

预混燃气高压不稳定燃烧实验研究^{*}

翁春生 金志明 张国强

(南京理工大学动力工程学院 南京 210094)

摘要 以冲压加速器为工程背景,着重研究预混燃气高压不稳定燃烧问题。采用实验方法,分析预混燃气装填压力、配比等因素对不稳定燃烧的影响;采用频谱分析方法,分析诸因素对压力振动特性的影响。实验给出的预混燃气的装填压力及配比的范围,可直接应用于冲击加速器射击实验,这对于减少冲压加速器高压异常事故具有重要的实际意义。

关键词 冲压加速器 燃烧 内弹道学

中图法分类号 V312

1 工程背景

最近几年,冲压加速器作为超高速弹丸发射技术在国际上得到广泛重视,多个国家正在开展研究^[1~5]。冲压加速的原理是利用超高速运动弹丸产生的激波点燃预混燃气,从而形成正推力推动弹丸向前加速。根据我们以往对固体发射药与液体发射药为能源的推进技术的研究经验,在具体射击试验之前,必须对发射药不稳定燃烧规律进行基础实验,防止因发射药高压不稳定燃烧而导致灾难性事故发生。国外在冲压加速射击实验过程中也多次出现高压异常现象^[2~3]。冲压加速器利用预混燃气作为推进剂,因此有必要对高压条件下这一新型推进剂的不稳定燃烧进行实验探索,为冲压加速弹丸发射试验提供依据。

2 高压不稳定燃烧实验结果分析

目前国际上一般采用甲烷、氧气与氮气,或者氢气、氧气与氮气作为预混燃气,我们采用前者。实验是在 50ml 密闭爆发器中进行的,使用 0.5g 硝化棉作为点火药点燃混合气体,实验室温度为 20℃。我们对 CH₄、O₂ 与 N₂ 进行几十种配比、多种装填压力的实验,这里讨论几种典型的实验结果。

2.1 贫氧燃烧条件下不同装填压力的影响

预混燃气按 2O₂+2.5CH₄+5.5N₂ 的摩尔配比,该配比为贫氧燃烧。装填压力分别为 1.0、2.0、3.0、4.0 与 5.0MPa,图 1 给出 3.0MPa 与 5.0MPa 的实验 $p-t$ 曲线。当装填压力达到 5.0MPa 时,发生不稳定燃烧, $p-t$ 曲线波动很严重。在冲压加速过程中,高装填压力可提高推力,但装填压力应小于 5.0MPa,否则极易出现高压异常现象。

2.2 氧气配比的影响

图 2 为装填压力 3.0MPa 时,增加氧气配比的实验 $p-t$ 曲线。与图 1(a) 相比,当 N₂ 配比

* 翁春生:男,1964 年 3 月生,博士,副教授。

1998-02-16 收到原稿,1998-06-12 收到修改稿。

不变,而氧气配比增加时,出现明显的不稳定燃烧,曲线波动较大(图2(a))。当 O_2 与 CH_4 按反应 $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$ 配比时, $p-t$ 曲线振荡非常严重(图2(b))。可见,预混燃气作为冲压加速器的推进剂,只能为贫氧配比。

