

等容燃烧条件下粉尘等效燃烧速度的确定*

浦以康, 贾复, 胡俊

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 介绍寻求表征粉尘物料爆炸特性的参数的一些结果。提出的最大等效燃烧速度参数, 可以从等容爆炸实验的实测压力时间序列中求得, 同时其对于实验容器的依赖性也大大减轻。给出了把最大等效燃烧速度参数应用于3种粉尘4种不同容器中等容燃烧实验数据分析的结果。

关键词: 粉尘爆炸; 等容燃烧; 最大等效燃烧速度

中图分类号: O 643 2⁺ 1

文献标识码: A

文章编号: 1006-8740(2002)01-0001-05

Determination of the Maximum Effective Burning Velocity of Dust-Air Mixtures in Constant Volume Combustion

PU Yi-kang, JIA Fu, HU Jun

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Presented in this article is an outcome of the authors' finding a parameter that can represent to some extent the explosion characteristics of gas and dust air mixture through constant volume experiments. The proposed parameter, termed as "maximum effective burning velocity", can be derived from the pressure history measurement and can be less dependent on the apparatus. Also given in the papers are some practical applications of the maximum effective burning velocity to constant explosion experiments of three kinds of dust air mixtures in four different combustion vessels. The results turn out quite encouraging and the superiority of using this parameter is obvious compared with the K_{st} approach.

Keywords: dust explosion; constant volume combustion; maximum effective burning velocity

无论从粉尘爆炸研究或工业减灾的实践角度, 首当其冲需要解决的问题之一就是要有能反映物料爆炸特性的表征量。

在气相燃烧爆炸问题中, 这样的表征量就是等压条件下的层流燃烧速度。它能很好地反映物料由其化学组成规定的燃烧特性, 同时它又可以通过本生灯等实验方法准确测定。但是当我们面对的是粉尘-气体混合物的爆炸问题时, 情形就变得大为复杂。首先, 影响粉尘爆炸的因素有许多, 如粉尘的化学组成、粒度、分散度、浓度及分布, 环境流动特别是湍流情况等, 它们

的控制及测定也十分困难。其次, 对于粉体爆炸的研究大多需在封闭容器中进行, 这种等容燃烧过程比等压过程复杂得多, 观察、测量也困难得多。此外, 在重力场中研究粉尘爆炸大多需要小尺度湍流扬尘, 因而容器中扬尘湍流的存在和它对火焰传播的影响成为粉尘等容爆炸不能回避的问题。粉尘的等容层流燃烧速度也许只能在微重力环境下测定^[1]。最后, 粉尘作为固相物质, 其燃烧过程较之气相复杂得多。

工业实践要求提供一种实际可行, 能比较不同物料爆炸特性的手段, Hartmann^[2]、Bartknecht^[3]和美国

* 收稿日期: 2000-11-27。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19772060)。

作者简介: 浦以康(1938-), 女, 博士, 研究员。E-mail: ykpu@imech.ac.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

煤矿局匹兹堡研究中心^[4]使用了不同容积的封闭球形容器对煤粉等物料进行了等容爆炸实验, 并采用等容爆炸过程中的最大爆炸压力升值和最大压力上升速率作为表征粉尘物料爆炸特性的主要参数。Bartknecht^[3]为了解决实验模型律的问题, 把最大压力上升速率与实验容器的体积(V_0)进行关联, 得到工程界颇为知名的立方根律: 对于给定的物料, 其表征等容爆炸特征的最大压力上升速率与实验容器容积存在着下述关系

$$K_{st} = (dp/dt)_{\max} \cdot V_0^{1/3} = \text{常数} \quad (1)$$

使用 K_{st} 因子可以把不同容积球形和类球形容器中得到的 $(dp/dt)_{\max}$ 与容积关联后进行比较。Bartknecht 还建议, 用 20 L 的爆炸球作为工业部门确定粉尘 K_{st} 值的标准实验容器。

多年来, K_{st} 方法几乎是工程师用来分析、设计粉尘爆炸工程问题的唯一工具。但是, 大量粉尘爆炸实验和相关的工业应用实践都表明: 同一粉尘在不同容器(特别是对于工业常用的柱形容器)内等容爆炸所得到的 K_{st} 值并不能保持为一常值, 立方根律的通用性与唯一性得不到保证。

