中国西南部强震带残余应变能水平场 与大震分布的关系。

安 欧

(中国地震局地壳应力研究所,北京 100085)

摘要:据岩体正交异性弹性理论,横跨与平行龙门山断裂带,安宁河断裂带、红河断裂带和鲜水河断 裂带四个测区,用X射线法布设26条测线,测得了岩体宏观残余应变能密度水平分布等值线图, 研究了其与区内大震时空分布的关系。 关键词:中国西南部;X射线法;残余能量场;能震分布关系 中图分类号:P315.2 文献标志码:A 文章编号:1000-0844(2015)04-0976-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.0976

Relation between Residual Strain Energy Horizontal Field and Large Earthquake Distribution in Strong Seismic Belts in Southwestern China

AN Ou

(Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China)

Abstract: Based on the theory of elasticity for orthotropic rock mass, using X-ray diffraction method, 26 survey lines were laid across and along four fault zones, including Longmenshan fault, Anninghe fault, Honghe fault and Xianshuihe fault zone. Then the density horizontal distribution isoline for macro-residual strain energy of rock mass was drew and the relationship between it and spatial-temporal distribution of large earthquakes in these study areas was studied.
Key words: Southwestern China; X-ray diffraction method; residual energy field; relation between energy field and earthquakes

0 引言

从上世纪 50 年代开始,作者在迁西地区布设 11 条测线共 96 个测点,用 X 射线法测量了迁西山 字型构造带三维古构造残余主应力和主应变,求得 其构造带中所储序的残余应变能量,用之鉴定了结 构面的存在和力学性质及构造体系,并研究了此种 力学场在岩体工程中的应用。

从 1985 年起, 历时 10 年, 又在龙门山断裂带、 安宁河断裂带、红河断裂带和鲜水河断裂带四个测 区, 4.2×10⁵ km² 范围内布设 26 条测线共 223 个测 点,用 X 射线法测得区内残余应力三维主分量和水 平、铅直最大剪应力,求得其水平分布场^[1]。研究了 其水平分布场与地震的成因联系和在震源力学过程 中的作用,用之圈划了古地震活动区和未来强震危 险区,并对测区内发生的武安 6.5级、丽江 7.0级和 汶川 8.0级三个大地震都用残余和现今应力场重叠 法做了中期预测^[2-4]。

在前述工作基础上,本文进一步求得四个测区 内岩体中残余应变能密度水平分布场,研究其与测 区内大震时空分布的关系。

① 收稿日期:2014-04-28

基金项目:地震科学联合基金(85-012,85-0708,86-3017,88-138,91-046);中国地震局老专家科研基金(201041) 作者简介:安 欧(1932-),男,辽宁辽阳人,研究员,主要研究地壳动力学及其在地震预测、石油开发和岩体工程中应用。

岩体中宏观残余应变能密度场 X 射线法 测量

将各测点的测量岩样从地壳定向采下后测量, 其中的现代应变能便已释放,故测到的是岩体中古 构造残余应变能。

目前国内外地壳力学界所用的岩体应力是固体 力学界通用的宏观应力^[5],故本区测量的岩体残余 能量场是宏观残余应变能密度场^[6]。

X射线法测量的是岩体中选测矿物晶面间距的 法向变化,从固体物理学知,此种变化是弹性形变。 以矿物经高温退火后弹性形变为零的状态作起算 点,则所得的是绝对弹性正应变。因此,可用弹性理 论方程求得岩体中宏观残余主应力和主应变,以算 得岩体中宏观残余应能密度。

岩样中要含有符合测量要求的力学性质比岩石 稳定且成高级轴对称的矿物石英或方解石,取其轴 对称弹性参量,测量此种晶粒中(001)晶面系的晶面 间距变化,可利用其正交异性弹性理论求得岩样中 宏观残余应变密度。

在岩石新表面处,平行此表面方向的残余应力 和应变保留,垂直此表面方向的则释放到一定深度。 利用此特点,沿水平方向将测量岩样切开,把一个测 点的岩样制成水平和铅直二个测件。再将它们放在 X射线测角仪上,测算得其宏观残余主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 和主应变 e_1 、 e_2 、 e_3 ^[1],代入下式,得到测点岩体 中宏观残余应变能密度:

