

内燃机爆震

及其对燃烧室组件破坏的机理

姚春德 姚安仁 续 晗 编著



科学出版社

内燃机爆震及其对燃烧室组件破坏的机理

Mechanism of Components Damaged by Internal Combustion Engine Knocking

姚春德 姚安仁 续 晗 编著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从内燃机发生的爆震现象出发,通过对爆震后气缸内产生的剧烈的振荡压力波在封闭空间中的反射和汇聚,结合对活塞材料被爆震破坏后开展的金相分析,对由爆震产生后造成活塞材料破坏的机理进行了研究。研究中引入爆燃转爆轰的理论,建立了相应的计算模型,提出了内燃机爆震破坏活塞的模式,为彻底防止爆震发生提供了新的思路。

本书可供汽车和内燃机或相关动力装置专业的学生或研究生作为参考书使用,也可供从事内燃机生产和研究的人员在工作中参考。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机爆震及其对燃烧室组件破坏的机理=Mechanism of Components Damaged by Internal Combustion Engine Knocking/姚春德,姚安仁,续晗编著. —北京:科学出版社,2015. 1

ISBN 978-7-03-043122-6

I. ①内… II. ①姚… ②姚… ③续… III. ①内燃机-爆震-研究
②燃烧室-破坏机理-研究 IV. ①TK411

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 013535 号

责任编辑:牛宇锋 乔丽维 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:210 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



姚春德,1955年生,博士,天津大学教授,博士生导师。内燃机燃烧学国家重点实验室副主任。中国工程热物理学会副理事长,中国汽车工程学会理事和特聘专家。多年来一直从事内燃机燃烧基础理论和内燃机新燃料方面的研究,承担多项国家自然科学基金重点课题和面上课题,主持多项 863 子课题。在国内外科技刊物上发表论文 270 余篇。获国家教委、机械工业联合会、天津市自然科学奖等奖项。是国家教委和人事部“优秀留学回国人员”、机械工业部首批跨世纪学科带头人。获发明、实用新型等专利 43 项。近十年来,在内燃机替代燃料领域,提出了柴油/甲醇二元燃料燃烧理论,发明了柴油/甲醇组合燃烧技术,并得到了成功的推广及应用。此外,在用于提高汽油燃烧效率的生物添加剂、废气加热甲醇裂解气等方面也取得了很好的成绩。

前 言

内燃机爆震是一个较为古老的现象,伴随着内燃机的产生而出现,是限制内燃机提高压缩比的重要障碍。由于点燃式发动机爆震已经能够通过推迟点火有效地进行控制,大家对普通爆震似乎都已经淡忘。近年来出现了传统方法无法控制的缸内直喷汽油机的超级爆震现象,使人们试图通过提高压缩比改善发动机热效率的愿望受到极大挑战,促使人们又重新燃起对爆震的关注。在对点火后发生的传统爆震开展的大量研究中,已经比较全面地了解了此种爆震发生的机理及其防治的方法,对于在点火前发生的超级爆震,尽管尚未完全掌握其发生机理,但是通过对各种发动机结构、运转影响因素的研究,也大体得到控制。然而一个基本问题一直没有得到很好的解释,即无论哪种爆震,当其发生时,发动机的每个系统尚处于正常工作中,每个循环供油量也十分有限,何以能把活塞、气门这些金属组件击穿甚至烧蚀?爆震为何会有那样大的破坏力?这些破坏力究竟怎样产生?因此,阐明封闭空间中燃烧压力波的作用规律,了解其可能的破坏力,有利于进一步优化发动机结构、提高发动机性能,对于防止爆震对发动机组件的破坏也具有重要的理论价值和工程意义。

上述工作在国家自然科学基金(课题编号:51176135)的支持下于2012年开始。通过引入爆燃转爆轰的理论和爆轰波在密闭空间里反射和汇聚的研究,以及金属材料被爆震破坏的金相分析,得出爆轰波的汇聚是产生破坏活塞等材料的超高温、超高压主因的结论。上述研究结论揭示了爆震破坏活塞等部件的机理,为避免爆震对内燃机部件的损坏提供了理论基础。本项工作的成果是,将内燃机的压力波振荡现象研究从线性的小扰动理论发展到非线性的爆轰波汇聚,在爆震波破坏燃烧室组件研究方面取得一定的进展。但是随后依然存在的问题是,具有如此破坏力的爆轰波产生的缘由是什么?目前这个问题依然困扰着内燃机工业界。随着今后工作的深入开展,相信不久的将来,一定可以找出爆轰波产生的根源,从而彻底消除爆震的危害。