Eckhoff^[6]曾正确地指出, 立方根律仅对于形状相似的球形容器内其薄火焰面传播的速度作为压力和温度的函数又彼此全同的条件下才能成立。他警告工程师们, 由于 K_{st} 中没有包含湍流的作用, 因而, 它是个任意性很大的参数。这些缺憾使得人们一直希望寻找能如气相等压层流燃烧速度那样可以表征粉尘爆炸特征的参数。

本文作者近年来^[5, 7~9]通过对多种粉尘物料在球形和多种柱形容器内的等容爆炸实验研究发现, 对于等容爆炸, 仍可能找到在一定程度上反映物料燃烧特性的参数, 权且称它为“最大等效燃烧速度”, 记为 $u_{\text{eff}, \max}$ 。

本文主要是介绍等效燃烧速度的概念、导出和使用方法, 以及应用 $u_{\text{eff}, \max}$ 分析甲烷-空气与粉尘-空气混合物在不同形状容器中等容爆炸的大量实验数据的结果。结果表明, 采用 $u_{\text{eff}, \max}$ 表征粉尘爆炸特性较之 K_{st} 方法有明显的优越性, 对于实验容器的形状、尺寸的依赖性大大减低。

1 等容粉尘燃烧的基本热力学分析

为使导出的等效燃烧速度具有较明确的物理含义, 在此简要地对等容燃烧作一些热力学分析, 细节可参见[10]。在以下分析中, 假设:

1) 气固两相混合物的火焰前缘, 其厚度与气相火焰厚度相似, 与表征封闭容器大小的尺度相比, 均可视为薄火焰面;

2) 粉尘燃烧物在燃烧过程中, 首先挥发、气化成可燃气体, 因此两相混合物的燃烧过程与气相相似;

3) 粉尘颗粒经挥发后产生的气体具有完全气体性质, 气体的比热比 γ 取其燃烧前与后值的平均值。

体积为 V_0 的绝热封闭容器, 其中的气体或粉尘挥发生成的可燃气体的总内能可表示为

$$U = M C_v T = \frac{MRT}{\gamma - 1} = \frac{pV_0}{\gamma - 1} \quad (2)$$

式中: U 为内能; M 为总质量; C_v 为定容比热; T 为温度; p 为压力; γ 为混合气体的比热比; R 为气体常数。

在绝热封闭容器内的爆炸过程中, 随压力的上升内能增加速率为

$$\frac{dU}{dt} = \frac{V_0 dp}{\gamma - 1 dt} \quad (3)$$

在等容爆炸过程中, 设 t 时刻粉尘火焰面是以燃烧速度 $u(t)$ 向未燃的混合气体传播, 在 dt 时间间隔内, 由于物料燃烧导致的容器内的总内能增加为

$$dU = \int_{A(t)} Q \cdot u(t) \cdot \rho(t) d\alpha dt \quad (4)$$

式中: $u(t)$, $A(t)$, $\rho(t)$ 分别是时刻 t 的燃烧速度、火焰面面积、火焰面前方未燃混合气的质量密度; Q 是单位质量燃料的化学反应热; 积分沿火焰面 $A(t)$ 进行。

设想这样一个等效的(平均的)燃烧速度 u_{eff} , 它使得下式成立

$$u_{\text{eff}}(t) \cdot Q \cdot \rho(t) \cdot A(t) = \int_{A(t)} Q \cdot u(t) \cdot \rho(t) d\sigma \quad (5)$$

对于等效燃烧速度 u_{eff}

$$u_{\text{eff}}(t) \cdot Q \cdot \rho(t) \cdot A(t) = \frac{dU}{dt} = \frac{V_0 dp}{\gamma - 1 dt} \quad (6)$$

可以合理地认为, 容器内火焰前方的未燃气体在压力升高过程中经历了等熵压缩, 于是有

$$\rho Q = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1/\gamma} Q = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1/\gamma} \frac{M}{V_0} Q \quad (7)$$

假设, 容器内全部燃烧化学能转化为气体内能, 根据式(3)可有

$$M Q = \Delta p_{\max} \cdot V_0 / (\gamma - 1) \quad (8)$$

其中, Δp_{\max} 表示燃烧前后的最大压力增值。这样便得到

$$u_{\text{eff}} = \frac{p_0^{1/\gamma}}{\Delta p_{\max}} \cdot \frac{V_0}{A} \cdot \frac{1}{p^{1/\gamma}} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (9)$$

式(9)即为在式(5)意义下的粉尘等效燃烧速度 u_{eff} 的表达式。以上分析对于封闭容器内绝热燃烧过程成立。

必须注意:

- 1) 上式右端许多参量都与扬尘湍流强度有关;
- 2) 火焰面积与火焰的发展有关, 它强烈地依赖容器形状、点火位置等。

要实际地确定这些问题, 还须认识扬尘湍流规律, 把握燃烧过程中火焰面积变化规律, 这些都是比较复杂的问题。

2 等容爆炸过程中的最大等效燃烧速度

2.1 扬尘湍流的衰变规律

扬尘机构和扬尘方式的不同直接影响等容爆炸过程。这也是困扰粉尘燃烧研究者的难题之一。浦以康等^[5]曾对 20 L 球形和 26 L (单管) 柱形封闭容器内微射流气动扬尘系统产生的扬尘湍流, 进行了系统的测量和研究。本文对 7 L (双管), 22 L (双管) 柱形封闭容器内气动扬尘系统产生的扬尘湍流衰减特性也进行了测定 (示于图 1)。主要结果可简要归纳为以下几点:

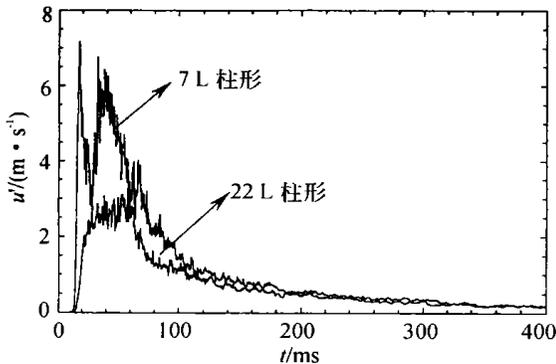


图 1 柱形容器 (对称双管) 扬尘湍流衰减特性

1) 采用双管或单管微射流气动扬尘方式 (参见文献 [7, 8]), 在球形和柱形容器 ($L/D = 2 \sim 6$) 内均可有效地形成较均匀的悬浮粉尘云, 使得等容爆炸实验的重复性提高, 较之单射流扬尘、自由落尘、风扇等扬尘方法有明显的优点。

2) 对于球形和不同长径比的柱形容器, 采用热线风速仪测量了单、双排微射流扬尘器产生湍流的瞬时速度, 然后对这类瞬变湍流衰变过程进行系统统计处理, 求得了湍流强度随时间的衰变规律。测量结果显示, 此类扬尘器湍流衰变具有比较好的规律性, 不同的实验容器及扬尘条件下的扬尘湍流遵循着大致相同的随时间的负幂次规律。

3) 根据测定的湍流衰变规律, 可定量地建立起点火延迟时间和点火时刻湍流强度之间的对应关系, 从而可以确定和控制等容爆炸实验的湍流强度。

2.2 球形和柱形容器中容爆炸过程

把封闭容器作为一个系统看, 其内的燃烧过程分为初始的绝热阶段和其后的非绝热阶段。基于 Ellis^[11]、浦以康^[5]等对于等容燃烧过程的光学观察、压力测量和器壁传热的测量, 可以认为: 球形、柱形容器内的等容燃烧 (分别以中心点火和底端中心点火) 的两个阶段的区分与其火焰面的发展状态密切相关。

对于球形容器, 从中心点火到火焰沿径向传播的一个相当大的距离内, 火焰面近似保持为球面, 燃烧基本为绝热过程, 是为第一阶段。仅当火焰面相当接近壁面时 (如火焰面半径约为容器半径的 0.8 倍时), 壁面传热的热损失才不可忽略, 燃烧进入第二阶段。

对于柱形容器中的等容燃烧, 底端中心点火后, 火焰同时沿轴向和径向发展, 火焰面从初始的半球形不断增大, 拉长为半椭球形直至火焰面与容器侧壁面接触, 这一阶段是绝热阶段。火焰面与器壁的接触而冷却使火焰面的近柱形部分突然消失, 变成垂直于轴线的近似平面状。由于向壁面的传热火焰表面积减小, 同时火焰的冷却又导致燃烧生成物气体密度增加, 都会使火焰减速。在非绝热的第二燃烧阶段, 火焰面会产生波折, 形如郁金香花状, 火焰也变得不稳定。

