

文章编号: 0258-7025(2007)06-0804-05

大气中激光烧蚀铝靶冲量耦合系数实验研究

石海霞^{1,2}, 谭荣清¹, 郑义军¹

(¹ 中国科学院电子学研究所, 北京 100080; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 研究了激光与铝靶相互作用过程中, 大气中激光功率密度与铝靶获得的冲量耦合系数的关系, 通过改变激光聚焦在靶面上的光斑大小, 得到冲量耦合系数与激光功率密度的关系。实验结果表明, 当入射激光功率密度为 $3.47 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时, 铝靶获得的冲量耦合系数最高。该入射激光功率密度最佳值与理论计算值 $6.14 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 符合得较好。用激光支持爆轰波(LSDW)与固体靶相互作用的二维模型理论计算得到的冲量耦合系数与实验结果比较, 二者趋势相同, 定量比较有较大差别, 原因是所用激光光斑面积偏大, 不能按照该理论点爆炸模型来计算。

关键词 激光技术; 冲量耦合系数; TEA CO₂ 激光器; 激光功率密度

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A

Impulse Coupling Coefficient in Laser Ablating Aluminium at Air Ambient

SHI Hai-xia^{1,2}, TAN Rong-qing¹, ZHENG Yi-jun¹

(¹ *Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)
(² *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract To study the effect of laser flux on impulse coupling coefficient during laser aluminium target interaction at air ambient, by changing laser spot size on the target, the relationship between coupling coefficient and laser flux is achieved. The experimental results indicate that the coupling coefficient reaches to maximum when laser flux is $3.47 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, which agrees well with the theoretical result of $6.14 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$. The two-dimensional model theory of laser supported detonation wave (LSDW) interacting with solid target is used to calculate the coupling coefficient. And the trends of theory and experiment are the same, but the two have prominent difference in values. The reason is that the laser spot is a little over large and the point blast model is not suitable to calculate the theory values.

Key words laser technique; impulse coupling coefficient; TEA CO₂ laser; laser flux

1 引言

激光辐照固体靶引起靶物质的气化和烧蚀, 靶蒸气或等离子体的喷溅膨胀施加给固体靶表面反冲压力及冲量。高功率激光脉冲时间宽度很窄, 作用于靶的宏观力学效应用冲量来表示, 单位入射激光能量所获得的靶的冲量称为激光与靶的冲量耦合系数。1973年, Anthony N Pirri 提出了激光支持爆轰波(LSDW)与固体靶作用过程中冲量传递的二维

理论模型, 该模型理论计算结果与 AVCO 公司和林肯实验室实验数据吻合得较好^[1]。谭荣清等用聚焦后的 TEA CO₂ 激光束烧蚀铝靶, 研究激光束的聚焦特性对冲量耦合系数的影响, 得到初步的实验数据和结果^[2]。美国阿拉巴马大学的 Andrew V. Pakhomov 等在文献[2]的基础上进一步研究了气压对冲量耦合系数的影响, 分析了随着气压的变化, 烧蚀和吸气模式在总的冲量耦合系数中分别所占的比重^[3]。中国科学院物理研究所郑志远等用 Nd:

收稿日期: 2006-09-12; 收到修改稿日期: 2007-01-17

作者简介: 石海霞(1982—), 女, 山西人, 硕士研究生, 主要从事激光烧蚀固体靶方面的研究。

E-mail: donggunenjun@yahoo.com.cn

导师简介: 谭荣清(1966—), 男, 辽宁人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光技术和应用方面的研究。

