

赫兹破裂：一种被忽视的构造

张进¹⁾, 程弘毅^{2,3)}, 曲军峰¹⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037;

2) 兰州大学资源环境学院, 兰州, 730000; 3) 兰州大学冰川与沙漠研究中心, 兰州, 730000



Pre-pub. online: www.
geojournals.cn/georev

内容提要:赫兹破裂在工程和材料领域一直备受关注,但其在地质学领域的应用还很少,远未像里德尔破裂那样熟知。从微观尺度到露头尺度,从板块尺度到行星尺度,赫兹破裂在自然界都广泛存在。赫兹破裂作为一种点接触破裂区别于常见的里德尔剪切破裂。它们均是自然界中特殊而又普遍发育的破裂形式,代表了不同的边界和应力条件。典型的赫兹破裂属于弹性变形范畴,由于点接触而在三维空间中形成特征的锥形破裂,在平面上则表现为放射状及环状破裂。在剖面上锥形破裂一般会出现一定角度的转折,下段破裂与接触面的角度变大,是锥形破裂的典型特征之一。在地质学领域,赫兹破裂有着重要的指示意义,可以表征物质的韧性(toughness)、解释环状和放射状构造、解释锥状以及弧形破裂成因与样式、判断冰川以及断层的运动学特征、区分不同破裂机制形成的新月形构造等,也可以应用于恢复沉积环境以及判断成岩过程中或者构造变形过程中的古应力及其方向。板块碰撞过程中,在特定环境下也可形成赫兹破裂,因此该类型破裂将会有助于我们理解一些断层的成因、发展以及大陆的变形,同时为类地行星(卫星)表层的构造提供解释方案。

关键词:赫兹破裂;脆性变形;锥形破裂;环状破裂;地质应用

在地质学领域,由一般剪切造成的里德尔剪切破裂已经为学者所熟悉,这种类型的破裂广泛分布在不同的构造中,成为解释众多脆性变形的重要基础(Logan et al., 1992; Sylvester, 1988)。然而地球甚至很多类地行星(包括月亮)表面广泛发育的环形构造、放射状构造等,很难用里德尔剪切破裂解释,因为里德尔剪切不会形成环状的三维破裂(Riedel, 1929; Logan et al., 1992)。由于变形的样式和机制不同,有可能存在其他的破裂形成机制,尽管一些文献对环形构造提出了解释方案,但普遍缺乏机理认识。笔者等提出这些独特的构造可能与赫兹破裂有关。

赫兹破裂或者赫兹锥状破裂是以德国物理学家亨利希·鲁道夫·赫兹(1857~1894)命名(图1)的一种破裂模式。虽然赫兹的主要贡献在电磁波领域,但他在点接触力学分析领域也开创了先河(Hertz, 1881),随后的研究用其名字命名了由于点接触应力造成的一种特殊而又常见的破裂。赫兹研究了玻璃受力后形成的构造(图1),他发现平直玻璃受到一个坚硬的球形楔入体作用后,会在玻璃

中形成锥形的破裂(图1)。自赫兹破裂被提出之后,因其形成过程属于弹性变形领域(Zeng Kaiyang et al., 1992a, b),破裂的形成与物体强度有关的一系列物性有重要的关系,在工程和材料领域得到了广泛的应用,相关的理论研究也一直没有停止过(Tillet, 1956; Oh and Finnie, 1967; Frank and Lawn, 1967; Lawn, 1967, 1968, 1975; Langitan and Lawn, 1969; Wilshaw, 1971; Lawn and Wilshaw, 1975; Swain and Lawn, 1976; Elaguine et al., 2006; Mouginit and Maugis, 1985; Fischer-Cripps and Collins, 1994; Fischer-Cripps, 1997; Kocer and Collins, 1998; Ai and Ahrens, 2004; Jelagin and Larsson, 2008)。

目前,关于赫兹破裂几何学与力学机制等方面的研究已有大量工作(Frank and Lawn, 1967; Lawn, 1967, 1968, 1975; Zeng Kaiyang et al., 1992a, b)。但在地质学领域,尤其是构造地质学领域,目前仍很少被提及或者研究(McEwen, 1981)。然而赫兹破裂在地球上很多环境中都有发育。如有学者认为陨击坑具有赫兹破裂的特征(Bahat, 1979),也有学者认为一些岩浆侵入导致的环状和放射状的破裂也属

注:本文为中国地质调查局三级项目(编号:DD20230217, DD20221646)和国家自然科学基金资助项目(编号:41972224)的成果。

收稿日期:2023-01-22;改回日期:2023-04-22;网络首发:2023-05-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10. 16509/j. georeview. 2023. 05. 041

作者简介:张进,男,1973年生,博士,研究员,长期从事地质调查与大陆变形研究;Email: zhangjinem@sina.com。

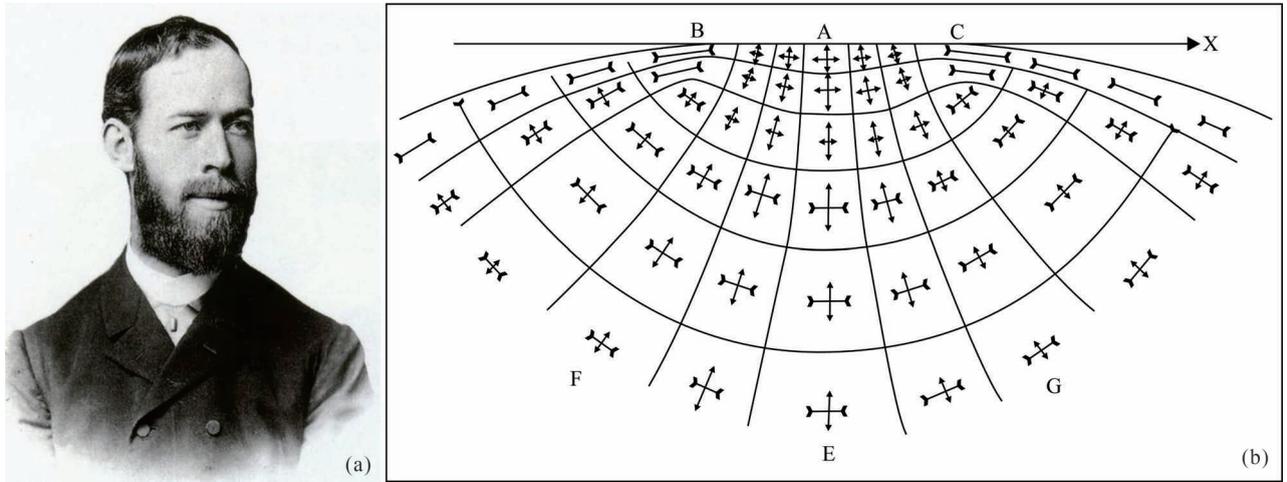


图1 亨利希·鲁道夫·赫兹(1857~1894) (<https://baike.so.com/doc/5401988.html>) 与赫兹本人得到的点接触应力分布(背向箭头指示压缩方向,对向箭头指示拉伸方向,箭头长短指示应力大小;据 Hertz, 1881)

Fig. 1 Photo of Heinrich Rudolf Hertz (1857~1894) (<https://baike.so.com/doc/5401988.html>) and point contact stress distribution obtained by Hertz (1881)

于赫兹破裂(Anderson, 1936; Bahat, 1977a, 1979, 1980a, b)。山区河流中的砾石表面常见的圆形破裂也是赫兹破裂(图2,图3);显微尺度下,风成沙表面的凹坑也可能由赫兹破裂所控制(图4)。古人类在制造石器的过程中也利用了赫兹破裂的形成机理,有目的地制造不同功能的石器,一些石器的表面实际就是赫兹破裂面(Bahat, 1977b)。在沉积物的成岩和压实过程中,赫兹破裂也会导致碎屑颗粒的破碎,并影响岩石的孔隙率和渗透性(McEwen, 1981; Brzesowsky et al., 2011)。此外,在板块碰撞过程中,一些不规则边界的碰撞也可能导致一系列的赫兹破裂产生。例如,印度与欧亚板块的碰撞导致形成了一些断层,其前身也可能是赫兹破裂。鉴于相关研究还较薄弱,本文目的是简单介绍赫兹破裂的一些基本特征及其形成机制,并与地质学中常见的里德尔剪切带对比,借此抛砖引玉,促进赫兹破裂在地质学中的推广和应用。

1 赫兹破裂几何学特征

赫兹破裂属于脆性变形,通常由两套破裂系统组成,平面上表现为环形破裂和放射状破裂,三维空间中则分别为锥形破裂和放射状破裂,两套破裂受同一应力场控制,是点应力作用的结果(Byous, 2013)。赫兹破裂最为典型的构造就是平面上的环形破裂和三维空间的锥形破裂(图5)。有关这两类破裂的发育位置和形状已经有较多的研究,但形成

机制仍存在不同的认识。

1.1 环形破裂

环形破裂是围绕着楔入体周缘产生的破裂。地质上,这些破裂往往被一些岩浆所侵入。研究表明,平面上的环状破裂的大小以及被楔入体与楔入体接触面的大小与楔入体的直径直接相关,而且它也直接控制了导致产生环状破裂的临界载荷(Zeng Kaiyang et al., 1992b; Fischer-Cripps, 1997)。一般在高荷载作用下,在被楔入体表面会形成多个环形破裂,这种情况下,锥形破裂一般会从位于更内侧的环形破裂上发育;而内侧环形破裂的半径会随着荷载的增大而增大,实际的半径一般比计算得到的接触面半径大1.2~1.3倍,因而环形破裂一般发育在接触面圆的外侧(Zeng Kaiyang et al., 1992b)。如果被楔入体表面没有小裂隙或瑕疵,最大应变能会沿着接触圆边界释放,导致沿着接触圆边界发育的环形破裂。对一个抛光好的玻璃样品,环形破裂的大小与楔入体和样品的接触圆大小重合(Zeng Kaiyang et al., 1992b)。

