DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0057-08

缸内激波对锥顶型燃烧室的活塞破坏机理*

姚春德[1],续 晗[1],姚安仁[2],唐 超[1]
(1.天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室,天津 300072;
2.天津大学材料科学与工程学院,天津 300072)

摘要:以二维数值模拟为基础,研究了锥顶型燃烧室内的冲击波发展的震荡过程,得到作用于活塞不同位置处的超压分布。模拟结果表明:由于燃烧室结构的独特性,导致冲击波能在特定区域进行汇聚,致使该区域超压明显高于其他区域。将该模拟结果与实际破坏失效的活塞进行对比,发现冲击波汇聚区域往往就是活塞被破坏的地方。数值模拟结果与实际破坏结果吻合很好。这为设计燃烧室形状以避免冲击波对活塞造成破坏提供了理论基础。

关键词:爆炸力学;活塞破坏;冲击波;燃烧室形状;汇聚
中图分类号:O383 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

近年来,在能源与环境的双重压力下,新型燃烧方式和高度强化作为内燃机发展的方向,获得了广泛的认同。随着高增压缸内直喷汽油机的不断小型化,发动机出现了新的燃烧现象——早燃。早燃现象发生后常进一步伴随超级爆震的发生。超级爆震发生时的最大缸压振幅可达 25 MPa,远高于常规爆震[1-4]。这种均质混合气自燃,在燃烧发生时,一是速度极快,属于体积式里外同时着火;二是伴随着远高于常规爆震振幅和频率的极强烈的燃烧震荡波[5-6]。这种高频、高振幅的压力震荡持续出现,常常会导致活塞在爆震循环内被击穿,使得发动机工作失效[7-8]。进一步的研究发现,活塞被破坏的位置很集中,多发生在活塞正顶部或边缘。随着高强度发动机的持续工作,缸内早燃引起的超级爆震烈度越来越大,最高爆压也越来越高[9],因此可以肯定的是,活塞破坏一定源自于高烈度爆震。

为了寻找这种对活塞材料具有破坏作用的爆震波在缸内的变化规律,避免发动机在工作中因此而损坏,本文中就缸内发生爆震后的冲击波传播、反射开展相关研究。从爆震波在狭小空间的传播、反射入手,以期找到爆震波汇聚点。为阐明爆震形成破坏性作用的机理,同时也为燃烧室形状设计提供理论依据,以避免爆震波汇聚对活塞造成严重破坏。

对于活塞破坏失效的研究,通常的做法是分析其热疲劳和机械疲劳,并把活塞失效的原因归结于热冲击、热疲劳和机械疲劳上[10-11]。很少有学者研究缸内冲击波对于活塞破坏的具体作用[7-8]。但是近来有研究发现,在缸内发生的爆震波,波速达到 2 km/s,类似于爆炸冲击波[12]。可以推测,在这种爆震波汇聚的地方可能会产生超压状况,从而形成极高具有强大破坏力的超压。

1 物理数学模型

1.1 物理模型简化

目前对爆震的研究主要应用的是声学的办法。小扰动声波方程、声模态等相关方法被应用于爆震研究,以期解决发动机噪声问题[6,13-16]。然而新型燃烧方式和高度强化技术所产生的强烈爆震,其压力振幅和静压的数量级相同,这已不是小扰动声波所能阐释的。这种高幅值、高频率的压力震荡需要非线性声学即激波的相关知识来阐释。不论是 HCCI 爆震还是汽油机的超级爆震,都是压缩到上止点后,缸内的高温高压致使均质可燃混合气发生自燃,而这种自点火现象极易引起爆轰,爆轰波则会产生一个前

* **收稿日期**:2013-05-28;**修回日期**:2013-09-05
基金项目:国家自然科学基金项目(51176135);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120032130009)
第一作者:姚春德(1955—),男,博士,教授,arcdyao@tju.edu.cn。

导冲击波[15]，该冲击波在燃烧室内不断反射震荡，使缸压传感器侦测出高达 25 MPa 振幅的高频震荡。

对于激波的研究，主要集中于激波管内的微观研究[17-18]。而激波破坏的应用研究则主要集中于建筑物、地下通道等场所的防爆研究[19-21]。对于发动机燃烧室内激波传播和反射的应用研究则较少。