E-mail: rongqingtang@vip.sina.com

YAG 激光在大气和真空中分别烧蚀铝、石墨、铅和碳氢靶,并研究了激光聚焦面积对靶冲量的影响,发现各种材料在大气中的冲量转换能力相差不大,在真空中各种材料的冲量转换能力受材料本身物理特性影响差别较大^[4]。中国科学院电子学研究所郑义军等分别研究了大气环境中气压、脉冲能量、脉冲波形对冲量耦合系数的影响^[5~7]。对于激光烧蚀固体靶,现有的实验数据还没有能够完整地反映冲量耦合系数的规律。本文在已有工作的基础上,详细研究了大气中激光烧蚀铝靶过程中冲量耦合系数与激光功率密度的关系,并将实验结果与理论计算进行了比较。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,为了研究激光功率密度对冲量耦合系数的影响,将一个聚焦镜固定在导轨上,通过改变聚焦镜的位置来改变聚焦面积,从而改变入射到靶面的激光功率密度。

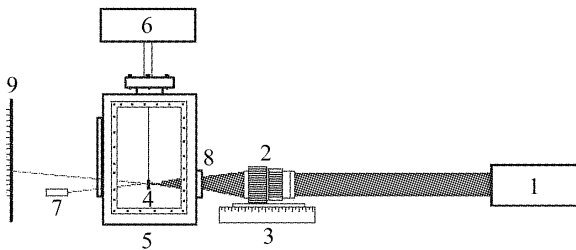


图 1 实验装置图

1: 激光器; 2: ZnSe 聚焦镜; 3: 导轨; 4: 冲击摆+铝靶;
5: 真空仓; 6: 真空泵; 7: 氦氖激光器; 8: BaF₂ 入射窗; 9: 屏尺

Fig. 1 Experimental setup

1; laser; 2; plano-convex ZnSe lens; 3; adjustable translation stage; 4; pendulum+aluminium target; 5; vacuum chamber; 6; vacuum system; 7; He-Ne laser; 8; BaF₂ window; 9; wall ruler

激光器采用中国科学院电子学研究所研制的 TEA CO₂ 脉冲激光器,激光输出波长为 10.6 μm,脉冲维持时间 3 μs。所用靶材是边长 45 mm,厚度 1.2 mm 的硬铝。激光器发出一束光,经 ZnSe 聚焦镜(焦距 25.4 cm)聚焦,通过 BaF₂ 入射窗照射到铝靶上,激光聚焦产生的等离子体膨胀造成冲击摆摆过一定角度。聚焦镜放置在一个可精确定位的导轨上,真空仓内的气压通过真空泵来控制,仓内的气压通过真空表头读出。

冲击摆的结构如图 2 所示,摆的长度 l 为 510 mm,摆的下方连接铝环用来固定铝靶,系统的质心距摆杆顶端的长度 l_c 为 459 mm,系统的转动惯

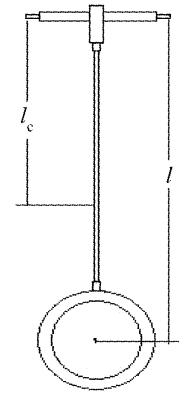


图 2 冲击摆结构

Fig. 2 Pendulum and its dimensions

量 I 为 $50.9 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。冲击摆摆过的角度测量方法参考文献[2]。

3 实验结果及讨论

3.1 冲量耦合系数的计算

在不考虑空气阻力和系统摩擦力的情况下,根据能量守恒定律有

$$\frac{1}{2} I \omega^2 = m g l_c (1 - \cos \theta_m), \quad (1)$$

式中 ω 为摆受冲击后的初始角速度, θ_m 为冲击摆摆动的最大角度, m 为铝靶和冲击摆的质量之和。由激光脉冲产生的冲量可以表示为

$$P = \frac{I \omega}{l}, \quad (2)$$

根据冲量耦合系数 C_m 的定义有

$$C_m = \frac{1}{El} \sqrt{2mgIl_c} \sqrt{1 - \cos \theta_m}, \quad (3)$$

式中 E 为人射激光能量。

3.2 实验结果

将聚焦镜的焦点和铝靶之间的距离定义为焦移。规定焦点在铝靶后为负焦移,在铝靶前为正焦移。移动聚焦镜在导轨上的位置,改变激光聚焦在铝靶上的光斑大小。为了减小激光能量不稳定带来的误差,每个位置记录多个 θ_m , 取其平均值,得到 100.0 kPa 气压下冲量耦合系数和焦移之间的关系曲线,如图 3 所示。

