

文章编号: 1001-1455(2009)04-0429-05

镁粉尘云最低着火温度的实验测试*

钟英鹏, 徐冬, 李刚, 苑春苗, 陈宝智

(东北大学火灾爆炸防治实验室, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 采用标准装置 Godbert-Greenwald 恒温炉测试了不同条件下镁粉尘云最低着火温度。实验测试结果显示: D_{50} 为 6、47、104、173 μm 时镁粉尘云最低着火温度分别为 480、520、620、 >700 $^{\circ}\text{C}$; 选取 D_{50} 为 6 μm 的镁粉, 在分散压力恒定为 0.1 MPa 时, 镁粉浓度由 424 g/m^3 变化到 5 085 g/m^3 , 粉尘云最低着火温度由 600 $^{\circ}\text{C}$ 降低到 480 $^{\circ}\text{C}$; 而粉尘质量恒定为 0.3 g 时, 分散压力从 0.1 MPa 增加到 0.2 MPa, 粉尘云最低着火温度由 540 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 580 $^{\circ}\text{C}$ 。还分析了镁粉粒径、浓度及分散压力对粉尘云最低着火温度的影响。

关键词: 爆炸力学; 粉尘云最低着火温度; G-G 恒温炉; 镁粉; 粒径; 浓度; 分散压力

中图分类号: O381; X932

国标学科代码: 130 · 3510

文献标志码: A

金属镁化学性质比较活泼, 容易与氧化剂发生剧烈的氧化还原反应。在镁粉加工、输送和储存过程中, 镁粉经常处于悬浮的粉尘云状态, 此时, 如果粉尘云遇到温度足够高的热源, 就可能被点着, 从而引发火灾爆炸^[1]。

粉尘云最低着火温度(minimum ignition temperature of dust cloud, MITC)是粉尘爆炸中的一个非常重要的特征参数, 是对粉尘爆炸敏感度进行相对评价的重要指标, 也是进行防爆工艺设计和防爆设备选型的重要依据。有效点火源是粉尘爆炸发生的必备条件之一, 镁粉生产场所选择防爆电气设备, 可有效避免电气火花和设备过热成为粉尘爆炸的着火源。测试镁粉尘云最低着火温度的目的是为了正确选择防爆电气设备, 同时可用来评价镁粉着火爆炸危险性, 为保证安全生产提供实验依据^[2]。

镁粉尘云最低着火温度研究的数据都缺乏对测试镁粉粒径分布、活性、粉尘形状等物理特性及测试条件的介绍, 所以数据的比较性价值不大^[3-5]。M. Nifuku 等^[6-7]对镁粉尘云最低着火温度进行了较为系统的测试, 按照日本标准 JIS Z 8818-2002^[8]在改进的 Hartman 管装置测试。由于不同标准中测试设备、判定标准等方面的差异均可能使最终的测试结果存在偏差^[9], 因此, 关于镁粉尘云最低着火温度的测试结果有待于进一步研究和讨论, 如与国际标准 ISO 6184-1-1995^[10]和 IEC1241-2-1-1994^[11]下测出相关结果的分析比较。本文中通过镁粉尘云最低着火温度的实验测试, 分析镁粉尘云最低着火温度的影响因素, 试图为不同粒径镁粉生产工艺防爆设计及防爆设备选型提供实验依据, 指导安全生产。

1 实验样品分析

实验所用镁粉为唐山威豪雾化镁粉, 纯度为约 99.7%, 具有活性镁含量高、松装密度大、球形率高、流动性好等优点, 镁粉规格有 4 种: $>1\ 000$ 目、200~325 目、100~200 目、50~100 目。粒径分析图如图 1, 镁粉粒径分布及物理特性参数见表 1。其中, I_c 为累积分布, I_d 为微分分布, D 为粒径, D_3 、 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 、 D_{97} 为激光粒径分布, D_{50} 为中位径, r 为比表面积, τ_{Mg} 为活性镁质量分数, ρ_a 为松装密度。