本文中主要针对锥顶型燃烧室开展研究，如图 1 所示。由于二维模型完全可以满足冲击波在燃烧室内传播、反射规律的研究，并且计算量较小，因此选择二维模型进行研究。为了研究冲击波在缸内震荡反射的过程，研究中应用破膜法，在燃烧室中心区域人为创造一个或者几个高压区，使其与周围环境形成强大压差，导致冲击波的形成，如图 1 所示。而缸内实际燃烧过程产生的冲击波也与之类似。在发动机压缩行程中，缸内压力、温度不断上升，由于环境状态的不均匀性导致均质混合气（浓度也存在不均匀性）在某点产生了自燃，而瞬时的大量放热，无法立刻向周围传开，因而在该区域温度、压强急剧上升并与周围环境产生极大压差，进一步导致冲击波的形成。本文中采用激波捕捉法，捕捉冲击波波面，观察冲击波波面传播反射过程，并在活塞顶面均布几个测点（图 1 中“+”代表测点），用于观测活塞上不同位置的超压分布。

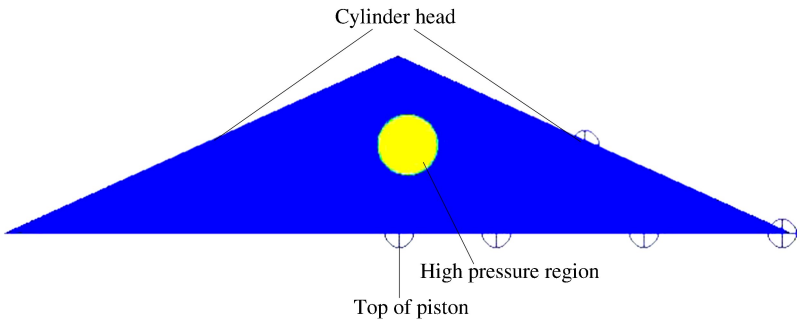

图 1 锥顶型燃烧室

Fig. 1 Combustion chamber with cone type roof

1.2 数学模型

由于本工作目的主要在于研究冲击波的传播与反射过程，且为了计算简便，数值模拟采用欧拉方程作为控制方程。

用 FLUENT 对缸内激波进行 CFD 模拟计算。由于研究的是瞬态的、高速可压流体的流动问题，所以采用的数值模拟方法是基于密度的、瞬态的方法。又由于要捕捉冲击波这种非连续性流场，因而选用三阶的 MUSCL 计算格式。

1.3 边界条件和初始条件

由于在强烈爆震初期，压力震荡最厉害，对活塞破坏的贡献也最大，因而主要研究爆震初期压力剧烈波动的时段。这个时间持续期很短，只有 3°曲轴转角左右，因而在该时间段内，假设壁面绝热，活塞静止不动。缸内压力赋值为压缩终了的平均压力 6 MPa，对于单爆点锥顶型燃烧室，本文中在自燃发生点的高压区赋值 100 MPa，从而导致冲击波的形成。由于使用的是有限体积法，因此采用相对简便的非结构化网格，用三角单元来划分计算区域。由于冲击波的厚度很薄，因而数值模拟的网格画得相对较密，为 0.05 mm 的网格特征尺度，并且验证了网格的独立性，在进一步加密后，计算结果基本没有变化，但是占用内存量更大。由于冲击波的波速大概在 2 km/s 左右，因而用 $\Delta t = l/c$ 初略估计其时间步长为 $\Delta t = 10^{-8}$，其中 l 为网格的特征尺度，c 为波速。进一步验证了该时间步长的独立性，在进一步减小时间步长后，计算结果基本没有变化，但是总体计算时间加长。

2 计算结果与分析

2.1 锥顶型燃烧室数值模拟结果

如图 2 所示，为锥顶型燃烧室的冲击波传播发展过程。从图 2 中可以很好地观察到冲击波在狭小燃烧室余隙内的发展、反射过程。波面触及缸盖和活塞顶部后发生反射，在向相反方向反射的同时，还在不断向两端狭小区域扩张。因此，可以观察到缸盖和活塞之间来回震荡的横波，与此同时，还能观察

到向两边狭小区域扩张的行波(图 2(a)～(f))。在冲击波抵达两端狭小区域后,由于空间变小,缸盖与活塞顶部的间隙减小,冲击波在缸盖与活塞之间的反射次数也成倍上升,这就导致在端部尖角处的震荡频率急剧增大。在激波触及端部反射的同时,和入射激波、缸盖与活塞间来回震荡的横波又产生叠加,导致在两端尖角处的超压急剧上升(图 2(g)～(i))。因此在两端尖角处,也就是在活塞的外围会产生剧烈的压力震荡。因而,在活塞外围处很容易受到激波的冲击破坏。

