

# 微重力条件下粉尘燃烧机理研究\*

浦以康\*\* 严楠  
(中国科学院力学研究所)

## 摘 要

由落塔仓产生的微重力提供了一种独特环境,可克服粉尘云在地面实验时因受重力影响而产生的沉降现象,使封闭容器内的整个燃烧过程能维持粉尘云的稳定悬浮,保证粉尘燃烧机理的实验研究中粉尘的实际浓度与初始名义浓度相符,令粉尘浓度名符其实地成为一个独立参变量。在12m落塔提供的 $10^{-2}g$ ,1.2s微重力环境下对球形铝粉( $d_{50}=7\mu\text{m}$ )与球形玉米粉( $d_{50}=20\mu\text{m}$ )两种粉尘的等容燃烧特性进行了系统的实验研究。实验结果经与地面实验结果进行比较与分析后定量给出了粉尘浓度保持不变时,粉尘爆炸特性随扬尘湍流强度衰减而变化的规律以及在地面上重力沉降令粉尘浓度变小后对粉尘爆炸特性的影响。最后还讨论了实验容器过小而引起的部分实验数据失真的原因。

关键词: 微重力, 粉尘爆炸, 等容燃烧, 湍流

## Investigation on Dust Combustion Mechanism under Microgravity

Pu Yikang Yan Nan

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

### Abstract

For the studies of constant volume dust combustion, the microgravity environment can provide a steady suspension of dust cloud in the vessel during the combustion process. In this case, the real dust concentration during the combustion process will be kept constant and equal to the initial nominal dust concentration. The dust concentration can be treated as an independent variable of turbulent intensity. A 12m height drop tower of Lodz University of Poland was employed for providing the microgravity environment in the present study, in which there have been  $10^{-2}g$  and 1.2s of test time. In present study systematic experiments of constant volume dust combustion under

\* 原稿收到日期为1998-07-02, 修改稿收到日期为1998-10-22。

\* 国家自然科学基金资助项目。

\*\* 中国北京, 邮编100080。

both the microgravity and gravity environments were carried out. Aluminum ( $d_{50} = 7.2 \mu\text{m}$ ) and cornstarch ( $d_{50} = 20 \mu\text{m}$ ) dusts have been tested. The comparison and analysis of the experimental results between microgravity and gravity environments demonstrate quantitatively the effect of dispersion-induced turbulent intensity on dust explosion characteristic, while the dust concentration keeps constant. The effect of dust concentration reduction by gravity sedimentation on dust explosion characteristic is also examined. Finally, the distortion of experimental data resulting from too small a volume of the test vessel is discussed.

**Key words:** Microgravity, Dust explosion, Constant volume combustion, Turbulence

## 引 言

粉尘燃烧与爆炸机理的研究已有近百年历史,英、美、德、加等国都曾投入大量人力、财力,致力于解决粉体工业的安全生产与防护问题<sup>[1~11]</sup>。但迄今为止,因难度太大而进展缓慢。

粉尘燃烧机理研究遇到的实质性困难之一来自重力影响。与气相燃烧机理研究相比,粉尘燃烧研究还有一些其它困难。因此,粉尘燃烧实验大部分是在封闭容器中进行。

为了在封闭容器中形成燃烧实验研究所必需的粉尘悬浮状态,人们想出各种办法实现扬尘<sup>[2~4,5,7,10,12]</sup>。然而,具体的扬尘机构与所形成的粉尘悬浮状态千差万别,研究结果难有自恰、可比及定量规律性。为此作者针对柱形容器,设计与发展了一种扬尘机构,并对扬尘诱导的湍流随时间的衰减特性进行了测量<sup>[12,13]</sup>。结果表明,只有使用特殊设计的扬尘机构将粉尘经一定强度的小尺度射流扬至燃烧室内才能在有限空间内形成具有给定初始浓度和均匀分布的粉尘云悬浮。扬尘湍流的最佳强度、尺度与实验用的粉尘种类、粒度、浓度及燃烧室的形状和容积都有关,需由实验确定。实验还清楚揭示了粉尘悬浮态的瞬变本性及由此引发的粉尘燃烧研究存在 3 方面的固有困难,一是燃烧过程的非定常性,即燃烧过程中湍流强度与初始浓度两个重要参数均随时间变化;二是在重力状态下火焰层流状态的不可获得性,由于湍流是粉尘颗粒在重力条件下维持悬浮状态必不可少的动力条件,因此当湍流衰减到零时对应的初始粉尘浓度将降低到粉尘火焰无法点燃与传播的程度;三是湍流状态与实际悬浮粉尘浓度不可分割的耦合关系,从而在重力状态下难以区分粉尘浓度与湍流强度两个因素单独对粉尘燃烧的作用。