值得注意的是, 无论在球形还是在柱形容器内, 等容燃烧都存在绝热的第一阶段, 其间火焰面保持有相对简单的形状和规律, 可以应用前述热力学分析的一些结果。设封闭容器等容燃烧第一阶段结束在 $t = t^*$ 时刻。对于球形容器, $t < t^*$, 火焰面大致保持为球形, 式 (9) 中球形容器体积 V_0 与该时刻火焰面表面积 $A(t)$ 的比值有

$$\frac{V_0}{A(t)} = \frac{4/3 \cdot \pi R_0^3}{4\pi R(t)^2} = \frac{1}{3} \frac{R_0^3}{R(t)^2}$$

如前所述, $t = t^*$ 时火焰面半径 $R(t)$ 大约为容器半径 R 的 0.8 倍, 因此有

$$\frac{V_0}{A(t^*)} \approx 0.52 R_0 \quad (10)$$

对于柱形容器内的绝热燃烧过程, 形式上也可有

$$\frac{V_0}{A(t)} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L}{\pi \cdot d(t) \frac{7l(t)^2 + 6l(t) \cdot d(t) - d(t)^2}{6l(t)}} \quad (11)$$

式中: $l(t)$ 和 $d(t)$ 表示 t 时刻半椭球火焰面的半长轴和短轴; D 、 L 则分别是柱形容器的内直径和长度。

2.3 等容爆炸最大等效燃烧速度

浦以康^[5]根据大量的气相和气-固两相等容燃烧实验观察结果的分析发现: 无论是在球形或是柱形, 当等容燃烧由绝热第一阶段向非绝热第二阶段转换的

t^* 时刻, 压力历史 $p \sim t$ 曲线均会出现第一个拐点。换言之, 当 $t = t^*$ 时, 容器内压力上升速率 (dp/dt) 达到极大值, 此后, 由于壁面热损失, 绝热燃烧阶段结束。

Ellis^[11] 用不同长径比的玻璃柱形容器进行了等容燃烧火焰面发展的光学观察, 清晰地展示了火焰锋面演化的过程。从他的结果中, 可以得到火焰面从长椭球形变为平直形时的轴向传播距离 L_{eff} 和容器长径比的实验关系, 定量地表示于图 2。同时, 文献[5]中利用电离探头测量火焰面到达 L_{eff} 的时刻的实验结果表明, 这个时刻即为 t^* 。

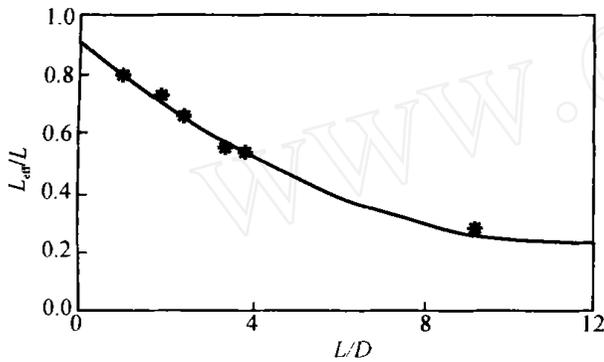


图 2 柱形容器中火焰面等效长度与容器长径比的经验关系

这样一来, 尽管无法确定等容燃烧绝热阶段中火焰面面积、位置等的演化关系, 但从实测的压力历史可以确定当 $t = t^*$, dp/dt 达到极大值时, 相应的 $p(t^*)$ 、 $R(t^*)$ 以及 L_{eff} 等。代入公式(9), 此时的等效燃烧速度达到最大值, 称为最大等效燃烧速度, 表示为

$$u_{eff,max} = \frac{p_0^{1/\gamma}}{\Delta p_{max}} \cdot \frac{V_0}{A(t^*)} \cdot \frac{1}{p(t^*)^{1/\gamma}} \cdot \left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} \quad (12)$$

式中: $\frac{V_0}{A(t^*)}$ 项对于球形容器可由公式(10)求出, 对于柱形容器, 有 $l(t^*) = L_{eff}$, $d(t^*) = D$, 可由式(11)求得。

式(12)中的 $u_{eff,max}$ 给出了最大等效燃烧速度与物料燃烧特性、实验容器体积和形状之间的关系。对于一给定球形或柱形实验容器和扬尘条件, 如果测定了扬尘湍流的衰变规律, 就可以根据点火延迟确定实验所对应的湍流强度, 从而应用 $u_{eff,max}$ 来作为表征物料燃烧特性的参数。它应具有较好的自恰性和较少依赖实验容器形状、尺寸。