在激波触及两端尖角后,同时向中心反射,于此同时作用在活塞中心的压力波还不断在活塞顶部和缸盖之间来回震荡。当来自两端的冲击波反射回活塞中心处时,与来自缸盖反射的冲击波在活塞中心处发生交汇。此处压力叠加,导致在活塞中心处的超压陡增(图 2(j)～(n)),这使得活塞中心处也容易受到冲击波震荡的破坏。

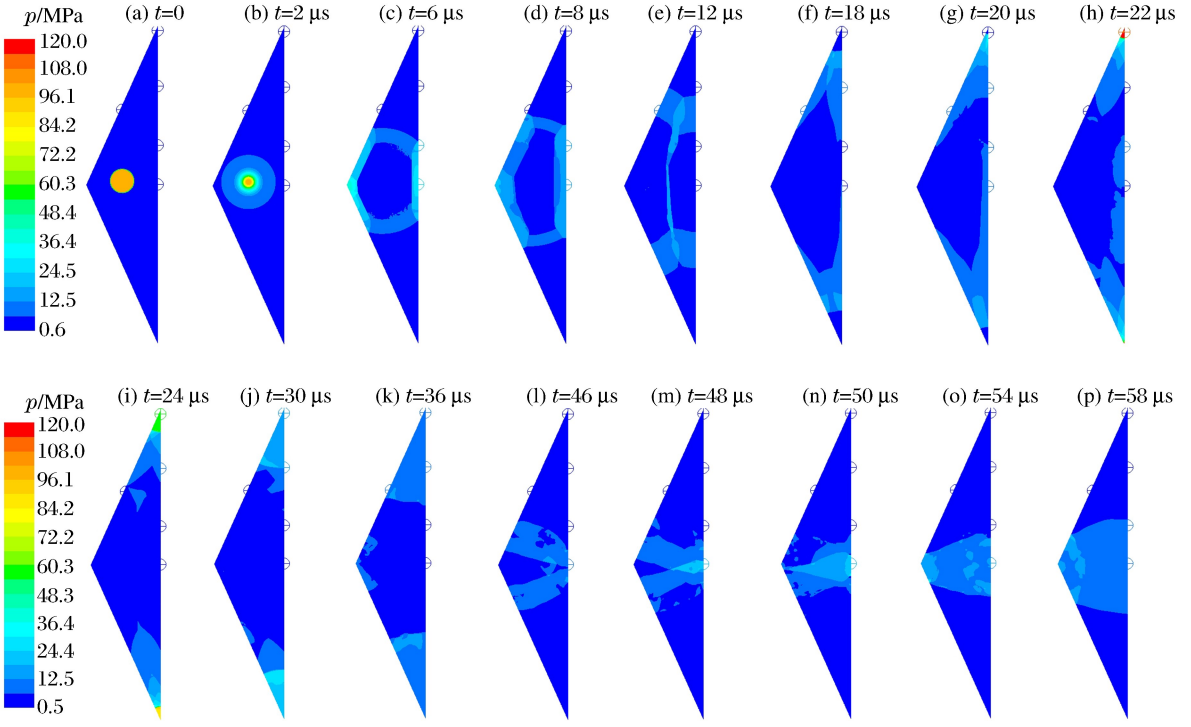

图 2　锥顶型燃烧室中激波发展过程

Fig. 2　Propagation of shock wave in cone style combustion chamber

冲击波在中心发生交汇后,又开始往两端尖角处传播,重复上述过程,导致最终驻波的形成(图 2(n)～(p))。而在这种驻波中,两端尖角处的振幅和活塞中心处的振幅最大,两端尖角处的震荡频率也最高,因而导致活塞在两端尖角处(图 3(a))和活塞中心处(图 3(b))最容易受到激波破坏。

由于燃烧室的对称性,因此只监测活塞一侧的超压信息。图 4 为活塞顶部一侧的压力时间曲线,该压力时间曲线很好地印证了前文所述。活塞中心点处的坐标为(18 mm,0 mm);活塞边缘处的坐标为(18 mm,39 mm)。从图中可见,在两端尖角处(18 mm,39 mm)的超压远高于活塞上其他测点的超压。在中心爆压只有 100 MPa 的情况下,两端尖角处的超压可高达 200 MPa,是中心爆压的 2 倍。其次是活塞中部(18 mm,0 mm),其超压相对于其他测点而言同样较高。由于这两处的超压较高,因此,活塞在这 2 个区域最容易受到破坏,也就是活塞中心处和活塞边缘处容易被冲击波破坏。

