

文章编号:2095-6134(2016)01-0082-07

# 基于数值模拟的潮汐应力触发月球深震机制的探讨<sup>\*</sup>

张 贝, 张 怀, 石耀霖<sup>†</sup>

(中国科学院大学计算地球动力学重点实验室, 北京 100049)

(2015 年 4 月 2 日收稿; 2015 年 4 月 8 日收修改稿)

Zhang B, Zhang H, Shi Y L. A discussion about how the deep moonquakes are triggered by tidal stress[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016,33(1):82-88.

**摘 要** 月震发生在约 700 ~ 1 200 km 的深度,且具有 27 天多的活动周期. 本文对月球所受地球引力而产生的固体潮汐作用的位移场和应力场进行百万网格的并行有限元方法计算模拟. 计算结果显示最大剪应力随深度变化,如果月球可能有半径为 700 km 左右的液态核,或者虽然月核较小,但月幔底部处于部分熔融状态,则月震发生深度恰好就是剪应力最大的深度. 月核是否存在一直没有直接的地震学观测证据,本文的计算从另一个角度在一定程度上支持了液态月核可能存在的观点.

**关键词** 潮汐; 月震; 并行计算; 有限元

**中图分类号:**P184      **文献标志码:**A      **doi:**10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2016. 01. 013

## A discussion about how the deep moonquakes are triggered by tidal stress

ZHANG Bei, ZHANG Huai, SHI Yaolin

(College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Most moonquakes recorded are deep moonquakes that occur at depths of 700-1 200 km, and have a period of about 27 days. We use parallel finite element method and a model with million grids to simulate the tidal stress field and displacement field of the moon numerically. The results show that the maximum shear stress varies with depth. If the moon has a liquid core with a radius of about 700 km or if the moon has a smaller core but the materials at the bottom of lunar mantle are partially molten, the depth of the maximum shear stress will coincide with the depth of the deep moonquakes. The proposition that the moon has a core is lack of sound seismological evidence. Our calculation provides another approach and our result inclines to the suggestion that the moon has a liquid core.

**Key words** tidal stress; moonquake; parallel computation; finite element method

月球作为距离地球最近的天体,一直都是人类努力探索的对象. 对月球的探索是我们迈向更

遥远宇宙的第一步. 航天技术的发展使得可以对月球进行近距离观测,20 世纪六七十年代掀起

<sup>\*</sup> 中国科学院国家合作创新团队(Y32902JED2)和国土资源部深部探测技术与实验专项(201311187)资助

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: shiyl@ucas. ac. cn

了探测月球的高潮,尤其是美国的阿波罗计划,带回了大量的数据和岩石样品等以供研究。1969 年阿波罗 11 号在月面上设置了 6 台月震仪进行观测,其中 4 台正常工作<sup>[1]</sup>。从 1969 到 1977 年,一共记录到约 12 000 例月震,其中约 7 000 例为深源月震<sup>[2]</sup>,这些深源月震发生在约 700 ~ 1 100 km 深度范围,且许多深震丛集出现,并有着显著的周期行为<sup>[3]</sup>,周期为 27.2 或 27.5 天<sup>[4]</sup>,与地球-月球轨道几何参数有关<sup>[5]</sup>,也与震源所在位置有关<sup>[6]</sup>。我们知道,月球绕地球运行恒星月的时间为 27.3 天,而且月球总以一面对着地球,所以在月球的参考系中,地球与太阳的运行都是以月为周期。这种具有相同周期的行为预示着深源月震的发生与地球、太阳的作用很可能有某种关联,而潮汐作用正是引起月球内部应力场变化从而诱发月震的可能因素之一。由于太阳距离遥远,其潮汐作用与地球相比很小,所以主要考虑地球的潮汐作用对月球的影响。本文将对此进行一些定量的讨论。

