

文章编号: 1006-9941(2004)03-0129-05

悬浮铝粉尘爆轰波参数

洪滔, 秦承森

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 用两相流模型对爆轰波管中的悬浮铝粉尘的爆轰波进行了研究。数值模拟了管径为 15.2 cm 的圆管中平均粒子直径为 3.4 μm 、单位质量表面积为 $3 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 的铝粉尘中爆轰波的传播和发展, 得到了不同浓度时悬浮铝粉尘爆轰波参数, 并得到了爆轰极限的下限为当量比 $\phi = 0.25$ 。数值计算给出管径趋于无穷大时不同铝粉尘浓度时爆轰波的参数, 得到悬浮铝粉尘爆轰极限的下限为当量比 $\phi = 0.16$ 。数值模拟了当量比为 $\phi = 1$ 、管径不同时爆轰波速度的变化, 并得到产生爆轰的临界管径。

关键词: 爆炸力学; 爆轰; 悬浮铝粉尘; 爆轰波参数; 爆轰极限

中图分类号: O389

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。在铝粉的生产过程中, 极易产生粉尘爆炸。另外作为燃料空气炸弹的首选燃料, 需要了解铝粉尘的爆轰性能。因此对铝粉尘的爆轰进行理论研究是非常重要的。

80 年代 Wolanski, Denz 和 Sichel^[1] 用两相流模型研究定常的粉尘爆轰波结构。模型中考虑粒子与气体的作用引起的加速、粒子与气流之间的热传导, 可以得到粒子的速度和温度变化过程, 在爆轰波前导激波过后, 经一定的点火延时, 颗粒开始燃烧释放出能量。Veysiere 和 Khasainov^[2] 用两相流体力学模型研究在碳氢气体与空气混合气体中散布着悬浮铝颗粒的爆轰波结构问题。Fedorov^[3] 用两相流体力学模型研究铝粉尘与氧形成的两相系统的定常爆轰波, 研究了铝粉尘爆轰波定常解的存在问题。对空气中悬浮铝粉尘的非定常爆轰的理论研究则较少见。

本实验用两相流模型研究空气中悬浮铝粉尘的爆轰波问题。数值模拟得到铝粉尘中爆轰波的变化和发展, 得到不同浓度的铝粉尘的爆轰波参数及爆轰极限的下限值。

2 爆轰波管中的铝粉尘爆轰波分析模型

铝粉尘的爆轰波是复杂的问题。在含有悬浮铝粉

尘的两相介质中传入一激波时, 激波后的高速气体使铝颗粒升温并发生点火, 释放出化学能支持前导激波的传播, 形成爆轰波。

铝粉尘爆轰模型中假定: 流场是一维非定常的; 铝颗粒均匀分布在气体中, 它们的初始直径相同。颗粒内温度是均匀分布的; 颗粒间的相互作用可以忽略, 忽略固体颗粒与壁面的作用。不考虑反应的中间产物, 放能颗粒的速率与压力无关。化学反应释放的能量仅被气体吸收。考虑辐射、管壁摩擦和管壁热传导引起的能量损失。两相模型中气体与颗粒的速度、温度是不同的, 考虑了气体-粉尘颗粒之间的动量、动量和能量的交换, 具体的运动方程参见文献[4]。

常温下, 铝颗粒表面上形成稳定、致密的 Al_2O_3 薄膜, 保护铝不再继续被氧化。铝的熔点为 931.7 K, Al_2O_3 的熔点为 2 300 K。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铝颗粒温度升高而点火。通常认为铝颗粒被加热到 2 300 K (Al_2O_3 的熔点) 后导致铝颗粒表面的氧化层破裂后铝颗粒才能被点火^[5]。Veysiere 用该判据计算铝颗粒在碳氢化合物气体与氧或空气混合物的爆轰波中的点火延时比实验结果长得多^[2]。

本文中铝颗粒的点火采用作者提出的铝颗粒激波点火判据^[6], 该判据基于对铝颗粒的热应力问题的分析。由于铝的热膨胀系数比其氧化物大, 受热时只要温度升高 70 $^\circ\text{C}$, 其氧化层就会产生裂纹。那么当铝颗粒被加热到其熔点时, 表面的氧化层会产生破裂。该判据认为如果颗粒在温度达到铝的熔点 931.7 K 且铝