为此,人们开展了微重力环境下等容粉尘燃烧实验的研究<sup>[14~17]</sup>。因微重力下无需依靠湍流来维持粉尘悬浮状态,有可能获得粉尘层流状态的燃烧特性,并可单独研究湍流对粉尘燃烧过程的影响机制。近年来 Peraldi 等人<sup>[17]</sup>在飞机抛物线飞行提供的 15 s 微重力条件下对微细铝粉等容层流燃烧特性进行研究,发现了在微重力条件下扬尘湍流强度对最大爆炸升压速率影响不大的物理现象。但其实验数据的质量受实验方法限制,尚有待改进。

本文作者 1997 年 1 月与 8 月分别在波兰罗兹大学 12 m 落塔上(重力加速度为  $10^{-2} g$ ,持续实验时间为 1.2 s)对微重力条件下的粉尘燃烧机理进行研究。鉴于落塔能提供的微重力实验时间为 1.2 s,研究内容限于分解在地面有重力影响下引起粉尘浓度变化的两个相关参数(扬尘湍流与重力)成为两个独立因素,单独定量考察在粉尘浓度保持不变时扬尘湍流强度变化对粉尘爆炸特性的影响。由于落塔实验时间和搭载重量的限制,研究中使用了长径比( $L/D = 2.25$ )与容积( $V = 7 \text{ dm}^3$ )较小的封闭容器和微细球形铝粉( $7.2 \mu\text{m}$ )与玉米粉( $20 \mu\text{m}$ )。

## 1 实验装置与测量系统

实验容器是一座内径 $\phi 16\text{m}$ 、长 $\phi 36\text{m}$ 的 $7\text{dm}^3$ 圆柱形封闭燃烧室。扬尘系统由两套完全对称的扬尘管、电磁阀、粉尘室和高压贮气室组成,见图1。

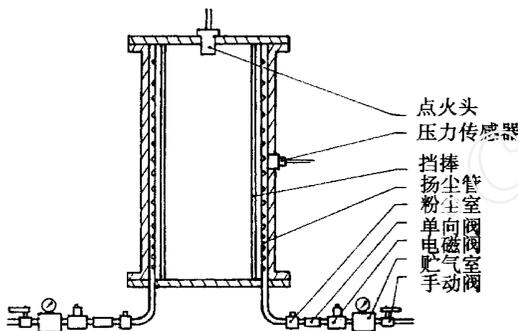


图1  $7\text{dm}^3$  爆炸罐的结构

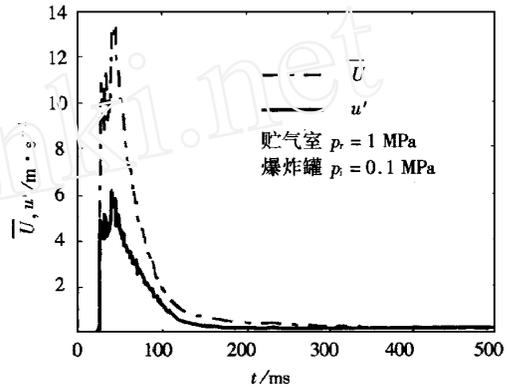


图2 扬尘诱导湍流的特性

压力测量用 FTSV 2100 应变式压力传感器与放大器,通过 A/D 板转换后将采集的数据输入计算机。

实验中标称的浓度是名义浓度,由放入粉尘室的粉尘重量和燃烧室的容积来确定。两相介质中的含氧量按扬尘后封闭燃烧室内空气的初始压力值推算。

实验中使用的铝粉与玉米粉在显微镜下观察均呈球形,其粒径  $d_{50}$  分别为  $7.2$  和  $20\ \mu\text{m}$ 。为了提高扬尘的均匀性和改善粉尘颗粒团聚情况,实验用铝粉及玉米粉中加入了  $0.5\%$  的流化剂(CAB-O-SL)。

