

# 大气层中吉林陨石雨飞行轨道 计算和现象分析

中国科学院力学研究所 张德良 刘育魁 赵成福

**提要** 1976年3月8日下午3时许,吉林市郊降落了一场古今中外罕见的陨石雨,称为“吉林陨石雨”。中国科学院吉林陨石雨联合考察小组对吉林陨石雨进行了科学考察。本文是在对吉林陨石雨科学考察的基础上,进一步对大气层中吉林陨石雨飞行轨道进行了计算。给出了吉林陨石雨进入大气层的初始角度和速度,爆裂位置,飞行距离,着陆角度和速度等参数。同时,对吉林陨石雨所发生的现象也作了进一步分析,从而为研究“吉林陨石雨”的外空间轨道提供了依据。

## 一、前言

宇宙中的陨星体<sup>1)</sup>以极高速度飞入大气层。由于飞行速度高,头部会形成很强的冲击波。这个冲击波传到地面时,人们就会听到类似于爆炸的巨大“爆炸声”。同时,由于冲击波的强烈压缩和加热,陨星头部达到很高温度,例如,陨星飞到20公里高空时,飞行速度仍有每秒10—15公里左右,可使陨星附近的空气加热到上万度。陨星表面温度要低一些,但也可以有几千度。所以陨星在飞入大气层后,加热到一定程度,会被汽化、烧蚀,成为一个光亮的火球。

石质陨星的热传导性能不好,内部温度分布不匀,这样,在热应力和冲击波的强烈作用下,陨星表面会发生剥离,陨星内部会开裂,这就是我们所说的“爆裂”现象。在爆裂之后,一块完整的陨星会破裂成许多块,大的达几吨重,小的可以不到一公斤重。

一定重量的陨石,飞行轨道是一定的。一般说来,陨石越重,飞行距离越远,着陆速度就越大。这样,这些不同重量的陨石降落在地面上时就会散开,形成一个带状分布,这就是陨石雨现象。

## 二、吉林陨石雨概况和实测资料<sup>[1]</sup>

吉林陨石雨降落在吉林市北郊和永吉县、蛟河县的七个公社的范围内。东西长72公里,南北最宽约8.5公里,分布面积为480平方公里(图1)。

降落在地面上的陨石重量自西向东是逐步减小的,我们把具有代表性的陨石自西往东记为1#, 2#, 3#, 4#, 5#, 6#陨石。它们的重量分别为:1#重2000公斤,2#重400公斤(这是根据群众反映情况粗估的数值,本文根据计算作了重估,见后),3#重124公斤,4#重70公斤,5#重15公斤,6#重0.5公斤<sup>1)</sup>。在这次计算中,我们重点研究这六块陨石

1) 我们把在爆裂以前的陨石母体称为陨星体。

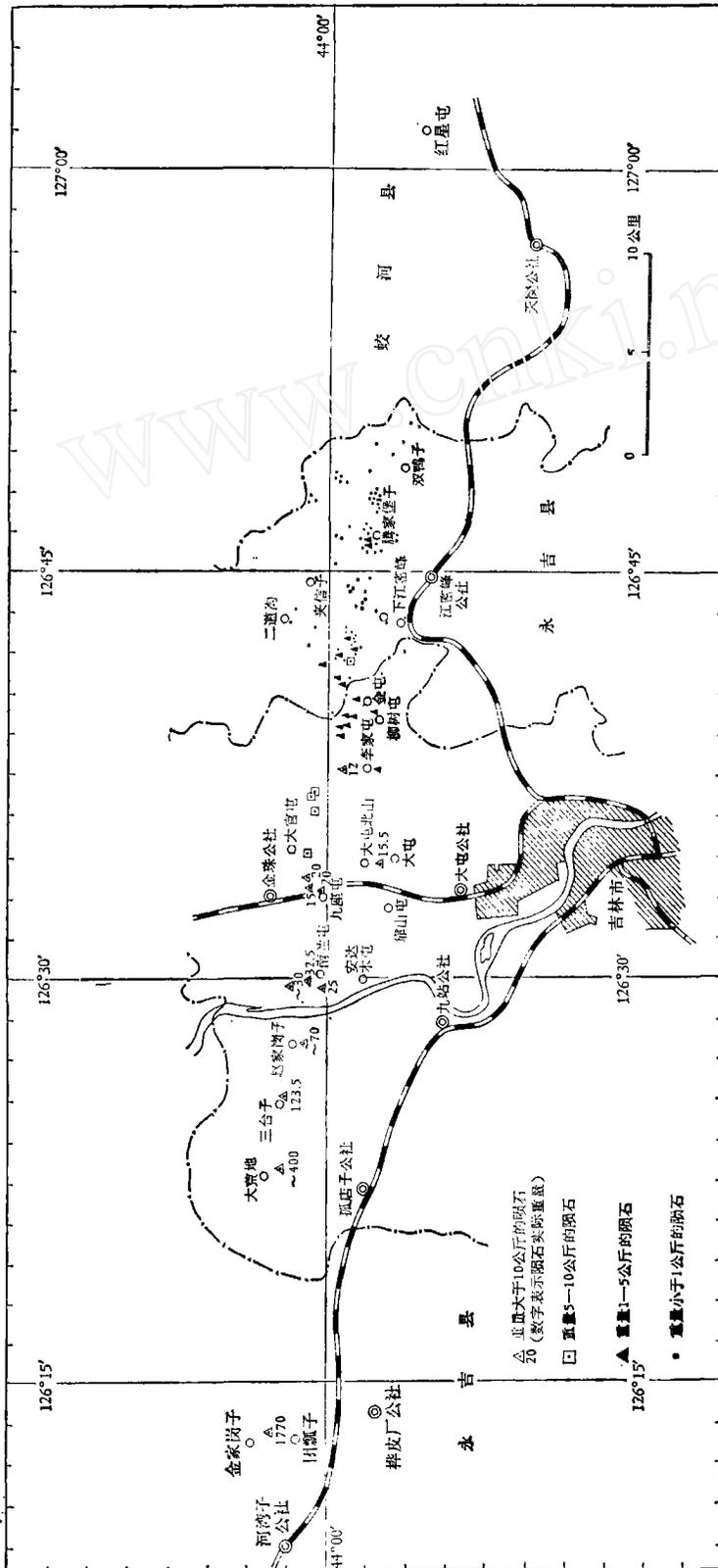


图 1 吉林陨石雨陨石分布图

的飞行轨道。

陨石着陆时的倾角(即和地面夹角)在西部桦皮厂公社一般在  $40^{\circ}$ — $60^{\circ}$  之间,在中部金珠公社、大屯公社一带陨石下落方向几乎和地面垂直,在东部江密峰公社一带陨石倾角和西部陨石倾角方向相反。