实验中所用激光能量为 15.7 J,激光脉冲维持时间为 3 μs,激光功率密度定义为单位时间单位面积上的激光能量。聚焦后激光光斑面积和功率密度对应关系如表 1 所示。

计算得到的冲量耦合系数与激光功率密度的关系曲线如图 4 所示。

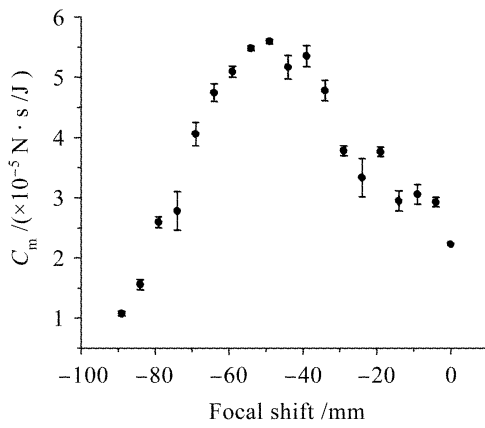


图3 在 100.0 kPa 气压下冲量耦合系数与焦移的关系
Fig. 3 Impulse coupling coefficients versus focal spot shift at pressure of 100.0 kPa

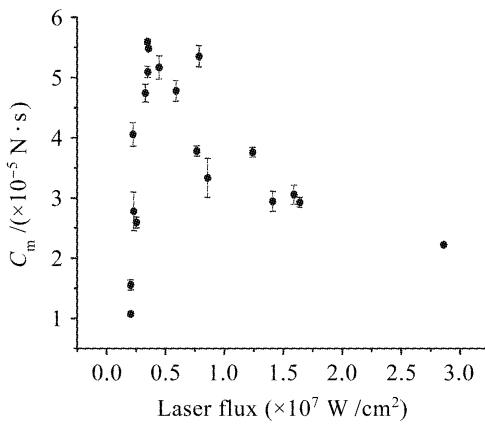


图4 冲量耦合系数与激光功率密度关系曲线
Fig. 4 Impulse coupling coefficient versus laser flux

表1 不同光斑面积对应的激光功率密度
Table 1 Spot area and related laser flux

Spot area /cm ²	Laser flux /(W/cm ²)	Spot area /cm ²	Laser flux /(W/cm ²)
2.55	2.05 × 10 ⁶	1.48	3.56 × 10 ⁶
2.33	2.25 × 10 ⁶	1.17	4.45 × 10 ⁶
2.28	2.30 × 10 ⁶	0.68	7.66 × 10 ⁶
2.07	2.53 × 10 ⁶	0.42	1.24 × 10 ⁷
1.59	3.29 × 10 ⁶	0.33	1.59 × 10 ⁷
1.49	3.51 × 10 ⁶	0.18	2.86 × 10 ⁷

3.3 分析讨论

实验中所用激光功率密度范围为 $2.05 \times 10^6 \sim 2.86 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, 每次激光辐照铝靶均发出明亮白光, 并伴随有巨大声响, 据此可判断产生了激光支持爆轰波(LSDW)^[8]。根据文献[1]中激光支持爆轰波与固体靶相互作用冲量计算的二维理论模型, 激光支持爆轰波传递给有限靶面的冲量为

$$I = \pi R_s^2 P^{1D} t_{2D} + \int_{t_{2D}}^{t_\phi} \int_0^{R_s(t)} P^{2D} 2\pi r dr dt + \pi R_t^2 \int_{t_\phi}^{t_a} P^{2D} dt = \pi R_s^2 P^{1D} t_{2D} + \pi R_s^2 P^{1D} \left(\frac{t_p}{t_{2D}}\right)^{2/3} (t_\phi - t_{2D}) + \pi R_t^2 P^{1D} \left(\frac{t_p}{t_{2D}}\right)^{2/3} t_{2D} \ln\left(\frac{t_a}{t_\phi}\right), \quad (4)$$