本书除了三位作者,还有银增辉、唐超、陈志方等参与其中部分编写工作。在此一并致以衷心的感谢。

姚春德

2014年12月5日

常用名词缩写

ASB:绝热剪切带(adiabatic shear band)

BTDC:上止点前(before top dead center)

CA:曲轴转角(crack angle)

CEA:化学平衡及其应用(chemical equilibrium and applications)

CFD:计算流体力学(computational fluid dynamic)

C-J: Chapman-Jouguet 爆轰理论

DDT:爆燃转爆轰(deflagration-to-detonation transition)

DL: Darrieus-Landau 界面不稳定机理

DMCC:柴油/甲醇组合燃烧(diesel-methanol compound combustion)

ECU:电子控制单元(electronic control unit)

EGR:废气再循环技术(exhaust gas recirculation)

GDI:缸内直喷汽油机(gasoline direct injection)

LSPI:低转速高负荷早燃(low speed pre-ignition)

MAPO:最大压力幅值法(maximum amplitude pressure oscillation)

MBF:质量燃烧分数(mass burned fraction)

NASA: 美国国家航空和宇宙航行局(National Aeronautics and Space Administration)

RDR:旋转动态再结晶机制(rotational dynamic recrystallization)

SEM:扫描电子显微镜技术(scanning electron microscope)

SI:火花塞点燃式(spark ignition)

XRD: X 射线衍射(X-ray diffraction)

ZND:一种考虑爆轰波内部结构的爆轰模型(Zeldovich-von Neumann-doring theory)

目 录

前言

常用名词缩写

第 1 章 绪论	1
1.1 内燃机爆震及其危害	1
1.2 国内外发展现状	2
1.3 存在的问题和展望	3
参考文献	4
第 2 章 内燃机爆震现象	6
2.1 普通爆震现象	6
2.1.1 普通爆震介绍	6
2.1.2 普通爆震机理	6
2.1.3 汽油机燃烧室介绍	8
2.2 普通爆震检测方法	10
2.2.1 机体振动法	10
2.2.2 燃烧噪声法	13
2.2.3 缸压检测法	13
2.2.4 离子电流法	13
2.3 超级爆震现象	14
2.4 超级爆震成因	28
2.5 本章总结	29
参考文献	30
第 3 章 爆燃及爆轰理论	32
3.1 爆炸理论	32
3.2 爆轰理论	33
3.3 爆燃转爆轰	40
3.3.1 火焰阵面微分加速机理	43
3.3.2 加热和压缩机理	44
3.3.3 火焰阵面不稳定加速机理	44
3.3.4 火焰阵面湍流加速机理	45
3.3.5 内燃机燃烧室中的火焰加速	48

3.4	两相爆轰波的 ZND 模型及相关的问题	50
3.4.1	两相爆轰波的 ZND 模型	50
3.4.2	化学反应动力学	54
3.5	气体-液体燃料液滴两相系统爆轰的研究	60
3.5.1	两相流体力学方程	61
3.5.2	化学反应模型	63
3.6	本章总结	64
	参考文献	65
第 4 章	振荡燃烧压力波在封闭空间的传播	66
4.1	可压缩流体中的波	66
4.1.1	小扰动波	66
4.1.2	马赫波	67
4.1.3	膨胀波	68
4.1.4	激波	69
4.1.5	爆轰波	71
4.2	激波的反射	71
4.2.1	激波的正反射	71
4.2.2	斜激波的反射	72
4.3	激波的聚焦	74
4.4	本章总结	79
	参考文献	80
第 5 章	冲击波致燃烧室内超温超压形成机理	81
5.1	热点自燃引发爆轰机理	81
5.2	内燃机数值模拟的理论基础	83
5.2.1	内燃机燃烧模型分类	83
5.2.2	数值模拟基本控制方程	84
5.2.3	Fluent 软件介绍	85
5.3	研究方法	85
5.4	基于破膜法的冲击波汇聚研究	87
5.4.1	物理模型及数学模型	87
5.4.2	边界条件和初始条件	88
5.4.3	锥顶型燃烧室数值模拟结果与实际破坏情况比较	89
5.4.4	ω 型燃烧室数值模拟结果与实际破坏情况比较	95
5.5	基于总包反应的冲击波汇聚研究	99