# 1 月球结构

虽然长久以来人们对月球作了大量的研究工作,但是我们所掌握的资料仍然十分匮乏,对于月球内部结构的了解远不如对地球了解得详细。在研究地球结构时人们使用地震波数据反演的的方法,这种方法在用来研究月球时有很大困难。首先,在月球表面不能像在地球上一样建设很多台站,这样就使得月震数据的覆盖面很小,难以做出全球模型的反演;其次,在 1 100 km 深度以下没有月震数据,此深度以下的月球结构无法用月震数据得出,只能通过与地球等行星的类比,利用重力、电磁等方法进行推测<sup>[7]</sup>。人们通过多种地球物理方法得出的一个月球结构模型如图 1 所示。

图 1 表明,月球像地球一样也具有圈层结构,大体可分月壳、月幔、月核 3 个圈层,然而月球结构的一些细节仍然不能确定,比如是否存在液态核以及下月幔底部是否熔融,至今仍无定论。对于月球内部结构的了解不足也是对月球进行数值模拟的一大困难,因为要进行模拟就必须要有物理模型,要有准确的物理模型就必须要对其结构有准确的信息。虽然有这个困难,但是我们可以根据已有的知识,先根据合理的假设得出

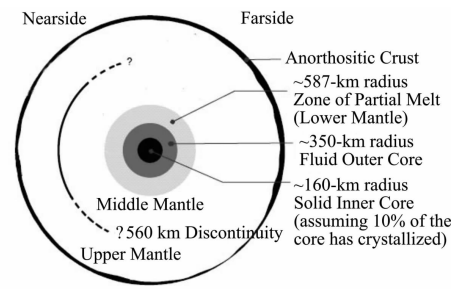


图 1 月球内部结构示意图<sup>[2]</sup>  
Fig. 1 Structure of the Moon

一个物理模型,然后依照此模型进行数值模拟,将得出的结果与实际观测对照,反过来检验我们所用模型的合理性。

# 2 潮汐作用

如图 2 所示,假设 2 个天体(图中为月球与地球)绕它们共同的质心 O 作圆周运动,而它们各自作平动(即没有自转),那么对于其中一个天体上的参考点 P,会受到万有引力 F2 和惯性离心力 F1,它们的合力就是所谓的潮汐力。以月球球心为原点,月球球心到地球球心连线为 x 轴,则潮汐力在 3 个方向分量分别为:

$$\begin{aligned} f_x &= \frac{GMm}{L^2} \frac{D-x}{L} - \frac{GMm}{D^2}, \\ f_y &= -\frac{GMm}{L^2} \frac{y}{L}, \\ f_z &= -\frac{GMm}{L^2} \frac{z}{L}, \end{aligned}$$

其中,G 为万有引力常数,M、m 分别表示地球、参考单元质量,L、D 分别表示参考单元、月球球心到地球球心的距离,x、y、z 表示参考单元坐标。从上面公式可以看出,潮汐力大小与对面天体的质量成正比,与两天体之间距离的 3 次方成反比,太阳质量  $1.99 \times 10^{30}$  kg,是地球的  $3.3 \times 10^6$  倍,而太阳到地球的距离  $1.5 \times 10^8$  km,是月地距离的约 400 倍,计算可知月球受到太阳的潮汐作用大约为地球潮汐作用的 0.6%。因此一般认为潮汐作用相对于地球的潮汐作用可以忽略不计。

# 3 网格模型

本文采用朱桂芝等<sup>[8]</sup>、陈绍林等<sup>[9]</sup>发展的一种方法生成网格。传统的经纬度划分网格方法会使球心处的网格过分密集,浪费计算资源。而本文所用的方法是先构造一个小立方体,在立方体

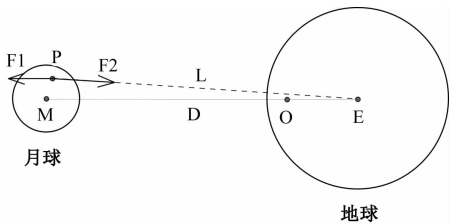


图 2 地月系统潮汐作用示意图

Fig.2 Tidal force of the Earth-Moon system

6 个面方向分别向外扩展,在扩展过程中可以将网格适当加密,将最后得到的大立方体投影成球体.

在本文计算过程中,使用上述方法将月球划分为 1 010 223 个单元,共 1 029 984 个节点,在表面处的单元边长约 8 km(约 0.27°). 剖面如图 3 所示.