1.2 锥形破裂

锥形破裂是赫兹破裂中最独特也是最引人注目的构造,它在三维空间往往构成一个锥面(图5),这是里德尔剪切破裂不可能形成的构造样式之一。有关锥形破裂也开展了大量的实验和理论研究。研究表明其分布的主要位置也是在楔入体与被楔入体的接触面圆边界附近并向样品内部延伸。一般认为锥



图2 砾岩中砾石表面的赫兹破裂(阿拉善泥盆系株斯楞组)

Fig. 2 Hertzian fractures on the surfaces of gravels in conglomerates (the Devonian Zhusileng Formation, Alxa, NW China)

形破裂是环形破裂垂直(或大角度)被楔入体向下延伸一定距离后向被楔入体两侧生长而成(图6b)。而锥形破裂一个最突出的特点就是该破裂是弯曲的,形成一个向外(上)突出的弧形或者拐折(图6b),这也是锥形破裂区别与里德尔剪切破裂中R破裂的重要特征(Zeng Kaiyang et al., 1992b; Kocer and Collins, 1998)。一般而言,R破裂在剖面上呈向下凸的弧形(Petit, 1987)。

锥形破裂与被楔入体表面的夹角也是赫兹破裂研究中的一个重要内容。因为泊松比可以影响应力场,因此也是影响锥形破裂与被楔入体表面角度的重要因素(Zeng Kaiyang et al., 1992b)。不同学者对不同的被楔入体进行了模拟和测试,获得了不同的角度关系。例如,玻璃的角度为 22° (泊松比0.22),而其他一些合成物的角度在 $28^\circ \sim 31^\circ$ (泊松比0.24),少数也可以达到 33° (泊松比0.25)(Zeng Kaiyang et al., 1992b)。Frank和Lawn(1967)对比了锥面夹角和应力迹线,发现它们相等,都近似等于 22° (泊松比0.33)。

Kocer和Collins(1998)通过实验(钙钠玻璃)发现,在泊松比为0.21的情况下,锥形破裂与样品表面的夹角的范围在 $16^\circ \sim 30^\circ$,而极值为 22° (图6)。上述学者认为锥形破裂面与样品平面之间的夹角在远离荷载中心的一段距离内保持不变。然而,远离荷载中心,样品表面与最大主应力法线之间的夹角却为 33° ,这些学者进一步认为锥形破裂是沿着最大应变能释放的方向递增扩展,而不是沿着先存应力场。需要说明的是,这个角度范围与里德尔剪切破裂中R破裂与主剪切带之间的角度非常类似,因而可能导致在实际应用中将赫兹破裂和里德尔剪切破裂混淆。

2 成因机制与应力分布

赫兹早年的工作得出了荷载、球形楔入体半径以及楔入体与被楔入体接触面面积之间的数学关系,被后人称为赫兹方程:



图3 现代河流中石英砂岩砾石表面赫兹破裂(样品采自青海省西宁市湟水河;箭头指示赫兹破裂)

Fig. 3 Hertzian fractures on the surfaces of sandstone gravels in modern rivers (samples from the Huangshui River, Xining City, Qinghai Province; white arrows indicate the Hertzian fractures on sandstone gravels)

$$\begin{cases} a^3 = \frac{4}{3} \frac{kPR}{E} \\ k = \frac{9}{16} \left[(1 - \nu^2) + \frac{E}{E'} (1 - \nu'^2) \right] \end{cases} \quad (1)$$

方程中 P 为荷载, R 为球形楔入体半径, a 为接触面积。 k 为弹性常数, 其与被楔入体和楔入体的泊松比以及两者的杨氏模量有关, 其中 E 和 E' 分别为被楔入体和楔入体的杨氏模量。 ν 和 ν' 分别为被楔入体和楔入体的泊松比。

由于建立了不同物体作用之间的函数关系, 赫兹方程也成为研究赫兹破裂的基础, 奠定了其在工程和材料学领域中广泛应用的基础。在赫兹提出了赫兹破裂的几何形状以及与荷载形状、接触面积等参数之间的关系后, Auerbach (1891) 发现赫兹破裂中锥状破裂的形成与荷载和球形楔入体半径之间存在线性关系, 进而提出了赫兹破裂中锥状破裂的形成是荷载达到临界值后的结果, 与楔入体的半径大小直接相关, 后来这个认识被称为“ Auerbach's

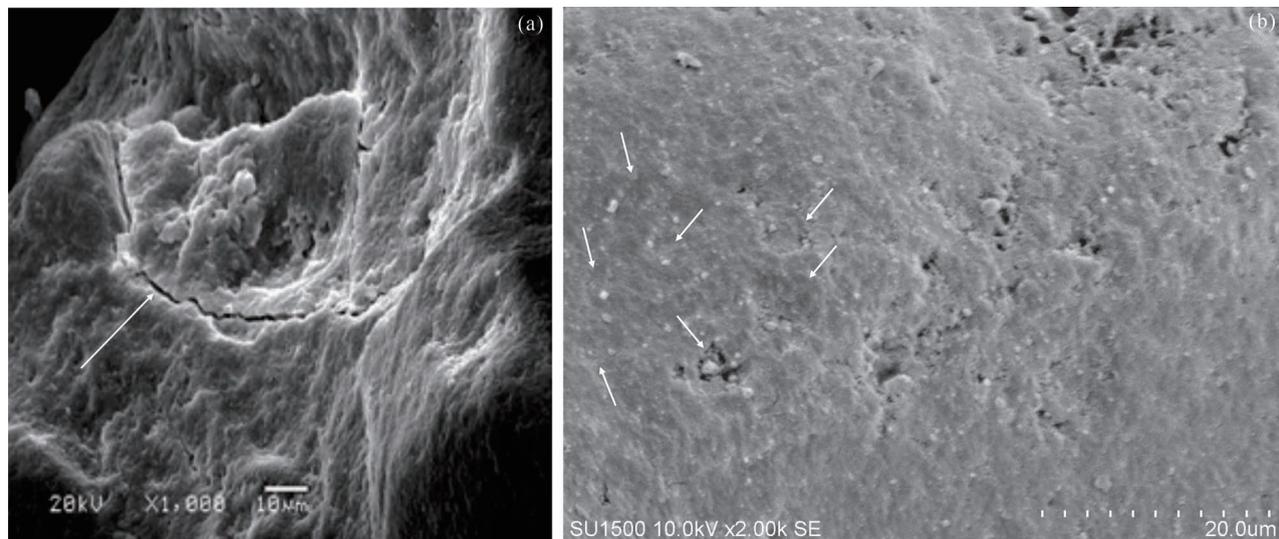


图4 现代风成沙表面的赫兹破裂(箭头示赫兹破裂)

Fig. 4 Hertzian fractures on the surfaces of modern eolian sands (Hertzian fractures are indicated by white arrows)

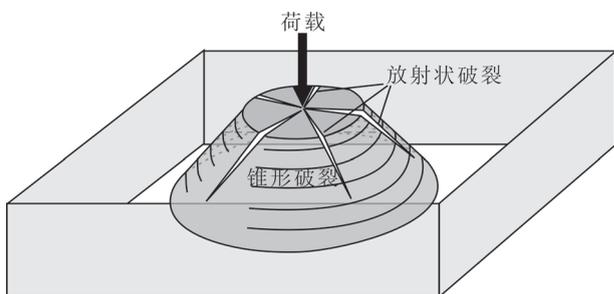


图5 赫兹破裂3维模型

Fig. 5 3-D model of Hertzian fractures

law”。

在赫兹方程的基础上,Huber(1904)最早计算并获得球形楔入体的应力场分布,此后不同的学者也都得到了类似的结果(Fuchs and Róth, 1913; Morton and Close, 1922)。而后来的不同学者也基于不同的理论方法和实验模型开展应力场的研究(图7),尽管不同的研究得到的具体参数有所不同,但也都得到了类似的导致赫兹破裂的应力场分布(图8,Zeng Kaiyang et al., 1992a)。

研究表明,在样品表明的接触面范围内,所有主应力都是挤压性质,均为负值(图8A),而且具有相似的量级(Zeng Kaiyang et al., 1992a; Fischer-Cripps, 1997)。在接触面之外,最大主应力(σ_1)都为正值,并在接触面的圆形边界上最大(图8a)。 σ_1 是赫兹破裂中锥形破裂形成的主要控制因素。在楔

入体的接触点 $\sigma_1 = \sigma_2$ 。而在样品表面, σ_1 迹线均为放射状, σ_2 被称为环向应力(hoop stress), σ_3 则垂直作用与样品表面。在脆性物质中锥形破裂形成中的重要特征是接触面之外的样品表面均为张性区域。

一般认为赫兹破裂中环状破裂的起始与最大张应力(σ_1)有关,而锥形破裂的形成则与最大张应力(σ_1)的作用有关(Zeng Kaiyang et al., 1992a)。为了刻画锥形破裂的生长或扩展,描述破裂端部样品的破裂韧性(fracture toughness),引入了应力强度系数(stress intensity factor)的概念及其方程(Zeng Kaiyang et al., 1992a, b):

$$K = 2 \cdot \sqrt{\frac{c_0}{\pi}} \cdot \int_0^{c_0} \frac{\sigma_1(c)}{(c_0^2 - c^2)} dc \quad (2)$$

上式是不同载荷下应力强度系数的方程,其中 c_0 是特定载荷条件下的锥形破裂长度, σ_1 是最大主张应力(垂直于锥形破裂)。需要注意的是,在此方程中,锥形破裂的起始端长度被忽略。应力强度系数与载荷无直接关系,而随着锥形破裂长度的增加,应力强度系数逐渐降低(Zeng Kaiyang et al., 1992b)。