表 1 镁粉粒径分布及物理特性参数

Table 1 Particle size distribution and physical parameters of magnesium powder

规格/目	$D/\mu\text{m}$	$D_3/\mu\text{m}$	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	$D_{97}/\mu\text{m}$	$r/(\text{m}^2/\text{cm}^3)$	τ_{Mg}	$\rho_a/(\text{g}/\text{cm}^3)$
>1000	<10	2	3	6	14	18	0.952	0.963 4	0.902
200~325	43~74	18	26	47	76	94	0.145	0.986 2	0.888
100~200	74~147	62	72	104	166	215	0.064	0.988 5	0.952
50~100	147~288	73	93	173	306	394	0.038	0.990 2	

* 收稿日期: 2008-01-28; 修回日期: 2008-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(50674023)

作者简介: 钟英鹏(1982—), 男, 硕士研究生。

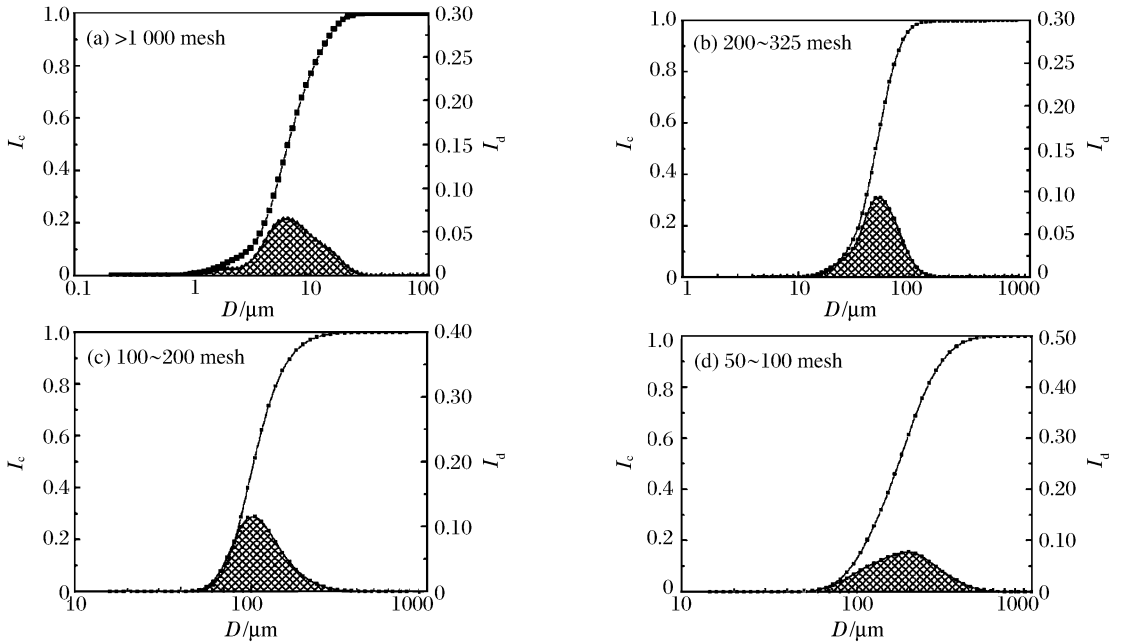


图1 镁粉粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of magnesium powder

2 实验装置、原理及着火判据

2.1 实验装置

国际上通用的粉尘云着火温度的测试装置有2种,1种是水平炉管BAM恒温炉,另1种是垂直炉管Godbert-Greenwald(G-G)恒温炉。不同的测试装置测试的粉尘云最低着火温度存在差异。W. Hensel^[12]推荐BAM恒温炉为粉尘云最低着火温度的最佳测试装置。王海福等^[13]则指出,对于BAM恒温炉,由于炉管水平放置,实验中未燃粉尘颗粒在炉管底部沉积,受热后会产生比粉尘云更易着火的发烟气体,并以发烟气体延迟着火判定粉尘云点火,因此,BAM炉所测粉尘最低着火温度略低于G-G炉所测结果。而国际标准IEC1241-2-1-1994^[11]推荐G-G恒温炉为测试粉尘云最低着火温度标准测试装置。