陨石在地面上的分布距离以 1\* 为准,它和 2\* 相距 12.8 公里,和 3\* 相距 16.5 公里,和 4\* 相距 19.5 公里,和 5\* 相距 28.6 公里。

1\* 陨石是目前世界上最大的一块陨石。它位于东经  $126^{\circ}12'52''$ , 北纬  $44^{\circ}1'31''$ 。它着陆时在地面上砸出一个大坑,坑略呈椭圆形,短径 2 米,长径 2.1 米,坑深 6.5 米(斜距)。根据陨石坑边缘,测出 1\* 陨石倾角为  $42^{\circ}$ 。我们认为 1\* 陨石质量大、速度高、穿透土层深度也大,因此这个倾角基本上表示了 1\* 陨石实际着陆时的倾角。但又考虑到 1\* 陨石落地时对陨石的反作用力等因素,这个值是偏小的,可能有  $3^{\circ}$  左右的偏差。因此,我们认为 1\* 陨石着陆倾角大约为  $42^{\circ}$ — $45^{\circ}$ 。

1\* 陨石着陆时,撞击地面,发出巨大的响声,大地发生了震动。吉林地震台和丰满地震台都记录到了这次震动的讯号:吉林台记录的到时为 15 时 2 分 50 秒;丰满台记录的到时为 15 时 2 分 46 秒。

根据当地的地层结构和地震波传播速度的有关资料,推算出地震波速大约为 4000 米/秒,由此可知 1\* 陨石触地时刻大约为 15 时 2 分 36 秒。

吉林陨石雨根据矿物成分定名为橄榄石-古铜辉石球粒陨石,密度为  $3.88$  克/厘米<sup>3</sup><sup>[2]</sup>。吉林陨石雨主要陨石基本参数见表 1。

### 三、飞行轨道计算中的基本假设

陨石的实际飞行过程是十分复杂的,包括烧蚀、剥离、爆裂以及自身转动等。为便于计算,特作如下假设:

1. 把不同形状的陨石都简化为圆球(称为当量球)。当量球半径由  $m_i = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_i$  求出,迎风面积为  $S = \pi R^2$ , 其中  $m_i$  为陨石质量,  $\rho_i$  为陨石密度,  $R$  为陨石当量球半径;

2. 在飞行过程中陨石重量不变,忽略烧蚀、剥离等现象所引起的质量变化;

3. 在飞行过程中陨石是一个质点,并且在垂直于地面的平面内运动,忽略地球自转的影响;

4. 陨星在空气动力作用下,仅产生一次爆裂现象,爆裂后由原来完整一块的陨星分裂成 1\*, 2\*, 3\*, 4\*, 5\*, 6\* 等陨石,这些陨石以相同速度和角度从爆裂位置(以下称为分离点)继续向前飞行,忽略由于爆裂而引起的角度和速度的偏差;

5. 地面是水平的,忽略地球曲率的影响;

6. 大气层厚度为 70 公里。

在具体轨道计算中还将引入一些假设。

### 四、飞行轨道基本方程

在垂直于地平面的平面内,取  $x-y$  坐标,坐标原点取在 70 公里处,坐标方向如图 2 所

1) 江密峰公社一带降落的陨石多为 0.5 公斤左右,此处所称 6\* 陨石是指其中的一块。

表 1 吉林陨石雨主要陨石基本参数和实测资料

名称 参数 编号	陨石质量 实测值 $m$ (千克)	陨石当量 球体积 $V$ (米 <sup>3</sup> )	陨石当量 球半径 $R$ (米)	陨石当量球 迎风面积 $S$ (米 <sup>2</sup> )	陨石迎风面 积和质量的 比值 $S/m$ (米 <sup>2</sup> /千克)	陨石着陆点 间距离 $\Delta L_0$ (米) <sup>(a)</sup>	陨石坑直 径实测值 $r$ (米)	陨石坑深 度实测值 $h$ (米)	陨石坑边 缘倾角实 测值 $\alpha_e$ (度)	陨石着陆时 刻实测值 $t_0$
1*	2000	$5.154 \times 10^{-1}$	$4.974 \times 10^{-1}$	$7.773 \times 10^{-1}$	$3.886 \times 10^{-4}$	0	2.0	6.5 <sup>(b)</sup>	42°	15 时 2 分 36 秒
2*	400 <sup>(d)</sup>	$1.031 \times 10^{-1}$	$2.909 \times 10^{-1}$	$2.658 \times 10^{-1}$	$6.645 \times 10^{-4}$	$1.28 \times 10^4$	1.5	0.5	55°	—
3*	124	$3.196 \times 10^{-2}$	$1.969 \times 10^{-1}$	$1.218 \times 10^{-1}$	$9.822 \times 10^{-4}$	$1.65 \times 10^4$	1.0	0.3	55°	—
4*	70	$1.804 \times 10^{-2}$	$1.627 \times 10^{-1}$	$8.314 \times 10^{-2}$	$1.188 \times 10^{-4}$	$1.95 \times 10^4$	—	—	—	—
5*	15	$3.866 \times 10^{-3}$	$9.736 \times 10^{-2}$	$2.978 \times 10^{-2}$	$1.985 \times 10^{-5}$	$2.86 \times 10^4$	0.4	0.7 <sup>(f)</sup>	93° <sup>(c)</sup>	—
6*	0.5	$1.289 \times 10^{-4}$	$3.134 \times 10^{-3}$	$3.085 \times 10^{-3}$	$6.169 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$	—	—	—	—
陨星体	4000 <sup>(e)</sup>	1.031	$6.268 \times 10^{-1}$	1.234	$3.084 \times 10^{-4}$	—	—	—	—	—