5.5.1	模拟方法	99
5.5.2	模型简化	100
5.5.3	爆轰波在燃烧室内的传播特性	102
5.5.4	过量空气系数对早燃的影响	108
5.5.5	EGR 对早燃的影响	110
5.5.6	不同燃烧室形状对爆燃的影响	112
5.6	本章总结	114
	参考文献	115
第 6 章	爆震波破坏活塞材料的失效结构分析	117
6.1	内燃机爆震实验装置与方法	117
6.1.1	内燃机爆震台架实验活塞所用材料	117
6.1.2	爆震破坏活塞显微组织结构观察	119
6.2	爆震活塞绝热剪切的特征	119
6.2.1	金属绝热剪切失效原理	119
6.2.2	爆震波破坏活塞宏观特征	120
6.2.3	爆震波破坏活塞显微组织及成分分析	122
6.2.4	爆震波破坏活塞断口扫描	125
6.2.5	爆震波破坏活塞微观构型	128
6.2.6	爆震波破坏活塞微观推演	129
6.3	爆震破坏活塞绝热剪切数值模拟分析	132
6.3.1	内燃机爆震活塞破坏形式	132
6.3.2	燃烧室结构聚能理论的引入	133
6.3.3	爆震波对活塞剪切应力的数值计算	136
6.3.4	爆震波对活塞绝热剪切温升计算	140
6.4	爆震活塞的失效机理	144
6.4.1	对试样结果的讨论	144
6.4.2	爆震波作用于活塞的冲击方式	145
6.4.3	活塞结构受剪切应力的失效方式	146
6.5	本章总结	148
	参考文献	149
第 7 章	内燃机爆震的控制技术	151
7.1	汽油机的爆震及控制	151
7.1.1	汽油机的爆震	151
7.1.2	普通汽油机爆震的控制	152

7.1.3 汽油机超级爆震的控制	157
7.2 柴油机工作粗暴及控制	161
7.3 HCCI 等新型燃烧方式爆震及控制	162
7.4 本章总结	165
参考文献.....	165

第 1 章 绪 论

1.1 内燃机爆震及其危害

爆震是内燃机的一种常见的异常燃烧现象。自内燃机诞生投入使用以来,爆震燃烧便一直受到关注。影响爆震发生的因素主要有两大类:一是发动机运转因素;二是发动机自身的结构因素。运转因素包括发动机转速、负荷、燃料性质、混合气浓度、点火时刻、冷却水温、进气温度等,结构因素则主要是发动机压缩比、燃烧室结构、燃烧系统材料等。运转因素中最主要的是燃料的性质,如辛烷值,而结构因素中最主要的是压缩比。近年来,石油资源日渐紧张以及环境保护要求日益突出,特别是温室气体的排放控制,加快了各项新技术在内燃机上的应用,特别是汽油缸内直喷、增压、均质混合气压燃、多种燃料应用等。根据热力学原理,从结构因素说,压缩比与发动机热效率直接相关,压缩比越高,发动机热效率也随之越大。因此,为了降低燃油消耗、节约能源、提高热效率,增加压缩比是首要选择。但是,增加压缩比遇到的最大障碍是发动机缸内的爆震。爆震是发动机内一种常见现象,一旦发生,可以记录到缸内压力伴有高频率振荡,机外可以听到清脆的敲击声,所以爆震又称为发动机敲缸。目前对于爆震的认识,大体认为是混合气火焰在传遍燃烧室之前,一部分“端气”自燃。这部分自燃端气量虽不多,但是由于已被高度压缩并具有较高的温度,一旦燃烧,速度极快,以数倍于正常火焰的速度传播。伴随混合气的快速燃烧会产生一些具有很高频率的压力振荡波,即所谓爆震波。这种爆震波会对活塞及其组件产生强烈的作用,这种作用的直接结果便是活塞对缸体的高频敲击振动。工程上就是依据发动机机体产生的振动频率来识别爆震的发生。尽管对发动机产生爆震的准确原因尚无定论,但是目前对端气自燃的原因大体有两种解释已经得到共识,一种是活塞在上行压缩时产生的压力波与燃烧的压力波复合,形成对最后燃烧部分的所谓“端气”的强烈压缩;另一种认为是首先着火的混合气燃烧后产生了压力波,随着后续的混合气逐步参加燃烧形成了马赫效应,不断对未燃混合气进行压缩。两种说法的最终结果是一致的,即压缩的结果导致端气自燃。爆震一旦出现,应立即改变发动机当时的运行状态,如果长时间不改变,就会造成活塞材料的损坏,如图 1-1 所示。

