

铝颗粒在激波后气流作用下的点火

洪 滔

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 对铝颗粒在激波后气流作用下的点火进行了理论分析, 用三个不同的判据得到铝颗粒点火的延时曲线并与实验进行了比较。理论分析结果表明, 铝颗粒可以在远低于 Al_2O_3 的熔点被点火, 甚至只要在铝的熔点时就被点火。提出的铝颗粒在温度达到铝的熔点且铝完全熔化时被点火这个判据在一些条件下与实验符合很好。如果铝颗粒表面的氧化层较厚, 则点火温度为氧化铝的熔点。

关键词: 铝颗粒; 激波点火; 点火延时

* 中图分类号: O643.2; TQ038.1 文献标识码: A

1 引 言

铝粉作为炸药和推进剂的添加剂被广泛使用, 同时由于铝粉尘在空气中容易产生爆轰, 因此对铝颗粒点火进行理论研究是非常重要的。铝及其氧化物具有独特的物理性质。铝颗粒表面形成十分稳定的氧化物 Al_2O_3 , 在常温下它保护铝颗粒不被继续氧化, 而且它的熔点比铝高。因此铝颗粒的点火与其他粉尘的点火相比有独特的性质。

国内外对铝颗粒的点火研究较多, 如对铝颗粒作为燃料添加剂的点火与燃烧实验^[1-2], 铝颗粒的激波点火实验^[3-4]等。铝颗粒在含有氧气的高温气体中由于热传导和表面的化学反应导致颗粒温度升高而点火, 因此铝颗粒的点火过程包括了对流热传导、化学反应及热辐射等。本文中, 我们对铝颗粒在激波后气流作用下被加速、升温直至点火的整个过程进行了分析, 得到了铝颗粒在激波后气流作用下的点火延时与实验比较, 并提出了一个点火判据。

2 铝颗粒点火模型

假定铝颗粒是球形的。当 Biot 数 $Bi = hr_p / (3k_p) \ll 1$ 时, 粒子是等温的。粒子的能量守恒方程为

$$\rho_p V_p c_p dT_p / dt = hA_s (T_g - T_p) + A_s q_r k_s - A_s \epsilon_p \sigma (T_p^4 - T_o^4) \quad (1)$$

式中: 右边的第一项为对流热传导项, 第二项为粒子的表面反应项, 第三项为粒子的辐射项; k_p 为热导率; T_g 、 T_p 分别为气体和粒子的温度, T_o 为周围环境温度, V_p 、 A_s 分别为粒子的体积和表面积, c_p 是铝的比热, ρ_g 、 ρ_p 分别为气体和粒子的密度, h 为对流热传导系数, q_r 为单位质量铝化学反应释放出的化学能, k_s 为表面反应系数, σ 为 Stefan-Boltzman 常数, $\sigma = 56.7 \text{ nW} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, ϵ_p 为粒子发射系数。

2.1 粒子的运动和对流热传导

粒子在激波后的气流作用下被加速。粒子的运动方程为

$$dv_p / dt = (3\rho_g / (8\rho_p r_p)) C_D (v_g - v_p) |v_g - v_p| \quad (2)$$

式中: v_p 是粒子速度, C_D 是粒子由于气流而受到的拖曳力的系数, 它是粒子雷诺数 Re_p 和马赫数 Ma_p 的函数。细小粒子的拖曳系数 C_D 由下式表示^[5]

* 收稿日期: 2001-01-02

基金项目: 中国工程物理研究院基金项目(20000109)

作者简介: 洪滔(1965—), 男, 博士, 副研究员。

$$C_D = C_{D,C} + (C_{D,FM} - C_{D,C})e^{-A Re_p^N} \quad (3)$$

式中: $C_{D,C}$ 、 $C_{D,FM}$ 、 A 、 N 是 Ma_p 的函数, $Re_p = 2r_p |v_g - v_p| \rho_g / \mu_g$, $Ma_p = v_p / c_g$, c_g 是激波后气流中的声速。对流热传导系数 $h = Nu k_g / (2r_p)$, Nu 是 Nusselt 数, 表达式为^[6]

$$Nu = 2 \frac{e^{Ma_p}}{1 + 17Ma_p / Re_p} + 0.459 Pr^{0.33} Re^{0.55} \left[\frac{2}{3} \left[1 + \frac{1}{2} e^{-17Ma_p / Re_p} \right] \right] \quad (4)$$