联系到汽油机的常规爆震是端气自燃,而端气自燃的原因一部分是已燃火焰面的传热传质,我们认为另一部分原因则是由于冲击波在两端狭小区域聚集,不断压缩未燃的端部混合气,从而导致端气压力、温度急剧上升,进而导致自燃。

同时,根据我们在研究中监测到的缸压传感器安放处的压力时间曲线,该测点位于缸盖一侧,监测结果如图 5 所示。结果表明,在缸压传感器的安放处,其压力震荡并不是最厉害的地方,震荡幅值大概

为 10 MPa，和超级爆震发生时，缸压传感器监测到的振幅[3]相当。因此，在实验过程中，缸压传感器监测到的缸压震荡并不能代表活塞顶部所承受的压力震荡。在某些区域，活塞所承受的压力震荡要远高于缸压传感器所监测到的，这就导致了活塞最终的破坏。

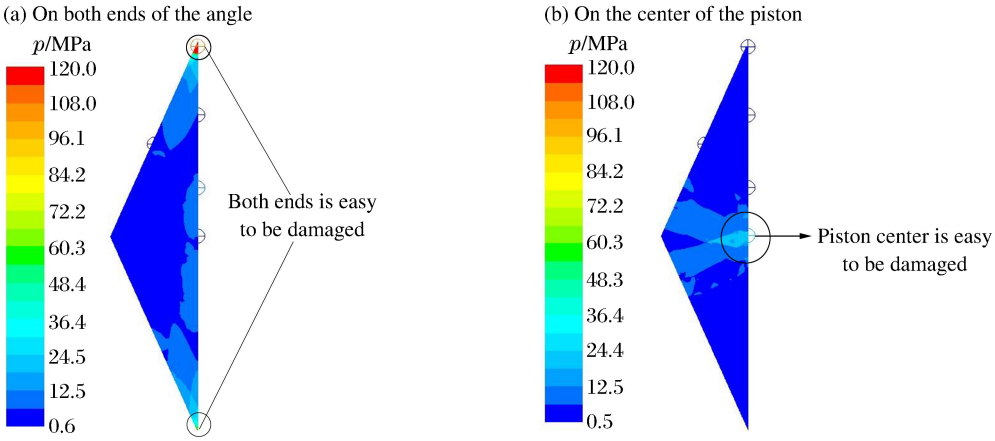

图 3 锥顶型燃烧室超压最大区域

Fig. 3 The highest pressure region of cone style combustion chamber

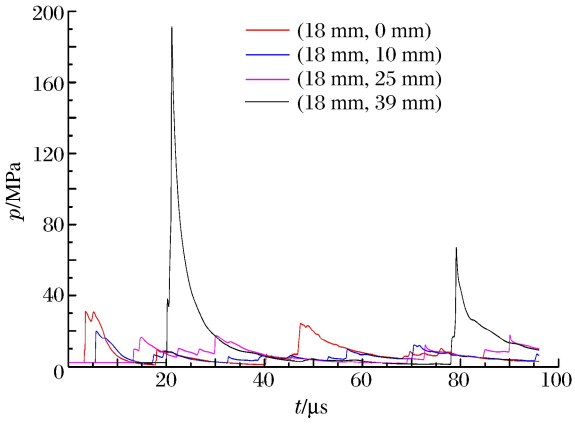

图 4 锥顶型燃烧室中活塞顶部压力时间曲线

Fig. 4 Pressure-time curves of piston face in cone style combustion chamber

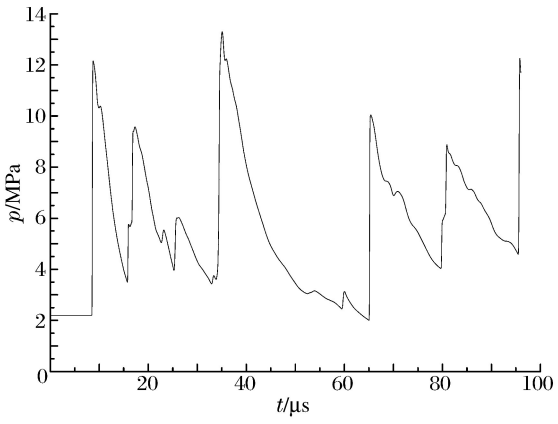

图 5 锥顶型燃烧室中缸压传感器处的压力时间曲线

Fig. 5 Pressure-time curve of pressure sensor in cone style combustion chamber

AVL 公司也做了相关爆震实验[12]，在燃烧室内不同位置布置了 3 个传感器。在燃烧室内部的传感器监测到的压力波动振幅明显小于燃烧室两端的压力振幅，进一步说明了在燃烧室两端尖角处发生了冲击波的汇聚，从而导致了超压上升，振幅加大。

