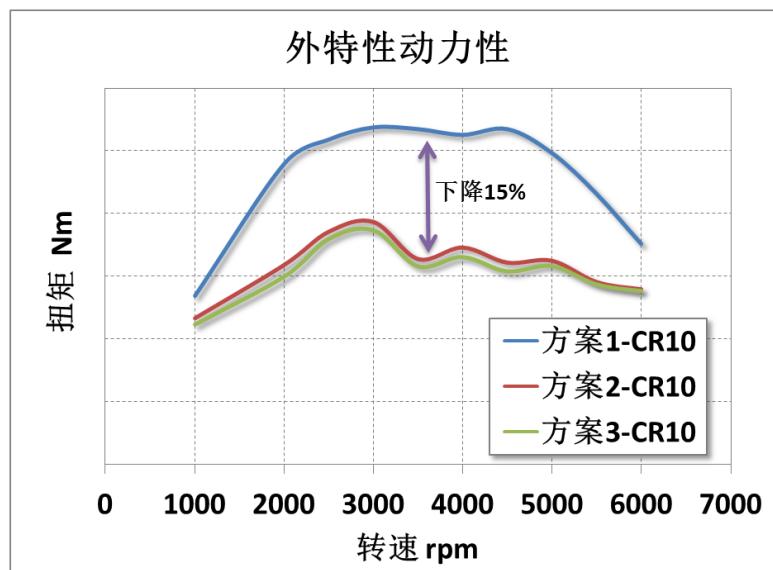


对比上止点前 50° CA 混合气温度可以发现，采用阿特金森循环后，由于实际压缩比较低，点火前（上止点前 50° CA）混合气温度明显低于传统发动机，这有利于抑制爆震提高压缩比。可以看到即便采用了压缩比 13 的高压缩比上止点前 50° CA 混合气的温度依然较传统发动机低 7.9°C。可以预见如果配合燃烧系统其它措施，例如更高滚流比气道，更好的燃烧室挤气等等，压缩比 13 的爆震依然可以获得很好的控制，实现较好的燃烧。从计算结果看，如果压缩比 13 爆震控制可以实现压缩比 10 传统发动机的放热率，那么该工况点的指示热效率将会提高大约 2 个百分点，这意味着比油耗将会下降 5%，实现大约 12g/kWh 比油耗降幅。

### (三) 外特性动力性损失

对比 3 种气门升程曲线压缩比 10 时的外特性动力性，可以看到采用阿特金森循环后外特性动力性损失较大，动力性损失最大可以达到 15%，如果压缩比提高到 13，可以预见动力性损失将会达到 20% 水平。

另外对比方案 2 和方案 3，可以发现高升程气门升程曲线并未表现出动力性优势。



## 4 结论

从以上计算结果分析可以总结出不同压缩比，不同升程的阿特金森循环特点。

- ① 小负荷区域：采用阿特金森循环可以明显降低泵气损失，大幅降低油耗，但指示热效率会降低，削弱降低泵气损失带来的油耗降低。另外由于实际压缩比较低，燃烧开始前混合气温度较传统发动机要低很多，不利于发动机冷启动性能，因此需要优化冷启动时相位或者提高压缩比，提高实际压缩比。
- ② 大负荷区域：采用阿特金森循环后可以降低泵气损失，改善油耗，同时降低混合气温度，抑制爆震，改善燃烧，这也为采用更高压缩比，进一步降低油耗提供了条件。
- ③ 外特性：采用阿特金森循环气门升程曲线后发动机动力性会有大幅下降，计算结果显示大约会下降 15%~20%。
- ④ 不同升程：高升程的阿特金森循环并未表现是动力性和经济性优势。从计算结果看，大包角最大升程与原机相同的气门升程曲线反而泵气损失略有优势。

了解了以上阿特金森循环特点，显然对于不同类型发动机使用阿特金森循环需要根据动力性和经济性需求合理的选择压缩比和气门升程曲线，充分利用阿特金森循环降低泵气损和抑制爆震的特点实现更好的经济性。

对于不追求动力性的混合动力自然吸气发动机采用阿特金森循环则需要配合高压缩比，以便获

取更好的经济性；对于对动力性有需求的传统车用自然吸气发动机则可以采用两段式气门升程曲线或大 VVT 调整范围的气门机构，辅以 4-2-1 排气管，并适当小幅提高压缩比来兼顾经济性和动力性；对于增压发动机使用阿特金森循环，为了兼顾外特性动力性则不能采用高压缩比，可以使用两段式气门升程，在小负荷区使用阿特金森循环气门升程曲线降低泵气损降低油耗，在中高负荷区利用阿特金森循环气门升程曲线抑制爆震实现更好的燃烧降低油耗，在外特性区域则使用传统气门升程曲线来保证动力性。

## 5 参考文献：

- [1] 周龙宝, 刘巽俊, 高宗英. 内燃机学. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [2] Chongming Wang, Ritchie Daniel, Homing Xu. Research of the Atkinson Cycle in the Spark ignition Engine. SAE Paper 2012-01-0390.