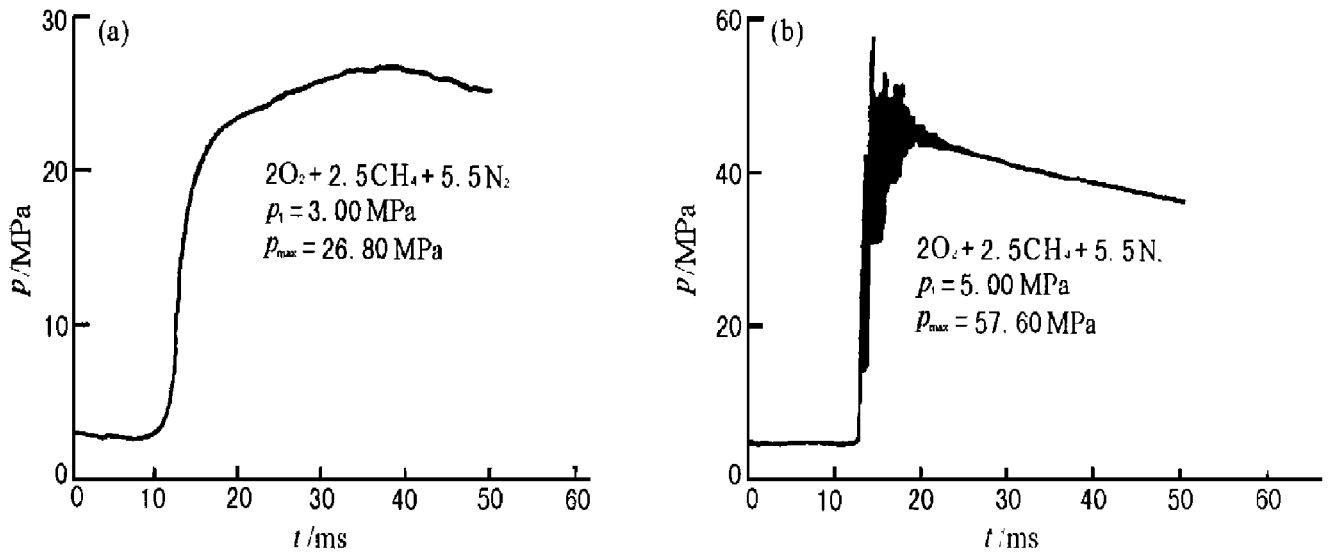


图1 预混燃气 $2O_2 + 2.5CH_4 + 5.5N_2$ 的 $p-t$ 曲线

Fig.1 $p-t$ curves for a combustible mixture $2O_2 + 2.5CH_4 + 5.5N_2$

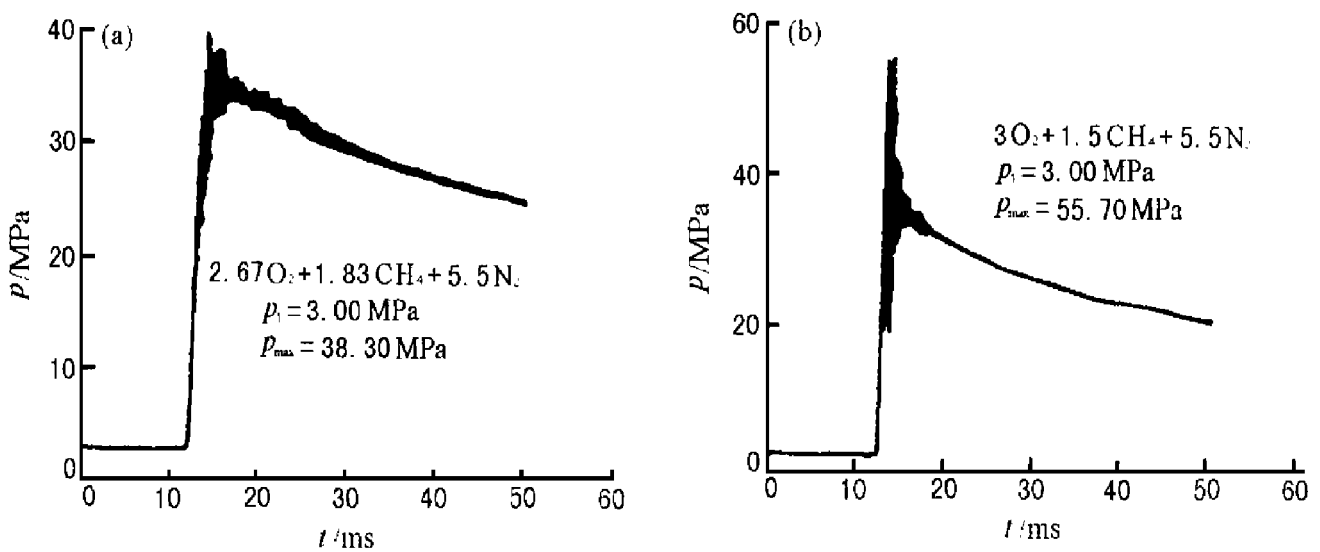


图2 增大氧气配比的 $p-t$ 曲线

Fig.2 $p-t$ curves for a mixture with increasing O_2 equivalence ratio

2.3 氮气配比的影响