图 1-1 中分别是发动机运行不同燃料造成的活塞破坏。图 1-1(a)是汽油,图 1-1(b)是柴油引燃甲醇均质混合气,图 1-1(c)是纯甲醇。由图可见,爆震发生时对活塞材料的损坏与燃料的种类无关,只取决于发动机发生爆震的时间和爆震



图 1-1 活塞被爆震损坏的情况

发生的强度。从图 1-1 可见,爆震对活塞造成的损坏是很严重的。图 1-1(a)中的头道活塞环上方至燃烧室边沿的材料已经完全烧损(见箭头所指处)。图 1-1(b)中的活塞头部已经部分烧熔,图 1-1(c)中的活塞则直接将顶部烧穿(可以看到下面的连杆小头)。活塞材料一般为共晶或过共晶硅铝合金,熔点在 660°C 以上,表面的氧化层烧熔的温度超过 1200°C 。因此,要把活塞局部烧熔并损毁,持续温度至少高于此。我们知道,内燃机燃烧时最高燃烧温度虽然超过 2000°C ,但是持续时间很短,仅十几度曲轴转角。这种瞬间的高热不足以击毁活塞表面氧化层,否则活塞材料不可能用现今的共晶或过共晶硅铝合金。那么产生具有如此巨大破坏作用的能量来自何方?另外,图中所示的发动机都是四冲程,每两转才做一次功,进气和换气过程对活塞具有一定的冷却效果,也就是说,活塞在工作中每两转要被新鲜混合气冷却一次。发动机的冷却水泵直接与曲轴相连,发动机工作时水泵持续运转,将冷却液送至机体的气缸套外部和缸盖内部,把活塞传过来的缸内热量带走。但是,发生爆震时显然气缸内的热量没有被及时传出,而被滞留在缸内。等到开始下个循环,新鲜混合气燃烧再次对活塞进行加热。如此循环下去,直至把活塞烧熔、烧穿。因此,爆震造成活塞材料损坏的原因具有十分复杂、尚未知晓的一面。随着国家节能减排的要求逐步推进,以增加压缩比来提高发动机热效率的方法越来越被人们接受,因此,研究爆震发生对活塞材料损坏的机理,找出避免损毁的方法是当今内燃机学科一个重要的需求。

1.2 国内外发展现状

对爆震的研究由来已久。早在 1919 年 Ricardo 就提出了爆震的自燃说,Lewis 和 von Elbe 等的补充研究证明末端气体的急剧燃烧是因为未燃混合气在着火前有先期反应的存在而产生的自燃性点火。20 世纪 40 年代,Miller 等^[1]用更高速纹影摄影观察缸内火焰传播,认为存在着以超声速传播的波面,确立了爆震说。自

燃说后来获得了广泛的认同,但爆震说也不能被完全否定。目前对于爆震的研究,主要关注宏观方面,即从发动机运行状况出发,结合粗略的模拟,研究如何通过调整运行参数抑制爆震的发生,拓宽工况^[2~6]。目前得到广泛关注的新型燃烧方式——均质混合气压燃(homogenous charge compression ignition,简称为 HCCI),由于存在爆震而限制了运行范围,对拓宽 HCCI 发动机的运行工况更为重要^[7~9]。同时,对爆震也有大量探测技术方面的研究^[10,11],以期借助这些技术能找到爆震的成因。