激光支持爆轰波传递给无限大靶面的冲量为

$$I = \pi R_s^2 P^{1D} t_{2D} + \int_{t_{2D}}^{t_a} \int_0^{R_s(t)} P^{2D} 2\pi r dr dt = \pi R_s^2 P^{1D} t_{2D} + \pi R_s^2 P^{1D} \left(\frac{t_p}{t_{2D}}\right)^{2/3} (t_a - t_{2D}), \quad (5)$$

式中 R_s 为入射到靶面的激光光斑半径, $R_s(t)$ 为 t 时刻的柱型爆炸波波阵面的半径, R_t 为固体靶的半径, P^{1D} 为不考虑侧面稀疏影响时激光支持爆轰波作用在靶面的压力, P^{2D} 为考虑侧面系数影响时激光支持爆轰波作用在靶面的压力, t_{2D} 为侧向稀疏波传至靶中心所用的时间, t_a 为激光支持爆轰波作用到靶的压力降为环境压力所用的时间, t_ϕ 为激光支持爆轰波引起的柱面爆炸波到达靶边缘的时间, t_p 为激光脉冲维持时间, r 为等离子体绝热指数。 t_a 和 t_ϕ 可表示为^[1]

$$t_a = \frac{P^{1D}}{P_0} \left(\frac{t_p}{t_{2D}}\right)^{2/3} t_{2D}, \quad (6)$$

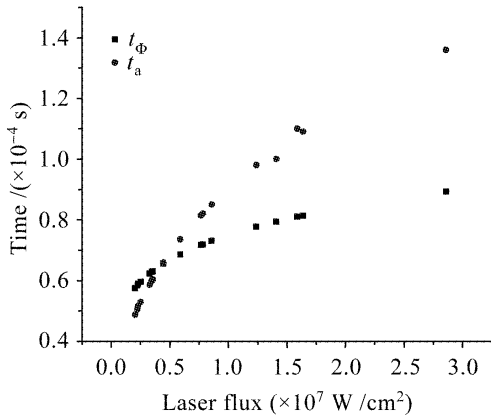
$$t_\phi = \left(\frac{R_t}{R_s}\right)^2 t_{2D}, \quad (7)$$

式中 P_0 为环境气压, 实验中 $P_0 = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。如果 $t_a \geq t_\phi$, 则激光支持爆轰波在作用到靶的压力降为环境压力之前到达靶边缘, 这时必须考虑有限靶半径对冲量带来的影响, 如果 $t_a < t_\phi$, 固体靶可以看作无限大, 不必考虑靶半径的影响。

实验中铝靶固定在半径为 2.5 cm 的圆环上, 激光支持爆轰波与固体靶作用的有效面积是半径为 2.5 cm 的圆, 所以 $R_t = 2.5 \text{ cm}$, 根据式(6), (7) 计算得到不同激光功率密度下的 t_a 和 t_ϕ 如图 5 所示。

从图 5 可以看到, 当激光功率密度为 $2.05 \times 10^6 \sim 3.47 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 即光斑面积为 $2.55 \sim 1.51 \text{ cm}^2$ 时, $t_a < t_\phi$, 计算冲量传递用式(5), 当激光功率密度为 $3.47 \times 10^6 \sim 2.86 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, 即光斑面积为 $1.17 \sim 0.18 \text{ cm}^2$ 时, $t_a \geq t_\phi$, 计算冲量用式(4)。

当 $t_p = t_{2D}$ 时, 激光支持爆轰波传递给靶的冲量最大^[1]。将 $t_p = t_{2D}$ 代入式(4), (5), 得到有限靶获得的冲量最大值为

图 5 t_a 和 t_ϕ 与激光功率密度的关系Fig. 5 t_a and t_ϕ versus laser flux

$$I_{\max} = \pi R_s^2 P^{1D} t_\phi + \pi R_t^2 P^{1D} t_{2D} \ln\left(\frac{t_a}{t_\phi}\right), \quad (8)$$