注: (a) 由地图标记点量出最大偏差约 500 米, 间距是以 1\* 陨石为基准。

(b) 1\* 陨石坑深为斜距。

(c) 此角度是根据 5\* 陨石擦伤的树枝和陨石坑位置测得。

(d) 第二块陨石已损坏, 400 千克的数据是根据群众反映情况粗略的, 本文根据计算作了重估, 见后。

(e) 据群众反映和收集到陨石总量估算的, 很不精确。

(f) 坑已被人挖深后的实测值。

示。陨石在大气中飞行时,仅受空气阻力和重力作用。陨石运动应满足如下基本方程:

$$m \frac{du}{dt} = -X \cos \vartheta \tag{1}$$

$$m \frac{dv}{dt} = mg - X \sin \vartheta \tag{2}$$

$$\frac{dx}{dt} = u \tag{3}$$

$$\frac{dy}{dt} = v \tag{4}$$

$$|\boldsymbol{w}| = \sqrt{u^2 + v^2}, |\boldsymbol{w}_0| = \sqrt{(u + u_0)^2 + v^2} \tag{5}$$

$$\lg \alpha = \frac{v}{u}, \lg \vartheta = \frac{v}{u + u_0} \tag{6}$$

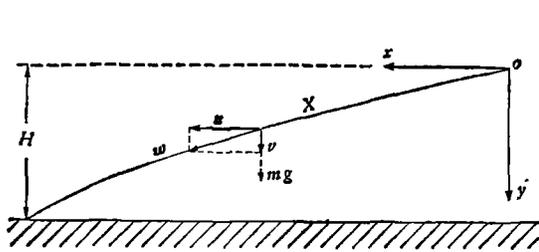


图 2 陨石飞行轨道示意图

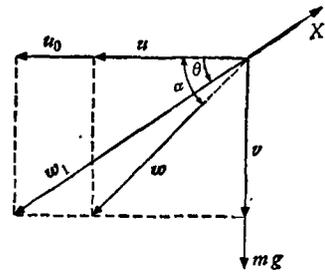


图 3 陨石飞行力场分析

其中  $u, v$  是陨石飞行的水平和垂直速度分量 (米/秒),  $u_0$  为高空风速度 (米/秒),  $m$  为陨石质量 (千克),  $X$  为空气阻力 (牛顿), 其表达式为

$$X = \frac{1}{2} \rho [(u + u_0)^2 + v^2] C_d \cdot S \tag{7}$$

其中  $C_d$  为阻力系数,  $S$  为陨石的迎风面积 (米<sup>2</sup>),  $\rho$  为高度  $H$  公里处空气密度 (千克/米<sup>3</sup>),  $w$  为陨石飞行速度 (米/秒),  $\vartheta$  是阻力  $X$  和地平面夹角,  $\alpha$  为陨石飞行速度和地平面的夹角,  $g$  为重力加速度。

在大气层中空气密度是随高度变化的, 国际标准大气表中给出了空气密度随高度变化的精确数值。为方便起见, 我们采用如下近似表达式<sup>[3]</sup>:

$$\rho = \rho_0 e^{-H/7000} \tag{8}$$

其中  $H$  为陨星飞行高度,  $H = H_0 - y$  (米),  $H_0$  为 70 公里,  $\rho_0$  为地面上标准空气密度,  $\rho_0 = 1.25$  千克/米<sup>3</sup>。

3 月 8 日吉林气象局给出了当天高空风资料 (图 4)。高空风近似表达式为

$$u_0 = \begin{cases} 3 + 0.005H, & H < 10^4 \text{ 米} \\ 80 - 0.0027H, & 10^4 < H < 3 \times 10^4 \text{ 米} \\ 0, & H > 3 \times 10^4 \text{ 米} \end{cases} \tag{9}$$

4 公里以上是西风, 4 公里以下是西北风。

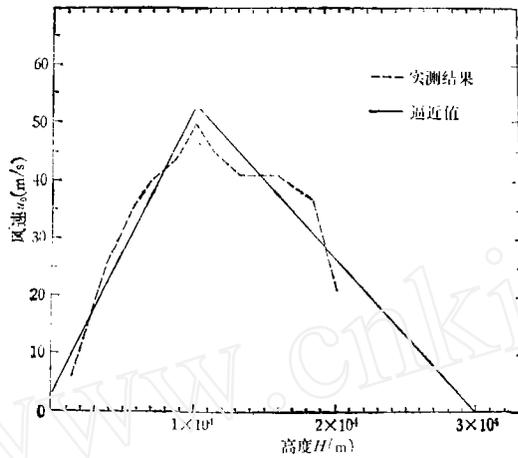


图4 吉林市3月8日气象资料分析

风速表达式

$$\begin{cases} u_0 = 3 + 0.005H & H < 10^4 \\ u_0 = 80 - 0.0027H & 10^4 < H < 3 \times 10^4 \\ u_0 = 0 & 3 \times 10^4 < H \end{cases}$$

空气动力学实验指出,陨石的空气阻力不仅和陨石的形状有关,而且和陨石的飞行马赫数有关. 对于圆球来说,空气阻力和飞行马赫数的关系如图5所示<sup>[4]</sup>. 为便于计算,我们给出近似表达式为:

$$C_d = \begin{cases} 0.95, & M > 1.3 \\ 0.75M - 0.25, & 0.7 < M < 1.3 \\ 0.5, & M < 0.7 \end{cases} \quad (10)$$

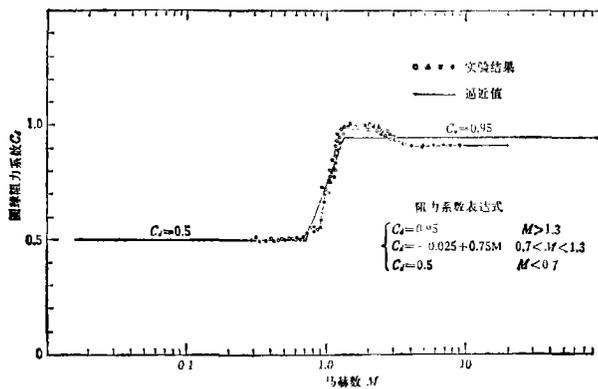


图5 圆球阻力系数和飞行马赫数关系

其中 $M$ 为陨石的飞行马赫数,记为 $M = \frac{|w|}{a}$ 或 $M = \frac{|w_1|}{a}$ , $a$ 为声速,这里近似取为常数 $a = 340$ 米/秒.