针对环形破裂,早年赫兹就观察到,该破裂一般起于球形楔入体与被楔入体接触面的边缘附近,因为那里的张应力最大(Hertz, 1881)。而计算该位置应力的方程为(Bahat, 1979):

$$\sigma_m = \frac{(1-2\nu)P}{2\pi a^2} = \frac{(1-2\nu)P_0}{2} \quad (3)$$

代表接触面圆边界最大张应力,其中 a 代表接

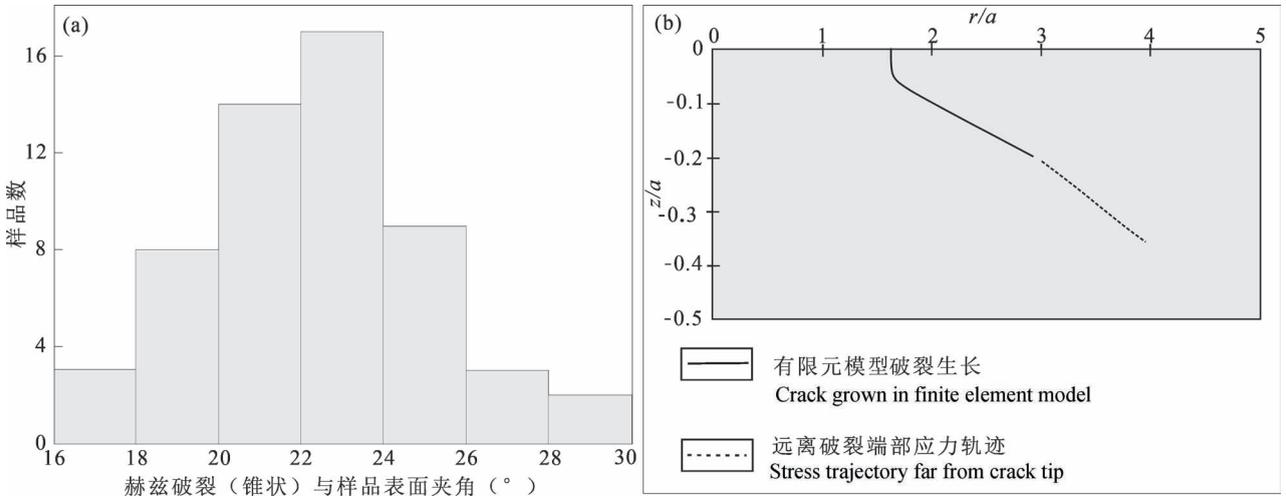


图 6 赫兹锥状破裂角度分布 (Kocer and Collins, 1998)

Fig. 6 Angle distribution of Hertzian cone crack (Kocer and Collins, 1998)

(a) 基于钙钠玻璃实验的锥面夹角分布; (b) 基于有限元模型沿生长赫兹破裂端部延伸的最小主张应力轨迹, 泊松比 0.21, a 为接触面圆半径, r 为距离荷载中心的水平距离, z 为距离荷载中心的垂直距离

(a) histogram showing the distribution of experimentally measured angles of cone cracks in soda - lime glass, using a cylindrical punch indenter; (b) trajectory of the minimum principal tensile stress which extends from the tip of a Hertzian crack grown using the finite element model, Poisson ratio of 0.21, a is the circle radius of the contact surface, r is the horizontal distance from the load center, and z is the vertical distance from the load center)

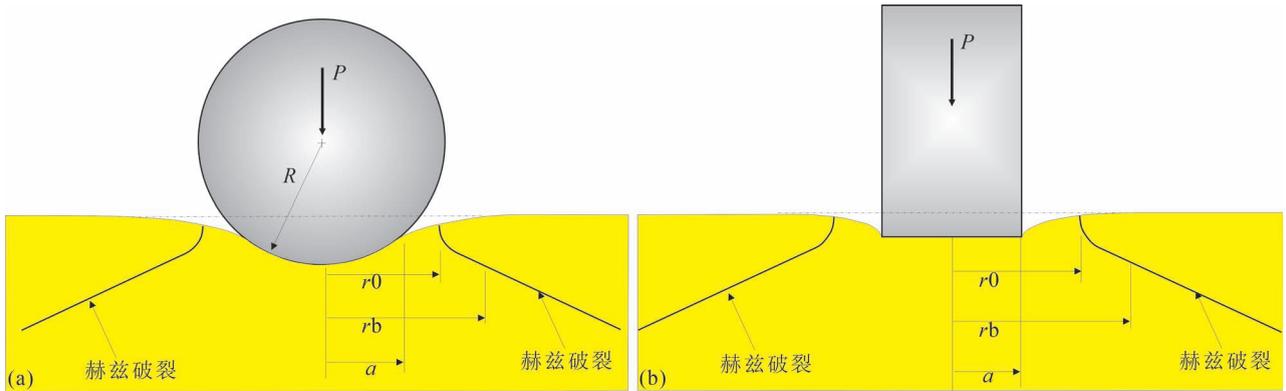


图 7 赫兹破裂及赫兹接触方程参数示意 (Fischer-Cripps, 1997): (a) 球型物体接触; (b) 柱状 (底面为圆形) 物体接触

Fig. 7 Hertzian fractures and geometry of indentation fracture with spherical (a) and cylindrical flat punch indenters (b) (after Fischer-Cripps, 1997)

球形接触表面随着载荷的增大而增大, 而柱状接触表面随载荷的增加并不增加, 但两者的应力场分布基本类似

The spherical contact surface increases with the increase of load, while the cylindrical contact surface does not increase with the increase of load, but the stress field distribution of the two is basically similar

触面圆形半径, P_0 为楔入体与样品之间的平均载荷, P 为载荷。

上述几个方程将物体的变形与外力作用以及介质的物性 (强度、泊松比等) 很好地进行了关联, 成为赫兹破裂得以广泛应用的重要理论基础。

随着赫兹破裂应力场的确定, 3 个主应力的方向和迹线也随之确定。在剖面 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 上, σ_1 迹线主体呈半圆状, 并向两侧向上收敛, 而 σ_3 为放射状。

在平面 ($\sigma_1 - \sigma_2$) 上, σ_1 呈放射状, 而 σ_2 为同心圆状 (也称环向应力) (图 9)。需要指出的是, 样品中的这些应力迹线分布会受到之前形成的破裂影响, Zeng 等 (1992a, b) 认为轨迹可能会因不断增长的破裂而改变。从图 9 中可以看出, σ_3 迹线的外形与锥形破裂很相似, 致使一些学者认为锥形破裂可能就是沿着 σ_3 迹线发育的 (Frank and Lawn, 1967)。此后, 也有研究认为锥形破裂沿着垂直最大主应力

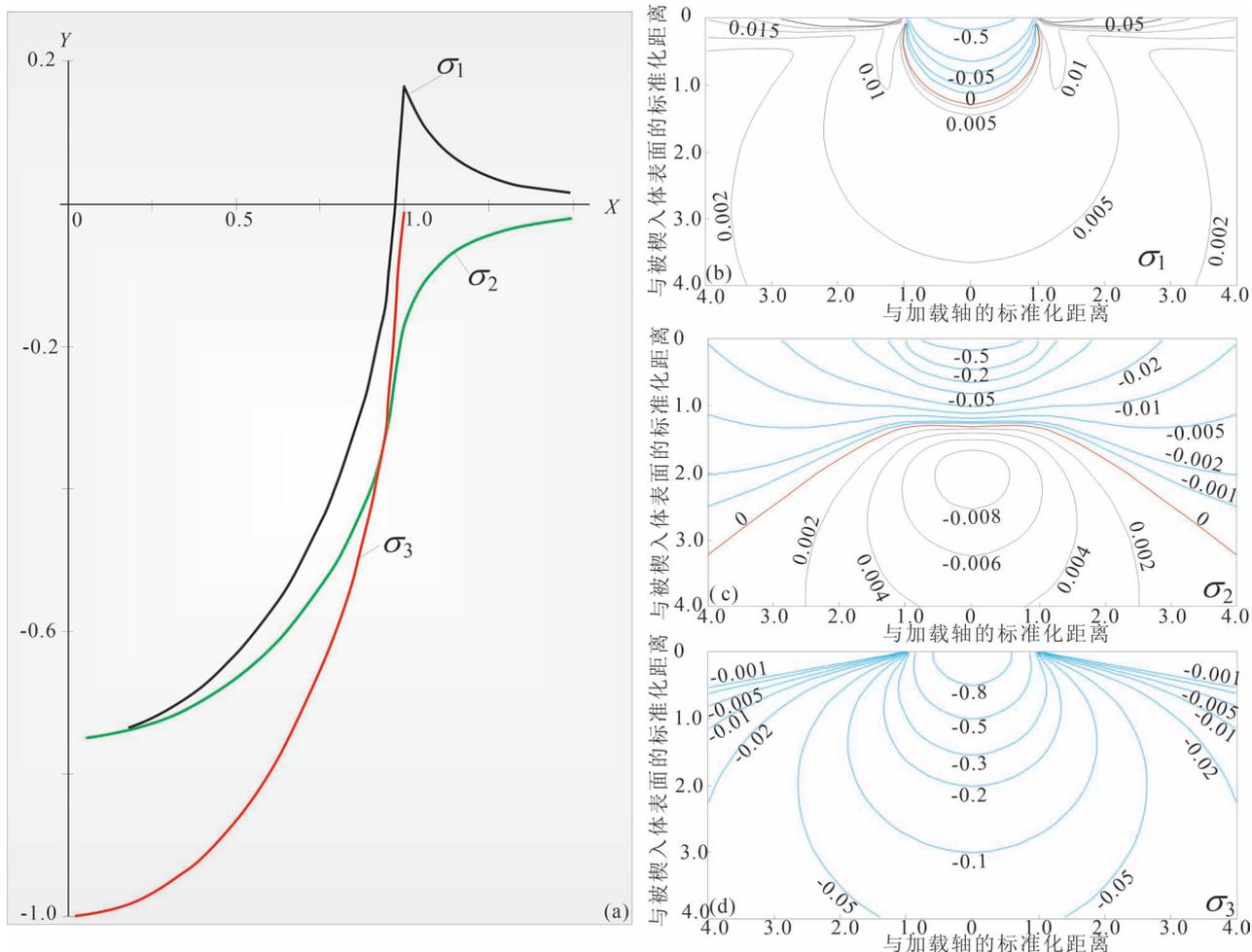


图8 赫兹破裂应力场中主应力关系及分布

Fig. 8 Distribution of normalized principal stresses of Hertzian fractures at the surface