本实验中采用G-G恒温炉测试装置,该装置主要性能指标:恒温范围为0~700℃,控制精度为±1℃,炉管容积为236 mL,贮气压力为0.01~1 MPa。

2.2 实验原理及着火判据

粉尘云最低着火温度测试原理和判据:测试时首先将炉内壁控制在某一恒定温度,然后利用储气室高压气体将粉尘喷入炉管内,从炉管下部观察是否有火焰喷出。通过调整分散压力及粉尘浓度,能使粉尘着火的最低炉内壁温度称为粉尘云最低着火温度。若火焰喷出滞后时间超过3 s,则判定为未着火,如果只有火星无火焰,则认为没有着火。

3 实验结果及分析

粉尘云着火温度不仅与粉尘种类、粉生物化性能有关,还与测试条件有关,如粉尘粒径、浓度、分散压力及环境湿度等。本实验的目的主要是研究粉尘粒径、浓度、分散压力对镁粉尘云最低着火温度的影响。

3.1 镁粉粒径的影响

对中位径为6、47、104和173 μm等4种不同粒径分布镁粉进行粉尘云最低着火温度实验测试,测试条件及结果见表2,镁粉粒径对粉尘云最低着火温度影响关系见图2。其中, t_e 为环境温度, h_e 为环境湿度, $t_{i,\min}$ 为粉尘云最低着火温度。

由实验测试结果, $D_{50}=6、47$ 和 $104 \mu\text{m}$ 镁粉尘云最低着火温度分别为480、520和620℃,在

表2 不同粒径镁粉最低着火温度测试结果

Table 2 Minimum ignition temperature of magnesium dust cloud with different particle size

规格/目	$D_{50}/\mu\text{m}$	$t_e/^\circ\text{C}$	h_e	$t_{i,\min}/^\circ\text{C}$
>1 000	6	18	0.60	480
200~325	47	17	0.47	520
100~200	104	18	0.50	620
50~100	173	19	0.55	>700

低于镁粉熔点 650 °C 时发生了燃烧,这是由于细镁粉在高温环境下和空气中的氧气发生反应,且反应释放的热量使得镁粉的温度增加直至熔化成蒸气被点燃。由于测试装置的最大测量范围为 700 °C,而 $D_{50}=173 \mu\text{m}$ 镁粉在 700 °C 时没有被点燃,只能得出其粉尘云最低着火温度 $>700 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

由图 2 可知,一般情况下,随着镁粉粒径的减小,粉尘云最低着火温度逐渐降低。这是因为镁粉尘云颗粒燃烧是在颗粒表面进行的,当粒径减小,粒子的比表面积增大时,在浓度一定情况下,与氧气接触面增大,燃烧反应剧烈完全,使系统释放的热量大于散失的热量,容易着火,使粉尘云最低着火温度降低。但当粒径细到一定程度时,由于较细镁粉颗粒之间的静电吸附作用,分散性差,易形成粉尘团聚现象,使粉尘云最低着火温度减小的程度比较小。

A. B. Ryzhikr^[3]用实验得出在标准状态下镁粉的最低着火温度为约 518 °C,但没有说明具体粒度分布。R. K. Eckhoff^[4]对中位径为 240 μm 的镁粉利用 G-G 炉所测的粉尘云最低着火温度为 760 °C。而本文中实验得到的不同粒径镁粉尘云最低着火温度与 M. Nifuku 等^[6-7]的结果相差不大,见图 3。B. I. Khaikin 等^[5]介绍了 Cassel 等对 15、55 μm 镁粉颗粒粉尘云最低着火温度测试,测试结果为 650、880 °C,其测量结果比本文中大,造成这种结果的主要原因是由于不同的测试装置粉尘云在加热区的滞留时间、粉尘云的浓度存在着差异^[14]。