### 五、定解条件和解法

众所周知,为了确定陨石的飞行轨道,就必须首先知道它的初始速度和初始角度以及

分离点的位置。但是吉林陨石雨是自然界的一个偶然现象,无法精确测定和记录这些初始参数,这就给我们带来困难。为了确定吉林陨石雨的飞行轨道,我们就利用陨石降落在地面的参数(这是可以测定的)来反推初始参数。有 4 个初始参数是未知的:

进入大气层时的初始速度  $w_0$ ; 进入大气层时的初始角度  $\alpha_0$ ; 分离点高度  $H_0^*$ ; 分离点距离  $L_0^*$  (和 1# 陨石的水平距离)。为此需给出 4 个定解条件,根据实测资料可知: 1# 陨石着陆时倾角为  $42^\circ-45^\circ$ ; 3# 陨石和 1# 陨石间距 16.5 公里; 4# 陨石和 1# 陨石间距 19.5 公里; 5# 陨石和 1# 陨石间距 28.6 公里。由于第二块陨石已破碎,质量是未知的,为了确定第二块陨石质量  $m_2$ , 还必须引入一个定解条件,即 2# 陨石和 1# 陨石的间距 12.8 公里。这样,方程是完备的,可以求出确定解。

## 六、计算主要结果

吉林陨石雨飞行轨道计算结果列于表 2 和图 6、7 中。计算结果和实测结果相比,陨石间距偏差  $\Delta L_e < 300$  米, 1# 陨石着陆倾角偏差  $\Delta \alpha_e < 0.5^\circ$ 。

表 2 吉林陨石雨飞行轨道计算结果

陨星体总质量	$m_0 = 4000$ 千克						
陨星体进入大气层初值	$t_0 = 0, H_0 = 70$ 公里, $w_0 = 19$ 公里/秒, $\alpha_0 = 16^\circ 15'$						
陨星体爆裂时飞行参数	$t_0^* = 9.9$ 秒, $L_0^* = 172.7$ 公里, $H_0^* = 19.21$ 公里, $w_0^* = 14.24$ 公里/秒, $\alpha_0^* = 16^\circ 32'$						
陨星体爆裂后,各陨石质量	$m$ (千克)	2000	220	124	70	15	0.5
陨石落到地面时的主要参数	$t_e$ (秒)	40.9	61.4	66.6	72.1	90.0	152.5
	$L_e$ (公里)	229.93	217.29	213.72	210.20	201.04	184.25
	$w_e$ (米/秒)	284.1	210.5	195.1	178.7	135.1	72.9
	$\alpha_e$	$42^\circ 38'$	$74^\circ 56'$	$80^\circ 34'$	$85^\circ 14'$	$93^\circ$	$94^\circ 34'$
陨石间距计算值	$\Delta L_e$ (公里)	0	12.64	16.21	19.73	28.89	45.68
陨石间距实测值	$\Delta L_e$ (公里)	0	12.80	16.50	19.50	28.60	40—50
计算值和实测值偏差	(公里)	0	-0.16	-0.29	+0.23	+0.29	—
陨石着陆倾角计算值	$\alpha_e$	$42^\circ 38'$	$74^\circ 56'$	$80^\circ 34'$	$85^\circ 14'$	$93^\circ$	$94^\circ 34'$
陨石坑边缘倾角实测值	$\alpha_e$	$42^\circ$	$55^\circ$	$55^\circ$	—	$93^\circ$	—
计算值和实测值偏差		$38'$	$19^\circ 56'$	$25^\circ 34'$	—	0	—

上述结果是以 1# 陨石着陆倾角为  $42^\circ$  时计算得到的。如果 1# 陨石着陆倾角为  $42^\circ-45^\circ$  时, 那末吉林陨石雨飞行轨道的计算结果应是: 陨星进入大气层时初始角度  $\alpha_0 = 16^\circ 15'$ , 陨星进入大气层时初始速度  $w_0 = 19-15$  公里/秒, 陨星爆裂点的位置  $L_0^* = 57.21-57.36$  公里 (和 1# 陨石距离), 陨星爆裂点的高度  $H_0^* = 19.21-19.805$  公里, 陨星爆裂时角度  $\alpha_0^* = 16^\circ 33'-16^\circ 43'$ , 陨星爆裂时速度  $w_0^* = 14.24-11.55$  公里/秒 (1# 陨石着陆倾角取  $42^\circ$  是偏小的, 应取  $45^\circ$  较合理。与此相对应, 取  $\alpha_0 = 16^\circ 15'$ ,  $w_0 = 15$  公里/秒作为初值进行计算, 更为合理)。我们的计算结果只是一种近似。粗略的估算指出,

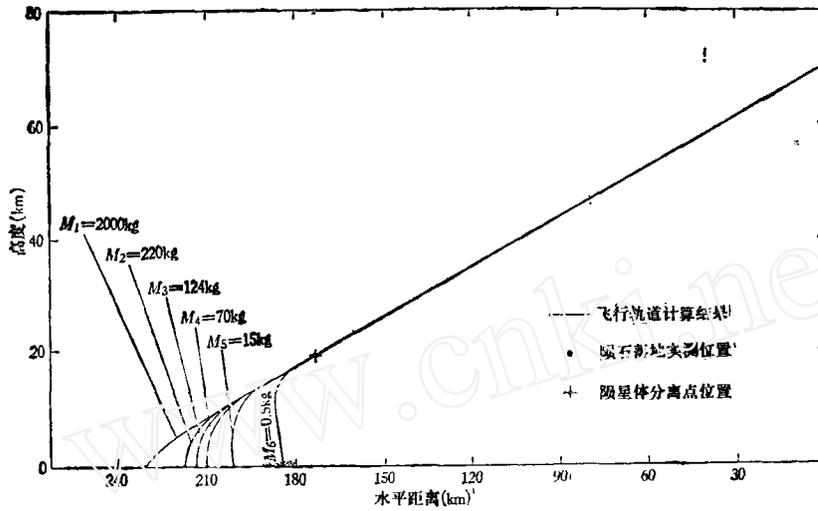


图 6 吉林陨石雨飞行轨道(一)