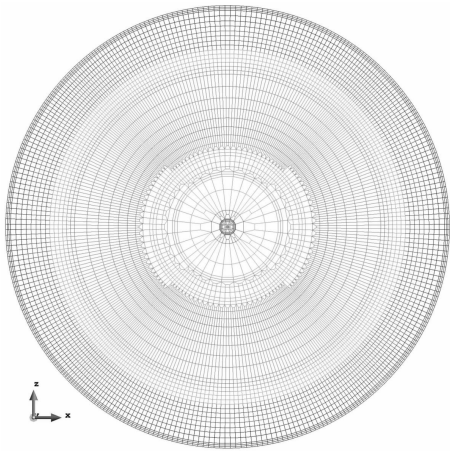


图 3 计算网格剖面图

Fig.3 Profile of our working mesh

4 计算结果

本文采用基于 MPI 环境的并行有限元计算. 假设月球各层为均匀各向同性线弹性介质,使用泊松比为 0.499 9 的弹性介质近似代表液态介质,分别计算了两个模型. 两个模型使用相同的网格. 材料参数的设置,对于 1 100 km 深度以上的部分,根据参考文献[10-12]中利用月震数据反演得到速度结构,我们依照月震波速计算出杨氏模量和泊松比;对于 1 100 km 深度以下部分则依照参考文献[2, 13-15]中的一些模型做出假设.

模型 1:

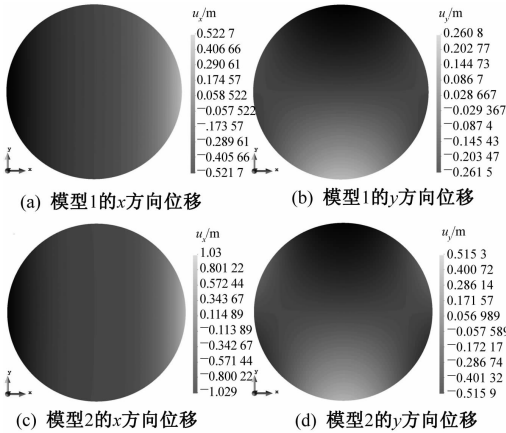
分为月壳、上月幔、下月幔、月核 4 个均匀层,各层材料参数设置见表 1.

表 1 模型 1 的材料参数

Table 1 Material parameters in model 1

| 分层         | 半径范围<br>$R/\text{km}$ | 杨氏模量 $E/$<br>Pa | 泊松比<br>$\nu$ | 密度 $\rho/$<br>( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) |
|------------|-----------------------|-----------------|--------------|--|
| 月核<br>(液态) | 0 ~ 400               | 0.25e10         | 0.499 9      | 6 500                                    |
| 下月幔        | 400 ~ 1 200           | 0.20e12         | 0.27         | 3 583                                    |
| 上月幔        | 1 200 ~ 1 700         | 0.15e13         | 0.26         | 3 365                                    |
| 月壳         | 1 700 ~ 1 738         | 0.69e11         | 0.33         | 2 900                                    |

图 4(a)、图 4(b) 给出潮汐作用引起月球表面的位移场计算结果. 由于地球质量比月球质量大很多,月球受到的潮汐作用也比地球受到的作用更大,这在月球表面位移可以看出来,地球表面由于潮汐作用引起的位移大约为 30 cm.

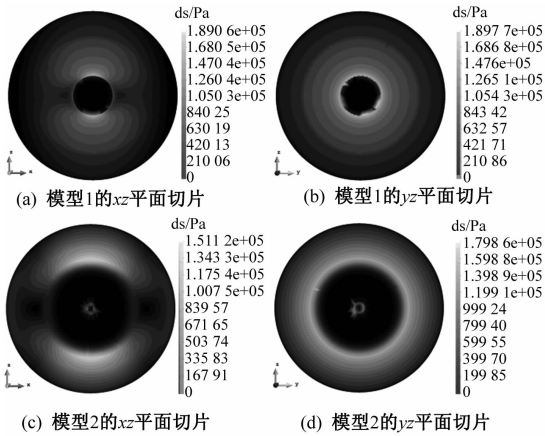


由对称性,z 方向位移与 y 方向位移相同

图 4 潮汐作用下月球的位移场

Fig.4 Tidal displacement on the Moon

为了与月震的观测联系起来,有必要计算出最大剪应力的分布情况,图 5(a)、图 5(b) 为计算出的最大剪应力的剖面图.