图3为装填压力3.0MPa时,改变氮气配比的实验 $p-t$ 曲线。与图1(a)相比,减少氮气配比, $p-t$ 曲线出现一处大的振荡(图3(a)),而增加氮气配比,曲线非常光滑(图3(b))。这说明氮气作为稀释剂是必不可少的。

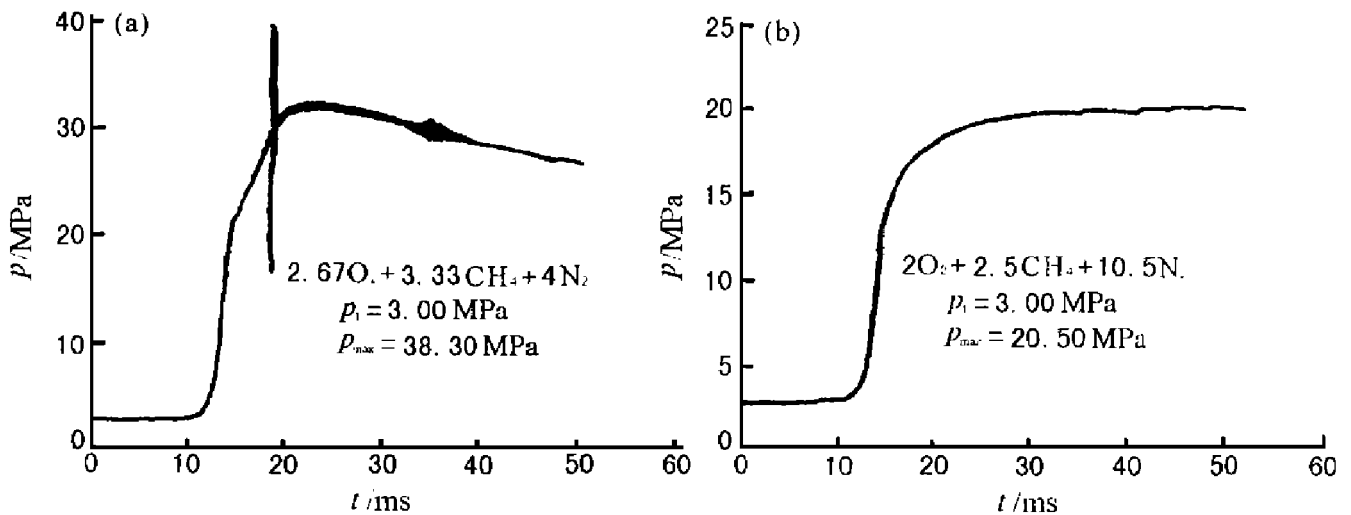


图3 改变氮气配比的 $p-t$ 曲线

Fig.3 $p-t$ curves for the mixture with variable N_2 equivalence ratio

3 频谱分析

压力曲线波动是一种瞬态非周期的振动波,可用频谱分析的方法,分析波动的主要频率成份及其对应的幅值分布,这种处理方法能体现整条压力曲线波动的物理特性。频谱分析的方法有多种,我们利用快速傅里叶变换(FFT)^[6],对上述的波动特性进行分析。