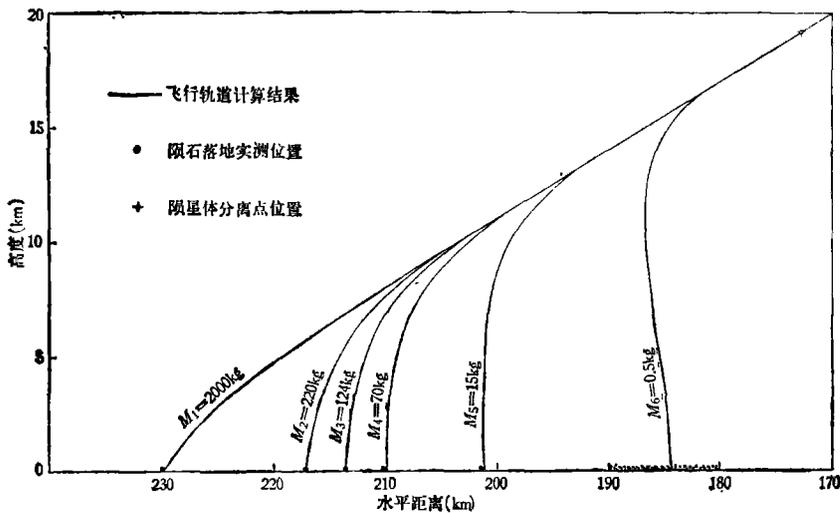


图 7 吉林陨石雨飞行轨道(二)

飞行轨道的计算结果允许的误差范围是： $\Delta\alpha_0 < 0.5^\circ$ ， $\Delta u_0 < 2$  公里/秒， $\Delta H_0^* < 2$  公里。

## 七、主要结论

### 1. 关于吉林陨石雨飞行轨道

(1) 吉林陨石雨飞行过程描述：陨星体大约在北京时间 15 时 1 分 55 秒以初始速度 19 公里/秒、初始角度  $16^\circ 15'$ ，在黑龙江省镜泊湖一带（距 1# 陨石水平距离为 230 公里）距地面 70 公里高空进入大气层，陨星又飞行了 10 秒后，飞过的水平距离为 172.71 公里，大约于北京时间 15 时 2 分 5 秒在蛟河县东部上空 19.21 公里处，由于热应力和空气动力的作用，产生了一次较强的爆裂。一个完整的陨星被分裂成 1#，2#，3#，4# 等陨石，同时陨星在 17—23 公里之间逐步产生剥离，而形成 5#，6# 小陨石。这些陨石同时以 14.2 公

里/秒的速度,  $16^{\circ}33'$  的角度继续向前飞行。1# 陨石在北京时间 15 时 2 分 36 秒降落在桦皮厂公社靠山十队的田野上(它的位置为东经  $126^{\circ}12'52''$ , 北纬  $44^{\circ}1'33''$ ), 其他 2#, 3#, 4# 陨石分别落在大荒地大队、三台子大队、赵家岗子大队。大量的小陨石降落在东部江密峰公社一带, 和飞行方向相反, 形成了这场陨石雨。

1# 陨石在大气层中飞行了 41 秒, 飞行的水平距离为 230 公里。

(2) 2# 陨石重量的确定: 由于 2# 陨石当时已损坏, 它的重量无法确定, 400 公斤的数据是根据当地群众反映的情况估计的。根据这次计算, 确定 2# 陨石的重量约为 220 公斤。

(3) 陨石降落速度: 计算结果表明, 各块陨石降落时飞行速度是亚声速的。1# 陨石速度最大, 着陆时速度为 284 米/秒, 接近声速。0.5 公斤重的陨石着陆时速度最小为 72.9 米/秒。这个计算结果和当地群众反映的先听到声音后看见陨石降落的亚声速现象是吻合的。

众所周知, 当物体的重力和空气阻力平衡时, 即

$$mg = \frac{1}{2} \rho_0 v^2 C_d S$$

时, 物体达到极限速度, 以后物体就以这个极限速度匀速下降。0.5 公斤重的陨石, 它的极

限速度为  $v_l = \sqrt{\frac{mg}{\frac{1}{2} \rho_0 C_d S}} = 72.3$  米/秒, 说明它在飞行过程中很快达到极限速度后, 以匀

速降落到地面上的。由于降落时速度小, 它们落地时不会产生较大的陨石坑, 这和江密峰公社一带所看到的现象是相符的。

(4) 陨石着陆倾角分析: 计算给出了各块陨石着陆倾角(参看表 2)。由计算结果可以看出, 陨石着陆倾角自 1# 陨石到 4# 陨石是越来越大的, 而且在南兰大队以东地区的 5#, 6# 陨石着陆倾角和西部陨石着陆倾角方向相反。这个计算结果和现场考察结果非常一致。同时, 1#, 5# 陨石着陆倾角的计算值和实测值也十分接近。

对于 1# 陨石, 由于着陆速度大, 土层相对说来是软的, 因此陨石着陆时穿入地层很深, 虽然在穿过土层时倾角要略有变化, 但不会很大, 陨石坑壁上擦痕的倾角基本上可以代表陨石的着陆倾角。5# 陨石着陆倾角实测值也是如此。因此上述计算结果和实测结果相符是合理的。

然而, 对于 2#, 3# 陨石来说情况就不同了, 它们着陆时形成的坑较浅(2# 陨石坑深 0.5 米, 3# 陨石坑深 0.3 米), 而陨石的块度较大(2# 陨石直径 0.7 米, 3# 陨石直径 0.5 米), 因此, 根据陨石坑边缘擦痕所测出的角度实际上并不是陨石真实的着陆倾角(图 8)。

根据计算, 2# 陨石着陆倾角应是  $74^{\circ}57'$ , 3# 陨石着陆倾角应是  $80^{\circ}35'$ 。

(5) 吉林陨石雨各块陨石着陆时间: 根据两个地震台测得的 1# 陨石着陆的时刻, 可

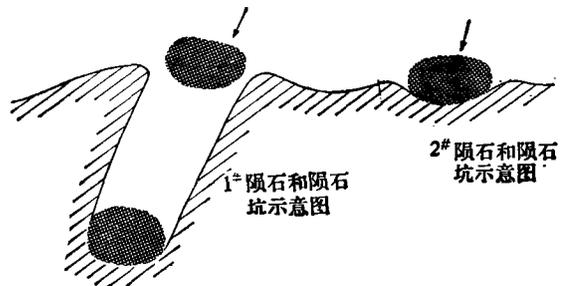


图 8 陨石着陆示意图

以确定陨石飞行时间和着陆时刻(表 3).