在研究爆震的发生、压力波的传导及对机械部件损坏的作用机理方面,人们采用多种技术措施,其中包括可视化技术。德国的 Spicher 等^[12]用光导纤维的可视化研究表明,轻度爆震是从壁面上开始的;Maly 和 Konig 等则认为爆震始于活塞、缸套和第一道环之间的狭缝容积中产生的热点^[13,14]。天津大学史绍熙教授曾在 20 世纪 90 年代利用光学发动机和高速摄影技术详细地观察到缸内火焰传播及爆震发生时近缸壁处末端混合气自燃的现象^[15]。最近,日本的 Kawahara 等^[16]设计了一台以氢气为燃料的点燃式光学发动机,拍摄到了发生爆震时爆震波的存在。近年来随着对反应动力学研究的重视,以及探求新型抗爆剂的需要,对爆震这种主要由化学控制的自燃现象的研究也开始涉足动力学领域^[17],对爆震的发生和抗爆剂作用的机理有了更细致的了解,重点研究羟基对爆震的诱导作用,从而使从数值上准确模拟自燃的发生成为可能。采用探测气缸中存在的自由基等化学物质还可对爆震进行激光诊断^[18]。在研究爆震压力波的传导、热声耦合方面,Syrimis 等^[19]在燃烧室中布置了多点压力测试传感器,发现:在自燃的开始期,燃烧室内存在巨大的局部压力差异。并且指出,在大多数情况下爆震所诱发的压力波动主要表现为燃烧室内的声学特性,通过对靠近着火点的压力传感器和依次对其他传感器的测试显示了自燃的多点特征,同时指出了压力波传播的方向以及压力波特性的变化。Bradley 等^[20]研究了多种燃料对爆震波的影响;天津大学舒歌群研究了缸内发生爆震时的热声耦合效应,并进行了三维模拟,给出了存在爆震波的缸压曲线^[21]。

1.3 存在的问题和展望

虽然对爆震现象开展了大量研究,但对于爆震对活塞等机件的损坏,研究比较少,且成因尚未明了。Betz 等^[22]的研究认为,爆震时活塞表面温度未达临界值,不会造成表面熔化,表面损坏是冲击波造成的,而 Errig^[23]的研究结果则相反。另外还有研究表明,发生爆震时,火焰传播速率、传热率都会以非常规方式发展,导致燃烧恶化,从而对发动机造成损坏^[17,24]。总之,爆震对发动机的损害是多方面因素耦合的结果,为防止爆震带来的危害,必须对损害机理进行全面系统的研究。

综观国内外对发动机爆震现象的研究工作可见,重点都是集中于爆震发生的

影响因素及其发生时的现象识别和如何规避。但是,关于爆震为什么以及怎样造成活塞材料损坏,至今尚未有过深入的研究。本书将针对发动机发生爆震时活塞材料损坏的原因进行深入研究,阐明活塞材料在爆震条件下破坏的机理,提出活塞材料在爆震发生时规避破坏的方法,为满足增加压缩比以提高内燃机热效率作出贡献。

参 考 文 献

- [1] Miller C D, Olsen H L, Logan W O, et al. Analysis of Spark-Ignition Engine Knock as Seen in Photographs Taken at 200000 Frames Per Second[R]. USA: NACA TR859, 1946.
- [2] Brunt M F J, Pond C R, Biundo J. Gasoline engine knock analysis using cylinder pressure data[J]. Society of Automotive Engineers, 1998, 107(3): 1399-1412.
- [3] Lee Y, Pae S, Min K, et al. Prediction of knock onset and the autoignition site in spark-ignition engines[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2000, 214: 751-763.
- [4] Grandin B. Knock in Gasoline Engines—The Effects of Mixture Composition on Knock Onset and Heat Transfer[D]. Chalmers; Chalmers University of Technology, 2001.
- [5] 金顺爱, 李勇, 尚秀镜, 等. 汽油机燃烧过程模拟计算及爆震预测[J]. 内燃机学报, 1999, 17(3): 271-276.
- [6] 肖茂宇, 石磊, 杨万里, 等. 增压直喷式汽油机性能与爆震的实验与模拟研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31(6): 22-26.
- [7] Lv X C, Chen W, Huang Z. A fundamental study on the ignition, combustion and emissions of HCCI engines fueled with primary reference fuels. SAE Paper, 2005, 2005-01-0155.
- [8] Shibata G, Oyama K. The effect of fuel properties on low and high temperature heat release and resulting performance of an HCCI engine, SAE Paper, 2004, 2004-01-0553.
- [9] 侯玉春, 吕兴才, 俎琳琳, 等. 进气喷射不同辛烷值燃料的 HCCI 燃烧爆震实验分析[J]. 内燃机学报, 2006, 24(5): 414-420.
- [10] 高青, 金英爱, 孙志军. 孙济美内燃机爆震燃烧探测及其临界爆震判析[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(4): 381-383.
- [11] Salvat O P, Cheng A S, Cheng W K, et al. Flame shape determination using an optical fiber spark plug and a head-gasket ionization probe[J]. Society of Automotive Engineers, 1994, 103(4): 1422-1435.
- [12] Spicher U, Kollmeier H P. Kollmeier H P. Detection of flame propagation during knocking combustion by optical fiber diagnostics[J]. Society of Automotive Engineers, 1986, 95(6): 552-561.
- [13] Konig G, Maly R R, Bradley D, et al. Role of exothermic centres on knock initiation and knock damages[J]. Society of Automotive Engineers, 1990, 99(4): 840-861.
- [14] Maly R R, Klein R, Peters N, et al. Theoretical and experimental investigation of knock induced surface destruction[J]. Society of Automotive Engineers, 1990, 99(3): 99-137.