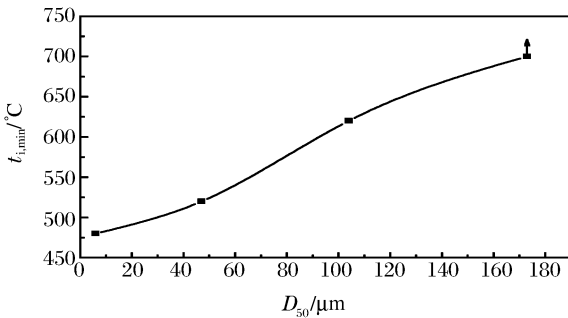


图 2 镁粉粒径对粉尘云最低着火温度的影响

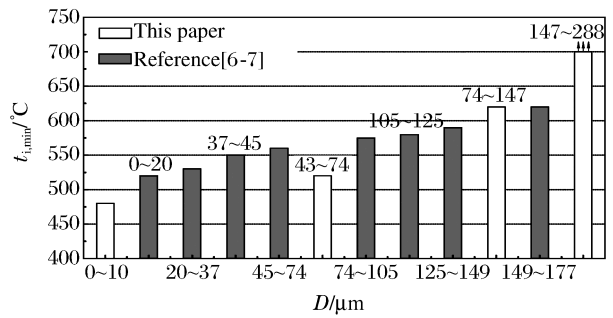


图 3 粉尘云最低着火温度测试数据的比较

Fig. 2 Influence of particle size on minimum ignition temperature of magnesium dust cloud

Fig. 3 Comparison of test data on minimum ignition temperature of magnesium dust cloud

3.2 镁粉浓度的影响

不同浓度下镁粉尘云最低着火温度的测试条件及结果见表 3,镁粉浓度对粉尘云最低着火温度的影响见图 4。其中, m 为粉尘质量, ρ 为粉尘密度。镁粉浓度是由镁粉质量与炉管容积 (226 mL) 之比计算得来的,实验测试镁粉 $D_{50}=6 \mu\text{m}$,分散气压 $p_d=0.1 \text{ MPa}$ 。

由表 3 可知,对于 D_{50} 为 6 μm 镁粉,其浓度由 424 g/m^3 变化到 5 085 g/m^3 ,粉尘云最低着火温度由 600 °C 降低到 480 °C。而由图 4 可知,随着镁粉浓度的增大,粉尘云最低着火温度逐渐降低,当浓度增大到一定值时,粉尘云最低着火温度不再降低。这是因为随着单位体积镁粉浓度的增加,反应释放的热量也增加,则火焰能自行传播,且由于镁粉颗粒之间热辐射的影响,火焰传播的速度和厚度随镁粉浓度的增加而增加。但当浓度增大到一定值后,由于分子的传输过程在火焰传播中占主导地位,而颗粒辐射时的影响在火焰传播中不占主导地位,使火焰特性参数与浓度的关系减小。即当火焰厚度增加到一定值时,颗粒辐射的影响较小或几乎不影响,辐射的影响达到饱和,浓度再增加,粉尘云最低着火温度变化不大。通过对实验的观察,还发现随着镁粉浓度的增加,镁粉尘云燃烧反应更剧烈,这是因为与一般粉尘相比,镁粉还能与空气中的氮气发生燃烧反应,增加了燃烧的剧烈程度。

表 3 不同浓度镁粉尘云最低着火温度测试结果

Table 3 Minimum ignition temperature of magnesium dust cloud with different concentration

m/g	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$t_e/^\circ\text{C}$	h_e	$t_{i,\text{min}}/^\circ\text{C}$
0.1	0.424	16	0.52	600
0.3	1.271	16	0.52	540
0.5	2.119	16	0.52	520
0.8	3.390	16	0.50	480
1.2	5.085	19	0.61	480

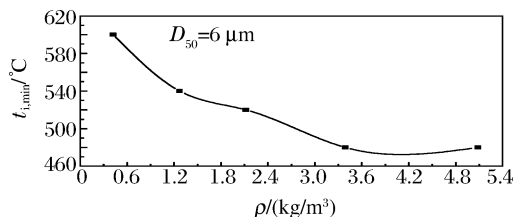


图 4 镁粉浓度对粉尘云最低着火温度的影响

Fig. 4 Influence of concentration on minimum ignition temperature of magnesium dust cloud

3.3 分散压力的影响

不同分散压力下镁粉尘云最低着火温度的测试条件及结果见表4,分散压力对粉尘云最低着火温度的影响见图5,实验测试镁粉 $D_{50}=6\ \mu\text{m}$,粉尘质量 $m=0.3\ \text{g}$ 。