收稿日期: 2003-09-23; 修回日期: 2004-01-22

作者简介: 洪滔(1965-), 男, 研究员, 从事爆轰研究。

e-mail: hongtao@iapcm.ac.cn

完全熔化时,如果激波强度足够强,激波后的气流对颗粒的作用力引起氧化膜的进一步破裂,使熔化的液态铝暴露于气体中,与氧发生反应,导致点火的发生。用新的铝颗粒点火得到铝颗粒的激波点火延时与实验符合很好。铝颗粒点火后的燃烧速率按照文献[7]中的公式计算。

这里的计算针对 Tulis^[8]的实验所用的铝粉尘,因为其中有可供比较的实验结果。从文献中所给的关于铝颗粒的显微照片看,实验中所使用的片状铝粉尘具有非常粗糙的表面。文献中给出了铝颗粒的尺寸分布,由此得到实验中采用的片状铝粉尘的等效直径为 $3.4 \mu\text{m}$,计算中使用颗粒假定为球形。文献中也给出了颗粒单位质量的表面积为 $3 \sim 4 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,引入一个参数 β ,它是铝颗粒单位质量的实际面积与单位质量的具有等效直径的铝颗粒的面积比。根据文献中给出的数据,实验所用的铝颗粒的 β 值为 $4.6 \sim 6.1$,计算中 β 值取 5。在计算铝颗粒与气体之间的热传导时,先得到气体与等效尺寸的铝颗粒之间的热传导再乘以系数 β 。铝颗粒达到点火后,由于铝已经熔化,假定这时铝颗粒已变为球形, β 取 1。

由于 Tulis 的实验是在爆轰波管中进行,因此模型中还考虑了爆轰波管壁面粘性力引起的耗散和气体与管壁的对流热传导引起的能量损失。另外还考虑了铝颗粒辐射引起的耗散。

化学反应为 $4\text{Al} + 3\text{O}_2 = 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 。生成的产物 Al_2O_3 为液态,假定其速度、温度与气体相同,对气体压力没有贡献。在计算中,取 Al_2O_3 沸点为 3800 K 。在计算中,如果流场中气体的温度超过 3800 K ,部分 Al_2O_3 将发生逆向反应 $2\text{Al}_2\text{O}_3 = 4\text{Al} + 3\text{O}_2$,产物为气态铝。这是因为许多金属氧化物不能以气体形式存在,当温度超过沸点时,发生分解^[9],因此逆向分解吸热反应限制了火焰的温度,即火焰温度不能超过金属氧化物的沸点。这里也认为爆轰产物的不能超过 Al_2O_3 的沸点。

气体采用理想气体状态方程。气体每一组分均有自己的质量守恒方程,气体中组分包括 O_2 、 N_2 、 Al_2O_3 和 Al ,具体的处理方法参见文献[10]。

用具有二阶精度的 MacCormack 差分格式加上 FCT 技术^[11]求解两相流体力学微分方程组,编制了求解两相系统中爆轰波发展的程序,用于数值模拟点火后两相系统爆轰波的发展过程,得到了爆轰波的结构和参数。数值模拟得到悬浮铝粉尘爆轰波爆速为 $1.63 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,

Tulis 的实验得到的爆速为 $1.65 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,二者符合较好。计算得到点火距离是 3 mm ,点火距离是指从爆轰波波面到粒子点火处的距离。这与实验中平均爆速为 $1.62 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的铝粉尘爆轰波的点火距离 3 mm 是相同的。数值模拟给出了与实验符合的爆轰波速度和铝颗粒的点火延时^[4]。本文在此基础上,对悬浮铝粉尘爆轰波进一步进行数值模拟,得到不同浓度的悬浮铝粉尘爆轰波参数。