(a) 样品表面不同的主应力, X 轴代表标准化的距离荷载中心距离, Y 轴代表样品表面标准化主应力; (b) — (d) 样品中不同主应力等值线图 (Zeng Kaiyang et al., 1992a) (注: 在材料学等专业中, 主应力的大小和方向与构造地质中习惯用法相反, 笔者等采用的是材料学中的定义, 即 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, 挤压为负值)

(a) variation of principal stresses, where X -axis represents the normalized distance from loading axis, and Y -axis represent the normalized principal stresses at the surface; (b) contours of the principal stresses (σ_1); (c) σ_2 ; (d) σ_3 in a plane containing the loading axis (Zeng Kaiyang et al., 1992a) (Note: In materials science, the magnitude and direction of the principal stress are exactly opposite to the usage in the structural geology. This paper adopts the definition in materials science, i. e., $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, and compression is negative)

σ_1 的方向发育, 锥形破裂在向被楔入体内部生长的过程中, 沿着 σ_3 应力迹线方向发展, 因为它本身就垂直于 σ_1 , 在三维空间中, 这些锥形破裂形成一个锥面, 因此锥形破裂的形成被认为受控于 σ_3 和 σ_1 的联合控制 (Fischer-Cripps, 1997)。可以看出, 锥形破裂属于 mode-I 型破裂 (张破裂), 但随着荷载的持续, 锥形破裂往往会发生剪切位移。而在平面上, 也可以看出一系列垂直于 σ_1 的同心圆, 尤其是在接触圆外侧, σ_1 和 σ_2 均为张性, 因此形成了同心圆状

的环状破裂。由于 σ_2 在接触面之外的区域为张性, 因此也是放射状破裂的控制因素, 放射性破裂也因此属于张破裂。由于放射状破裂一般切割锥形破裂, 因此赫兹破裂中的锥形破裂形成要稍早一些。

3 里德尔 (Riedel) 破裂及赫兹 (Hertzian) 破裂的对比

一般而言, 赫兹破裂是点接触条件下形成的三维破裂系统, 这区别于常见的里德尔剪切破裂的面

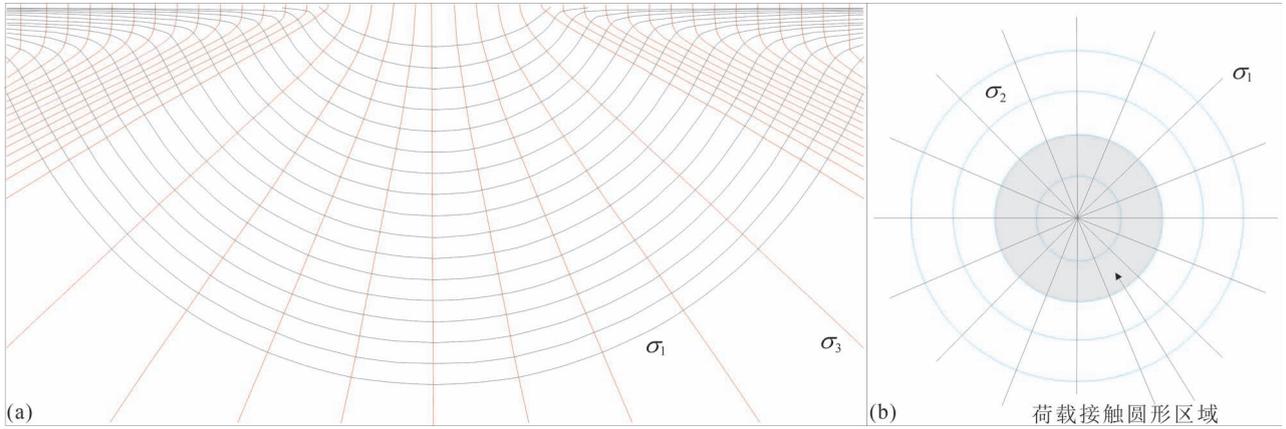


图9 赫兹破裂 σ_1 - σ_2 - σ_3 应力轨迹(据 Bahat, 1979; Fischer-Cripps, 1997): (a) 剖面分布;(b) 平面分布

Fig. 9 Side view (a) and Plane surface view (b) of stress trajectories (σ_1 - σ_2 - σ_3) in Hertzian field

(after Bahat, 1979; Fischer-Cripps, 1997)

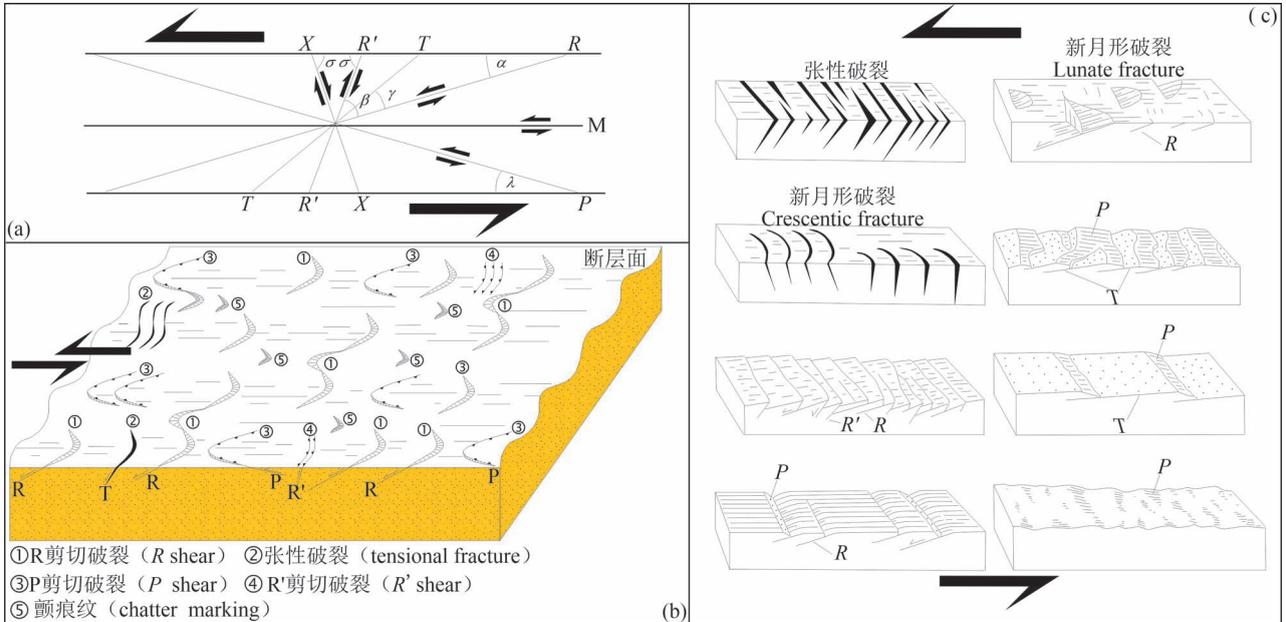


图10 里德尔剪切与断层构造: (a) 里德尔剪切破裂(Logan et al., 1992); (b) 断层面各种新月型构造

(Zhang Jin et al., 2011); (c) 主断层面与不同次级破裂组合及导致的断层面构造(Petit, 1987)

Fig. 10 Riedel shear and structures on the fault planes: (a) Riedel shear fractures (Logan et al., 1992); (b) different crescentic structures on fault plane (Zhang Jin et al., 2011); (c) combination of main fault plane and different secondary fractures and the resulting fault plane structures (Petit, 1987)

接触条件下形成的二维破裂系统 (Bahat, 1980a, b)。断层面及其相关的次级破裂组合目前已经有了很多共识,它们多数是由里德尔剪切以及断层面形态共同控制而成(图10, Riedel, 1929; Petit, 1987; Logan et al., 1992; Zhang Jin et al., 2011)。在这些断层面构造中,各种新月型构造的发育和分布非常显著(图10b; Tjia, 1964; Petit, 1987; Doblas, 1998; Zhang Jin et al., 2011),这与冰蚀面新月型构

造有一定的相似性(图11)。然而断层面上的一些新月型构造和冰蚀面上的类似构造具有不同的成因机制和涵义。

Tjia(1964)将弧顶指向观察者所在盘运动方向的称为新月形刻槽(crescentic gouge)、弧顶指向构造所在盘运动方向的新月形破裂(crescentic fracture)、并认为颤痕(chattermarks)的弧顶指向构造所在盘。仅从弧顶的方向判断,这个分类与目前