表 3

编 号	飞行时间	着 陆 时 刻
1#	40.9秒	15 时 2 分 36 秒
2#	61.4秒	15 时 2 分 56.5 秒
3#	66.6秒	15 时 3 分 1.7 秒
4#	72.1秒	15 时 3 分 7.2 秒
5#	90.0秒	15 时 3 分 25 秒
6#	152.5秒	15 时 4 分 27.6 秒

计算结果告诉我们,各块陨石由于它们重量不同,所受的空气动力不同,在大气层中的飞行时间和着陆时刻也是不相同的. 1# 陨石着陆最早,为 15 时 2 分 36 秒,而 0.5 公斤重的小陨石着陆最晚,为 15 时 4 分 27.6 秒,先后可以相差大约 2 分钟.

## 2. 吉林陨石雨飞行轨道的特性

(1) 影响飞行轨道的因素很多,例如有: 陨石重量、陨石大小、初始速度、初始角度,分离点位置、高空风、阻力系数等. 计算结果表明,影响陨石雨飞行轨道的主要因素是陨石重量、大小和初始角度.

(2) 吉林陨石雨分离以前,陨星飞过的水平距离为 172.71 公里,占全部水平距离的 75%. 但是陨星在这段路程中飞行倾角的变化很小,它的初始角度为  $16^{\circ}15'$ ,而到达分离点时它的飞行倾角为  $16^{\circ}33'$ ,相差  $18'$ . 因此,可以看出分离前飞行轨道基本上是直线,飞行轨道只有在高度约 20 公里以下时才发生明显弯曲.

(3) 计算中陨星总重量约为 4 吨,是根据当时收集到的标本的重量及分布规律所作的估计. 这个数值很不确切. 但是,计算结果表明,在陨星分离以前,陨星总重对飞行轨道计算的影响不大.

(4) 分离点位置和初值的关系: 在不同初始速度、不同初始角度时,飞行轨道上的最大动压值和最大动能损失率的位置列于表 4, 5 中. 从表中可以看出,最大动压值和最大动能损失率的位置仅和初始角度有关,而和初始速度关系不明显. 也就是说,当初始角度确定后,最大可能爆裂的位置也基本确定了,初始速度不同只会影响最大动压值和最大动能损失率值本身. 例如,当初始角度为  $15^{\circ}$  时,最大动能损失率的位置大都在 18 公里高空附近. 但初始速度为 10 公里/秒时,最大动能损失率为  $0.214 \times 10^{11}$  焦耳/秒,而初始速度为 20 公里/秒时,最大动能损失率为  $0.167 \times 10^{12}$  焦耳/秒. 同时我们还可以发现,随着初始角度的增加,分离点的位置降低,最大动压值和最大动能损失率值增大,这就是说,陨星经受的烧蚀时间和烧蚀量也增大,因此当初始角度和初始速度增加到一定值时,陨星就可能被全部烧毁. 吉林陨石雨之所以能保留下来,不被烧毁,从反面证实了它的初始角度和初始速度不会太大.

(5) 风的影响: 计算结果表明,风会影响飞行方向的变化. 1#, 2#, 3# 大陨石飞行方向变化不大. 而对小陨石而言,风的存在明显地影响到飞行方向的变化,甚至能使陨石飞行方向发生转折. 例如 15 公斤重的陨石,在西风的影响下,飞行方向发生转折. 对于 0.5 公斤重的陨石,风的影响更大,不仅可以使飞行方向转折,还能使陨石发生来回摆动现象,

表 4 重 4 吨的陨石从 70 公里飞入时最大动压

$\alpha_0$	$V_0$ (公里/秒)	10	15	20	25	30
10°	H(公里)	17.36	17.70	17.85	18.37	18.20
	q(牛顿/米 <sup>2</sup> )	$1.946 \times 10^6$	$4.089 \times 10^6$	$7.123 \times 10^6$	$1.107 \times 10^7$	$1.599 \times 10^7$
15°	H(公里)	15.11	15.29	14.90	14.95	14.93
	q(牛顿/米 <sup>2</sup> )	$2.731 \times 10^6$	$5.975 \times 10^6$	$1.059 \times 10^7$	$1.669 \times 10^7$	$1.599 \times 10^7$
20°	H(公里)	13.24	13.63	13.20	13.16	13.66
	q(牛顿/米 <sup>2</sup> )	$3.543 \times 10^6$	$7.896 \times 10^6$	$1.419 \times 10^7$	$2.253 \times 10^7$	$3.299 \times 10^7$
25°	H(公里)	11.51	11.40	11.71	11.98	12.23
	q(牛顿/米 <sup>2</sup> )	$4.353 \times 10^6$	$9.819 \times 10^6$	$1.781 \times 10^7$	$2.846 \times 10^7$	$4.189 \times 10^7$
30°	H(公里)	10.43	10.94	10.44	10.30	9.315
	q(牛顿/米 <sup>2</sup> )	$5.157 \times 10^6$	$1.176 \times 10^7$	$2.144 \times 10^7$	$3.448 \times 10^7$	$5.059 \times 10^7$

表 5 重 4 吨的陨石从 70 公里飞入时最大动能损失率

$\alpha_0$	$V_0$ (公里/秒)	10	15	20	25	30
10°	H(公里)	20.07	20.51	20.92	20.67	20.95
	$\dot{E}$ (焦耳/秒)	$1.517 \times 10^{10}$	$4.802 \times 10^{10}$	$1.119 \times 10^{11}$	$2.181 \times 10^{11}$	$3.785 \times 10^{11}$
15°	H(公里)	17.96	18.52	18.52	18.35	17.62
	$\dot{E}$ (焦耳/秒)	$2.144 \times 10^{10}$	$7.055 \times 10^{10}$	$1.672 \times 10^{11}$	$3.303 \times 10^{11}$	$5.787 \times 10^{11}$
20°	H(公里)	16.30	16.43	15.56	16.20	15.50
	$\dot{E}$ (焦耳/秒)	$2.791 \times 10^{10}$	$9.356 \times 10^{10}$	$2.244 \times 10^{11}$	$4.475 \times 10^{11}$	$7.897 \times 10^{11}$
25°	H(公里)	14.43	14.70	14.76	13.86	14.59
	$\dot{E}$ (焦耳/秒)	$3.443 \times 10^{10}$	$1.170 \times 10^{11}$	$2.831 \times 10^{11}$	$5.667 \times 10^{11}$	$1.009 \times 10^{12}$
30°	H(公里)	13.01	13.62	14.07	12.53	11.94
	$\dot{E}$ (焦耳/秒)	$4.080 \times 10^{10}$	$1.401 \times 10^{11}$	$3.393 \times 10^{11}$	$6.888 \times 10^{11}$	$1.225 \times 10^{12}$