 $\varepsilon = \frac{1}{2}(\sigma_1 e_1 + \sigma_2 e_2 + \sigma_3 e_3)$

测件中的每一个被测晶粒都相当于测量岩样中 的一个小测点^[5],故将 X 射线束照射于测件表面, 得到测件表层一定深度大量被测矿物内的宏观残余 应力和应变。由大量被测晶粒反射线束可求得岩样 中宏观残余应变能密度的平均值,作为岩体中一点 的测值。

在岩体中选择测点测量岩样的条件:(1)岩石新 鲜,未经风化;(2)可从中切取5 cm 的水平和铅直二 测件;(3)完整而无节理、裂隙、孔洞;(4)含有大量选 测矿物石英或方解石;(5)选测矿物晶粒大小应为 10⁻⁴~0.5 mm。

X射线法是造岩矿物晶体学、晶体弹性力学、岩 石固体物理学和X射线物理学相结合的产物。它 综合利用矿物晶面间距改变的弹性性质、选测矿物 力学性质的轴面异性、岩体残余应变经高温退火后 消除而为零,以及 X 射线穿过晶体发生衍射的性能 等诸多特点,顺其自然地巧妙组合。用水平和铅直 二测件,运用多向测量的衍射几何学与相应弹性理 论的跟踪配合进行测量,可一次测得测点的三维宏 观残余主应力和主应变,继而用弹性理论解得测点 的宏观残余应变能密度值。

在龙门山断裂带测区横跨和平行断裂带布设 6 条测线共 57 个测点;在安宁河断裂带测区横跨和平 行断裂带布设 6 条测线共 42 个测点;在红河断裂带 测区横跨和平行断裂带布设 7 条测线共 63 处测点; 在鲜水河断裂带测区横跨和平行断裂带布设 7 条测 线共 62 个测点。定向采取测量岩样,用 X 射线法 测得各测点的宏观残余应变能密度,绘出其在四个 测区的水平分布等值线图(图 1~图 4)。

2 四测区宏观残余应变能密度水平场

中国西南部龙门山断裂带、安宁河断裂带、红河 断裂带和鲜水河断裂带四测区的宏观残余应变能水 平分布状况如下。

龙门山断裂带测区,测值范围为(5.1~21.7)× 10³ J/m³,平均值约为13.4×10³ J/m³。水平分布 高值区由高到低的顺序为平武一塔玛地区、汶川一 沙章地区、青川地区、北川地区(图1)。



图 1 龙门山断裂带用 X 射线法测得的宏观残余弹性应 变能密度水平分布等值线图(高国宝参加采样)

Fig.1 Horizontal distribution isoline map of macro-residual strain energy density measured by X-ray method in Logmenshan fault zone region

安宁河断裂带测区,测值范围为(0.3~3.4)× 10³ J/m³,平均值约为1.9×10³ J/m³。水平分布高 值区由高到低的顺序为西昌—冕宁地区、岩口—华 坪地区、富民—嵩明地区、因民—巧家地区、金河地





红河断裂带测区,测值范围为(1.0~38.0)×10³ J/m³,平均值约为 19.5×10³ J/m³。水平分布高值 区由高到低的顺序为松平—剑川地区,大理—南涧 地区、开远地区、普洱地区、姚安地区,水平总分布趋 势为北高南低(图 3)。

鲜水河断裂带测区,测值范围为(0.03~22.8) ×10³ J/m³,平均值约为 11.4×10³ J/m³。水平分 布高值区由高到低的顺序为乾宁—康定地区、炉 霍—道孚地区、沙德地区、汉源地区,水平分布总趋 势为南高北低(图 4)。

四测区宏观残余应变能密度水平分布的比较列 于表 1。

当今地壳岩体中存在的构造应变能是古构造残 余应变能与现今形成的应变能的叠加。地震时残余



- 图 3 红河断裂带测区用 X 射线法测得的宏观 残余弹性变能密度水平分布等值线图
- Fig.3 Horizontal distribution isoline map of macro-residual strain energy density measured by X-ray method in Honghe fault zone region