高温下气体的粘性系数 μ_g 和热传导系数 k_g 根据气体的分子理论得到公式计算^[7]。当 $Ma_p > 1$ 时, 在铝颗粒前会形成脱体激波, 这里用正激波关系计算脱体激波后气体的温度、压力及速度。

2.2 表面反应项

假定粒子的表面反应项与压力无关, 表面反应系数表达式为^[8]

$$k_s = A_1 \exp(-E_a / (RT_p)) \quad (5)$$

式中: A_1 是常数, E_a 是活化能, R 是普适气体常数。其中 $A_1 = 200 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $E_a = 95.395 \text{ kJ/mol}$ 。

2.3 点火判据

铝颗粒在常温下表面上形成稳定、致密的 Al_2O_3 薄膜, 保护铝不再继续被氧化。铝的熔点为 933K, Al_2O_3 的熔点为 2328K。通常认为铝颗粒被加热到 Al_2O_3 的熔点后导致铝颗粒表面的氧化层破裂后铝变成蒸汽才能被点火^[9], 这里将该判据称为判据 1。以下我们会看到由该判据得到铝颗粒在激波后的气流中点火延时的结果比实验得到的点火时间长得多。

当铝颗粒被加热到被氧化层包裹的铝达到熔点变成液态时, 粒子变成由很薄的固态氧化层包裹的液态金属。如果氧化层破裂, 那么熔化的铝将变成蒸气与氧发生反应, 铝颗粒被点火。有一些可能的因素会造成铝颗粒氧化层提前破裂, 这意味着点火温度将降低。气流的作用可能导致粒子的变形, 粒子被拉伸导致铝颗粒氧化层破裂。Veyssiere 提出将点火温度降到 1350K^[10], 该温度比铝的熔点高, 但比 Al_2O_3 的熔点低得多, 这里将该判据称为判据 2。

B.T. Philips 等^[11] 在研究铝丝在共振管中的点火时推测铝丝的温度达到铝的熔点时就可以被点火。本文中假定铝颗粒在温度达到铝的熔点且铝完全熔化时被点火, 以此作为判据 3。该判据基于以下机理: 颗粒在温度达到铝的熔点且铝完全熔化时, 激波后的气流对颗粒的作用力将引起氧化膜的破裂, 由此导致点火的发生。用以上三个判据, 我们对方程(1)进行了数值计算, 得到了铝颗粒在激波后气流作用下的点火延时, 并与实验结果^[3]进行了比较。

3 数值计算结果

激波前气体压力 $p_0 = 2.5 \text{ kPa}$, 气体为氧气。激波后气流的参数如压力、密度、速度随入射激波强度变化而变化, 因而铝颗粒的点火延迟时间也将发生变化。用四阶的 Runge-Kutta 法对直径分别为 6、2 μm 的铝颗粒在不同的入射激波强度下的点火延时进行分析。

3.1 直径为 6 μm 的铝颗粒的点火

图 1 是根据上述三个点火判据得到的铝颗粒点火延时 t_{id} 随激波马赫数 Ma 变化的曲线及实验结果。从图中可以看出, 当 $Ma > 5.86$ 时, 用判据 3 得到的 $t_{id}-Ma$ 曲线与实验符合最好, 由判据 1 得到的 t_{id} 远大于实验值。 Ma 在 5.36~5.60 之间时, 用判据 2 得到的 t_{id} 与实验结果较接近。 Ma 在 5.60~5.86 之间时, 由于没有实验数据可以比较, 难以判断。