并且受低空的偏北风影响,陨石偏离原来的飞行轨道,降落在飞行轨道的南边。因此,我们认为研究陨石雨飞行轨道时风的影响是不能忽略的。

### 3. 关于陨星一次爆裂假设的讨论

计算中我们采用了陨星一次爆裂的假设。为了对这一假设作进一步讨论,我们计算了分离点位置对飞行轨道的影响(见表 6 和图 9)。计算结果表明,分离点位置不同,对飞行轨道是有影响的,但是高度在 20 公里以上时,1#, 2#, 3# 陨石的飞行轨道几乎完全重合在一条直线上,只是从 20 公里附近高空开始才渐渐分离开来。计算也指出,如果陨石着陆点间距的计算值和实测值的偏差要小于 300 米,那末分离点高度只能在 19.21 公里附近,偏差不能大于 1 公里。

因此,我们认为 1#, 2#, 3# 陨石基本上是在同一位置上爆裂的。计算结果指出,这个

表 6 分离点位置  $H_0^*$  变化时对飞行轨道的影响

分离点飞行参数	着陆参数单位	1*	2*	3*	4*	5*	6*
$H_0^* = 70$ 公里 $w_0^* = 19$ 公里/秒 $\alpha_0^* = 16.25^\circ$	$t_e$ (秒)	41.8	66.1	72.6	79.6	102.6	183.5
	$x_e$ (公里)	229.54	214.38	209.91	205.39	192.95	164.71
	$w_e$ (米/秒)	286.70	212.3	196.9	151.0	135.2	72.9
	$\alpha_e$	43°24'	76°37'	82°5'	86°31'	93°26'	94°35'
	$\Delta L_e$ (公里)	0	15.16	19.63	24.15	36.59	64.83
$H_0^* = 49.96$ 公里 $w_0^* = 18.95$ 公里/秒 $\alpha_0^* = 16.36^\circ$	$t_e$ (秒)	38.1	62.2	68.8	75.7	98.6	178.9
	$x_e$ (公里)	161.04	145.90	141.45	136.94	124.57	96.64
	$w_e$ (米/秒)	282.3	212.4	196.70	180.0	135.1	72.9
	$\alpha_e$	45°30'	76°33'	82°5'	86°31'	93°27'	94°34'
	$\Delta L_e$ (公里)	0	15.14	19.59	24.09	36.46	64.40
$H_0^* = 30.0$ 公里 $w_0^* = 17.88$ 公里/秒 $\alpha_0^* = 16.47^\circ$	$t_e$ (秒)	34.0	57.3	63.5	70.1	91.5	165.8
	$x_e$ (公里)	93.38	78.81	74.57	70.31	58.81	34.64
	$w_e$ (米/秒)	282.6	212.1	196.5	179.6	135.20	72.9
	$\alpha_e$	43°18'	76°15'	81°48'	86°17'	93°22'	94°35'
	$\Delta L_e$ (公里)	0	14.57	18.81	23.07	34.37	58.74
$H_0^* = 19.21$ 公里 $w_0^* = 14.24$ 公里/秒 $\alpha_0^* = 16.55^\circ$	$t_e$ (秒)	31.1	51.6	56.8	62.3	80.1	142.7
	$x_e$ (公里)	57.23	44.58	41.01	37.49	28.33	11.54
	$w_e$ (米/秒)	283.7	210.4	195.0	178.6	135.1	72.9
	$\alpha_e$	42°43'	75°1'	80°37'	85°15'	92°59'	94°34'
	$\Delta L_e$ (公里)	0	12.65	16.22	19.75	18.91	45.69
$H_0^* = 15.02$ 公里 $w_0^* = 11.23$ 公里/秒 $\alpha_0^* = 16.61^\circ$	$t_e$ (秒)	29.3	47.4	51.9	56.7	72.0	126.9
	$x_e$ (公里)	43.47	32.55	29.55	26.61	19.10	6.11
	$w_e$ (米/秒)	285.0	208.76	193.4	177.2	134.8	72.9
	$\alpha_e$	42°6'	73°30'	79°12'	84°4'	92°29'	94°34'
	$\Delta L_e$ (公里)	0	10.93	13.93	16.86	24.37	37.36

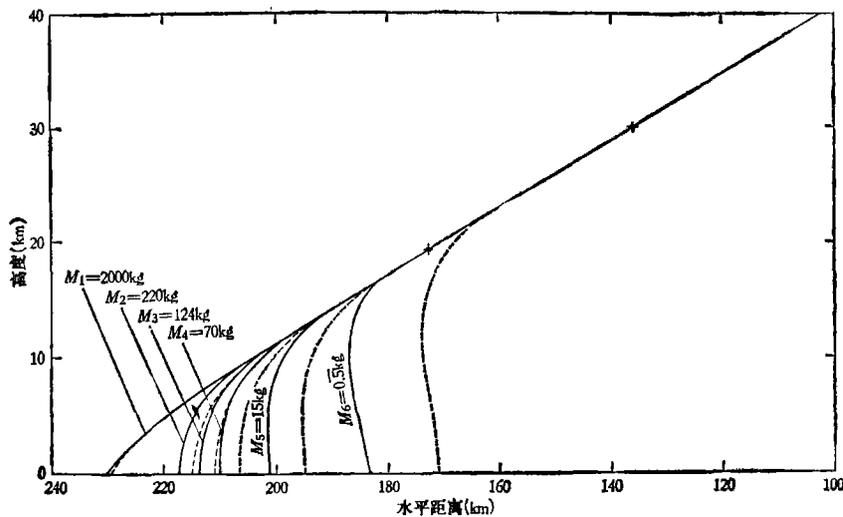


图 9 分离点位置对飞行轨道的影响

— 分离点位置为 19.209 公里的飞行轨道    - - - 分离点位置为 30.009 公里的飞行轨道

高度为 19.21 公里, 而 5\*, 6\* 小陨石则可能是在某一段距离上逐步剥离的。从吉林陨石雨分布图上可以看出, 0.5 公斤陨石散布在大约长 10 公里的范围内, 计算表明, 如果要使小陨石都降落在这个范围内, 那末小陨石剥离高度应在 17—23 公里之间。