3 计算结果

3.1 管径 $D_h = 15.2 \text{ cm}$ 的管道中的悬浮铝粉尘爆轰波的数值计算

首先数值模拟管径 D_h 为 15.2 cm 的管道中的悬浮铝粉尘爆轰波的参数。用高温和高速气流模拟冲击波对铝粉尘进行点火^[4]。计算了不同当量比 ϕ 条件下的空气中铝粉尘爆轰波参数。当 $\phi = 1$ 时,铝粉尘的浓度为 $304 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,颗粒数为 $5.46 \times 10^{12}/\text{m}^3$ 。图 1 是不同浓度时的爆轰波阵面激波压力随爆轰波前进距离 x 的变化情况。从图 1 中可以看出,当 $\phi = 0.24$ 时,激波阵面的压力值在 1.5 m 处迅速衰减,未能形成爆轰波。因此在这种条件下,悬浮铝粉尘的爆轰极限下限为 $\phi = 0.25$ 。

图 2 是铝粉尘中爆轰波的速度随浓度的变化曲线,图中的结果显示随着浓度的减小,爆速降低。表 1 中列出了不同浓度的悬浮铝粉尘中的爆轰波在 CJ 面上气相的密度 ρ_1 、速度 u_1 、温度 T_1 、压力 p 以及铝颗粒的直径 d 、爆轰波中铝颗粒的点火距离 L_{ign} 、前导激波到 CJ 面的距离 L 。表中的数据表明 CJ 面上的物理量随当量比(减小而下降,点火距离增加。

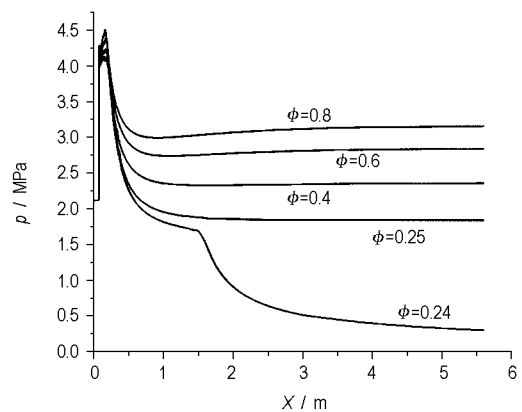


图 1 不同浓度的铝粉尘爆轰波阵面的压力极值
Fig. 1 Pressure history of detonation with different equivalence ratio ϕ

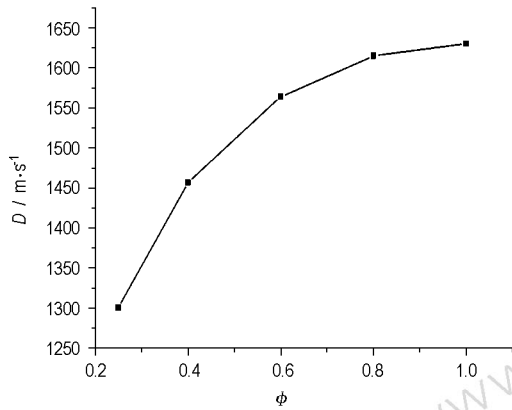


图 2 爆轰波速度随铝粉尘浓度的变化 ($D_h = 15.2 \text{ cm}$)

Fig.2 Detonation velocity vs. equivalence ratio with $D_h = 15.2 \text{ cm}$

表 1 铝粉尘不同浓度时的爆轰波参数 ($D_h = 15.2 \text{ cm}$)

Table 1 Parameters of detonation in CJ surface ($D_h = 15.2 \text{ cm}$)

ϕ	ρ_1 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	u_1 / $\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	T_1 /K	p /MPa	d / μm	L_{ign} /mm	L /mm
1.0	2.48	681	3800	1.91	2.00	3	183
0.8	2.44	678	3529	1.81	1.73	3	202
0.6	2.36	655	3056	1.62	1.55	3.5	194
0.4	2.26	606	2436	1.34	1.40	4.5	180
0.25	2.15	528	1839	1.02	1.27	7	173