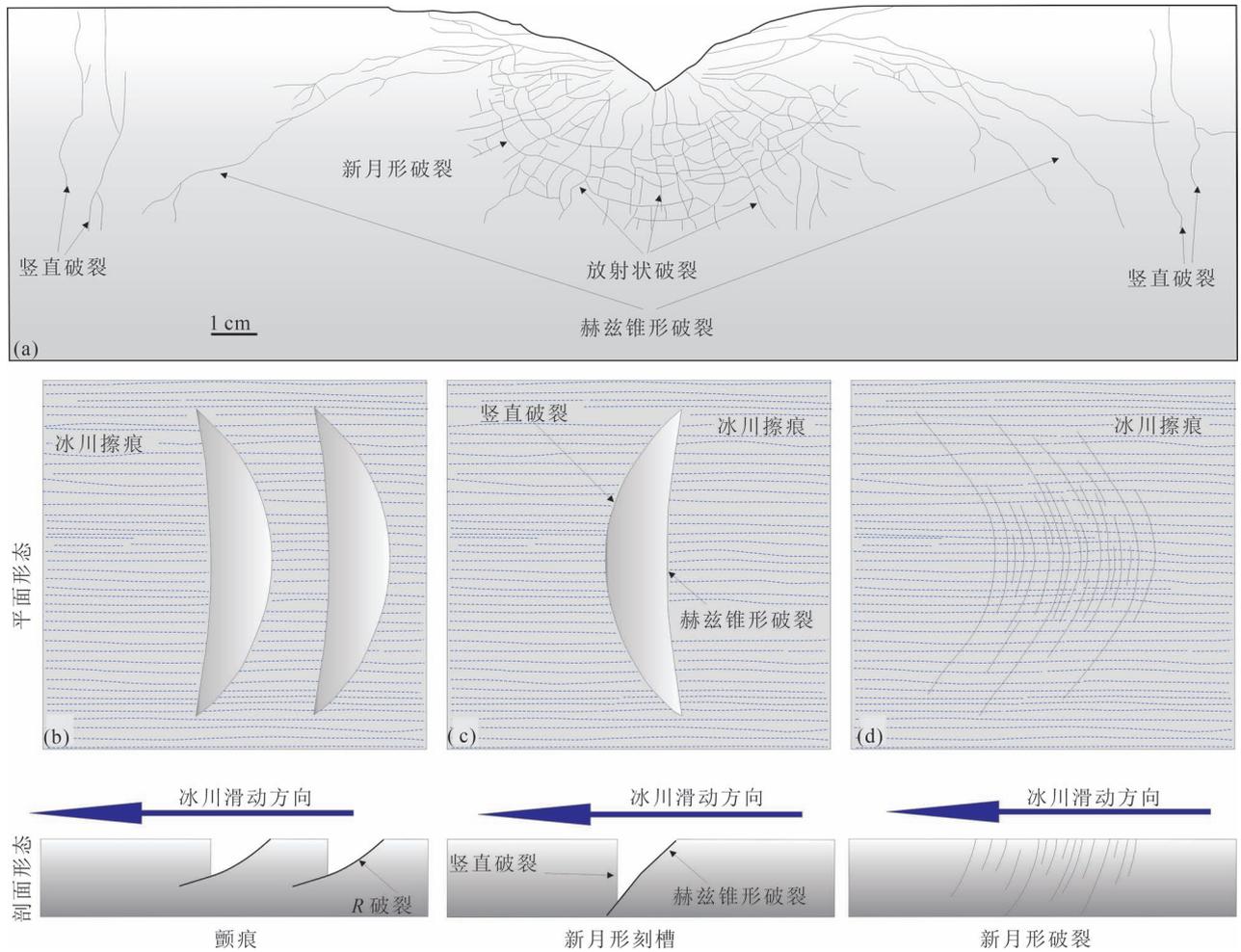


图 11 赫兹破裂特征: (a) 剖面实例(实验室中形成的 San Marcos 辉长岩撞击坑,据 Ai and Ahrens, 2004); (b)一(d) 冰川滑动面上不同新月形构造的平面和剖面特征(据 Krabbendam et al., 2017)

Fig. 11 Characteristics of Hertzian fractures: (a) cross-section of laboratory impact crater in San Marcos gabbro, showing the 4 types of crack failure (from Ai and Ahrens, 2004); (b)一(d) characteristics of different crescentic structures on the ice-erosion surfaces (after Krabbendam et al., 2017)

见到的冰蚀面的新月型构造是一致的(图 11)。Petit (1987) 将一些具有弧形构造的张性脉也称之为新月形破裂(crescentic fracture),而将与 R 面有关的类似构造称之为新月形破裂(lunate fracture),其弧顶指向观察者所在盘的运动方向。而也有研究认为不平直的断层面(或起伏)是直接导致出现新月型构造的重要因素(图 10b, Zhang Jin et al., 2011),但是不同的学者都认为在断层面的构造中多数新月型构造都不是可靠的运动方与断层面新月型构造不同,冰蚀面上的新月型构造类型划分基本得到了共识,都属于摩擦裂缝(friction cracks)(Gilbert, 1905; Lahee, 1912; Harris, 1943; Dreimanis, 1953; Smith, 1984; Rea, 2013; Krabbendam et al., 2017)。尤其是 Harris(1943)通过系统的调查,发现尽管存在不

同的新月型构造,但是均发育有一个倾向冰川前进方向的主破裂面,并向深部延伸较长。此后虽有一些不同意见,如先存构造(如片麻理)一定程度上影响了新月型构造的发育(Dreimanis, 1953)。但对这些新月型构造破裂面的成因解释都基本遵循 Gilbert (1905)的认识,没有用一般剪切导致的里德尔剪切机制来解释,虽然部分新月形破裂(crescentic fracture)和新月形刻槽(crescentic gouge)的形成也认为属于类 R 剪切破裂(Iverson, 1991a; Rea, 2013),但更多的则用点受力形成的赫兹破裂模式来解释(Hamilton and Goodman, 1966; Frank and Lawn, 1967; Lawn, 1967; Swain and Lawn, 1976; Iverson, 1991a; Rea, 2013)。这主要归结于冰川滑动过程中,冰川裹挟的砾石与滑动面的作用为主,目

前已经形成了相对完整的成因解释,不同的新月型构造主要和正应力大小、摩擦系数、砾石与滑动面的接触面大小、砾石的形状等有关 (Preston, 1922; Hamilton and Goodman, 1966; Frank and Lawn, 1967; Lawn, 1967; Engelder and Scholz, 1976; Swain and Lawn, 1976; Smith, 1984)。

目前,不同研究提出的几种冰蚀面新月型构造也确实很难用里德尔剪切来解释,如新月形破裂 (crescentic fracture), Lahee (1912) 和 Dreimanis (1953) 都认为新月形破裂 (crescentic fracture) 中倾向冰川前进方向的破裂倾角在 60° – 90° 之间,而且都是张性 (Gilbert, 1905),这与常见的里德尔剪切中的次级破裂均不符合。虽然此类构造与断层面中新月形破裂 (crescentic fracture) 类似,但是断层面的此类构造往往多为脉体所充填。同样,对于新月形刻槽 (crescentic gouge) 中倾向冰川前进方向的主破裂的倾角,不同学者收集的数据差别很大。Dreimanis (1953) 认为处于 50° – 70° 之间, Krabbendam 等 (2017) 则认为较小 (小于 30°), 而 Iverson (1991a) 通过模拟认为该角度的范围很大,涵盖了前人的测量,甚至部分倾向与冰川前进方向相反。

一般而言,与主剪切面呈 50° – 70° 夹角的多是 R' 破裂 (表 1), R' 破裂主要显示逆冲缩短趋势,然而冰蚀面的类似构造则主要显示伸展趋势 (Gilbert,

1905; Lawn, 1967; Frank and Lawn, 1967; Iverson, 1991a)。此外,由于不同学者认为的角度存在较大差别,因此造成了不能用里德尔剪切解释同一破裂,而如果 crescentic gouge 中主破裂倾角小于 30° , 则可能就是里德尔剪切中的 R 破裂,同样也是伸展正断性质。在河南鲁山石门沟地区见到的新月形刻槽 (crescentic gouge) 中倾向冰川前进方向的主破裂的倾角就很平缓 (图 12a), 我们将其解释成里德尔剪切中的 R 破裂,而在断层面中也发育与此类构造完全一致的构造 (新月形破裂–lunate fracture, 图 10c)。

表 1 里德尔剪切破裂之间的角度关系
(据 Logan et al., 1992)

Table 1 Angular relationship between Riedel shear fractures (after Logan et al., 1992)

围压 P_c (MPa)	α	B	σ	A
50	17°	55°	70°	17°
100	14°	52°	76°	18°
250	18°	53°	72°	19°
100	18°	53°	74°	19°
100	16°	57°	71°	18°
100	12°	50°	69°	9°
300	13°	52°	74°	15°
平均	15°	53°	72°	16°

可以看出冰蚀面上的新月型构造多以点受力产生的破裂为主,这区别于里德尔剪切,然而断层滑动与冰川滑动是类似的,为什么断层面的次级构造多以



图 12 冰川滑动面新月形刻槽 (crescentic gouge): (a) Tuolumne Canyon (Gilbert, 1905); (b) 河南鲁山石门沟 (新元古代末冰川滑动面)。箭头指示冰川滑动方向

Fig. 12 Crescentic gouge caused by the glacier flow: (a) Tuolumne Canyon (Gilbert, 1905); (b) Shimengou, Lushan, Henan Province (Latest Neoproterozoic). Arrows indicate the flow directions of glaciers

里德尔剪切机制导致,而冰蚀面上的构造则以赫兹破裂为特征? 这是否与冰川的物理性质有关? 是否与冰川磨蚀物被冰下融水迅速带走 (Alley et al., 2019; Lee and Rutter, 2004) 而断层中形成的断层角砾岩无法被带走有重要关系 (Scholz, 1987)? 是否与砾石以及冰蚀面存在压溶作用,造成砾石之下有效应力显著增加有关 (Hallett, 1979)? 同样我们对冰蚀面新月型构造的次级构造缺少系统和精确地测量也可能有一定关系,这与测量困难有很大关系,可能也是未来进一步工作的方向。

上述赫兹破裂与里德尔破裂的对比仅仅是从几何学方面进行了对比,而在力学机制上未做进一步的说明。里德尔破裂的应力分布与赫兹破裂的应力分布也存在非常明显的区别,主要就是赫兹破裂是点应力环境下的变形,而里德尔破裂则复杂的多,在三维空间上应力方向还会发生显著的变化 (Naylor et al., 1986)。本文讨论赫兹破裂和里德尔破裂的最主要原因是两者成因机制不同,而且应力场也不