- 图 4 鲜水河断裂带测区用 X 射线法测得的宏观 残余弹性应变能密度水平分布等值线图
- Fig.4 Horizontal distribution isoline map of macro-residual strain energy density measurd by X-ray method in Xianshuihe fault zone region

应变能将与现今应变能一起释放,从而提高震级。

中国西南部四测区残余应力场的三维主分量多 比同点现今应力场相应主分量高出几倍甚至十几 倍^[7]。由固体力学知,岩体应变能密度可表示为主

表 1 中国西南部四测区宏观残余应变能 密度水平分布比较表

 Table 1
 Horizontal distribution comparison for macro-residual

strain energy densities in 4 regions in Southwestern China

测区	ε 值范围/	测区 ε 平均值/	ε 水平分布
	$(10^{3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3})$	$(10^{3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3})$	总趋势
红河断裂带	1.0~38.0	19.5	北高南低
龙门山断裂带	5.1~21.7	13.4	北高南低
鲜水河断裂带	0.03~22.8	11.4	南高北低
安宁河断裂带	0.3~3.4	1.9	北高南低

应力二次项的组合, $\varepsilon = \frac{1}{2E} \left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2v(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)\right]$ 。可见本区残余应变能密

 $2v(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]$ 。可见本区残余应受能密 度高出现今应变能密度很多倍。

中国西南部残余力场是晚第三纪应力场残留至

今的残余场^[1],其残余应变能仍高于现今应变能,说 明本区晚第三纪的地震活动要比现代强烈得多,现 代地震活动相对晚第三纪喜马拉雅运动的应是处于 舒缓时期。同时也说明在这个过程中,残余应变能 的作用一直在提高本区地震震级,其对地震释放能 量的贡献要远高于现代应变能量,因而对区内大震 的空间分布应起主要作用。

3 四测区宏观残余应变能场与大震分布的 关系

中国西南部龙门山断裂带、安宁河断裂带、红河 断裂带和鲜水河断裂带四个测区内6级以上大地震 的时空分布如图5所示。



图 5 四测区的断裂分布、6级以上地震震中、震源机制解的 P 轴方向和宏观残余水平最大(实线)、 最小(虚线)主压应力线图

Fig.5 Chart of fractures distribution, epicenters of M > 6 earthquakes, P axial direction of focal mechanism solution, macro-residual horizontal maximum (solid line) and minimul (dotted line) principal compressive stress lines in the four fault zone regions

龙门山断裂带测区 6 级以上大地震沿断裂带分 布,集中在平武一塔玛地区、汶川一沙章地区以及北 川地区,这些区位与图 1 中宏观残余应变能的高值 区一致;发震时震源机制解的 P 轴方向与测区宏观 残余水平最大主压应力线方向分布的角域一致。

安宁河断裂带测区 6 级以上大地震沿断裂带分 布,集中在西昌一冕宁地区、麦地一华坪地区、因民 一塘上地区以及金河地区,这些区位与图 2 中宏观 残余应变能的高值区一致;发震时震源机制解的 P 轴方向与测区宏观残余水平最大主压应力线方向分 布的角域一致。

红河断裂带测区 6 级以上大地震沿断裂带的分 布,集中在松平一剑川地区、大理一南涧地区、玉 溪一开远地区、普洱地区、姚安一双柏地区以及永平 地区,这些区位与图 3 中宏观残余应变能的高值区 一致;发震时震源机制解的 P 轴方向与测区宏观残 余水平最大主压应力线方向分布的角域一致。

鲜水河断裂带测区 6 级以上大地震沿断裂带分 布,集中在乾宁一泸定地区、炉霍一道孚地区、甘孜 地区及得妥地区,这些区位与图 4 中宏观残余应变 能的高值区位一致;发震时震源机制解的 P 轴方向 与测区宏观残余水平最大主压应力线方向分布的角 域一致。