点火源系安装在容器顶盖中心的单个化学点火头。对于铝粉其点火头装  $0.4\text{g}$  黑火药,对于玉米粉则装  $0.6\text{g}$  黑火药。使用顶端点火的原因是为了在重力条件下观测重力沉降作用对粉尘浓度的影响。

本研究使用热线风速仪在封闭容器中心处测量扬尘过程中的湍流瞬态速度随时间的变化规律,然后用系综平均法<sup>[13]</sup>求出瞬态扬尘湍流强度(RMS 速度)随时间的衰减规律。文献[12]的实验结果表明粉尘云的存在对扬尘湍流参数测定的影响为小量,暂可忽略,所以上述湍流参数的测量是在纯空气中进行的。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 扬尘湍流随时间的衰减特性

图2给出了 $7\text{dm}^3$ 封闭燃烧容器中心处扬尘系统引导的扬尘湍流的瞬态速度平均值( $\bar{U}$ )及湍流强度RMS速度( $u'$ )随时间变化规律的测量结果。因为粉尘爆炸实验一般采用点火延迟时间 $\Delta t_{\text{di}}$ (即扬尘用电磁阀启动时刻与粉尘云点火时刻之间的时间间隔)来表征点火时刻所对应的湍流强度,因此如用点火延迟时间替换图2中的横坐标,则图2还可定量给出点火延迟

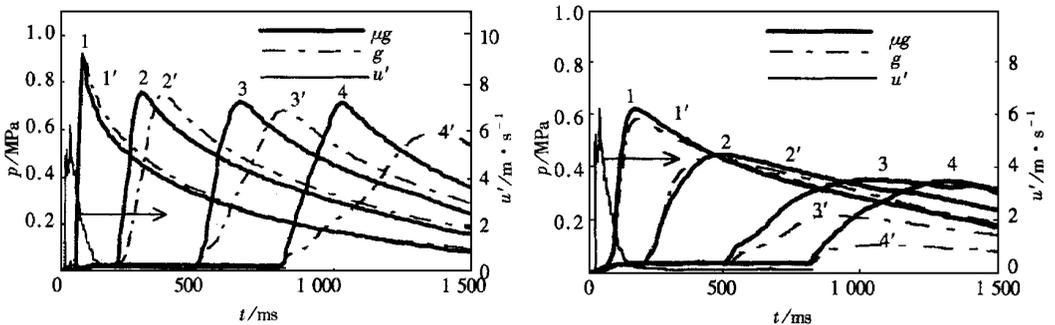
时间与扬尘湍流强度的对应关系。测量结果表明, 点火延迟时间为 50 m s 时对应的湍流强度最高(5 m/s), 从 50 m s 变至 150 m s 时所对应的湍流强度已由 5 m/s(峰值) 急骤下降至约 0.4 m/s, 随后从 150 m s 变至 500 m s 时所对应的湍流已缓慢降至可忽略的强度(0.15 m/s 左右)。

### 2.2 粉尘爆炸特性随扬尘湍流强度衰减的规律

在有重力作用的等容燃烧实验中, 因为湍流对实际参加燃烧过程的粉尘浓度的影响(即扬尘湍流强度高时对应的真实浓度也高) 与其对粉尘燃烧过程中传质与传热影响的非线性耦合, 故定量给出湍流对粉尘爆炸特性的影响尚有困难。只有去除了重力影响, 封闭燃烧室内的粉尘云才可能像气相混合物一样在燃烧过程中具有不变的浓度, 从而把粉尘浓度作为一个独立变量来处理。所以在微重力条件下的等容燃烧过程因粉尘浓度保持不变不再对爆炸特性产生影响, 此时粉尘爆炸特性随点火延迟时间的变化曲线单独反映出湍流强度对燃烧机制的影响。

#### 2.2.1 燃烧过程的压力-时间曲线随点火延迟时间(即湍流强度)的变化规律

图 3 示出在微重力和重力条件下粉尘名义浓度为 500 g/m<sup>3</sup> 的铝粉( $d_{50} = 7.2 \mu\text{m}$ ) 和玉米