3 最大等效燃烧速度参数的应用

把参数 $u_{eff,max}$ 应用到玉米粉、煤粉和甲烷 3 种物料在 4 种形状体积各异的容器内等容燃烧实验的典型

测量数据的分析中, 以考察 $u_{eff,max}$ 作为表征物料燃烧特性的可行性。为此对于上述 3 种物料在 4 种实验容器内的等容燃烧实验数据及相应的扬尘湍流衰减特性的测量数据进行了数据处理分析。在此基础上, 可以把式(12)右端的诸参数因子逐个计算出来, 从而把相应的 $u_{eff,max}$ 确定下来。为便于比较, 同时按式(1)计算出各种情况下对应的 K_{st} 值。结果分别示于图 3 及图 4。

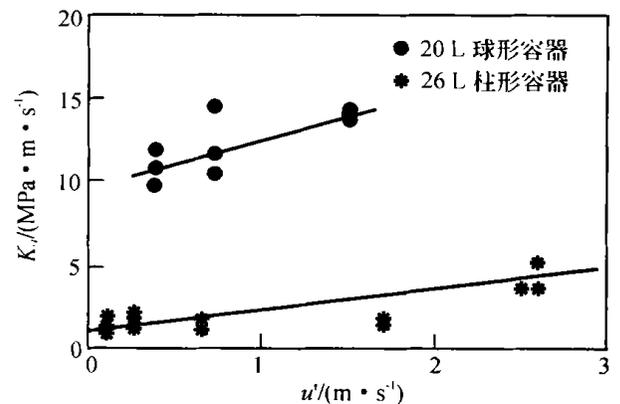
从 K_{st} 的结果(图 3), 可看到:

1) 当把湍流因素考虑进来, 即把扬尘湍流的强度作为横坐标来区分实验, 则 K_{st} 立刻表现出清晰的规律性。对于同一物料和容器, K_{st} 与湍流强度大致存在线性的函数关系。由此可见对于等容燃烧实验研究, 测定扬尘器湍流的重要性。

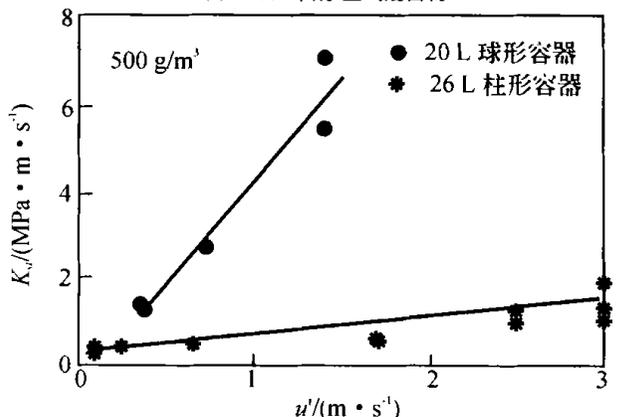
2) 从图 3 可清楚地看到, 使用不同形状实验容器来比较物料的 K_{st} 值是没有意义的, 即使容器的容积相同或接近。

从 $u_{eff,max}$ 的结果(图 4)可见:

1) 最大等效燃烧速度 ($u_{eff,max}$) 已不再强烈依赖实验容器的形状和大小; 对于球形和柱形形状差异很大以及 7 L 和 26 L 容积差异很大的工况, 所测定的同种物料的最大等效燃烧速度值是接近和可以比拟的。一