图4为对应于图1的频谱分布曲线。图中 f_0 表示最大振幅分量的频率,它反映波动的固有频率; A_0 表示零频分量的振幅,反映波动的平动特征。图中 $f_0 = 0\text{kHz}$, 并且 A_0 值远大于其它非零频率的振幅,说明压力波动的平动特征是主要的。与低装填压力的频谱分布(图4(a))相比,增大装填压力后(图4(b)),在 $0.078 \sim 2\text{kHz}$ 的频段范围振幅较大,衰减也较慢,并且在 $4 \sim 5\text{kHz}$ 的高频段范围也存在较大振幅。可见,增大装填压力会引起低频段与高频段的振荡成份。

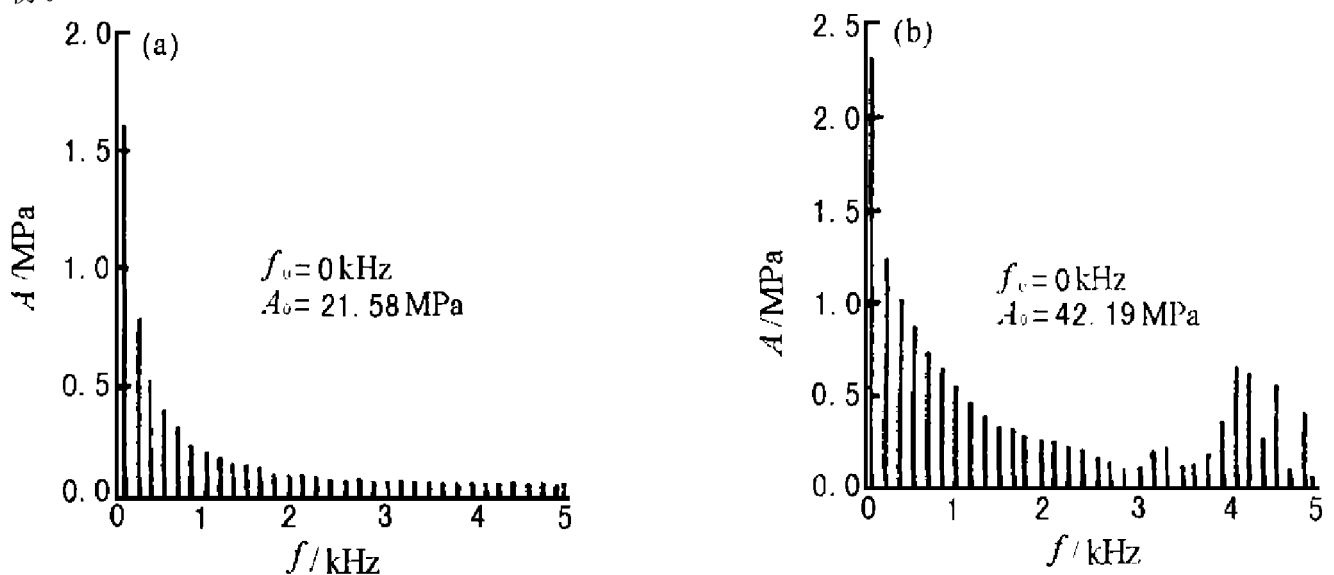


图4 预混燃气 $2O_2 + 2.5CH_4 + 5.5N_2$ 的 $p-t$ 曲线频谱分布

Fig.4 Frequency-spectrum of Fig.1 $p-t$ curves

图 5 为对应于图 2 的频谱分布曲线。与图 4 相似,这种压力波动的平动特征也是主要的。比较图 5(a)与图 4(a),说明增加氧气配比后,从 0~5kHz 频率范围内相应的振幅都有所增加,尤其在 3~4.1kHz 频段范围出现多次大的振幅。当氧气配比按化学反应配比($2O_2 \cdot 1CH_4$)时,在 2~5kHz 频段的振幅有较大的增加(图 5(b))。这说明增加氧气配比,会引起低频至高频振荡成份普遍增加,尤其高频振荡增加得更严重。