(a) 7.2 μm, 500 g/m<sup>3</sup> 的铝粉

(b) 20 μm, 500 g/m<sup>3</sup> 的玉米粉

$p \sim t$ 曲线	1, 1'	2, 2'	3, 3'	4, 4'
$\Delta t_{di}/\text{m s}$	50	200	500	800
$u' / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	5	0.2	0.15	0.14

图 3 对应于不同  $\Delta t_{di}$  的粉尘等容燃烧压力-时间曲线

粉( $d_{50} = 20 \mu\text{m}$ ) 对应于不同点火延迟时间( $\Delta t_{di}$ ) 的粉尘爆炸过程  $p \sim t$  曲线, 图中还附上了湍流衰减特性。图 3 中在微重力条件下的实验结果与湍流衰减特性表明, 对于两种粉尘由于微重力实验条件保持了粉尘浓度不变, 从而使曲线 1 与 2 间明显的差异归于湍流强度在点火延迟时间从 50 m s 至 200 m s 范围内由 5 m/s 急骤衰减至 0.2 m/s 之故; 至于曲线 2, 3, 4 之间差异较小, 则是因在点火延迟时间大于 200 m s 后扬尘湍流已衰减到可忽略的强度, 并且变化量也不大之故。图 3 中在重力条件下的实验结果与湍流衰减特性则表明, 曲线 1' 与 2' 间的变化基本上与曲线 1 与 2 相似, 它们都主要是由湍流强度的急骤衰减而引起, 此时粉尘浓度因点火延迟时间小于 200 m s 时的残存扬尘湍流强度还能阻力粉尘云沉降而保持不变; 至于曲线 2', 3', 4' 之间的变化则主要应归于在重力影响下粉尘云沉降而令粉尘浓度下降之故, 此时残存湍流强度已降低至可忽略的程度。

#### 2.2.2 最大爆炸压力( $\Delta p_{max}$ ) 随点火延迟时间( $\Delta t_{di}$ ) 的变化规律

图 4 给出铝粉( $d_{50} = 7.2 \mu\text{m}$ ) 和玉米粉( $d_{50} = 20 \mu\text{m}$ ) 在重力与微重力条件下等容( $V = 7$

dm<sup>3</sup>) 燃烧过程的  $\Delta p_{\max}$  (即最大爆炸压力  $p_{\max}$  与点火时刻燃烧室内的初始压力  $p_0$  之差) 随  $\Delta t_{di}$  的变化规律, 图中附有扬尘湍流强度随时间的衰减规律。参考扬尘湍流强度的衰减特性, 可以  $\Delta t_{di} = 150 \text{ m s}$  为界, 将图 4a, 4b 中的 4 条  $\Delta p_{\max} \sim \Delta t_{di}$  曲线分成前后两个部分。曲线的前一部分处于点火时残存扬尘湍流强度由  $5 \text{ m/s}$  降至  $0.4 \text{ m/s}$  的范围内, 此时即使对于重力条件下的粉尘浓度也基本上保持不变, 所以重力条件下的  $\Delta p_{\max} \sim \Delta t_{di}$  曲线基本上与微重力条件下重合, 它们的  $\Delta p_{\max}$  值均只随湍流强度的衰减而明显减小, 其中铝粉降约 15%, 玉米粉则降约 30%。曲线的后一部分处于点火时残存扬尘湍流强度已衰减至可忽略的程度 ( $< 0.2 \text{ m/s}$ ), 此时微重力条件下因粉尘浓度保持不变而令  $\Delta p_{\max}$  值随  $\Delta t_{di}$  的增加也基本保持不变; 但在重力条件下则因粉尘浓度明显下降而导致  $\Delta p_{\max}$  值随  $\Delta t_{di}$  的增加 (至  $800 \text{ m s}$ ) 继续明显减小, 其中铝粉将再降约 15%, 玉米粉则再降约 50%。