由表4可知,对于 $D_{50}=6\ \mu\text{m}$ 镁粉,分散压力从0.1 MPa增加到0.2 MPa,粉尘云最低着火温度由540 °C升高到580 °C,只升高了40 °C。而由图5可知,随着分散压力的增加,粉尘云最低着火温度升高,当分散压力增大到一定值时,粉尘云最低着火温度趋于不变,但当分散压力从0.1 MPa增加到0.2 MPa,粉尘云最低着火温度只升高了40 °C,分散压力的改变,对粉尘云最低着火温度影响并不是很大。这是因为一方面随着分散压力的增大,会加速镁粉粒子的沉降速度,使粒子在炉管内滞留时间变短,燃烧反应不完全,同时分散压力的增大还会带进更多的冷空气,使系统热量散失多,从而使粉尘云最低着火温度随分散压力的增大而升高;另一方面当分散压力增大时,会使更多的氧气进入炉管内,在一定程度上有利于镁粉的燃烧,使镁粉尘云最低着火温度有降低的可能。两方面影响因素共同控制,造成了镁粉尘云最低着火温度随分散压力的增加而升高,但上升的幅度不是很大。

表4 不同分散压力下镁粉尘云最低着火温度测试结果

Table 4 Minimum ignition temperature of magnesium dust cloud with different diffusing pressure

p_d/MPa	$t_e/^\circ\text{C}$	h_e	$t_{i,\text{min}}/^\circ\text{C}$
0.10	16	0.52	540
0.12	17	0.46	560
0.15	16	0.52	580
0.20	16	0.47	580

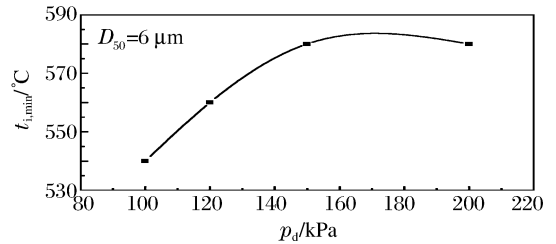


图5 分散压力对粉尘云最低着火温度的影响

Fig. 5 Influence of diffusing pressure on minimum ignition temperature of magnesium dust cloud

4 结论

(1)实验测试 $D_{50}=6, 47, 104, 173\ \mu\text{m}$ 镁粉,粉尘云最低着火温度分别为480、520、620和 $>700\ ^\circ\text{C}$ 。表明镁粉粒径越小,粉尘云最低着火温度越低。而在通常情况下,防爆电气设备最大允许热表面温度不应超过粉尘云最低着火温度的 $2/3$ ^[4],可知不同粒径镁粉对于防爆电气设备热表面允许出现的最高温度有不同的要求,即生产 $D_{50}=6, 47, 104\ \mu\text{m}$ 镁粉产品时防爆电气设备最大允许热表面温度应控制在320、346和413 °C以下。(2)对 $D_{50}=6\ \mu\text{m}$ 镁粉,当分散气压在0.1 MPa时,镁粉浓度由424 g/m^3 变化到5 085 g/m^3 ,粉尘云最低着火温度由600 °C降低到480 °C。表明浓度增大,粉尘云最低着火温度降低,但当浓度增大到一定值时,粉尘云最低着火温度随浓度的增加变化不大。(3)对 $D_{50}=6\ \mu\text{m}$ 镁粉,当粉尘质量为0.3 g时,分散压力从0.1 MPa增加到0.2 MPa,粉尘云最低着火温度由540 °C升高到580 °C,只升高了40 °C。表明镁粉尘云最低着火温度随分散压力的增加而升高,但上升的幅度不大。

参考文献:

- [1] 刘宝兰. 镁粉尘爆炸的原因及其防止[J]. 轻金属, 2002(10):53-56.
LIU Bao-lan. The cause and protection of magnesium powder explosion[J]. Light Metal, 2002, (10):53-56.
- [2] 李刚, 刘晓燕, 钟圣俊, 等. 粮食伴生粉尘最低着火温度的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(2): 145-147.
LI Gang, LIU Xiao-yan, ZHONG Sheng-jun, et al. Experimental investigation on minimum ignition temperature of dust concomitant with grain[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005, 26(2):145-147.
- [3] Ryzhik A B. Ignition of suspensions of aluminum-magnesium alloy powders in nitrogen-oxygen media[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1978, 14(2):258-260.
- [4] Eckhoff R K. Dust explosion prevention in process industries[M]. 2nd ed. Butterworth Heinemann; Elsevier, 1991:534-586.
- [5] Khaikin B I, Blosshenko V N, Merzhanov A G. On the ignition of metal particles[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1970, 6(4):412-422.
- [6] Nifuku M, Koyanaka S, Ohya H, et al. Ignitability characteristics of aluminum and magnesium dusts relating to the shredding processes of industrial wastes[C]// Amyotte P. Proceedings of Sixth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, Vol. I. Halifax, NS, Canada: Dalhousie Universi-

- ty, 2006:77-86.
- [7] Nifuku M, Tsujitab H, Fujino K, et al. Ignitability characteristics of aluminum and magnesium dusts that are generated during the shredding of post-consumer wastes[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2007,20(4-6):322-329.
- [8] JIS Z 8818-2002, Test method for minimum explosible concentration of combustible dusts[S]. Tokyo, Japan: Japanese Industrial Standard, 2002.
- [9] Mintz K J. Problems in experimental measurements of dust explosions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1995(42):177-186.
- [10] ISO 6184-1-1985, Explosion protection systems. Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air[S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1985.
- [11] IEC 1241-2-1-1994, Methods for determining the minimum ignition temperatures of dust. Method B: Dust cloud in a furnace at a constant temperature[S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 1994.
- [12] Hensel W. Methods for the determination of the ignition temperature of dust/air mixtures at hot surfaces-a comparison[R]. Berlin, Germany: Federal Institute for Materials Research and Testing, 1984:86-88.
- [13] 王海福, 郑珊, 冯顺山, 等. 粉尘云最小点火温度测试实验系统设计[J]. *中国安全科学学报*, 2001,11(6):52-54. WANG Hai-fu, ZHENG Shan, FENG Shun-shan, et al. Design of the experiment system for the determination of minimum ignition temperature of dust clouds[J]. *China Safety Science Journal*, 2001,11(6):52-54.
- [14] Krause U, Wappler M, Radzewitz S, et al. On the minimum ignition temperature of dust clouds[C]// Amyotte P. *Proceedings of Sixth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosion*, Vol. I. Halifax, NS, Canada: Dalhousie University, 2006:68-76.

Measurement of minimum ignition temperature for magnesium dust cloud

ZHONG Ying-peng, XU Dong, LI Gang*, YUAN Chun-miao, CHEN Bao-zhi

(College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University,

Shenyang 110004, Liaoning, China)

Abstract: A standard Godbert-Greenwald furnace apparatus was used to measure minimum ignition temperatures of magnesium dust cloud under different conditions. Experimental results reveal that corresponding minimum ignition temperatures of dust cloud for four magnesium specimens with the medium grain diameters D50 of 6, 47, 104 and 173 μm are 480, 520, 620, $>700^\circ\text{C}$, respectively. Take the magnesium powder with the grain diameter of 6 μm for example, under the constant diffusing pressure of 0.1 MPa, the minimum ignition temperature of the magnesium dust cloud decreases from 600 $^\circ\text{C}$ to 480 $^\circ\text{C}$ corresponding to the dust concentration changing from 424 g/m^3 to 5 085 g/m^3 ; and for the constant dust mass of 0.3 g, when the diffusing pressure increase from 0.1 MPa to 0.2 MPa, the minimum ignition temperature of this magnesium dust cloud increases from 540 $^\circ\text{C}$ to 580 $^\circ\text{C}$. And effects of grain diameter distribution, concentration and diffusing pressure on the minimum ignition temperature of magnesium dust cloud were analyzed by the above experimental results. It is helpful in the explosion-proof equipment design for the magnesium powder production.

Key words: mechanics of explosion; minimum ignition temperature of dust cloud; Godbert-Greenwald setup; magnesium powder; particle size; concentration; diffusing pressure

* Corresponding author: LI Gang

E-mail address: lig@smm.neu.edu.cn

(责任编辑 丁峰)