同,但是导致的部分构造却比较相似,在野外容易引起不一致的看法,如赫兹破裂的部分锥形破裂与里德尔破裂中的 R 破裂在剖面上如果不仔细观察,或者出露不好,就不容易区分。

4 构造地质学中的应用

在构造地质学领域内,对于里德尔剪切带的研究和运用已经达到了非常深入的层次。而关于赫兹破裂的研究和运用则非常少。最早将其运用到地质领域的是美国地质学家 Gilbert,他成功地解释了冰川滑动过程由于砾石刻划形成的新月形刻槽 (crescentic gouge) (Gilbert, 1905),但当时 Gilbert 还不知道赫兹破裂的相关研究。此后不同的学者认识到赫兹破裂的重要性,确立了其在冰川研究领域中的地位 (Rea, 2013)。在其他领域,直到 20 世纪后期,以色列学者 Dov Bahat 系统将赫兹破裂引入地质研究之中,对世界上不同地区的侵入体杂岩进行了解释,显示出较好的应用前景 (Bahat, 1977a,

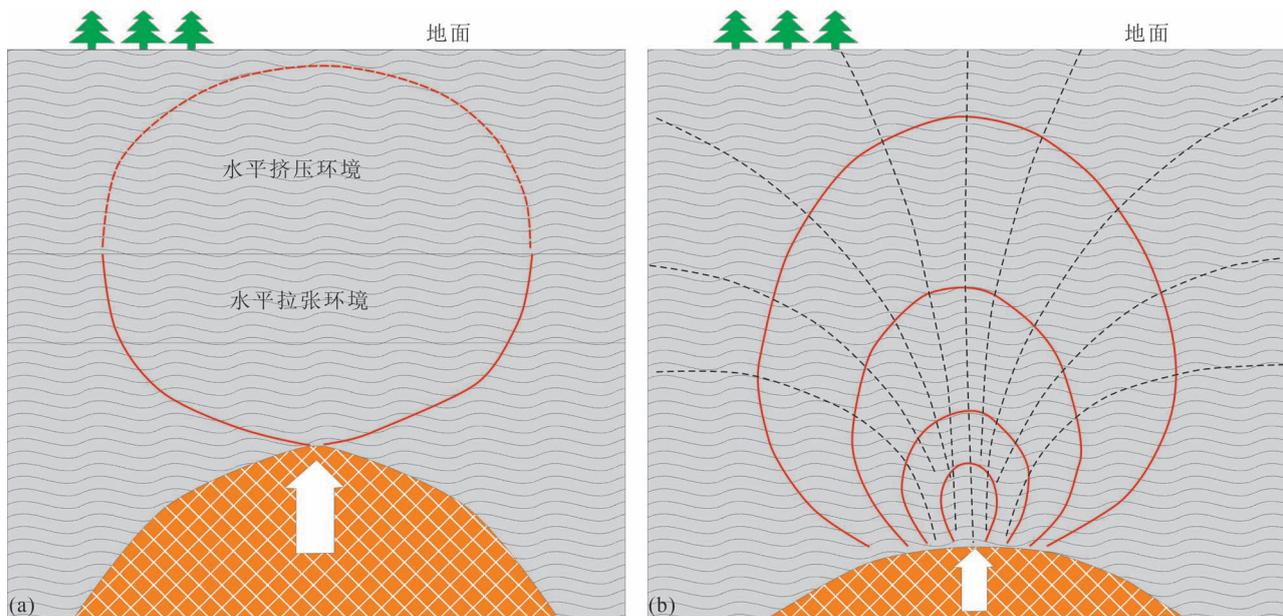


图 13 侵入体导致上部岩石赫兹准椭圆破裂模型(据 Bahat, 1980a, b 修改)

Fig. 13 Hertzian quasi-oval fracture model in the overlying rocks caused by the emplacement of magmatic rock (modified from Bahat, 1980a, b)

(a) 理论上的深赫兹断裂(实红线),从与侵入体顶点接触的压缩条件(箭头)到水平拉伸环境下锥角增加,破裂变为圆柱形,上部区域,进入水平压缩环境,破裂逐渐接近水平方向(虚线),并转变为抛物面形状。(b) 赫兹准椭圆形破裂模型。红色线条代表了由于侵入体竖直上顶形成的具有相同最大剪切应力的分布区域,断线代表张应力迹线

(a) Theoretical deep Hertzian fracture (solid line) which shows an increase of the cone angle on passing from compressional conditions at contact with indenter (arrow) to horizontal tensional conditions and becomes cylindrical. In the upper part of the figure the fracture gradually approaches horizontal orientation (broken line) due to horizontal compressional conditions and becomes paraboloidal. (b) The Hertzian quasi-oval fracture model. Isochromatic round bands which designate regions of equal maximum shear stress develop due to an upward vertical indentation. Broken lines indicate tensional stress trajectories

1979, 1980a, b)。但在地质学其他领域中的研究和运用就显得非常少了,虽然赫兹破裂形成的条件可能比里德尔剪切少,但仍在自然界中广泛存在。赫兹破裂的识别和相关知识的运用也会给我们带来新的启发,下面简单讨论赫兹破裂在一些地质学领域的应用以及未来可能的发展方向。

赫兹破裂可以解释环状和放射状的破裂(构造),在地球上造成环状破裂的构造有岩浆侵入和流星撞击。这两者的形成过程与典型的赫兹破裂非常类似,前人已经有了一定程度的研究。如岩浆侵入以及盐类底辟过程中形成的环形破裂和侵入体以及一些碟状岩床的发育(Bahat, 1980a, b)。Bahat (1980a, b)曾经提出一种基于赫兹破裂的岩浆侵入导致上覆地层变形的模型,并命名为准椭圆破裂模型(图13)。在该模型中,由于赫兹破裂受到地下不同深度的应力条件约束,形成的赫兹破裂与典型的赫兹破裂(未考虑外界应力环境和重力影响)有一定的区别,在未受到后期抬升剥蚀破坏的条件下,往往可以形成一个在侵入体上方近似椭圆的破裂,在这些破裂中往往会有侵入体的发育。如碟型岩床一般发育在侵入体的上方,柱状环形岩墙则形成与中等深度,而近地表则可能形成抛物线面的岩墙(图13)。Bahat(1979, 1980a, b)用赫兹破裂成功解释了非洲以及英国等地区的环状侵入杂岩的形成。

虽然作用方向与岩浆侵入造成的赫兹破裂相反,流星撞击也能形成类似的破裂。但是由于近地表或地表的剧烈爆炸,前期形成的赫兹破裂可能被破坏而不能识别。需要指出的是,经典的赫兹破裂是纯脆性域的变形,而后来的研究也表明,在塑性楔入体作用的情况下也会形成赫兹破裂(Anderson, 1936; Bahat, 1977b, 1979)。因此,可以根据环形破裂和锥状破裂的参数,计算岩浆侵入或者盐类底辟时的岩浆应力以及上覆地层的应力强度指数(stress intensity factor)和韧性(toughness),近似计算侵入体/盐类底辟的横截面积,类似的计算甚至可以用到地幔柱的相关参数确定上。

同样,在很多类地行星(卫星)表面发育很多环形和放射状构造,一般而认为存在3种可能的机制,①外来星体撞击;②火山爆发;③岩浆侵入(Bahat, 1980a, b),而这些构造本质上与赫兹破裂的形成是一致的。目前我国的外星探索进程正在快速发展,对于上述构造的解释离不开赫兹破裂理论,而通过赫兹破裂也可以帮助认识类地行星(卫星)表层的一些物理性质,如泊松比、韧性以及应力强度

指数等。

断层和冰川的运动学性质判断。美国学者Gilbert(1905)通过仔细观察,提出了冰川携带的砾石在冰川滑动面上刻划产生的crescentic gouge是可靠的运动学指示构造(图12a),而这种构造就是赫兹破裂。此后的Harris(1943)进一步讨论了该类型构造的角度和冰川运动方向之间的关系。在不熟悉赫兹破裂的情况下,容易将该类型构造中的破裂解释成里德尔剪切中的R破裂,其实R破裂在剖面上一般情况下是比较平直的,甚至是下凹的(图11b),而赫兹破裂的锥状破裂是上凸的(图11c)。类似的问题在断层滑动过程也会发生,但是目前这方面的研究还是比较薄弱,未能引起足够的重视,尤其是断层面上发育有一系列新月形断面构造,对这些新月形构造的解释比较多,而且术语也比较混乱,同一名词代表不同的构造,这就造成使用和推广的困难(见上述讨论,Zhang Jin et al., 2011)。赫兹破裂和里德尔剪切破裂均可以形成新月形构造(图11),而正确理解不同破裂的形成机理,是正确利用新月形构造在冰川以及断层滑动方向判断的前提。

在山区或者邻近物源区的河流或冲积扇上,河道中砾石表面发育很多赫兹破裂,这代表了砾石在河流搬运过程中与其他砾石发生了相互作用。这些大量发育赫兹破裂的砾岩也是一种沉积环境的指示(图2,图3)。而成岩过程中甚至地层变形过程形成的赫兹破裂则有可能提供成岩环境甚至变形环境中的应力条件(图2b)(Brzesowsky et al., 2011),在理想的情况下,可以计算造成砾石破裂的古应力大小和方向,当然这需要区分成岩阶段和变形阶段。McEwen(1981)通过对阿尔卑斯磨拉石盆地以及西班牙石炭系砾岩中砾石的变形总结,划分出了3种砾石破裂形式,其中的Type 1和Type 2破裂总体上就属于赫兹破裂的范畴,这篇文献也是构造地质学杂志(Journal of Structural Geology)第一个报道和论述赫兹破裂在变形分析中的应用。