由对称性,xy 切片应力与 xz 切片应力相同.

图 5 潮汐作用下最大剪应力剖面图

Fig.5 Profiles of the maximal shear stresses

计算结果表明,当存在一个液态核的时候,最大剪应力将在最靠近液态核的外侧集中,亦即此处岩石容易发生断裂而造成月震.在此模型中,最大剪应力集中分布在紧靠液态核外侧的下月幔底部,即 1 300 km 深处.而此处已经处于 1 100 km 深度以下的无月震区域.如果下月幔底部也处于熔融状态,那么这个应力集中区应该会向外扩展到月震频发区,这就是模型 2 的内容.

模型 2:

材料参数仍然按照速度结构(1 100 km 深度以上)和假设得出,虽然还是核、幔、壳的结构,但在每个结构中又按照速度结构进行不同程度的细分,并假设下月幔底部处于熔融状态(泊松比设为 0.499 9).材料参数如表 2.表 3 为各个不同圈层的对应半径.

表 2 模型 2 的材料参数

| Table 2 Material parameters in model 2 |               |                    |           |                                  |
|--|---------------|--------------------|-----------|----------------------------------|
| 层数                                     | 半径/km         | 杨氏模量 $E/\text{Pa}$ | 泊松比 $\nu$ | 密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$ |
| 1                                      | 0.666 666E+02 | 2.384 900E+11      | 0.255 4   | 0.430 000E+04                    |
| 2                                      | 0.138 000E+03 | 2.384 900E+11      | 0.255 4   | 0.430 000E+04                    |
| 3                                      | 0.296 915E+03 | 2.384 900E+11      | 0.255 4   | 0.430 000E+04                    |
| 4                                      | 0.400 000E+03 | 0.010 000E+11      | 0.499 9   | 0.344 000E+04                    |
| 5                                      | 0.435 272E+03 | 0.010 000E+11      | 0.499 9   | 0.344 000E+04                    |
| 6                                      | 0.515 421E+03 | 0.010 000E+11      | 0.499 9   | 0.344 000E+04                    |
| 7                                      | 0.515 421E+03 | 0.010 000E+11      | 0.499 9   | 0.344 000E+04                    |
| 8                                      | 0.560 871E+13 | 0.010 000E+11      | 0.499 9   | 0.344 000E+04                    |
| 9                                      | 0.638 002E+03 | 0.010 000E+11      | 0.499 9   | 0.344 000E+04                    |
| 10                                     | 0.664 141E+03 | 0.026 200E+11      | 0.497 8   | 0.350 000E+04                    |
| 11                                     | 0.722 705E+03 | 0.61 900E+11       | 0.494 7   | 0.350 000E+04                    |
| 12                                     | 0.786 433E+03 | 0.145 600E+11      | 0.487 3   | 0.350 000E+04                    |
| 13                                     | 0.855 781E+03 | 0.339 900E+11      | 0.468 8   | 0.350 000E+04                    |
| 14                                     | 0.937 996E+03 | 0.776 800E+11      | 0.419 3   | 0.35 000E+04                     |
| 15                                     | 0.101 335E+04 | 1.664 200E+11      | 0.298 5   | 0.349 000E+04                    |
| 16                                     | 0.110 271E+04 | 1.687 500E+11      | 0.284 0   | 0.349 000E+04                    |
| 17                                     | 0.120 000E+04 | 1.710 800E+11      | 0.278 2   | 0.349 000E+04                    |
| 18                                     | 0.123 023E+04 | 1.734 100E+11      | 0.272 3   | 0.349 000E+04                    |
| 19                                     | 0.125 800E+04 | 0.757 500E+11      | 0.266 2   | 0.349 000E+04                    |
| 20                                     | 0.129 298E+04 | 1.780 700E+11      | 0.259 8   | 0.349 000E+04                    |
| 21                                     | 0.132 555E+04 | 1770 000E+11       | 0.265 8   | 0.342 550E+04                    |
| 22                                     | 0.133 798E+04 | 1.759 000E+11      | 0.271 5   | 0.336 220E+04                    |
| 23                                     | 0.139 316E+04 | 1.747 700E+11      | 0.277 1   | 0.330 000E+04                    |
| 24                                     | 0.142 825E+04 | 1.734 300E+11      | 0.274 5   | 0.325 540E+04                    |
| 25                                     | 0.146 423E+04 | 1.720 900E+11      | 0.271 9   | 0.321 130E+04                    |
| 26                                     | 0.150 111E+04 | 1.707 500E+11      | 0.269 2   | 0.316 790E+04                    |
| 27                                     | 0.153 892E+04 | 1.694 200E+11      | 0.266 5   | 0.312 210E+04                    |
| 28                                     | 0.157 769E+04 | 1.681 000E+11      | 0.263 8   | 0.308 280E+04                    |
| 29                                     | 0.161 743E+04 | 1.667 700E+11      | 0.261 0   | 0.304 110E+04                    |
| 30                                     | 0.167 799E+04 | 1.654 500E+11      | 0.258 2   | 0.300 000E+04                    |
| 31                                     | 0.170 001E+04 | 1.170 600E+11      | 0.200 7   | 0.290 000E+04                    |
| 32                                     | 0.171 801E+04 | 1.170 600E+11      | 0.200 7   | 0.290 000E+04                    |
| 33                                     | 0.172 526E+07 | 0.914 700E+11      | 0.193 2   | 0.280 000E+04                    |
| 34                                     | 0.173 801E+04 | 0.914 700E+11      | 0.193 2   | 0.280 000E+04                    |