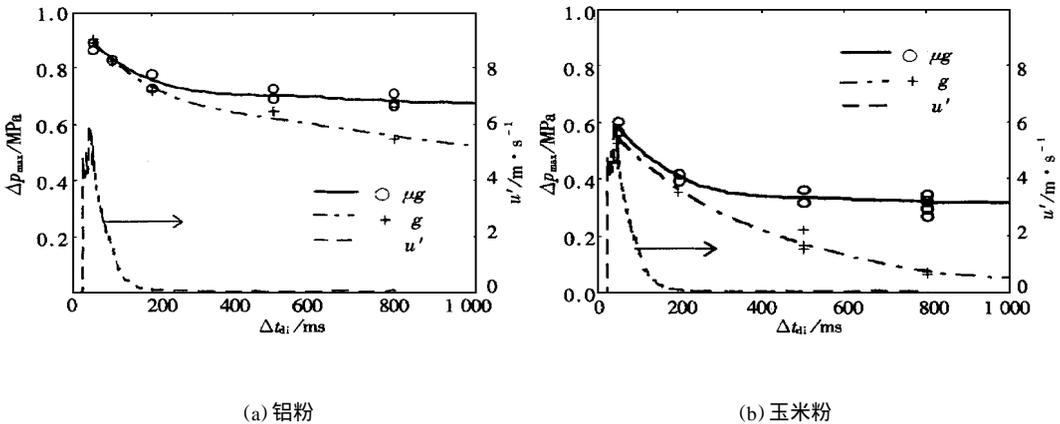


图 4 最大爆炸升压的对比

上述实验结果分别定量给出了扬尘湍流强度与粉尘浓度单独对最大爆炸压力值的影响。扬尘湍流强度由  $5 \text{ m/s}$  衰减至  $0.4 \text{ m/s}$  时可使铝粉的最大爆炸压力值降低 15%, 玉米粉降低 30%。重力条件下如无湍流强度支持, 粉尘云沉降令粉尘浓度下降时, 粒度  $7.2 \mu\text{m}$  的铝粉爆炸后的  $\Delta p_{\max}$  值比微重力条件下的对应值减少约 20%; 粒度  $20 \mu\text{m}$  的玉米粉减少约 80%。

以上实验结果表明了在地面有重力影响下的粉尘爆炸最大压力的实验值只有在有湍流存在的情况下其数值才没有失真, 仍有使用价值。无湍流存在时粉尘浓度因受重力沉降影响而变得面目全非, 此时的  $\Delta p_{\max}$  实验数值已无价值。

### 2.2.3 最大爆炸压力随时间上升速率 $((dp/dt)_{\max})$ 随点火延迟时间 ( $\Delta t_{di}$ ) 的变化规律

图 5 给出铝粉 ( $d_{50} = 7.2 \mu\text{m}$ ) 和玉米粉 ( $d_{50} = 20 \mu\text{m}$ ) 在重力与微重力条件下等容燃烧过程的  $(dp/dt)_{\max}$  随  $\Delta t_{di}$  的变化规律, 图中还附有扬尘湍流强度随时间的衰减规律。图 5a, 5b 中曲线的前半部分 ( $\Delta t_{di} = 50 \sim 150 \text{ m s}$ ) 的实验结果表明, 在重力与微重力条件下的扬尘湍流强度对  $(dp/dt)_{\max}$  值的影响规律基本相似, 湍流强度由  $5 \text{ m/s}$  减至  $0.2 \text{ m/s}$  时, 两种重力条件下的  $(dp/dt)_{\max}$  值均减小 6 倍左右。同时  $(dp/dt)_{\max}$  值随  $\Delta t_{di}$  迅速下降的规律与扬尘湍流强度随时间衰减呈指数状的关系相似, 由此可推断  $(dp/dt)_{\max}$  值与湍流强度之间呈线性关联。图 5a, 5b 中曲线后半部分 ( $\Delta t_{di} > 200 \text{ m s}$ ) 的实验结果表明, 当扬尘湍流强度衰减至可忽略程度后, 在重力条件下的  $(dp/dt)_{\max}$  值与微重力条件下一样基本上不再随  $\Delta t_{di}$  的增加而变化, 而且只比微重力条件下的最大值降低 10%。在重力条件下因粉尘云沉降令粉尘浓度降低对  $(dp/dt)_{\max}$  值的

影响远比前节中给出的对  $\Delta p_{\max}$  值的影响要小得多, 究其原因, 可认为  $(dp/dt)_{\max}$  实验数值偏高是由于实验容器容积偏小 ( $7 \text{ dm}^3$ ), 易受点火源诱导, 湍流局部加剧火焰发展之故。这种失真现象对于小容积的等容燃烧实验是不可避免的。为此,  $20 \text{ dm}^3$  容积曾被国际同行确定为容积的最低标准。本研究则因落塔载重量的限制才采用了小于标准容器的容积。