考虑到实验的样品中铝颗粒的大小有一定的分布^[3], 这里还计算了直径为 4 μm 的铝颗粒的点火延时, 并与直径为 6 μm 的实验结果进行了比较, 如图 2 所示。从图 2 可以看出, 当 $Ma > 5.86$ 时, 结论与上面的一致。只是 Ma 在 5.36~5.60 之间时, 实验点介于由判据 1 和 2 得到的 $t_{id}-Ma$ 曲线之间。以上结果表明铝颗粒在达到铝的熔点并完全熔化后就可以被点火。

图 3 为颗粒温度达到铝的熔点且铝完全熔化时, 铝颗粒在气流作用下的受力情况, 这里定义 $f = F / \pi r_p^2$, F 为粒子受到气流作用时的拖曳力。 $Ma = 5.86$ 时, 颗粒温度达到铝的熔点且铝完全熔化

时, $f=87.9\text{kPa}$ 。对于 $6\mu\text{m}$ 的铝颗粒, 在气流作用下如果颗粒温度达到铝的熔点且铝完全熔化时, $f>87.9\text{kPa}$ 时将被点火。当然这里得到的结果仅适用于得到本文中用到的实验结果的样品^[3]。

图 4 为 $Ma=5.36, 6.37$ 时, $6\mu\text{m}$ 的铝颗粒在气流作用下 Ma_p 和 T_p 随时间的变化。求解时假定颗粒始终保持球形。图中的曲线延续到粒子温度达到 Al_2O_3 的熔点为止。图中的温度曲线有一段恒定的区域, 这一段为铝的熔化阶段。从图中的温度变化曲线可以看出, 在粒子从初始温度达到铝的熔点这一阶段升温较快, 从铝的熔点到 Al_2O_3 的熔点这一阶段升温较慢。后一阶段由于化学反应的速度随温度的增加迅速加快, 在接近 Al_2O_3 的熔点时化学反应对铝颗粒温度的升高有明显的加速作用。

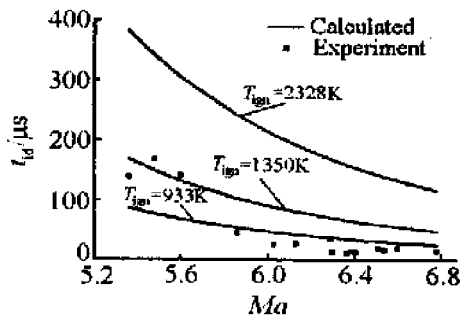


图 1 直径 $6\mu\text{m}$ 铝颗粒的 t_{id} - Ma 关系

Fig.1 The t_{id} vs. Ma relationship for aluminum particles with diameter $6\mu\text{m}$

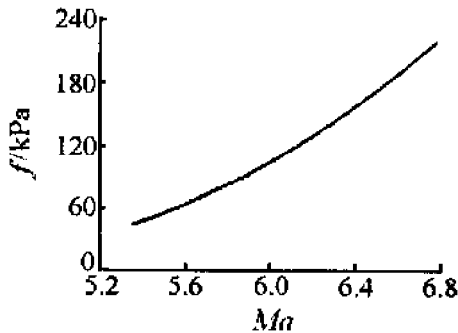


图 3 直径 $6\mu\text{m}$ 铝颗粒温度达到铝熔点且铝完全熔化时的 f - Ma 关系

Fig.3 The f vs. Ma relationship as particle temperature reaches aluminum melting point and all of aluminum in particles is melted

3.2 直径为 $2\mu\text{m}$ 的铝颗粒的点火

图 5 是根据上述三个点火判据得到的铝颗粒的 t_{id} 随 Ma 变化的曲线及实验结果。从图中可以看出, $Ma>5.83$ 时, 由于实验点较少, 难于断定用判据 3 还是用判据 2 得到的 t_{id} - Ma 曲线与实验符合更好。但可以断定的是铝颗粒的点火温度远低于 Al_2O_3 的熔点。当 $Ma>5.42$ 时, 用判据 1 得到的 t_{id} - Ma 曲线与实验结果较接近。 Ma 在 $5.42\sim 5.83$ 之间时, 由于没有实验数据可以比较, 难以判断。图 6 为 $Ma=5.36, 6.37$ 时, $2\mu\text{m}$ 的铝颗粒在气流作用下 Ma_p 和 T_p 随时间的变化。