表 3 模型 2 的各个圈层

| Table 3 Moon structure in model 2 |               |
|-----------------------------------|---------------|
| 圈层                                | 半径范围/km       |
| 内核(固态)                            | 0 ~ 138       |
| 外核(液态)                            | 138 ~ 400     |
| 下月幔                               | 400 ~ 1 200   |
| 上月幔                               | 1 200 ~ 1 700 |
| 月亮                                | 1 700 ~ 1 738 |

图 4(c)、图 4(d) 给出潮汐作用引起的月球表面的位移场.图 5(c)、图 5(d) 为最大剪应力的分布,对比模型 1 的结果可以看出,月球内部结构的改变对计算结果有影响.模型 2 的计算结果表明,当下月幔底部处于熔融状态时,最大剪应力的集中区域会扩展至下月幔底部附近,紧靠着熔融部分的一层之中,这样就与月震频发区的深度相吻合.由于中心网格较稀疏,所以有不规则的形状出现.

5 潮汐应力在一个近点月内的变化

由于月球总将一面对着地球,如果月球绕地球是圆形的轨道,则虽然月球受到地球的潮汐作用,但潮汐应力的大小基本不会变化.然而,月球绕地球的轨道为椭圆形,它到地球的距离在一个近点月内(月球两次通过椭圆轨道近地点的时间)周期性变化.月球绕地球旋转的轨道椭圆偏心率为 0.054 9<sup>[16]</sup>,在近地点和远地点距离地球相差 10.4%.而潮汐力的大小和二天体间距离的 3 次方近似成反比,因此,在一个近点月周期内,估算出差应力相对和绝对变化量为 28.1%, $0.5 \times 10^5$  Pa.可以看出在一个近点月的周期(27.554 551 d)之内,潮汐作用产生的差应力变化明显,这说明潮汐作用使岩石应力状态改变.实际观测到某些丛集的月震具有 27.58 d 的周期<sup>[5]</sup>,说明潮汐作用触发月震是很有可能.实际观测到的另一些丛集的月震具有 27.19 d 的周期<sup>[5]</sup>,这与交点月(即月球回到其轨道平面与黄道交点所需的时间)长度 27.212 220 d 相近,对某些纬度的月震可能这种纬向位置变化引起的应力作用更为明显.