2.2 锥顶型燃烧室数值模拟与实际破坏情况比较

许多被强烈爆震损害的活塞破坏形式，与我们模拟的结果十分吻合。

图 6 为本实验室发动机产生强烈爆震所破坏的活塞。其中图 6(a)～(b)主要展现的是活塞中心被强烈震荡的冲击波击裂，中心处发生凹陷并伴有裂纹的产生。图 6(c)～(d)为活塞边缘，也就是数值模拟的两端尖角处被高超压的激波所破坏的结果。

2.3 对比于锥顶型的平顶型燃烧室数值模拟

由于锥顶型特殊的形状，使激波在两端尖角处产生汇聚，从而导致活塞周围破坏严重。于是，考虑平顶型的燃烧室结构应该会缓解这种激波聚集的作用，因而对平顶型燃烧室进行了冲击波发展反射的数值模拟。为了与锥顶型燃烧室建立可比性，平顶型燃烧室的面积设定为与锥顶型相同，并且赋予平顶型燃烧室相同的初始条件和边界条件。图 7 为平顶型燃烧室的物理模型。

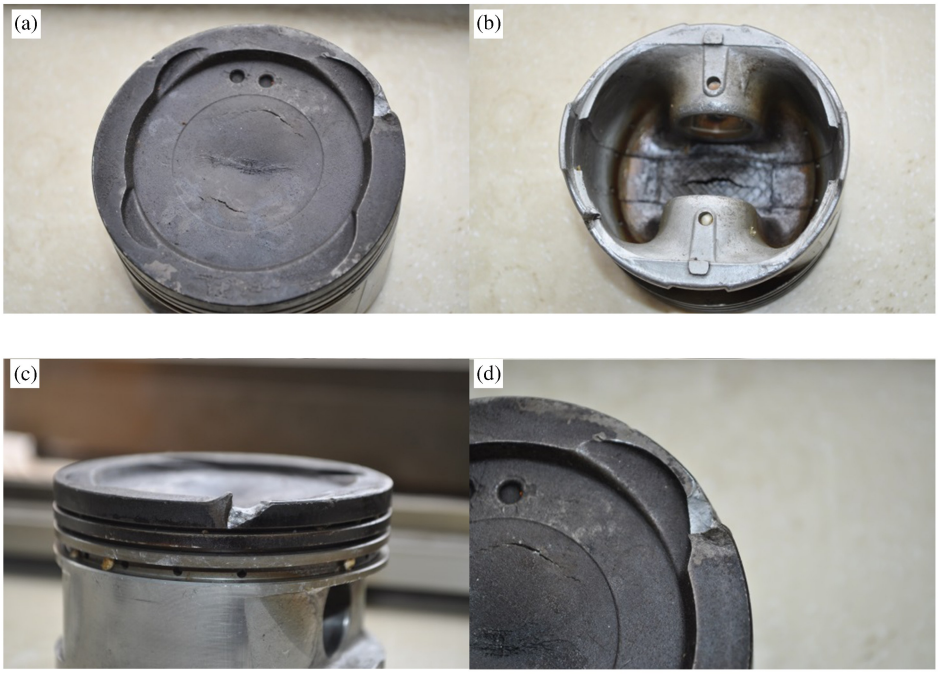

图 6 被强烈爆震破坏的活塞

Fig. 6 Piston damaged by heavy knock

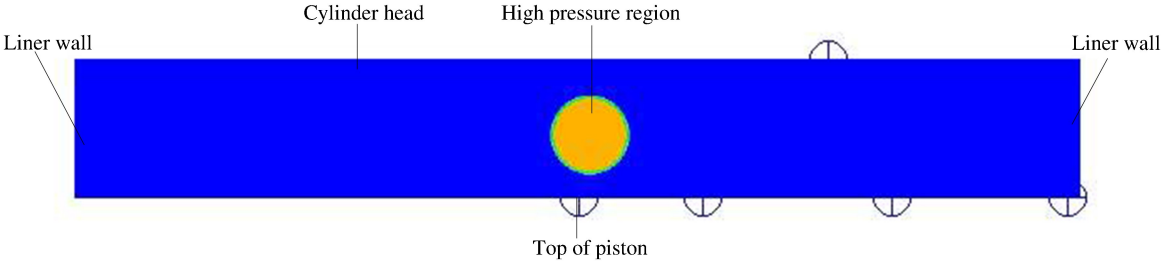

图 7 平顶型燃烧室

Fig. 7 Combustion chamber in flat style

图 8 为冲击波在平顶型燃烧室中发展、反射的过程。同在锥顶型燃烧室中的发展过程一样，冲击波遇活塞顶部和缸盖后向相反方向反射，与此同时，激波面在向两端扩展(图 8(a)～(e))。与锥顶型燃烧室不同的是，平顶型燃烧室两端的空间并没有减小，因而，激波面在触及燃烧室两端断面反弹后，虽然与入射激波发生叠加，超压相应上升，但是上升幅度并不大(图 8(f)～(g))。激波面遇两端反射后又会向活塞中心扩展，并在活塞中心处发生汇聚，活塞中心处的超压也会随之上升(图 8(h)～(j))，这和在锥顶型燃烧室中的发展规律一样。随后，冲击波又开始向相反方向传播开来(图 8(k)～(l))，重复上述过程，最终形成稳定的驻波。从冲击波的发展传播过程来看，超压最高处应该也在燃烧室两端和中间这两个地方。但是与锥顶型不同的是，燃烧室两端的超压并不会急剧上升，这会缓解冲击波对活塞周围的破坏作用。

如图 9 所示，同样对平顶型燃烧室中活塞顶部一侧的超压进行了监测。监测结果表明，平顶型燃烧室的超压分布规律同锥顶型燃烧室一样，也是活塞中心处(11 mm，0 mm)和两端(11 mm，39 mm)的超压较大。但是燃烧室两端的压力有了明显下降，与活塞中心处的超压是同一个数量级，这有助于缓解活塞周围受到的冲击波作用。