3.2 管径 $D_h \rightarrow \infty$ 时悬浮铝粉尘爆轰波的数值计算

计算了管径 $D_h \rightarrow \infty$ 时悬浮铝粉尘爆轰波参数。

$D_h \rightarrow \infty$ 意味着不考虑管壁的摩擦和对流热传导。图 3 是不同浓度时爆轰波阵面激波压力随爆轰波前进距离 x 的变化,图 4 是 $\phi = 1$ 时 $D_h = 15.2 \text{ cm}$ 和 $D_h \rightarrow \infty$ 时的压力曲线。从图 3 中可以看出,当 $\phi = 0.15$ 时,激波阵面的压力值在 2.5 m 处迅速衰减,未能形成爆轰波。因此在这种条件下,悬浮铝粉尘的爆轰极限下限为 $\phi = 0.16$,这个结果表明,铝粉尘具有很低的爆轰极限的下限值。

图 5 是爆轰速度随浓度的变化曲线。表 2 列出了不同浓度的悬浮铝粉尘爆轰波在 CJ 面上的参数,爆轰波中铝颗粒的点火距离 L_{ign} ,前导激波到 CJ 面的距离。

从图 5 和表 2 可以看出,爆速最大的铝粉尘浓度值不是 $\phi = 1$,而是 ϕ 小于 1 的某个值。造成这种现象的原因是 $\phi = 1.0$ 时发生逆向反应的程度比 $\phi < 1$ 大。当 $\phi = 1$ 时,CJ 面上 Al 蒸气组分的质量浓度为 $Y_{\text{Al}} = 0.99\text{e}-2$,当 $\phi = 0.8$ 时,CJ 面上 Al 蒸气组分的质量浓度为 $Y_{\text{Al}} = 0.213\text{e}-3$ 。从以上的计算结果可以得出结论,悬浮铝粉尘中产生爆轰波的最佳当量比约为 0.8。

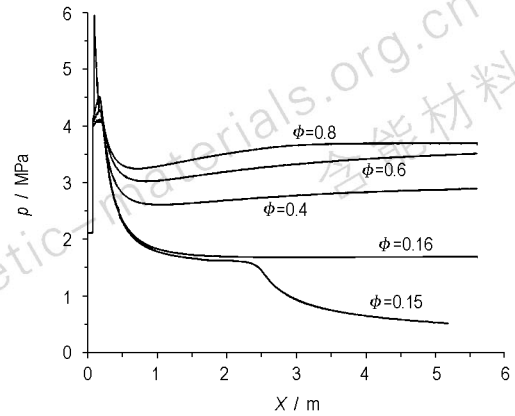


图 3 不同浓度的铝粉尘爆轰波阵面的压力极值的变化 ($D_h \rightarrow \infty$)

Fig.3 Pressure history of detonation with different equivalence ratio ($D_h \rightarrow \infty$)

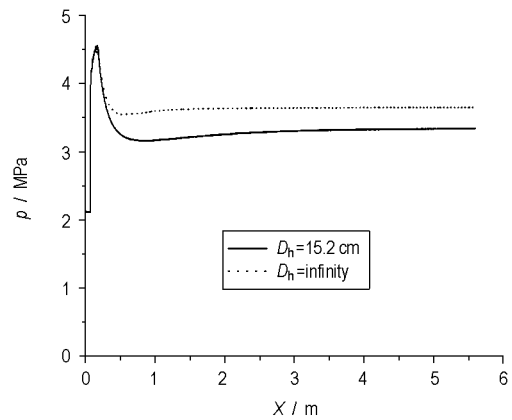


图 4 $\phi = 1$ 时爆轰波阵面的压力极值的变化

Fig.4 Pressure history of detonation in different tube diameter with equivalence ratio $\phi = 1$

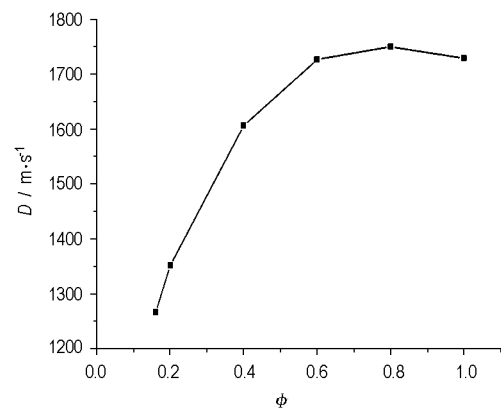


图 5 爆速随浓度的变化曲线

Fig.5 Detonation velocity vs. equivalence ratio with $D_h \rightarrow \infty$

表2 铝粉尘不同浓度时的爆轰波参数 ($D_h \rightarrow \infty$)Table 2 Parameters of detonation in CJ surface ($D_h \rightarrow \infty$)