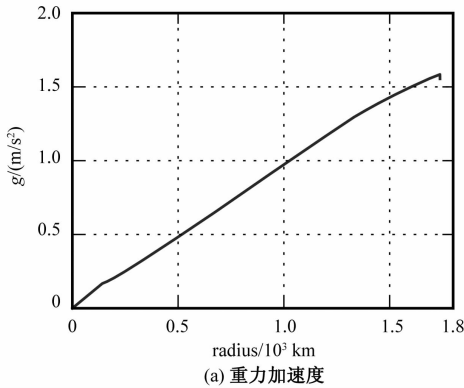
太阳在一个月之内离月球最近和最远时距离相差 0.51%,一个月内应力相对和绝对变化分别为 1.5%、965 Pa.无论从太阳对月球的潮汐作用自身,还是与地球对月球的作用相比,太阳对月球的潮汐作用的月变化都很小,就潮汐作用来说,地球对月球始终起主导作用.

6 讨论和结论

虽然计算的地球对月球的潮汐应力表明,潮汐应力可能是造成月震周期性的主要原因,但是,为什么会发生月震仍然存在未解的谜团. 我们知道,通常岩石破裂遵循库伦 - 摩尔破裂准则,即在  $\tau - \sigma_n$  平面上为  $\tau = \tau_0 + \mu\sigma_n$  的一条直线,当岩石所处的应力状态所表示的莫尔圆与之相切时,则岩石发生破裂. 因此,对于处于一定应力临近破坏状态下的岩石,如果潮汐应力变化使其莫尔圆与岩石破裂线之间位置发生相对变化,可能会触发月震.

然而,1 000 km 深度的月岩会处于什么样的应力状态呢? 利用模型 2 假设的密度,可以计算出在月震多发区的静岩压力:

$$\frac{dp}{dr} = -\rho g,$$
$$g = \frac{GM}{r^2},$$



其中  $p$  表示在半径为  $r$  处的静岩压力,  $g$  为此处的重力加速度,  $M$  为半径小于  $r$  的球体部分的质量,  $G$  为万有引力常数.

整理上两式并积分可得:

$$P_i = \frac{GC\rho_i}{r} - \frac{2}{3}\pi G\rho_i^2 r^2 + A_i, \quad 2 \leq i \leq 34,$$
$$P_1 = -\frac{2}{3}\pi G\rho_1^2 r^2 + A_1,$$

其中

$$C = -\frac{4}{3}\pi r_{i-1}^3 \rho_i + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{4}{3}\pi (r_j^3 - r_{j-1}^3) \rho_j,$$

$P_i$  表示第  $i$  层中的静岩压力,  $\rho_i$  为第  $i$  层的密度,  $r_i$  为第  $i$  层外表面的半径,  $A_i$  为第  $i$  层外表面处的压强. 这里使用  $A_{34} = 0$  即月球表面的静岩压力为 0 作为边条件.

由此可以得到重力加速度和静岩压力随半径的变化如图 6 所示.

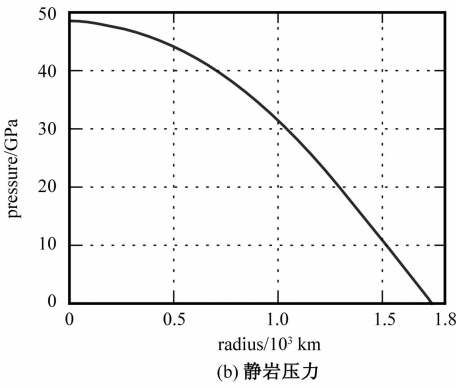


图 6 重力加速度 (a) 和静岩压力 (b) 随半径的变化

Fig. 6 (a) Gravity vs. radius; (b) lithostatic pressure vs. radius

经计算得到在 1 000 km 深处岩体静压大约为 3.9 GPa, 大体相当于地球岩石圈底部的围压. 在这样的围压下, 如果库伦 - 莫尔破裂准则  $\tau = \tau_0 + \mu(\sigma_n - p)$  中的摩擦系数  $\mu$  为 0.6, 则差应力需要达 1 GPa 以上, 远大于潮汐部分的差应力 ( $1.8 \times 10^5$  Pa). 如此小的差应力很难成为主导月震发生的原因, 但是我们又确实观察到破裂与潮汐有关. 这一问题需要继续研究, 我们估计有两种可能性, 一是在月震多发区存在孔隙流体和高孔隙流体压力, 使此区域需要的差应力大幅度减少; 二是存在别的机制在这些区域产生足够大的

差应力, 潮汐作用在此巨大差应力的基础上触发月震.