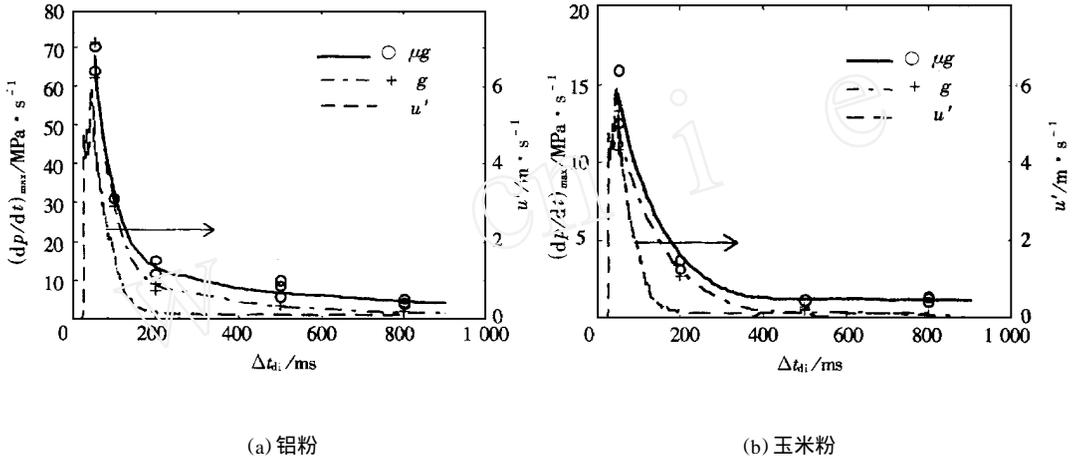


图 5 最大压力上升速率随点火延迟时间的变化

2.2.4 扬尘诱导湍流在等容燃烧过程中对粉尘燃烧速度的影响

粉尘燃烧速度的确定是粉尘燃烧机理研究的主要目的之一, 尽管目前还存在很大困难。因此, 本文中采用由等容燃烧理论推导出的最大等效燃烧速度 ( $S_{t,\max}$ ) 来表征粉尘燃烧速度。在等容燃烧过程中可以假定火焰阵面以等效燃烧速度在容器内均匀悬浮的粉尘云中传播, 并在燃烧过程为绝热、理想气体状态及中心点火的假设条件下, 推导出等效燃烧速度 ( $S_t$ ) 与等容燃烧过程的  $p$  和  $dp/dt$  值的关系式<sup>[18]</sup>

$$S_t = \frac{dp}{dt} \cdot \frac{1}{\Delta p_{\max}} \cdot L(t) \cdot \left( \frac{p_0}{p} \right)^{1/\gamma} \tag{1}$$

式中:  $L(t)$  为等效火焰阵面在传播  $t$  瞬间距点火中心的等效距离。对于球形容器,  $L(t)$  可简化地用半径  $r$  表征; 对于圆柱形容器,  $L(t)$  则可由实测的火焰传播过程导出经验公式后求得<sup>[19]</sup>。根据实验测得的  $p(t)$  与  $L(t)$  曲线, 可以求出在等容燃烧过程每个  $t$  瞬间的粉尘火焰等效燃烧速度。对应于  $(dp/dt)_{\max}$  值的瞬间, 其等效燃烧速度被称为最大等效燃烧速度 ( $S_{\max}$ ), 本文用该速度来表征粉尘的燃烧特性

$$S_{t,\max} = \left( \frac{dp}{dt} \right)_{\max} \cdot \frac{1}{\Delta p_{\max}} \cdot L_{\text{eff,max}} \cdot \left( \frac{p_0}{p_{(dp/dt)_{\max}}} \right)^{1/\gamma} \tag{2}$$

式中:  $L_{\text{eff,max}}$  为圆柱容器内火焰前沿在绝热条件下传播时离点火中心的最大距离<sup>[19]</sup>。对于本文使用的实验容器 ( $L/D = 2.25$ ),  $L_{\text{eff,max}}$  取为  $0.24 \text{ m}$ ;  $p_{(dp/dt)_{\max}}$  为对应于  $(dp/dt)_{\max}$  值瞬间的爆炸压力。