-
- [15] 傅茂林, 李建权. 火花点火发动机爆震燃烧的研究[D]. 天津: 天津大学, 1995.
- [16] Kawahara N, Tomita E. Visualization of auto-ignition and pressure wave during knocking in a hydrogen spark-ignition engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(7): 3156-3163.
- [17] Haas F M, Chaos M, Dryer F L. Low and intermediate temperature oxidation of ethanol and ethanol-PRF blends: An experimental and modeling study[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(12): 2346-2350.
- [18] Merola S S, Vaglieco B M. Knock investigation by flame and radical species detection in spark ignition engine for different fuels[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48: 2897-2910.
- [19] Syrimis M, Assanis D N. Knocking cylinder pressure data characteristics in a spark-ignition engine[J]. *American Society of Mechanical Engineers, Internal Combustion Engine Division (Publication) ICE, Advanced Engine Simulations*, 1997, 28(1): 71-78.
- [20] Bradley D, Kalghatgi G T. Influence of autoignition delay time characteristics of different fuels on pressure waves and knock in reciprocating engines[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(12): 2307-2318.
- [21] 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.
- [22] Betz G, Ellenmann J. Knock related piston damage in gasoline engines, aspects of piston failer prevention [C]. *International VW-Symposium, Wolfsburg, Germany*, 1981.
- [23] Errig G. Piston loading at knocking combustion (detonation), aspects of piston failer prevention[C]. *International VW-Symposium, Wolfsburg, Germany*, 1981.
- [24] 吴平友, 黄河, 程庆. 汽油发动机爆震分析与控制[J]. *传动技术*, 2003, 17(3): 36-38.

第 2 章 内燃机爆震现象

2.1 普通爆震现象

2.1.1 普通爆震介绍

普通爆震是指在火花点火式发动机中,火花塞点火之后火焰传播阶段发生的

异常燃烧现象。普通爆震通常伴随着缸内压力的波动以及明显的金属敲击声(俗称敲缸)。普通爆震时采集到的典型缸压曲线如图 2-1 所示^[1]。

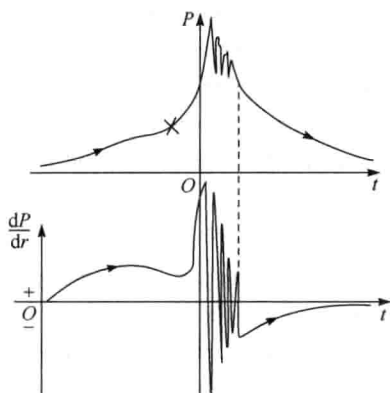


图 2-1 爆震的缸压及压力升高率曲线

发动机处于轻微爆震工况时,发动机功率会略有增加;而当爆震强度较高时,发动机的热效率会明显下降,工作不稳定。爆震时冷却水温和机油温度会有不同程度的上升,气缸体和气缸盖也会出现温度上升的情况。实验表明,发动机中混合气自燃部分高于总混合气的 5% 时,就能够引起强烈的爆震。强烈爆震对发动机的危害主要有以下几点。