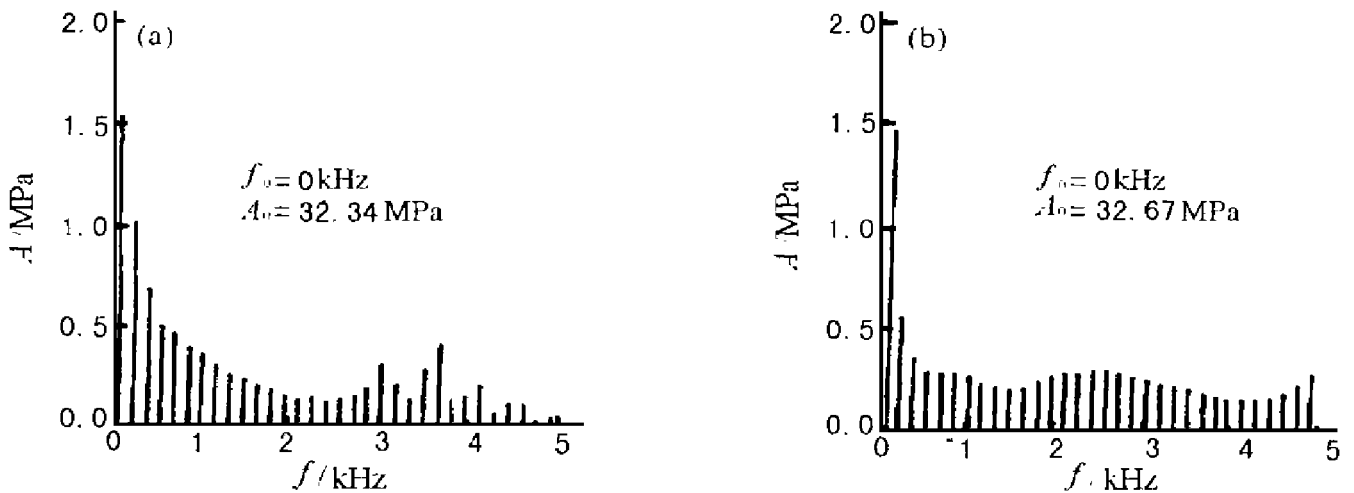


图 5 增加氧气配比的 $p-t$ 曲线频谱分布

Fig.5 Frequency-spectrum of Fig.2 $p-t$ curves

图 6 为对应于图 3 的频谱分布曲线。比较图 6(a)与图 4(a),显然减少氮气配比时,低频段 0.078~1.0kHz 的振荡较大,衰减也较慢,尤其在 0.078kHz 附近的振幅增加一倍多(达到 3.09kHz)。说明减少氮气配比,会增大低频振荡的成份。比较图 6(b)与图 4(a),当增加氮气配比时,从低频至高频的振荡成份都有所减少。