图 6 给出微重力和重力条件下按式 (2) 计算得出的铝粉与玉米粉的最大等效燃烧速度随扬尘湍流强度  $RM S$  速度的变化规律。如前所述, 在湍流强度由  $5 \text{ m/s}$  急骤衰减至  $0.2 \text{ m/s}$  时,  $S_{t,\max}$  也将与  $(dp/dt)_{\max}$  一样, 随  $u$  的减小呈线性下降。

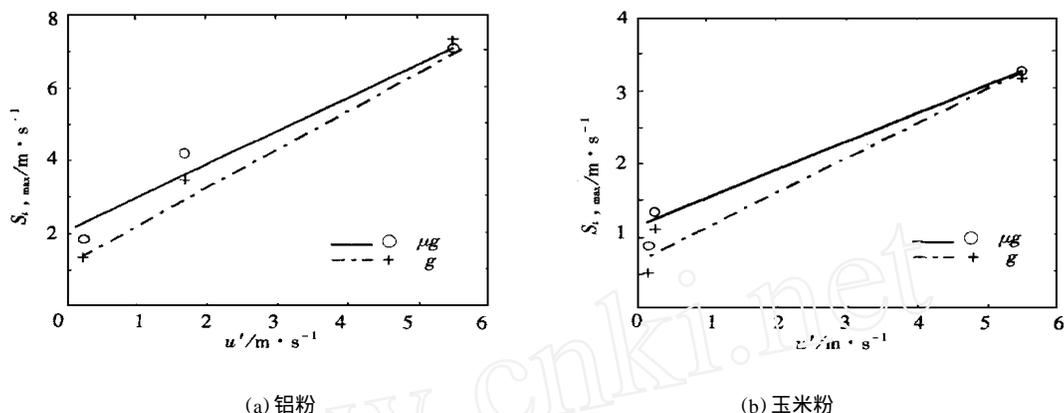


图6 等效燃烧速度与湍流强度的关系

### 3 结论

(1) 由微重力条件下湍流强度衰减后的粉尘最大爆炸压力不随点火延迟时间而变化的结果表明, 所用 12 m 落塔提供的微重力环境(重力加速度为  $10^{-2} g$ , 持续实验时间为 1.2 s)可以保证粉尘浓度的定常悬浮状态。利用微重力环境可以保证在粉尘浓度不变的条件下, 定量给出湍流单独对粉尘等容燃烧的影响。

(2) 微重力环境下的实验结果定量给出了湍流强度对粉尘爆炸特性的影响, 当扬尘湍流强度(RMS 速度  $u'$ ) 由 0.2 m/s 增至 5 m/s 时, 粒度  $7.2 \mu\text{m}$  铝粉的最大爆炸压力  $\Delta p_{\text{max}}$  增加 15%; 粒度  $20 \mu\text{m}$  的玉米粉则增加 30%。两种粉尘的  $(dp/dt)_{\text{max}}$  值都约增加 6 倍。

(3) 在扬尘湍流强度较高的范围内 ( $u' = 0.4 \sim 6 \text{ m/s}$ ), 重力条件下的等容燃烧特性 ( $\Delta p_{\text{max}}$ ,  $(dp/dt)_{\text{max}}$  及  $S_{t,\text{max}}$ ) 与微重力条件下相比区别不大, 这是因为在重力条件下有湍流支持粉尘云的悬浮, 阻止了粉尘浓度因重力沉降而变小的趋势。由此可推断在地面进行粉尘爆炸实验时必须采用扬尘机构才能产生并维持稳定粉尘浓度的空间悬浮, 而此时获得的粉尘爆炸特性的实验数据则限于湍流状态。

(4) 在扬尘湍流强度衰减到小于 0.2 m/s 后, 实验中重力条件下所获得的最大爆炸压力值 ( $\Delta p_{\text{max}}$ ) 比微重力条件下的对应值明显降低, 粒度  $7.2 \mu\text{m}$  的铝粉降低约 20%, 粒度  $20 \mu\text{m}$  的玉米粉则降低 80%。这充分反映了在地面实验中, 如无湍流支持粉尘云的悬浮, 重力沉降作用令粉尘浓度减小后对粉尘爆炸特性的严重影响。由此可得出结论, 在地面实验中无法获得正确的层流状态下的粉尘爆炸实验数据。