为了进一步说清楚这一问题, 我们对陨星头部热流和动压值进行了计算, 发现陨星在 30 公里以上高空时, 热流和动压值是不大的, 只有飞到 20 公里高空附近时, 热流和动压才发生急剧变化, 很快升高到最大值, 以后又迅速降低。

陨星飞行过程中, 动压、减速度、动能损失率、驻点热流最大值的位置为<sup>[5]</sup>: 动压最大值高度 15.71 公里, 减速度最大值高度 15.41 公里, 动能损失率最大值高度 18.53 公里, 驻点热流最大值高度 23.10 公里。在这个范围内陨石所受的空气动力和热应力值都足以使它破裂, 因此可以看出, 如果陨星要发生爆裂, 那末最大可能的爆裂高度应在 15—23 公里之间。而我们计算所给出的爆裂高度是 19.21 公里, 正好发生在这个范围内, 并且就在陨星动能损失率最大值位置附近, 因此我们认为计算给出的分离点高度是合理的。

#### 4. 关于烧蚀问题

陨星以极高速度进入大气层时, 烧蚀是一个十分重要的现象。但是如果在计算中考虑烧蚀影响, 就会使问题复杂化。为了粗略估算一下烧蚀对飞行轨道的影响, 我们就以一个重 4 吨的陨星(简化成当量球)以  $\alpha_0 = 16.25^\circ$ ,  $w_0 = 19$  公里/秒飞入大气层的问题为例, 粗略根据热流来估算烧蚀量。计算结果表明:

- 1) 陨星主要烧蚀段在 30—10 公里高空。
- 2) 陨星烧蚀最严重的时候, 发生在 20 公里高空附近。
- 3) 陨星从 70 公里飞到 10 公里高空时, 烧蚀量约占 10%。

我们的计算是很粗糙的, 考虑到陨星表面的粗糙度、形状不规则、自转等因素, 烧蚀量可能还应增加一些, 可能会达到 10—20%, 由此我们认为烧蚀会对飞行轨道参数确定有一定影响, 但仍在所允许的误差范围内。

#### 5. 关于陨星爆裂现象分析

在吉林陨石雨降落过程中人们看到了火球和爆裂现象, 也听到了巨大的“爆炸”声。计算结果指出, 陨星是以 19 公里/秒的速度飞入大气层的。由于飞行速度很高( $M=50$ ), 陨星猛烈压缩前面空气, 形成强冲击波, 把空气压缩加热到很高温度。陨星到达分离点时, 飞行速度为 14.21 公里/秒, 这时空气被加热到 19000℃ 左右(远远超过太阳表面温度 6000℃), 空气中的氮、氧被分解和电离。这样, 陨星就被一团灼热的燃烧着的气团所包围, 成为一个光亮的火球。同时, 陨星在大气层中飞行时, 由于猛烈减速, 大量的动能转变成热能, 例如, 4 吨重的陨星飞到分离点附近时, 每秒钟要发出  $0.326 \times 10^{11}$  卡的热量。这些热量大部分散发到陨星周围的气流中去, 只有一小部分传给陨星, 但这已足以使陨星表面灼热, 烧蚀, 甚至汽化。计算结果指出, 陨星表面可达到 3500℃ 左右的高温。然而由于陨星是石质的, 热传导性能不好, 根据热传导方程的量纲分析, 可以知道热传导的特征长度和特征时间之间的关系为

$$\theta \propto \frac{\rho C_v L^2}{K}$$

这里  $\theta$  为特征时间,  $L$  为特征长度,  $\rho$  为陨星密度,  $C_v$  为陨星比热,  $K$  为陨星热传导系

数.

陨星飞到分离点位置时所需要的飞行时间大约为 10 秒. 由此, 我们可以得出, 这时热传导的深度大约只有 1 厘米, 这说明陨星吸收的热量大部分集中在陨星表面, 陨星内部仍然是冷的. 由于陨星温度分布很不均匀, 温度梯度很大, 因而产生很大的热应力. 粗略的估算告诉我们, 热应力的数量级为  $10^3$  公斤/厘米<sup>2</sup>. 这时, 作用在陨星上的空气动力也相当大, 大约为 180 公斤/厘米<sup>2</sup> 左右. 在这样的热应力和空气动力作用下, 陨星内部处于受拉状态, 而陨星是脆性材料, 其抗拉强度不大, 只有几百公斤/厘米<sup>2</sup>, 因此陨星完全能够破裂. 这就是我们所说的爆裂现象.

但是必须指出, 这种爆裂和炸药的爆炸是不同的, 因为: (1) 炸药爆炸时能量密度很大, 大约为  $4 \times 10^{10}$  尔格/克, 而爆裂现象的能量密度是不大的. 爆裂时释放的能量为  $\sigma \varepsilon / \rho$ , 其中  $\sigma$  为抗拉强度, 约为  $10^2 \sim 10^3$  公斤/厘米<sup>2</sup>,  $\varepsilon$  是破裂时应变, 约为  $10^{-3}$ ,  $\rho$  是陨星密度. 因此, 可以算出爆裂时释放的比内能为  $0.258 \times 10^6$  尔格/克, 总能量也只有  $1.032 \times 10^{12}$  尔格, 相当于 24.7 克 TNT 炸药. (2) 炸药的爆炸需要岩石在极短时间内聚集大量能量, 又在来不及膨胀的条件下, 突然减压. 这些条件在陨星飞行过程中都不具备.

人们所听到的“爆炸”声, 不是由于爆裂所引起的, 而是由于冲击波所引起的.

我们对吉林陨石雨飞行轨道的计算是一个初步尝试. 由于计算中采用了一些假设和简化, 所以计算结果只是一种近似, 仅供参考. 计算过程中郑哲敏等同志提出了不少指导性的意见, 程序设计是中国科学院数学研究所方惠中同志协助编制的, 在此我们表示感谢.

### 参 考 文 献

- [1] 中国科学院吉林陨石雨联合考察组, “吉林陨石雨”初步考察, 中国科学, 1 (1977).
- [2] 长春地质学院、吉林地质科学研究所, 吉林陨石雨物质成分和结构的初步研究, 长春地院学报, 3 (1976).
- [3] 钱学森, 星际航行概论, 科学出版社 (1964).
- [4] Hoerner, S. F., Fluid-Dynamic Drag, Washington (1965).
- [5] 郭永怀, 星际航行科技资料汇编(第一集), 科学出版社 (1965).