在板块碰撞过程中,一些板块由于存在不规则边界,形成一些“犄角”形状的突出部位,这些部位在板块碰撞过程中可能也会形成类似赫兹破裂的构造。但这些断层或者破裂在碰撞过程会进一步演化与变形,造成识别或者解释的困难。Molnar和Tapponnier(1975)和Tapponnier and Molnar(1976)曾提出了与赫兹破裂机制类似的滑线场理论(slip-line field theory),用以解释印度板块楔入欧亚板块条件下,在亚洲的腹地形成了一系列的断层或者破

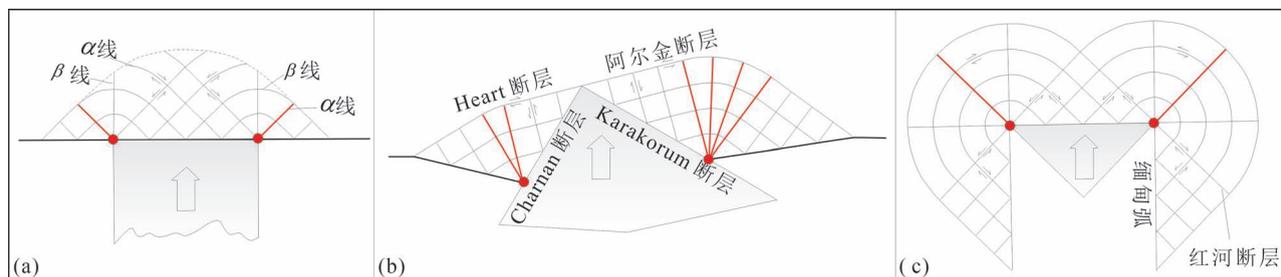


图 14 印度—欧亚板块碰撞的滑线场模型 (Tapponnier and Molnar, 1976)

Fig. 14 Slip-line field model caused by the collision between the Indian and Eurasian Plates (Tapponnier and Molnar, 1976)

红点为楔入体(印度板块)与被楔入体(欧亚板块)的接触面边缘,红色线段代表可能的锥形破裂

The red spots indicate the edges of contact between the indenter—Indian Plate and the wedged body—Eurasian Plate, the red lines represents possible cone cracks

裂,这些断层的性质和方向多样。需要指出的是上述作者采用了刚塑性组合模拟,这与经典的用于脆性领域的赫兹破裂不尽相同。尽管滑线场和赫兹破裂模型的具体细节有明显的差别,这可能与参与变形的物性不同有重要关系,但是两个模型均预测到了楔入体与被楔入体接触位置会形成向外发散状的断裂(图 14),这些断裂在赫兹破裂中就是锥形破裂。亚洲其他放射状的破裂,尤其在中亚地区的发育的一系列北西—南东走向的右行走滑断层以及蒙古西南部的近东西向左行走滑断层以及青藏腹地近南北向的正断层,也与赫兹破裂有类似之处。目前对这些断层的成因有不同认识 (Molnar and Tapponnier, 1975; Tapponnier and Molnar, 1976; Tapponnier et al., 1982; Cunningham, 2005; Yin An, 2010; Yin An and Tylor, 2016),但它们的前身可能与赫兹破裂的形成有关,而后期强烈的变形,也已经改造或者利用了这些破裂。

需要说明的是上述有关滑线场模型的经典文献中是根据目前的物性状态讨论印度楔入欧亚板块 (Molnar and Tapponnier, 1975; Tapponnier and Molnar, 1976),是否在印度—欧亚板块碰撞过程中也会出现脆性环境,尤其在碰撞发生的初期。印度板块与欧亚板块的碰撞与造成赫兹破裂的过程可能具有一定的类比性,形成一些类似赫兹破裂的构造,而这些构造在后续的变形过程中被改造叠加而不易识别。这方面也仅仅是推测,希望能起到抛砖引玉的作用,在具体的研究中有所发现。此外,虽然在传统的赫兹破裂研究中,重力的影响很小或者不明显而可以忽略,而在板块碰撞过程中,重力的参与下的大陆变形不可忽略,这需要未来进一步的研究。

5 结论

赫兹破裂虽然在工程和材料领域一直是重要的研究领域,但在地质学领域远未达到熟知的程度。赫兹破裂作为区别于里德尔剪切的一种点破裂在自然界中广泛存在。它与里德尔剪切是自然界中两种独特而又普遍的破裂形式,代表了不同的作用方式。赫兹破裂在剖面上形成特征的锥形破裂,而在平面上形成放射状以及环状破裂。锥形破裂与点作用面的夹角和被作用的物质泊松比有密切关系。赫兹破裂在地质学领域有很重要的应用价值,它不仅可以用来测定物质的韧性、解释环状和放射状构造、解释锥状破裂成因与形状、判断冰川以及断层的运动学方向,区分不同破裂形成的新月形构造,还可以帮助恢复沉积环境以及判断成岩或者构造变形过程中的古应力方向。在大陆碰撞过程中,也可能会形成赫兹破裂,这有助于理解一些断层的成因与发展以及大陆的变形。我国以及世界近期开展的一系列行星探测工作,也需要我们掌握赫兹破裂,为行星(卫星)表层的变形构造解释提供支持。

致谢:谨以此文祝贺马宗晋院士 90 华诞。在我国构造地质界,最先关注赫兹破裂的研究已无从考究,但是马先生早年(1960~1965)曾经开展过比较详细的破裂研究,其发表的《节理力学性质的判别及其分期、配套的初步研究》(马宗晋和邓起东, 1965)在当时的国内外也处于领先的水平。马先生曾经与笔者叙述过他早年破裂的研究过程,他曾在北京详细观察不同公园砌石的断面、花纹,在室内作不同材料的受力实验,详细观察厕所墙上瓷砖因受力而呈现的规则裂纹,思考窗户玻璃的破裂是从哪个方向受力而破裂,其实后者就是赫兹破裂。马先

生是本文第一作者的博士导师,虽然后期马先生的兴趣和关注领域已远远超出了构造地质的范畴,但在跟随先生的10年中,他总是与我讨论变形的研究,从黄陵背斜岩石节理到中国石油大学房顶侧面因热膨胀产生四个方向的里德尔剪切破裂,从贺兰山的变形到鄂尔多斯西缘褶皱逆冲带,从叠加褶皱到构造复合,从构造组合到变形系统,从青藏高原板条构造到全球中纬度巨型剪切等等。当时作者还没有完全领会,转眼又是十多年过去了,虽然换了工作单位,回想本人的研究历程,却无一不在早年与先生讨论的范围中。最近几年来用心体会先生治学的演变过程,从小构造到地震构造再到全球构造,发现其实构造地质才是先生最有心得的研究领域。先生患上阿尔茨海默症已经15年了,我们也无法再讨论构造地质的进展,虽然从前我们有时也争论的面红耳赤,但他从来不生气,仍然尊重我的观点和选择,现在回想起来不免有些伤感。我们这些年在先生指引的道路上也有了一定发现,希望先生能够感到些许的欣慰。同时,审稿专家和编辑老师提出了宝贵意见和建议,在此深表谢意!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "※" is in Chinese without English abstract)

马宗晋,邓起东. 1965. 节理力学性质的判别及其分期、配套的初步研究. 见:中国科学院地质研究所主编. 构造地质问题. 北京:科学出版社:13~30.

Alley R B, Cuffey K M, Zoet L K. 2019. Glacial erosion: status and outlook. *Annals of Glaciology*, 60(80): 1~13.

Ai Huirong-Anita, Ahrens T J. 2004. Dynamic tensile strength of terrestrial rocks and application to impact cratering. *Meteoritics & Planetary Science*, 39(2): 233~246.

Anderson E M. 1936. The dynamics of the formation of cone sheets, ring-dykes, and cauldron-subsidences. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 56(2): 128~57.

Auerbach F. 1891. Absolute Härtemessung. *Annalen de Physik*, 279(5): 61100.

Bahat D. 1977a. Thermally-induced wavy Hertzian fracture. *Journal of the American Ceramic Society*, 60(3~4): 118~20.

Bahat D. 1977b. Prehistoric Hertzian fracture of chert. *Journal of Materials Science*, 12(3): 616~620.

Bahat D. 1979. Interpretation on the basis of Hertzian theory of a spiral carbonatite structure at Homa Mountain, Kenya. *Tectonophysics*, 60(3~4): 235~246.

Bahat D. 1980a. A Hertzian Quasi-Oval fracture model for ring-complexes. *The Journal of Geology*, 88(3): 271~284.

Bahat D. 1980b. Hertzian fracture, a principal mechanism in the emplacement of the British Tertiary intrusive centres. *Geological Magazine*, 117(5): 463~470.

Byous J. 2013. Hertzian fractures and related terms—A glossary. A. T.

Dowd Research, AATR Publishing, Savannah, GA: 1~32 (www.AATRPublishing.com).

Brzesowsky R H, Spiers C J, Peach C J, Hangx S J T. 2011. Failure behavior of single sand grains: Theory versus experiment. *Journal of Geophysical Research*, 116 (B6), B06205, doi: 10.1029/2010JB008120.

Cunningham D. 2005. Active intracontinental transpressional mountain building in the Mongolian Altai: Defining a new class of orogen. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(2): 436~444.

Doblas M. 1998. Slickenside kinematic indicators. *Tectonophysics*, 295(1~2): 187~197.

Dreimanis A. 1953. Studies of friction cracks along shores of Cirrus Lake and Kasakokwog Lake, Ontario. *American Journal of Science*, 251(11): 769~783.

Elaguine D, Brudieu M A, Storåkers B. 2006. Hertzian fracture at unloading. *Journal of the mechanics and physics of solids*, 54(11): 2453~2473.

Engelder J T, Scholz C H. 1976. The role of asperity indentation and plowing in rock friction—II. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 13(5): 155~163.

Fischer-Cripps A C, Collins R E. 1994. The probability of Hertzian fracture. *Journal of Materials Science*, 29(8): 2216~2230.