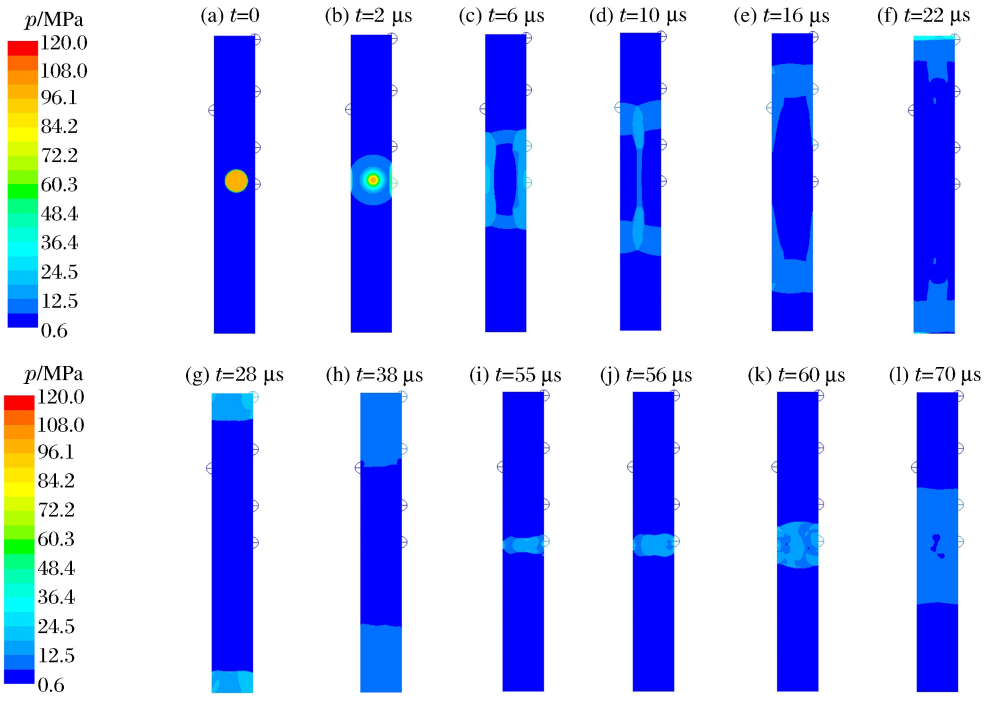

图 8 平顶型燃烧室中激波发展过程

Fig. 8 Propagation of shock wave in flat style combustion chamber

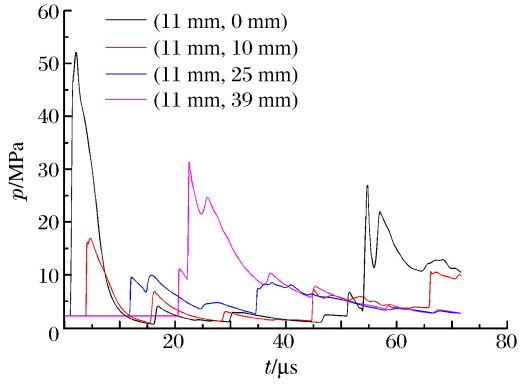

图 9 平顶型燃烧室中活塞顶部压力时间曲线

Fig. 9 Pressure-time curve of piston face in flat style combustion chamber

虽然平顶型燃烧室有助于缓解冲击波对活塞顶部的破坏作用，但是平顶型燃烧室的火焰传播距离长，不利于提高压缩比。在实际发动机中，因为无法形成滚流等诸多原因，平顶型燃烧室基本没有得到应用，一般主要用于油品的检测。

3 结 论

通过数值模拟，得到了锥顶型燃烧室中冲击波发展、反射的全过程，并监测出活塞顶部不同位置的超压分布，再结合对比活塞实际被破坏的情况，得出以下结论：

(1)高超压冲击波适合阐释爆震对活塞损坏的机理。由于新型燃烧方式和高度强化技术的应用，导致新的燃烧现象出现，由此产生的高振幅、高频率的爆震已经无法再用线性声学来解释了，高超压的冲击波更适合阐释这种压力震荡。

(2)爆震波的汇聚受燃烧室结构因素影响。由于燃烧室形状的特殊性，导致冲击波在局部区域会发

生汇聚，从而使得该区域超压明显高于其他区域，压力波振幅也就明显增大。

(3)燃烧室形状是导致活塞破坏的结构因素。通过与实际破坏活塞的对比，发现冲击波汇聚的区域往往就是活塞被破坏的区域，这进一步证明燃烧室内发生了激波汇聚。汇聚的激波对燃烧室局部区域造成了严重破坏。因此，通过合理设计燃烧室形状，避免激波汇聚，可以减轻激波对活塞的破坏作用。

(4)模拟研究发现，在边缘狭小空间处，由于激波的反射加上空间的急剧收缩，导致此处压力幅值上升极为剧烈，从而易对活塞两端尖角造成破坏。因此，可以通过适当增加余隙容积、减小锥角斜度来缓解两端尖角的压力聚集。

(5)模拟研究发现，由于燃烧室的绝对对称形状导致活塞中央压力汇聚。在缸内形成稳定的驻波后，活塞中央正好是驻波的波腹，此处振荡最剧烈，易对活塞中央产生破坏。因此，可以通过适当增加燃烧室的不对称度，使得从左右反射回中央的激波不总是在活塞中心汇聚，这样可减轻活塞中心的负荷，避免活塞中心破坏失效。

参考文献：