ϕ	ρ_1 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	u_1 / $\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	T_1 /K	p /MPa	d / μm	L_{ign} /mm	L /mm
1.0	2.56	742	3800	2.02	2.04	2.5	180
0.8	2.49	764	3800	2.05	1.99	2.5	186
0.6	2.38	741	3671	1.94	0.96	3	298
0.4	2.28	686	2898	1.60	0.96	3	298
0.2	2.15	559	1888	1.07	0.70	5.5	287
0.16	2.11	516	1636	0.93	0.61	8.5	294

3.3 爆轰波速度随管径的变化

数值模拟了当量比 $\phi = 1$ 时不同管径的管道中的悬浮铝粉尘爆轰波,得到了爆轰波速度。图6中显示了圆管中爆轰波速度随管径的变化。当管径为2.6 cm时,激波压力值迅速下降,不能发展成爆轰波。当管径为2.7 cm时,激波压力值趋于稳定,可以发展成爆轰波(图7),计算得到的爆速为 $1334 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此认为发生爆轰的临界管径为2.7 cm。

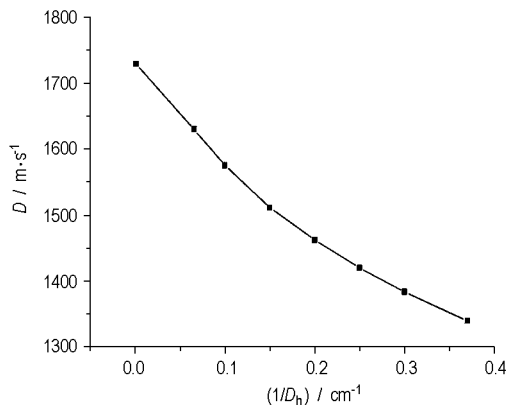


图6 爆速随管径的变化

Fig. 6 Detonation velocity vs. inverse tube diameter

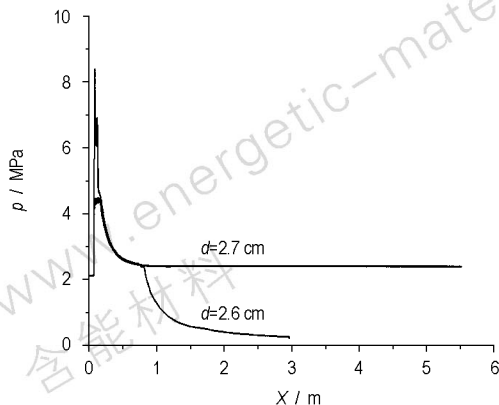


图7 管径为临界值时爆轰波阵面压力极值的变化

Fig. 7 Pressure history of detonation in critical tube diameter with equivalence ratio $\phi = 1$

4 结论

本文用两相流模型对管道中悬浮在空气中的铝粉尘爆轰波进行了数值模拟,铝颗粒的直径为 $3.4 \mu\text{m}$ 。得到了不同浓度的悬浮铝粉尘爆轰波参数,并得到爆轰极限的下限以及临界管径。当管径 $D_h = 15.2 \text{ cm}$ 时,得到的爆速、压力及其它参数随浓度下降而减小,得到的爆轰极限的下限为 $\phi = 0.25$ 。当管径 $D_h \rightarrow \infty$ 时, $\phi = 1$ 时的爆速并不是最大的,极限浓度的下限为 $\phi = 0.16$ 。当 $\phi = 1$ 时,临界管径为 2.7 cm 。数值计算结果表明,铝粉尘具有很低的点火浓度,这在一个方面说明了铝粉尘的易爆性。

本文只计算了极限浓度的下限,因为当燃料的当量比 ϕ 大于 1 时,铝与氧反应的一些中间产物成分 AlO 、 Al_2O 、 AlO_2 等对计算结果的影响将更明显,本文中简单的处理可能难于描述这种影响,在以后的计算中需要考虑这些中间产物的影响。