图 7 为被预热过的铝颗粒的 t_{id} - Ma 曲线与实验结果的比较。其中氧化物质量为 10%。图中的延

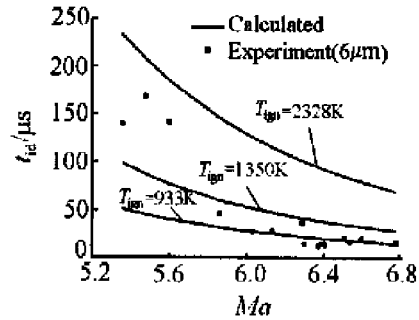


图 2 直径 $4\mu\text{m}$ 铝颗粒的 t_{id} - Ma 关系

Fig.2 The t_{id} vs. Ma relationship for aluminum particles with diameter $4\mu\text{m}$

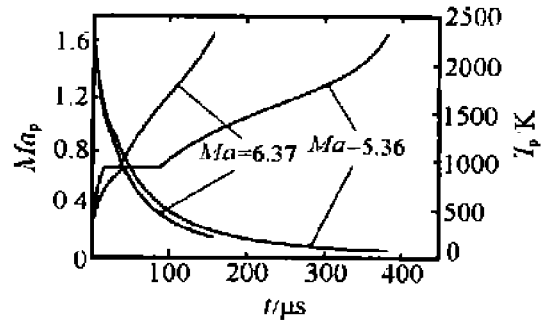


图 4 直径 $6\mu\text{m}$ 铝颗粒的 Ma_p 和 T_p 随时间的变化

Fig.4 A plot of the values of Ma_p and T_p vs. t

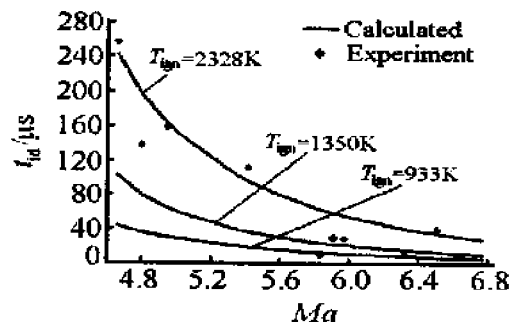


图 5 直径 $2\mu\text{m}$ 铝颗粒 t_{id} - Ma 关系

Fig.5 The t_{id} vs. Ma relationship for aluminum particles with diameter $2\mu\text{m}$

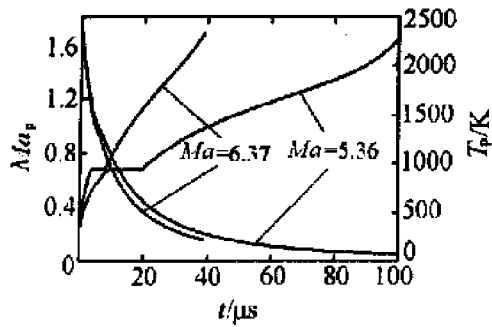


图6 直径 $2\mu\text{m}$ 铝颗粒的 Ma_p 和 T_p 随时间的变化

Fig.6 A plot of the values of Ma_p and T_p vs. t

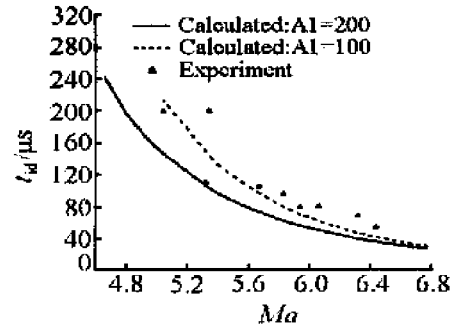


图7 直径 $2\mu\text{m}$ 被预热的铝颗粒的 t_{id} - Ma 关系

Fig.7 The t_{id} vs. Ma relationship for preheated aluminum particles with diameter $2\mu\text{m}$