[1] Zahdeh A, Rothenberger P, Nguyen W, et al. Fundamental approach to investigate pre-ignition in boosted SI engines[C]// Society of Automotive Engineers Paper , 2011:2011-01-0340.

[2] Dahnz C, Han K M, Spicher U, et al. Investigations on pre-ignition in highly supercharged SI engines[C]// Society of Automotive Engineers Paper, 2010:2010-01-0355.

[3] Dahnz C, Spicher U. Irregular combustion in supercharged spark ignition engines—Pre-ignition and other phenomena[J]. International Journal of Engine Research, 2010,11(6):485-498.

[4] 张志福，梁兴雨，刘国庆，等. 增压缸内直喷汽油机抑制预燃试验[J]. 燃烧科学与技术，2012，18(2)：156-160.
Zhang Zhi-fu, Liang Xing-yu, Liu Guo-qing, et al. Investigation on pre-ignition suppression of turbo-charged GDI engine[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2012,18(2):156-160.

[5] 侯玉春，吕兴才，俎琳琳，等. 进气喷射不同辛烷值燃料的 HCCI 燃烧爆震试验分析[J]. 内燃机学报，2006，24(5)：414-420.
Hou Yu-chun, Lü Xing-cai, Zu Lin-lin, et al. An experimental analysis of knock in single-cylinder HCCI engine fuelled premixed PRFs[J]. Transactions of CSICE, 2006,24(5):414-420.

[6] Eng J A. Characterization of pressure waves in HCCI combustion[C]// Society of Automotive Engineers Paper, 2002:2002-01-2859.