(a) 7.5% 甲烷-空气混合物



(b) 玉米粉-空气混合物

图 3 混合物的 K_{st} 值随扬尘诱导湍流强度的变化规律

定程度上具有表征物料燃烧特性的功能。

2) 最大等效燃烧速度($u_{eff,max}$)与扬尘湍流强度存在线性关系。这与小尺度湍流在气相燃烧中加热燃烧的线性规律是一致的^[12]。

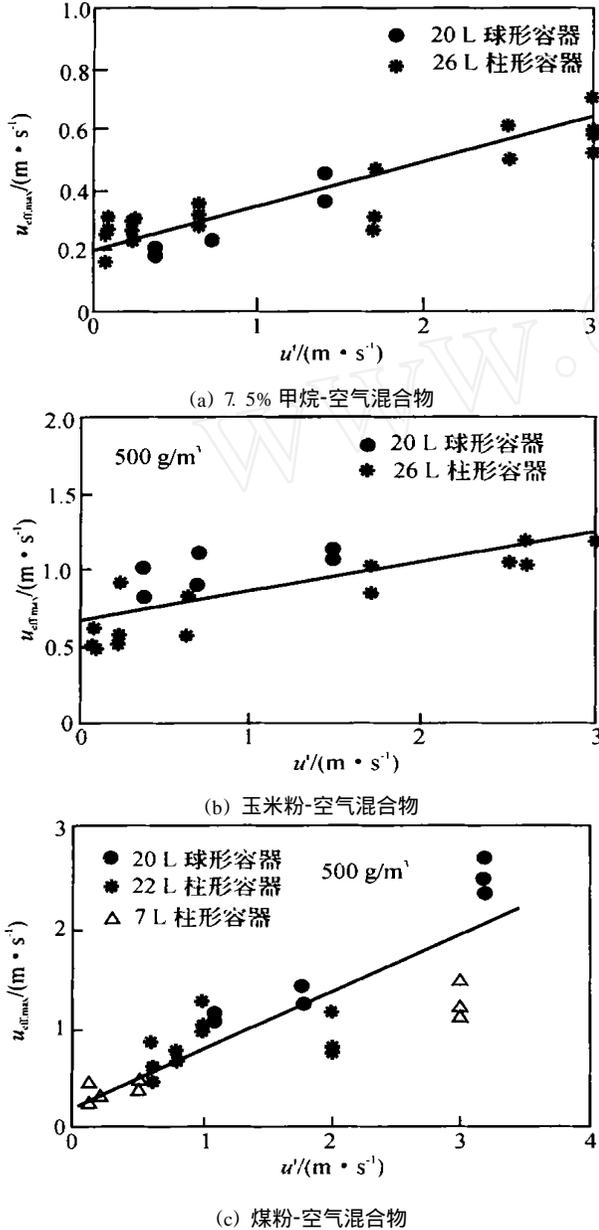


图4 混合物最大等效燃烧速度随扬尘诱导湍流强度的变化规律

4 结 语

本文介绍了粉尘等容燃烧的最大等效燃烧速度的

概念、导出和应用。在所提供的有限的考察范围内, 这个参数被证明具有表征物料燃烧特性的功能, 比工程界中习用的 K_{st} 方法效果有明显提高。最大等效燃烧速度作为物料燃烧特性, 其应用条件、范围和可能出现的问题, 很有必要在今后用更多的实验数据来考核, 这也是我们进一步需要做的工作。

参考文献:

- [1] Pu Y K, Podfilipiski J, Jarosinski J. Constant volume combustion of aluminum and cornstarch dust in microgravity[J]. *Combustion Science and Technology*, 1998, 135: 255- 267
- [2] Hartmann I, Cooper A R, Jacobson M. *Recent Studies on the Explosibilities of Cornstarch*[R]. US: Bureau of Mines RI 4725, 1950
- [3] Bartknecht W. *Explosion-Course Prevention and Protection*[M]. New York: Springer-Verlag, 1981, 4- 43
- [4] Nagy J, Verakis C. *Development and Control of Dust Explosions* [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1985, 9- 29
- [5] Pu Y K. *Fundamental Characteristics of Laminar and Turbulent Flames in Cornstarch Dust-air Mixture* [D]. Montreal: McGill University, 1987
- [6] Eckhoff R K. *Dust Explosions in the Process Industries*[M]. US: Butterworth-Heinemann Ltd 1991
- [7] Pu Y K, Jarosinski J, Tai C *et al*. The investigation of the effects of dispersion induced turbulence and its effects on dust explosion in closed vessels [R]. *22nd Symposium (international) on Combustion*. New York: The combustion Institute, 1988, 1777- 1787
- [8] Pu Y K, Li Y C, Kauffmann C W *et al*. The determination of turbulence parameters in closed explosion vessels [J]. *AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics*, 1989, 132: 107- 123
- [9] Pu Y K, Jarosinski J, Johnson V G *et al*. Turbulence effects on dust explosions in the 20 liter spherical vessels [R]. *23rd Symposium (international) on Combustion*. New York: The Combustion Institute, 1990, 843-849
- [10] Lee J H S, Pu Y K, Knystautas R. Influence of turbulence on closed volume explosion of dust-air mixtures [J]. *Arcivum Combustions*, 1986, 7(3/4): 279-297
- [11] Ellis O C. Flame movement in gaseous explosive mixtures[J]. *Fuel in Science and Practice*, 1928, 7: 502- 508
- [12] Chomiak J, Jarosinski J. Flame quenching by turbulence [J]. *Combustion and Flame*, 1982, 48: 241- 249