参考文献:

- [1] Lee D, Sichel M. The Chapman-Jouguet Condition and Structure of Detonation in Dust-Oxidizer Mixtures [A], AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics, 505-521, AIAA, New York, 1986.
- [2] Veysiere B, Khasainov B A. Steady, plane, double-front detonations in gaseous detonable mixtures containing a suspension of aluminum particles [J]. *Combustion and Flame*, 1991, 85: 241 - 253.
- [3] Fedorov A V, Khmel T A, Fomin V M. Non-equilibrium model of steady detonations in aluminum particles-oxygen suspensions [J]. *Shock Waves*, 1999, 9(5): 313 - 318.
- [4] 洪滔, 秦承森. 爆轰波管中铝粉尘爆轰的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 已被接受.
HONG Tao, QIN Cheng-sen. Numerical modeling of detonation in gas-fuel droplets system [J]. *Explosions and Shock Waves*, accepted.
- [5] Friedman R, Macek A. Ignition and combustion of aluminum particles in hot ambient gases [J]. *Combustion and Flame*, 1962, 6: 9 - 19.
- [6] 洪滔, 秦承森. 铝颗粒激波点火机制初探 [J]. 激波与冲击, 2003, 23(4): 295 - 299.
HONG Tao, QIN Cheng-sen. Mechanism of shock wave ignition of aluminum particle [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(4): 295 - 299.
- [7] Price E W. Combustion of Metalized Propellants [A]. Progress in Astronautics and Aeronautics: Fundamentals

- of Solid-Propellant Combustion [C], edited by K. K. Kuo, and M. Summerfield, Vol. 90, Chapter 9: 479 – 513, 1984, AIAA, New York.
- [8] 洪滔, 秦承森. 气体-燃料液滴两相系统爆轰的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(4): 335 – 342.
- HONG Tao, QIN Cheng-sen. Numerical modeling of detonation in gas-fuel droplets system [J]. *Explosions and Shock Waves*, 1999, 19(4): 335 – 342.
- [9] Tulis A J, Selman J R. Detonation Tube Studies of Aluminum Particles Dispersed in Air [A]. 19th International Symposium on Combustion [C], The Combustion Institute, 655 – 663, 1982.
- [10] Steinberg T A, Wilson D B, Benz F. The Combustion Phase of Burning Particle [J]. *Combustion and Flame*, 1992, 91: 200 – 208.
- [11] Book D L, Boris J P, Hain K. Flux-Corrected Transport II: Generalization of the Method [J]. *J. Computational Physics*, 1975, 18: 248 – 283.

Parameters of Detonation in Suspended Aluminum Dust

HONG Tao, QIN Cheng-sen

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

Abstract: Detonation in suspended aluminum dust in tubes was analyzed with two-phase flow model. Development and propagation of aluminum dust detonation with diameter of particle 3.4 μm in detonation tube with inside diameter 15.2 cm was numerically simulated. The differences of velocity and temperature between gas and particles were considered. The dissipation by the convective heat transfer and viscosity through tube wall was taken into account. Velocity of detonation and ignition distance of particles was obtained in suspended aluminum dust with difference concentration of aluminum dust. Also the lower detonation limit was obtained which was equivalence ratio 0.25. Furthermore, detonation velocity in suspended aluminum dust with infinity tube diameter was calculated and lower detonation limit was determined which was 0.16. The detonation parameters of suspended aluminum dust in different tube diameters were obtained with equivalence 1 and critical diameter of tubes was determined.

Key words: explosion mechanics; detonation; suspended aluminum dust; parameters of detonation; detonation limit

第二届全国隐身功能材料学术研讨会

第二届全国隐身功能材料学术研讨会将于2004年6月上旬在山东济南召开。会议主要研讨交流隐身功能材料的机理研究、产品应用情况及效果评价技术、未来发展趋势等。

承办单位: 中国兵器工业第五三研究所

联系地址: 济南108信箱科研处(250031)

联系人: 刘亚东

e-mail: cmml@i53.com.cn

联系电话: (0531)5930478 转 6040