时曲线是用判据1得到的。由于被预热的铝颗粒表面的 Al_2O_3 层较厚,表面的化学反应减慢,用 $\text{Al}=100$ 计算铝颗粒的点火延时得到的结果与实验结果符合更好。理论分析的结果表明,较厚的氧化膜不易破裂,铝颗粒温度须达到 Al_2O_3 的熔点才能被点火。同时较厚的氧化膜也影响了铝的化学反应速率。

4 结论

对 $2.6\mu\text{m}$ 两种尺寸的铝颗粒在激波后气流的点火进行了理论分析,运用三个点火判据得到了不同的理论点火曲线,并与实验结果进行了比较,由此得到以下结论:铝颗粒在激波后流场的点火与颗粒尺寸、氧化物的厚度有关,与入射激波的强度有关;铝颗粒可以在远低于 Al_2O_3 的熔点被点火。如果气流对颗粒的拖曳力可以使氧化膜破裂,那么铝颗粒在激波后的流场中温度达到铝的熔点且铝完全熔化时就能被点火,但这个作用力的大小有待进一步研究。如果铝颗粒氧化层较厚,那么铝颗粒的温度须达到 Al_2O_3 的熔点才能被点火。

参考文献:

- [1] Dreizin E L. Experimental Study of Stages in Aluminum Particle Combustion in Air [J]. *Combustion and Flame*, 1996, 105 (4): 541-556.
- [2] Yuasa S, Zhu Y, Sogo S. Ignition and Combustion of Aluminum in Oxygen/Nitrogen Mixtures Streams [J]. *Combustion and Flame*, 1997, 108 (4): 387-396.
- [3] 郑波, 胡栋, 丁敬, 等. 铝粉尘激波点火的研究[J]. *爆炸与冲击*, 1997, 17 (2): 174-181.
- [4] 胡栋, 王永国, 李玉同, 等. 气相介质中添加铝粉的微观机制研究[J]. *爆炸与冲击*, 1998, 18 (2): 145-149.
- [5] Walsh J M. Drag Coefficient Equations for Small Particles in High Speed Flows [J]. *AIAA J*, 1975, 13 (11): 1526-1528.
- [6] Fox T W, Rackett C W, Nicholls J A. Shock Wave Ignition of Magnesium Powders [A]. 11th International Symposium on Shock Tubes and Waves [C]. 1977: 262-268.
- [7] Hirschfelder J O, Curtiss C F, Bird R B. *Molecular Theory of Gases and Liquids* [M]. Wisconsin: Press of University of Wisconsin, 1954.
- [8] Kubaschewski O, Hopkins B E. *Oxidation of Metals and Alloys* [M]. London: Butterworths, 1976.
- [9] Markstein G H. Heterogeneous Reaction Process in Metal Combustion [A]. 11th Intl Symp on Combustion [C]. Pittsburgh: the Combustion Institute, 1966: 219-234.
- [10] Veysiere B, Khasainov B A. A Model for Steady, Plane, Double-Front Detonation (DFD) in Gaseous Explosive Mixtures with Aluminum Particles in Suspension [J]. *Combustion and Flame*, 1991, 85 (112): 241-253.
- [11] Philips B, De Witt K J. Resonance-tube Ignition of Aluminum [J]. *Combustion and Flame*, 1979, 35 (3): 249-258.

Theoretical Study of Shock Wave Ignition of Aluminum Particles

HONG Tao

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

Abstract: The ignition of aluminum particles behind shock waves is analyzed with three different criteria. Ignition delay time with different Mach number of incident shock waves is obtained and compared with experimental results. Theoretical results showed that aluminum particles is ignited at the temperature much lower than the melting point of aluminum oxide in the flow field behind shock waves. In this work it is assumed that aluminum particles are ignited as their temperature reaches the melting point of aluminum and all of the aluminum of particles are melted behind shock waves. The ignition delay time obtained by this criterion is best agreed with experimental results. If oxidized layer on particle surface is thick enough, its ignition temperature is at the melting point of aluminum oxide.

Key words: shock wave ignition; aluminum particle; ignition delay time