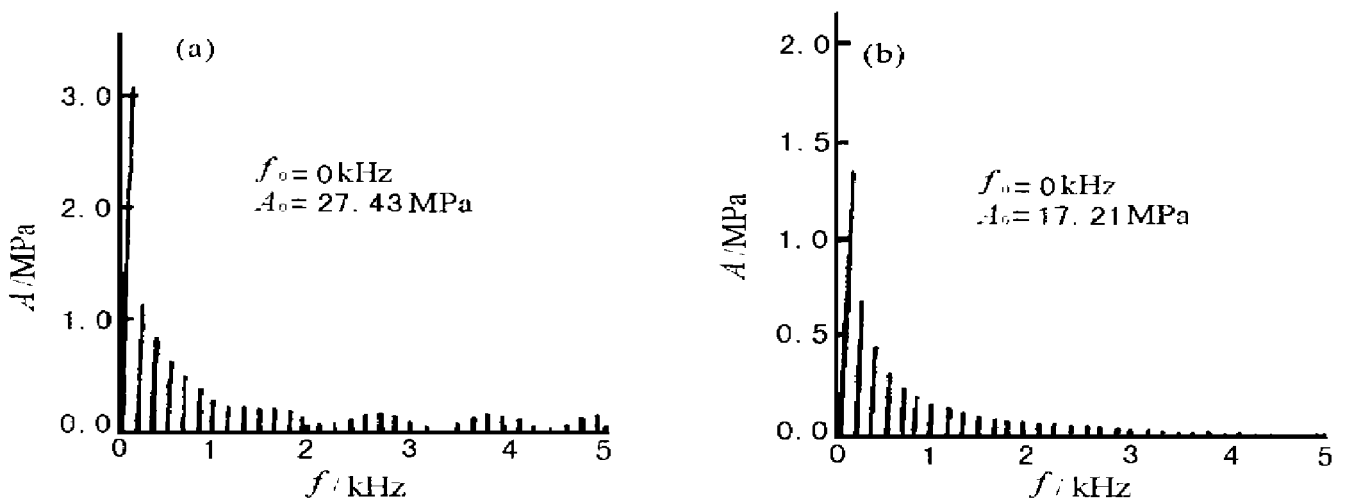


图 6 改变氮气配比的 $p-t$ 曲线频谱分布

Fig.6 Frequency-spectrum of Fig.3 $p-t$ curves

4 分析与结论

声不稳定是导致预混燃气不稳定燃烧的主要原因,它的发生和燃烧过程与声场的相互作

用有关^[7~8]。当密闭爆发器(燃烧室)形状一定时,声不稳定燃烧与预混燃气装填压力、配比、温度等因素有关。通过对实验 $p-t$ 曲线的频谱分析,发现增大装填压力会引起低频至高频段的振荡都增加,增加氧气配比主要会导致高频段振荡加剧,减少氮气配比主要会导致低频段振荡加剧。为了减少射击实验过程中出现预混燃气高压不稳定燃烧而可能产生的事故,应选取适当的装填压力及配比。

参 考 文 献

- 1 John B. Hinkley Jr. An Experiment and Numerical Investigation of the Three-dimensional Flow Field about a Ram Accelerator. In: Proceedings of the Second International Workshop of Ram Accelerator. Seattle, USA: [s. n.], 1995
- 2 Kruczynski D L. Experiments in a 120mm Ram Accelerator. In: Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics. Canada: [s. n.], 1993
- 3 Nusca M J. Numerical Simulation of Fluid Dynamics with Finite-rate and Equilibrium Combustion Kinetics for the 120mm Ram Accelerator. AIAA-93-2182, 1993
- 4 Lefebvre M H. Modeling of Unstarts in Ram Accelerator. In: Proceedings of the Second International Workshop of Ram Accelerator. USA: [s. n.], 1995
- 5 翁春生, 金志明, 袁亚雄. 冲压加速器弹丸发射系统非反应流数值模拟. 爆炸与冲击, 1997, 17(2): 119 ~ 126
- 6 张彦仲, 沈乃汉. 快速傅里叶变换及沃尔什变换. 北京: 航空出版社, 1989
- 7 谢蔚民. 固体火箭发动机不稳定燃烧. 西安: 航空专业教材编审组, 1985
- 8 叶万举. 固体火箭发动机工作过程. 长沙: 国防科技大学出版社, 1985. 225 ~ 270

EXPERIMENTAL STUDIES ON HIGH PRESSURE ABNORMAL COMBUSTION OF A COMBUSTIBLE GAS MIXTURE

Weng Chunsheng, Jin Zhiming, Zhang Guoqiang

(College of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

ABSTRACT In this paper, the ram accelerator is taken as engineering background, the high pressure abnormal combustion of a combustible gas mixture is studied. The influence of a combustible gas mixture filled pressure and its equivalence ratio on abnormal combustion is analyzed by experiments. The influence of some factors on pressure oscillation is studied by frequency-spectrum analysis. The range of a combustible gas mixture filled pressure and equivalence ratio, which are given by experiment, could directly be applied to the ram accelerator, this is of great value to decrease the high pressure abnormal combustion accident of ram accelerator.

KEY WORDS ram accelerator, combustion, interior ballistics