无限大靶获得的冲量最大值为

$$I_{\max} = \pi R_s^2 P^{1D} t_a, \quad (9)$$

当 $t_p > t_{2D}$ 时, 后续入射的激光能量无效^[9], 冲量衰减为^[1]

$$I = I_{\max} \left(\frac{t_{2D}}{t_p}\right), \quad (10)$$

冲量耦合系数计算公式为

$$C_m = \frac{I}{E}. \quad (11)$$

考虑有限靶半径影响和不考虑靶半径影响情况下分别用式(4), (8), (10)和(5), (9), (10)得到冲量耦合系数的理论值并与实验数据相比较, 如图 6 所示。

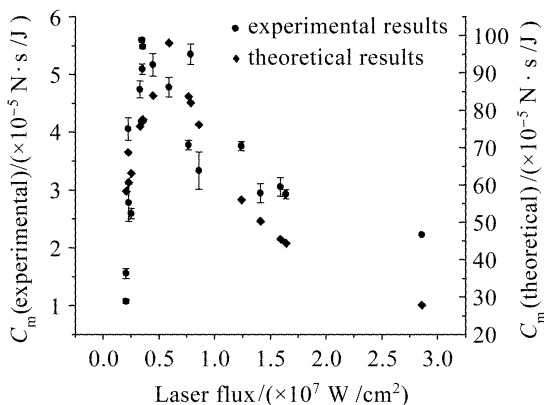


图 6 冲量耦合系数理论值和实验值比较图

Fig. 6 Impulse comparison between theoretical and experimental results

根据

$$t_{2D} = \frac{2R_s}{D} = t_p, \quad (12)$$

$$D = \left[\frac{2(r^2 - 1)P}{\rho_0} \right]^{1/3}, \quad (13)$$

可以求得, 激光功率密度为 $6.14 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时, 冲量耦合系数最大^[1]。式中 D 为激光支持爆轰波波速, 等离子体绝热指数 r 取 1.2, ρ_0 为空气密度, 取 1.29 kg/m^3 , P 为入射到靶面的激光功率密度。

图 6 中, 当激光功率密度为 $2.05 \times 10^6 \sim 3.47 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时, 此阶段 $t_p < t_{2D}$, 冲量耦合系数随着激光功率密度的增大而增大, 当激光功率密度为 $4.45 \times 10^6 \sim 2.86 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时, $t_p > t_{2D}$, 冲量耦合系数随着激光功率密度的增加而衰减, 符合式(10)的规律。冲量耦合系数最大时的激光功率密度为 $3.47 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 与理论计算的功率密度最佳值 $6.14 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 相比偏小, 但仍比较相符。理论计算的冲量耦合系数的最大值为 $1.006 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/J}$, 实验中冲量耦合系数的最大值为 $5.59 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$ 。当激光功率密度为 $1.24 \times 10^7 \sim 2.86 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ (对应光斑面积为 $0.42 \sim 0.18 \text{ cm}^2$) 时, 理论值比实验值高出 11~16 倍, 当激光功率密度为 $2.25 \times 10^6 \sim 8.58 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ (对应光斑面积为 $2.32 \sim 0.61 \text{ cm}^2$) 时, 理论值比实验值高出 15~20 倍, 当激光功率密度为 $2.05 \times 10^6 \sim 2.25 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ (对应光斑面积为 $2.55 \sim 2.32 \text{ cm}^2$) 时, 理论值比实验值高出 20~50 倍。可以看出当激光光斑较小时, 理论值与实验值比较符合, 激光光斑变大, 理论值与实验值吻合度降低。在文献[1]中提出的激光支持爆轰波与固体靶作用过程中冲量传递的二维理论模型理论计算结果与 AVCO 公司和林肯实验室实验数据相比较, 当激光功率密度为 $4 \times 10^6 \sim 2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, 激光光斑面积 $0.01 \sim 0.6 \text{ cm}^2$ 时, 二者符合得较好。关于本文理论计算与实验结果出现偏差的原因, 初步分析是由于文献[1]中的理论计算模型是按照点爆炸波理论得出的, 而本文中光斑面积偏大, 已经不能简单按照点爆炸模型来计算。