Fischer-Cripps A C. 1997. Predicting Hertzian fracture. *Journal of Materials Science*, 32(5): 1277~1285.

Frank F C, Lawn B R. 1967. On the theory of Hertzian fracture. *Proceedings of the Royal Society of London (Series A)*, 229(1458): 291~306.

Fuchs D, Röth N. 1913. Untersuchungen über die Wirkung des Adrenalins auf den Respirationsstoffwechsel. *Zeitschrift für experimentelle Pathologie und Therapie*, 14(1): 54~60.

Gilbert G K. 1905. Crescentic gouges on glaciated surfaces. *Geological Society of America Bulletin*, 17(1): 303~316.

Hallett B. 1979. A theoretical model of glacial abrasion. *Journal of Glaciology*, 23(89): 39~50.

Hamilton G M, Goodman L E. 1966. The stress field created by a circular sliding contact. *Journal of Applied Mechanics*, 33(2): 371~376.

Hertz H. 1881. On the contact of elastic solids. *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, 92: 156~171. Translated and reprinted in English in Hertz's *Miscellaneous Papers*, Mac-millan & Co., London, 1896, Ch. 5.

Harris S E Jr. 1943. Friction cracks and the direction of glacial movement. *The Journal of Geology*, 51(4): 244~258.

Huber M T. 1904. Zur Theorie der Berührung fester elastischer Körper. *Annalen der Physik*, 319(6): 153~163.

Iverson N R. 1991a. Morphology of glacial striae: Implications for abrasion of glacier beds and fault surfaces. *Geological Society of America Bulletin*, 103(10): 1308~1316.

Jelagin D, Larsson P L. 2008. On indentation and initiation of fracture in glass. *International journal of solids and structures*, 45(10): 2993~3008.

Kocer C, Collins R E. 1998. The angle of Hertzian cone cracks. *Journal of American Ceramic Society*, 81(7): 1736~1742.

Krabbendam M, Bradwell T, Everest J D, Eyles N. 2017. Joint-bounded crescentic scars formed by subglacial clast-bed contact forces: Implications for bedrock failure beneath glaciers. *Geomorphology*, 290(8): 114~127.

Lahee F H. 1912. Crescentic fractures of glacial origin. *American*

- Journal of Science, 33(193): 41~44.
- Langitan F B, Lawn B R. 1969. Hertzian fracture experiments on abraded glass surfaces as definitive evidence for an energy balance explanation of Auerbach's law. *Journal of Applied Physics*, 40(10): 4009~4017.
- Lee A A G, Rutter E H. 2004. Experimental rock-on-rock frictional wear: Application to subglacial abrasion. *Journal of Geophysical Research*, 109(B9), B0902, <http://dx.doi.org/10.1029/2004JB003359>.
- Lawn B R. 1975. Microfracture beneath point indentations in brittle solids. *Journal of Materials Science*, 10(1): 113~122.
- Lawn B R. 1967. Partial cone crack formation in a brittle material loaded with a sliding spherical indenter. *Proceedings of the Royal Society of London(Series A)*, 299(1458): 307~316.
- Lawn B R. 1968. Hertzian fracture in single crystals with the diamond structure. *Journal of Applied Physics*, 39(10): 4828~4836.
- Lawn B, Wilshaw R. 1975. Indentation fracture: principles and applications. *Journal of Materials Science*, 10(6): 1049~1081.
- Logan J M, Dengo C A, Higgs N G, Wang Z Z. 1992. Fabrics of experimental fault zones: their development and relationship to mechanical behavior. In: Evans B, Wong T(eds), *Fault mechanics and transport properties of rocks*. Academic Press, San Diego, CA, 33~67.
- Ma Zongjin, Deng Qidong. 1965. Preliminary study on the identification of mechanical properties of joints and their Staging and Matching. In: Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences. Editor. *Tectonic Geological Problems*. Beijing: Science Press: 13~30.
- McEwen T J. 1981. Brittle deformation in pitted pebble conglomerates. *Journal of Structural Geology*, 3(1): 25~37.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, 189(4201): 419~426.
- Morton W B, Close L J. 1922. Notes on Hertz's theory of the contact of elastic bodies. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 43(254): 320~329.
- Mougnot R, Maugis D. 1985. Fracture indentation beneath flat and spherical punches. *Journal of Materials Science*, 20(12): 4354~4376.
- Naylor M A, Mandl G, Sijpesteijn C H K. 1986. Fault geometries in basement induced wrench faulting under different initial stress states. *Journal of Structural Geology*, 8(7): 737~752.
- Oh H L, Finnie I. 1967. The ring cracking of glass by spherical indenters. *Journal of Mechanics Physics of Solids*, 15(6): 401~411.
- Preston F W. 1922. The structure of abraded glass surfaces. *Transactions of the Optical Society*, 23(3): 141~164.
- Petit J P. 1987. Criteria for the Sense of Movement on Fault Surfaces in Brittle Rocks. *Journal of Structural Geology*, 9(56): 597608.
- Rea B R. 2013. Glacial landforms, erosional features; micro- to macroscale forms. In: Elias S A, Mock C J. (Eds.), *Encyclopedia of Quaternary Science(2ed.)*, Elsevier, 865~876.
- Riedel W. 1929. Zur Mechanik geologischer brucherscheinungen. *Zentralblatt fur Mineralogie, Geologie und Palaontologie*, 1929B: 354~368.
- Smith J M. 1984. Experiments relating to the fracture of bedrock at the ice - rock interface. *Journal of Glaciology*, 30(104): 123~125.
- Scholz C H. 1987. Wear and gouge formation in brittle faulting. *Geology*, 15(6): 493~495.
- Swain M V, Lawn B R. 1976. Indentation fracture in brittle rocks and glasses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 13(11): 311~319.
- Sylvester A G. 1988. Strike-slip faults. *Geological Society of America Bulletin*, 100(11): 16661703.
- Tapponnier P, Molnar P. 1976. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, 264(5584): 319~324.
- Tapponnier P, Peltzer P, Le Dain A Y, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating Extrusion Tectonics in Asia; New Insights from Simple Experiments with Plasticine. *Geology*, 10(12): 611~616.
- Tillet J P A. 1956. Fracture of glass by spherical indenters. *Proceedings of the Physical Society of London(Section B)*, 69(1): 47~54.
- Tjia H D. 1964. Slickensides and fault movements. *Geological Society of America Bulletin*, 75(7): 683~686.
- Wilshaw R. 1971. The Hertzian fracture test. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10): 1567~1581.
- Yin An. 2010. Cenozoic Tectonic Evolution of Asia; A Preliminary Synthesis. *Tectonophysics*, 488(1~4): 293~325.
- Yin An, Taylor M H. 2011. Mechanics of V-shaped conjugate strike-slip faults and the corresponding continuum mode of continental deformation. *Geological Society of America Bulletin*, 123(910): 1798~1821.
- Zhang Jin, Li Jingyi, Ma Zongjin, Ren Wenjun. 2011. Structural traces of secondary faults(fractures) along main faults and their reliability as kinematic indicators. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 85(5): 1137~1149.
- Zeng Kaiyang, Breder K, Rowcliffe D J. 1992a. The Hertzian stress field and formation of cone cracks-I. Theoretical approach. *Acta Metallurgica et Materialia*, 40(10): 2595~2600.
- Zeng Kaiyang, Breder K, Rowcliffe D J. 1992b. The Hertzian stress field and formation of cone cracks-II. Determination of fracture toughness. *Acta Metallurgica et Materialia*, 40(10): 2601~2606.

Hertzian fracture: A type of neglected structure

ZHANG Jin¹⁾, CHENG Hongyi^{2, 3)}, QU Junfeng¹⁾

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

2) *College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, 730000;*

3) *Center for Glacier and Desert Research, Lanzhou University, Lanzhou, 730000*

Abstract: The Hertzian fracture has always been an important research field in engineering and material fields, but its application in geology is still rare, far from being as familiar as the Riedel fracture. However, the Hertz

fracture is indeed widely developed in nature, ranging from micro scale to outcrop scale, from plate scale to planetary scale. The Hertzian fracture is distinguished from the Riedel shear fracture as a point contact fracture. They are both unique and commonly developed fractures in nature, representing different boundaries and stress conditions. The typical Hertzian fracture belongs to the category of elastic deformation. Because of the point contact, it forms a characteristic cone cracks in three-dimensional space, and turns into radial and ring fractures/cracks on the plane. The angle between the cone crack and the point action surface is closely related to the Poisson's ratio of the acted materials. On the profile, the cone crack generally has a certain angle of inflection, and the angle between the lower crack and the sample plane becomes larger, which is a typical feature of the cone crack. The Hertz fracture has many uses in the field of geology, such as measuring the toughness of materials, explaining circular and radial structures, explaining the origin and shape of cone and arc fractures/cracks, judging the kinematic characteristics of glaciers and faults, distinguishing crescentic structures formed by different fracture mechanisms, etc. It can help restore the sedimentary environments and judge the ancient stress field during the diagenesis or tectonic deformation. In the process of plate collision, the Hertz fracture can also be formed under specific circumstances. This type of fracture will help us understand the origin and development of some faults and the deformation of continents, and provide the interpretation of the deformation on the surface of terrestrial planets (satellites).

Keywords: Hertzian fracture; brittle deformation; cone crack; ring crack; geological application

Acknowledgement: This study was supported by the China Geological Survey (Nos. DD20230217, DD20221646) and National Natural Science Foundation of China (No. 41972224). The authors thank one reviewer for constructive comments

First and corresponding author: ZHANG Jin, male, born in 1973, Ph. D., research fellow, major in the structural geology, is mainly engaged in the geological survey and continental deformation; Email: zhangjinem@sina.com

Manuscript received on: 2023-01-22; Accepted on: 2023-04-22; Network published on: 2023-05-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2023.05.041

Edited by: LIU Zhiqiang