[7] 姚安仁，罗震，姚春德，等. 甲醇点燃式发动机爆震破坏形式试验研究[J]. 机械工程学报，2013，49(4)：122-127.
Yao An-ren, Luo Zhen, Yao Chun-de, et al. Experimental study of the failure modes of the methanol-ignition engine knock[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,49(4):122-127.

[8] 续晗，姚安仁，姚春德，等. 基于柴油机 ω 型燃烧室缸内激波的活塞破坏研究[J]. 工程热物理学报，2014，35(3)：586-592.
Xu Han, Yao An-ren, Yao Chun-de, et al. Piston damaged by detonation wave produced in a ω type combustion chamber[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014,35(3):586-592.

[9] Roberts C E. Potential solutions to control super knock and paticulates in Euro V GDI Engines for passenger cars [R]. US, 2011.

[10] 武茜. 热冲击问题的理论研究及其在内燃机中的应用[D]. 浙江：浙江大学，2005.

[11] Silva F S. Fatigue on engine pistons—A compendium of case studies[J]. Engineering Failure Analysis, 2006,13(3):480-492.

[12] Georg Steiner. AVL Report: Knock analysis[R]. Austria, 2010.

[13] 韦静思. 内燃机燃烧过程中热声耦合机理的研究[D]. 天津：天津大学，2009.

[14] 韦静思，舒歌群，卫海桥. 运用波动方程计算内燃机爆震燃烧时的热声耦合性质[J]. 燃烧科学与技术，2010，16(4)：195-302.
Wei Jing-si, Shu Ge-qun, Wei Hai-qiao. A numerical method to analyze thermoacoustics in an internal combustion engine by coupling wave equation[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010,16(4):295-302.

[15] 韦静思,舒歌群,卫海桥.内燃机爆震燃烧过程中燃烧室内声学分析[J].内燃机学报,2011,28(5):427-434.
Wei Jing-si, Shu Ge-qun, Wei Hai-qiao. Analysis of acoustics in combustion chamber during knock combustion of an IC Engine[J]. Transactions of CSICE, 2011,28(5):427-434.

[16] Hickling R, Feldmaier D A, Chen F H K, et al. Cavity resonances in engine combustion chambers and some applications[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1983,73(4):1170-1178.

[17] 张博,白春华.气象爆轰动力学[M].北京:科学出版社,2012.

[18] 董刚,叶经方,范宝春.激波聚焦反射的实验和数值研究[J].高压物理学报,2006,20(4):359-364.
Dong Gang, Ye Jing-fang, Fan Bao-chun. Experimental and numerical investigation of shock wave focusing and reflection[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006,20(4):359-364.

[19] 杨秀敏.爆炸冲击现象数值模拟[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2010.

[20] 邬玉斌,田宇隆,张斌.地下建筑内爆炸冲击波荷载分布规律研究[J].武汉理工大学学报,2012,34(9):88-93.
Wu Yu-bin, Tian Yu-long, Zhang Bin. Distribution law of in-underground structure explosion-induced shock wave load[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012,34(9):88-93.

[21] 孔德森,孟庆辉,史明臣.爆炸冲击波在地铁隧道内的传播规律研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):48-55.
Kong De-sen, Meng Qing-hui, Shi Ming-chen. The dissemination rule of blasting shock-wave in subway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012,8(1):48-55.

Damage mechanism of detonation wave to piston in combustion chamber with cone-type roof

Yao Chun-de[1], Xu Han[1], Yao An-ren[2], Tang Chao[1]
(1. *State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*;
2. *School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*)

Abstract: For the internal-combustion engine, super knock produced by new combustion system may cause detonation in combustion chamber, which may damage the piston. 2D numerical simulation which is conducted by Ansys Fluent is used to investigate the propagation and reflection of detonation wave produced in combustion chamber with cone type roof. The overpressure distribution on top piston surface is obtained. Numerical simulation showed that the detonation wave could converge in special zone because of the shape of combustion chamber, which made the overpressure there much higher than that in the other zones. The numerical results were compared with the experimental damaged pistons, and it's found that the converging of the detonation wave found in numerical simulation could be the reason that causes the piston local region damaged under super knock. The results obtained in the study provided an important reference to the shape design of combustion chamber in order to avoid piston from being damaged by the detonation wave.

Key words: mechanics of explosion; damaged piston; shock wave; combustion chamber shape; convergence

(责任编辑 曾月蓉)