另一方面, 深源月震的体波震级多为 1 ~ 2 级, 较大的也不过在 3 级左右, 月震释放的能量最大约为  $10^6$  J<sup>[17-18]</sup>, 那么潮汐变形所积累的能量是否足以提供月震所需的能量呢? 由于大的月震震矩大约为  $5 \times 10^{13}$  N · m<sup>[18]</sup>, 故其矩震级约为 3 级, 利用地震震级与破裂面长度之间的经验关系:  $\lg(\text{RLD}) = a + b \times M$ , 其中  $a = -2.44$ ,  $b = 0.59$ , RLD 为破裂长度,  $M$  为矩震级<sup>[19]</sup>, 可以得出破裂长度约为 0.214 km, 于是一个包含破裂面的立方

体体积大约为  $10^7 \text{ m}^3$ , 根据我们计算的结果, 潮汐变形积累的能量密度最大约为  $0.34 \text{ J/m}^3$ , 那么在这个包含破裂面的立方体中潮汐变形所积累的应变能大约为  $3.4 \times 10^6 \text{ J}$ , 与月震释放的能量相当。

通过以上 2 个模型的计算, 可以看出当月球内部存在液态介质时, 由于潮汐作用而引起的剪应力会在靠近液态介质的外侧集中, 例如模型 1 的液核外侧、模型 2 的下月幔底部外侧, 而根据目前所掌握的月震资料来看,  $700 \sim 1\,100 \text{ km}$  为月震的频发区, 说明在此深度存在着剪应力的集中, 而  $1\,100 \text{ km}$  深度以下没有检测到月震, 说明此深度以下可能处于熔融或部分熔融的状态。这里有两种可能性。一种是液态月核半径的大小约为 700 多 km。关于月核的大小目前没有确切的估计, 柯宝贵<sup>[13]</sup> 估计  $704 \sim 356 \text{ km}$ , 如果月核半径为 700 多 km, 则  $1\,000 \text{ km}$  左右深度恰好为应力集中区。另外一种可能是月核半径小于  $700 \text{ km}$ , 但月幔底部处于部分熔融状态, 如同地球存在岩石圈和软流圈一样, 可能月幔下部也存在软的圈层, 其上界面大体位于  $1\,000 \text{ km}$  深度。由于月球热流测量数据十分有限, Apollos 15 和 17 的钻孔测量结果分别为  $21$  和  $14 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ , 因此对于月球深部介质的状态至今仍有争论, 不同学者通过不同途径对月球所处的热状态进行计算<sup>[20-25]</sup>, 多数认为  $1\,000 \text{ km}$  深处的温度在  $1\,200 \text{ }^\circ\text{C}$  左右, 在此情况下不会存在熔融状态。不过也有不同的模型计算出的温度高于  $1\,200 \text{ }^\circ\text{C}$ , 并认为在  $950 \text{ km}$  深度月球介质处于部分熔融状态<sup>[22]</sup>, 与本文上述所作的假设相符合。

月球深震往往汇聚于一些特定区域成团组<sup>[6, 26-28]</sup>, 这与我们计算的剪应力区有象限性(例如如图 5)也可能有关。将来如果对深震机制有更好的了解, 有助于比较不同位置的震群与潮汐应力的力学联系。

$1\,100 \text{ km}$  以下月震资料的缺乏, 造成对此深度范围月球结构的了解困难, 但月球深震的发生, 包含了极其丰富的信息, 而且我们仍然没能很好地了解。本文仅仅是一个初步探讨, 但为月球深部结构的研究提出了另一条思路。