由上可知,中国西南部四测区内6级以上大地 震的时空分布有如下特点:

(1)6级以上大地震沿断裂带分布,但并非分 布于断裂带上的任意部位,而是集中在宏观残余应 变能的高值区段;

(2)6级以上大地震发生时 P 轴方向分布在宏观残余水平最大主压应力线方向分布的角域区。在此种状态,残余和现今应力场同向同性叠加使得叠加场应力值最高,因而易引发大地震。残余应力场的主轴方向基本不变,而 P 轴方向随地球自转状态而变^[6],因此可用地球自转状态来预测区内 6 级以上大震的发生时段,即当将要发生地震的 P 轴方向变化到地区宏观残余应力场的水平最大主压应力方向分布的角域内时,便易发震^[2-4]。这个时段取决于地球自转状态,地球自转状态由天文观测曲线的拟合曲线沿时间轴向后外延而得^[2-4]。

上述说明,宏观残余应变能的高值区地震多且 震级大,低值区则没记录到大地震;地区将发生大震 的 P 轴与基本不变的宏观残余应力场水平最大主 压应力方向一致时是本区发生大震的最佳时段,此 时二水平场的主应力值同向同性叠加而使岩体中的 此研究结果支持了地震区划中"大震原地复发" 原则。

本区的宏观残余应力场是从晚第三纪以来就存 在的^[1]。在这段历史时期内,残余主应力方向基本 不变,但各地残余应变能有不同程度的衰减。因此 大震危险区可以随之而变,有多个大震区,但危险时 段与地球自转状态的关系基本不变^[1,6]。

参考文献(References)

- [1] 安欧,地壳残余应力场[M].北京:地震出版社,2011:4-17,36-39.
 AN Ou.Geocrustal Residual Stress Filed[M].Beijing:Seismological Press,2011:4-17,36-39.(in Chinese)
- [2] 安欧.残余和现今应力场重叠法预测红河断裂带测区大震危险时区[J].地震研究,1996,19(1):34-40.
 AN Ou.Forecast of Risk Area and Risk Time of Strong Earthquakes in Honghe Faults by Superposition Method of Residual and President Stress Freld[J]. Journal of Seismological Research,1996,19(1):34-41.((in Chinese)
- [3] 安欧.应力场重叠法预测安宁河断裂带大震时空强分布[A]//地 壳构造与地壳应力文集(10).北京:地震出版社,1997:45-51.
 AN Ou.A Prediction Method of Stress Field Superpositon for the Time-space-strength Distribution of Earthquakes in the Anninghe Fault Zone[A]//Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics(10).
 Beijing:Seismological Press,1997:45-51.(in Chinese)
- [4] 安欧.应力场重叠法预测龙门山断裂带测区大震时空强分布 [A]//地壳构造与地壳应力文集(12).北京:地震出版社, 1999:108-113.

AN Ou.A Prediction Method of Stress Field Superposition for the Time-space-strength Distribution of Earthquakes in the Longmenshan Fault Zone[A]//Bulletin of the Institute of Crustal Dynamice (12).Beijing.Seismological Press,1999:108-113.(in Chinese)

[5] 日本材料学会.X 線応力測定法[M].東京:書肆株式会社, 1966:84-104.

Japan Material Society. X-ray Stress Measure Method [M]. Tokyo:Literature Press, 1966:84-104.(in Japanese)

[6] 安欧.中国中部大震与地球自转的关系[J].地震研究,1984,7 (5):585-596.

AN Ou.Relation between Large Earthquake in Central China and Eatth's Kotation[J].Journal of Seismological Research, 1984,7(5):585-596.(in Chinese)

[7] 安欧.中国西南部强震带古构造残余应力场对大震的控制[A]// 地壳构造与地壳应力文集(15).北京:地震出版社,2002:23-30.
AN Ou. Control of Paleo-tectonic Residual Stress Field on Large Earthquakes in Strong Seismic Beismic Belts in Southwestern China [A]//Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics(15).Beijing: Seismological Press,2002:23-30.(in Chinese)