(5) 在扬尘湍流强度衰减小于 0.2 m/s 后, 实验结果还表明此时在重力条件下所获得的  $(dp/dt)_{\text{max}}$  比微重力条件下的减少程度不如  $\Delta p_{\text{max}}$  值明显, 对两种粉尘其影响都仅为 10%。据分析这可能与所采用的实验容器的容积过小, 使点火诱导湍流对  $(dp/dt)_{\text{max}}$  的影响不能排除之故。这一结果再次证实, 对于粉尘等容爆炸实验研究不宜采用小容积的容器, 国际同行规定的  $20 \text{ dm}^3$  可能是个合适的标准。

致谢 本研究得到了波兰罗兹大学工程热与制冷研究所的支持与合作, 在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Essenhigh R H. Combustion and Propagation in Coal Systems: A Review. 16th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh PA, 1977: 353~ 387
- 2 Richmond T K, Liebman L. A Physical of Coal Mine Explosion, Part II. 17th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh PA, 1977: 1257~ 1268
- 3 Nagy J, Verakis C. Development and Control of Dust Explosions. New York: Marcel Dekker Inc, 1985
- 4 Bartknecht W. Explosions—Course, Prevention and Protection. Translated by Burg H and Amord T. New York: Springer V, 1980
- 5 Eckhoff R K. Current Dust Explosion Research at the CM I Proceedings of International Conference in Fuel-Air Explosions. Montreal: McGill University, 1981: 4~ 6
- 6 Wolanski P. Fundamental Problems of Dust Explosions, and Gas and Dust Explosion Research in Poland. Fuel-Air Explosions, Edited by Lee J S and Guirao C M. Montreal: University of Waterloo Press, 1982
- 7 Kauffman C W, Srinath S R, Tezok F I, et al. Turbulence and Accelerating Dust Flame. 20th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh PA, 1984: 1701~ 1708
- 8 Bradley D, Habik S E, Jamel M A M. The Oxidation of Graphite Powder in Flame Reaction Zones. The First International Colloquium on Explosibility of Industrial Dust (ICED). Poland: Baranow, 1984: 8~ 10
- 9 Bradley D, Lee J H S. On the Mechanism of Propagation of Dust Flames. ICED. Poland: Baranow, 1984: 8~ 10
- 10 Jarosinski J, Lee J H S, Knystautas R, et al. Quenching Distance of Self-Propagation Dust-Air Flames. Proceedings of 21st Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh PA, 1986: 1917~ 1924
- 11 Proust C, Veysiere B. A New Experimental Apparatus for Studying the Propagation of Dust-Air Flames. The 11th International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDRS). Poland, 1987
- 12 Pu Y K. Fundamental Characteristics of Laminar and Turbulent Flames in Cornstarch Dust-Air Mixture [Ph. D. thesis]. Department of Mechanical Engineering, McGill University, 1988
- 13 Pu Y K, Li Y C, Kauffman C W, et al. The Determination of Turbulence Parameters in Closed Explosion Vessels. AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics, 1989, 132: 107~ 123
- 14 Ballal D R. Flame Propagation Through Dust Clouds of Carbon, Coal, Aluminum and Magnesium in the Environment of Zero Gravity. Proceeding Royal Society of London, 1983, A 385: 21~ 51
- 15 Ballal D R. Further Studies on the Ignition and Flame Quenching of Quiescent Dust Clouds. Proceeding Royal Society of London, 1983, A 385: 1~ 19
- 16 Gleras M, Klemens R, Wojcicki S. Ignition and Combustion of Coal Particles at Zero Gravity. Acta Astronautica, 1985, 12(7/8)
- 17 Peraldi O, Lee J H, Knystautas R, et al. Constant Volume Combustion of Aluminum Dust Suspensions in Microgravity. The 14th ICDES. Portugal: University of Coimbra, 1992: 573~ 579
- 18 Lee J H S, Pu Y K, Knystautas R. Influence of Turbulence on Closed Volume Explosion of Dust-Air Mixtures. Arcivum Combustions, 1986, 7(3/4): 279~ 297
- 19 Ellis O C. Fuel in Science and Practice, 1928, 7: 502~ 508