## 参考文献

- [1] Lognonné P, Mosser B. Planetary seismology[J]. Surveys in Geophysics, 1993, 14(3): 239-302.
- [2] Wieczorek M A, Jolliff B L, Khan A, et al. The Constitution and Structure of the Lunar Interior[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2006, 60(1): 221-364.
- [3] Bulow R C, Johnson C L, Bills B G, et al. Temporal and spatial properties of some deep moonquake clusters[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(E9).
- [4] Koyama J. Chaotic occurrence of some deep moonquakes[C]// 36th Annual Lunar and Planetary Science Conference, 2005, 36: 1 077.
- [5] Bills B G, Bulow R, Johnson C L. Influence of earth-moon orbit geometry on deep moonquake occurrence times[C]// Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts. 2008: 1 735.
- [6] Frohlich C, Nakamura Y. Geographic variations in the tidal control of deep moonquake nests and speculation about their mechanical origin[C]// Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts. 2007, 38: 1 749.
- [7] 丰海. 利用重力场和地形数据反演月亮厚度[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(3): 131-134.
- [8] 朱桂芝, 张怀, 石耀霖. 优化地球三维有限元计算网格的一种方法[J]. 中国科学院研究生院学报, 2006, 23(5): 676-680.
- [9] 陈绍林, 张怀, 朱桂芝, 等. 自转速率快速变化引起的全球位移场和应力场[J]. 地震, 2008, 28(4): 1-12.
- [10] Khan A. A new seismic velocity model for the moon from a Monte Carlo inversion of the Apollo lunar seismic data[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(11): 1 591-1 594.
- [11] Lognonné P, Gagnepain-Beyneix J, Chenet H. A new seismic model of the moon: implications for structure, thermal evolution and formation of the Moon[J]. Earth and Planetary Science letters. 2003, 211(1/2): 27-44.
- [12] Gagnepain-Beyneix J, Lognonné P, Chenet H, et al. A seismic model of the lunar mantle and constraints on temperature and mineralogy[J]. Physics of The Earth and Planetary Interiors, 2006, 159(3/4): 140-166.
- [13] 柯宝贵. 应用 Lane-Emden 方程分析下月幔厚度与月核半径大小[J]. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1 208-1 213.
- [14] 占伟, 李斐. 月球内部构造研究综述[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 737-742.
- [15] 张承志. 月球和火星内部结构模型的比较[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1990, 24(4): 575-587.
- [16] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版

- 社, 2005.
- [17] Latham G, Ewing M, Dorman J, et al. Moonquakes and lunar tectonism [J]. *Earth, Moon, and Planets*, 1972, 4(3): 373-382.
- [18] Goins N R, Dainty A M, Toksoz M N. Seismic energy release of the moon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86: 378-388.
- [19] Wells D L, Coppersmith K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(4): 974-1 002.
- [20] Hanks T C, Anderson D L. Origin, evolution and present thermal state of the Moon [J]. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 1972 (5): 409-425.
- [21] Tozer D C. The moon's thermal state and an interpretation of the lunar electrical conductivity distribution [J]. *Earth, Moon, and Planets*. 1972, 5(1): 90-105.
- [22] Toksöz M N, Solomon S C. Thermal history and evolution of the Moon[J]. *Earth, Moon, and Planets*, 1973, 7(3): 251-278.
- [23] Khan A. Constraining the composition and thermal state of the moon from an inversion of electromagnetic lunar day-side transfer functions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 248(3/4): 579-598.
- [24] Khan A, MacLennan J, Taylor S R, et al. Are the earth and the moon compositionally alike? Inferences on lunar composition and implications for lunar origin and evolution from geophysical modeling [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(E05005). doi:10. 1029/2005JE002608.
- [25] Khan A. Joint inversion of seismic and gravity data for lunar composition and thermal state [J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 168(10): 243-258.
- [26] Nakamura Y. A1 moonquakes: Source distribution and mechanism [C] // *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*. 1978, 9: 3 589-3 607.
- [27] Nakamura Y. New identification of deep moonquakes in the Apollo lunar seismic data [J]. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 2003, 139: 197-205.
- [28] Nakamura Y. Within-nest hypocenter distribution and waveform polarization of deep moonquakes and their possible implications [C] // *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*. 2007, 38: 1 160.