4 结 论

用实验方法得到冲量耦合系数与激光功率密度的关系曲线, 随着激光功率密度的增大, 冲量耦合系数先升后降。入射激光功率密度的最佳值为 $3.47 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 此功率密度下铝靶获得的冲量耦合系数最高, 与理论计算值 $6.14 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 相比二者符合得较好。并用激光支持爆轰波与固体靶相互作用的二维模型计算出冲量耦合系数的理论值与实验值相比较, 二者趋势相同, 定量相比有较大差

别,原因可能是文中所用激光光斑面积偏大,不能按照该理论的点爆炸模型来计算。

参 考 文 献

1 Anthony N. Pirri. Theory for momentum transfer to a surface with a high-power laser [J]. *The Physics of Fluids*, 1973, **16** (9):1435~1440

2 Rongqing Tan, Jun Lin, Jeremy Hughes *et al.*. Experimental study of coupling coefficients for propulsion on TEA CO₂ laser [C]. *Proceedings of the Second International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2004, **702**(3):122~128

3 Andrew V. Pakhomov, Jun Lin, Rongqing Tan. Air pressure effect on propulsion with transversely excited atmospheric CO₂ laser [J]. *AIAA Journal*, 2006, **44**(1):136~141

4 Zheng Zhiyuan, Lu Xin, Zhang Jie *et al.*. Experimental study on the momentum coupling efficiency of laser plasma [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(1):192~196
郑志远,鲁欣,张杰等. 激光等离子体动量转换效率的实验研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(1):192~196

5 Zheng Yijun, Gong Ping, Tan Rongqing *et al.*. Experimental study of coupling coefficients for air-breathing mode laser

propulsion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7):889~893
郑义军,龚平,谭荣清等. 大气模式激光推进耦合系数实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):889~893

6 Zheng Yijun, Ke Changjun, Tan Rongqing *et al.*. Effect of pulse waveform on momentum coupling coefficient [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1472~1476
郑义军,柯常军,谭荣清等. 脉冲波形对冲量耦合系数的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1472~1476

7 Zheng Yijun, Ke Changjun, Tan Rongqing *et al.*. Effects of laser pulse energy on coupling coefficient of laser propulsion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12):1684~1687
郑义军,柯常军,谭荣清等. 脉冲能量对激光推进中冲量耦合系数的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12):1684~1687

8 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. *Physics of the Interaction of Laser and Materials* [M]. Beijing: China Machine Press, 1996. 75~131
陆建,倪晓武,贺安之. *激光与材料相互作用物理学*[M]. 北京:机械工业出版社, 1996. 75~131

9 Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxiu *et al.*. *Laser Irradiation Effect* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 128~129
孙承伟,陆启生,范正修等. *激光辐照效应*[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 128~129



征 订 启 事

第八届全国激光加工学术论文集——《中国激光》2007年增刊,已于2007年3月出版。论文集较全面地反映了近年来我国激光加工技术研究、应用和产业化的最新成果,包括激光连接(焊接、钎焊),激光去除(切割、打孔、清洗、抛光等),激光强化(合金化、熔覆、沉积等),激光制备新材料,激光快速成形与激光快速制造,激光复合加工技术,激光微纳米技术,激光加工新技术与新应用,激光加工过程检测与控制,新型激光器件与光加工系统等领域,作者来自于国内近40个大专院校、科研机构和企业。是广大激光加工领域工作者的非常有价值的参考资料。

论文集约400页,定价100元,进口雅光纸精印,光盘版定价80元,欢迎读者订阅。

联系人:高先生 电 话:021-69918253