(1) 发动机机体过热。爆震产生的强烈压力波会破坏热边界层,加速缸内高温燃气向气缸盖、活塞顶面及气缸壁的传热。过高的温度将使机体、零件局部金属软化、烧蚀,最终导致发动机的损坏。

(2) 零件的应力增加。爆震时,缸内强烈的压力波在燃烧室壁面来回反射,将增加零件的机械冲击负荷。

(3) 发动机功率和热效率下降。当爆震强度较小时,混合气燃烧速度较快,接近定容燃烧。由内燃机理论循环可知,此时的热效率较高,是人们所希望的。然而,当爆震强度进一步加大时,压力波强度增加使得热边界层破坏,已燃气体热损失上升,其结果将导致发动机功率和热效率降低。此外,较高的燃烧温度将影响缸内化学平衡,燃烧产物加速离解成 CO 、 H_2 ,从而降低燃料的燃烧效率,对热效率产生不利影响。

2.1.2 普通爆震机理

普通爆震早在 19 世纪火花点火发动机出现时,就成为增强发动机动力性、经济

性和可靠性的巨大障碍。因此,对于普通爆震的研究工作也开展得很早。1852年, Mallard 等就已经发现了爆震现象。而爆震现象将严重影响发动机的动力性和经济性的论断则是在 1910 年由 Nemst 等提出的。在接下来大约 100 年的时间里,研究者为了消除爆震给发动机应用带来的不利影响,进行了大量的探索。总体上看,对爆震形成的机理大概有三种理论:端气自燃理论、爆轰理论、火焰加速理论。

端气自燃理论认为,火花塞点火之后,正常湍流火焰面将由点火中心向周边未燃混合气传播,此过程中由于燃烧放热,已燃区气体将对距离火花塞较远的末端未燃区混合气产生压缩效应。压缩效应使得本来处于压缩止点附近的高温高压末端混合气的温度、压力进一步上升。末端混合气在此条件下发生一系列的低温氧化反应,直到某一个或多个自燃中心的出现,并迅速将剩余的末端混合气消耗完毕,便形成了爆震。

端气自燃理论最早是由 Ricardo 在 1919 年提出的。随着高速摄影技术引入内燃机缸内燃烧过程的研究,19 世纪 30 年代, Rassweiler 及 Withrow 等发现爆震燃烧条件下,末端混合气在非常短的时间内达到自燃的热力状态,并迅速燃烧,形成了压力锋面。同时, Lewis 与 VonElbe 等也发现,未燃混合气经历低温氧化反应最终自燃是其迅速燃烧的根本原因。伴随着化学反应动力学及不同燃料自燃性质研究的逐渐完善,端气自燃理论也得到了 Ball、Affleck、Haskell 等的证明。

爆轰理论对爆震的机理解释为,在爆震发生情况下,缸内混合气的火焰锋面将以超声速传播,即形成以火焰面与冲击波面相结合的爆轰波。这种燃烧方式速度极快,并将产生很强的冲击波,从而形成了爆震。

在 19 世纪 40 年代, Miller 等^[2] 和 Male 等^[3] 用高速纹影法研究爆震的燃烧过程时发现超声速传播的压力波面,从而首次提出了爆震现象的爆轰理论。Firey 在爆震燃烧条件下,利用冲击压力测量器捕捉到了强烈的冲击波,这为爆轰理论提供了依据。爆震对机体会造成破坏,通过观察发现,破坏的形式通常分为高温造成的铝合金材料局部烧蚀,以及冲击压力对金属材料造成的裂缝或孔洞等机械损伤。而爆轰波形成的高温高压能够很好地解释爆震的破坏结果,因此,爆轰理论从某种程度上更符合机体破坏的结果。

与爆轰理论类似,火焰加速理论同样认为,爆震现象中存在正常火焰传播过程中的加速过程,但是其传播速度没有超过当地声速。也就是说,爆震现象中,火焰传播始终以亚声速传播,并迅速放热,形成压力波。

火焰加速理论是 19 世纪 60 年代由 Curry 利用离子探针检测火焰传播的方法得到的。他通过燃烧室内不同位置布置多个离子探针,得出爆震工况下,火焰在末端混合气内部的传播速度为正常情况下的 10~20 倍,从而提出了火焰加速理论^[4]。

从上述三种普通爆震机理的解释中不难看出,无论是哪种理论,都认为爆震时