

文章编号: 1000-7598(2011)05-1452-08

基于围岩片帮形迹的宏观地应力估计方法探讨

江 权¹, 冯夏庭¹, 徐鼎平¹, 赵 阳¹, 江亚丽², 黄 可²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 杭州 310014)

摘 要: 基于深部地下勘探隧洞围岩应力型片帮破坏是岩体初始地应力作用的最直观结果的认识, 建立借助围岩片帮形迹分析工程区岩体宏观地应力的估计方法。该方法通过对比分析地应力作用下多个交叉隧洞围岩的片帮空间分布特征和烈度强弱关系, 建立岩体 3 个初始主应力的空间大小和方向关系; 采用片帮劈裂纹方位角统计获得岩体最大主应力方向; 依据片帮的应力门槛值和起裂应力门槛值估算出 3 个主应力量值。现场实测地应力数据和多工况数值计算分析都有力地表明, 借助该分析方法获得的白鹤滩右岸厂址区域三维地应力是科学、合理的, 这也为深入认识工程区地应力特征提供了一条新思路。

关 键 词: 地应力估计; 片帮形迹; 劈裂纹; 围岩破坏; 白鹤滩水电站

中图分类号: U 451^{+.2}

文献标识码: A

Evaluation method of general geostress based on spalling features of wall rock

JIANG Quan¹, FENG Xia-ting¹, XU Ding-ping¹, ZHAO Yang¹, JIANG Ya-li², HUANG Ke²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. East China Investigation and Design Institute, CHECC, Hangzhou 310014, China)

Abstract: According to the viewpoint that the kind of brittle spalling of wall rock is the embodiment of in-situ rock stress, a new evaluation method of general geostress is put forward based on spalling features of wall rock. Firstly, the spatial relationship of three principal stresses is gained through the analysis of spalling features of wall rock from the aspect of spatial distribution and intensity relation. Then, the direction of maximum principal stress is counted according to the trend of spalling's split veins. The values of three principal stresses are calculated also based on the stress threshold values of spalling and threshold values of crack initiation. The in-situ stress evaluation of right powerhouse region in Baihetan hydropower station is validated by the local measured in-situ rock stress results and contrastively numerical analysis of different directions of maximum principal stress, which prove that the method is reasonable and useful for understanding the break of wall rock and checking the measured in-situ rock stress results.

Key words: evaluation of geostress; spalling feature; split veins; break of wall rock; Baihetan hydropower station

1 引 言

在复杂地层环境中修建深部地下工程时, 工程区域的现今地应力场特征常常成为大型洞室纵轴线设计的控制性因素^[1-4], 故大型水电地下厂房修建前通常都开展较详细的地应力测试工作。然而, 由于工程区复杂的内外动力地质历史作用过程和岩体中不同尺度的原生和次生结构面的客观存在, 工程现场地应力测试常常具有较大的实施难度和测试结果较离散^[5-9]。在通过实测方法获取工程区地应力

存在困难时, 采用另外一条思路即从工程现场勘探隧洞或试验洞围岩应力型破坏的形迹规律反分析该区域的初始地应力, 无疑是深入认识工程区地应力场特征和校验实测地应力的有效手段。

因此, 基于围岩应力型破坏是岩体初始地应力作用的最直观结果这一认识, 本文结合金沙江流域白鹤滩水电站右岸厂址区域 5 条勘探隧洞围岩的片帮现象, 在探讨围岩应力型破坏空间位置与岩体中初始最大主应力的关系基础上, 提出通过多条交叉探洞片帮形迹估计工程区宏观主应力大小和方位关

收稿日期: 2010-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40902090); 中科院知识创新工程项目 (No. KZCX2-EW-110); 国家重点基础研究发展规划 973 项目 (No. 2010CB732006)。第一作者简介: 江权, 男, 1978 年生, 博士, 副研究员, 主要从事地下工程数值模拟、大型洞室群稳定性分析、工程地质灾害治理等方面的研究工作。E-mail: qjiang@whrsm.ac.cn

系，依据劈裂纹方位角统计确定最大主应力的方位角；进而借助片帮发育的应力门槛值原理推算三维地应力场值，从而形成一个较完整地由围岩片帮形迹角度估计工程区宏观地应力的分析方法。白鹤滩右岸厂址区域三维地应力推定结果的多工况数值计算验证和实测地应力数据对比分析表明，该方法在大埋深条件下围岩应力型破坏特征明显的工程区地应力估计时具有较好的实用性。

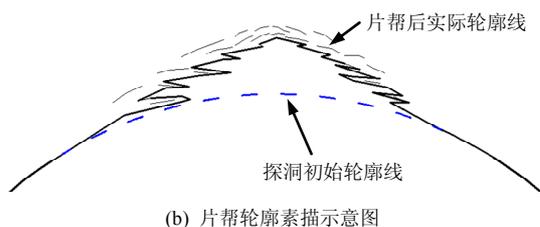
2 白鹤滩右岸厂址探洞片帮特点

2.1 工程背景简介

位于金沙江下游的白鹤滩水电站是我国继三峡和溪洛渡之后又一拟建的千万千瓦级的巨型水电站。电站发电枢纽拟采用全地下厂房式布置，即在左岸和右岸玄武岩地层中各布置多台发电机组^[8]。为全面认识右岸400 m左右垂直埋深下厂址区域地质条件和地应力场特征，设计单位在620 m水平开掘了5条相互交叉的勘探隧洞。现场调查发现，各探洞围岩在开挖后陆续出现烈度不同，厚度约0.5~3 cm的片状玄武岩剥落（见图1），这里统称为片帮（spalling）。探洞普遍发育的片帮实际上反映了工程区高地应力特点和将来地下厂房枢纽洞群较为严峻的稳定性问题，故准确掌握白鹤滩右岸厂址区域地应力特征就十分重要了。



(a) 现场片帮照片



(b) 片帮轮廓素描示意图

图1 白鹤滩右岸厂址探洞典型片帮

Fig.1 Typical spalling in exploration tunnel at right powerhouse region of Baihetan hydropower station

因此，国内多家单位采用了包括二维和三维水压致裂法、深孔套芯应力解除法、浅孔三维应力解除法在内的多种测试手段对白鹤滩右岸厂址高程区域进行了地应力测量^[10-11]，但不同单位采用不同的测试方法得出的地应力方向一致性不强，实测数据中最大主应力方向基本离散分布在 NE 第一象限内。这一方面表明，厂址区域岩体地应力场可能较为复杂，另一方面给地下发电厂房和主变室纵轴线设计提出了新的挑战。为确保地下厂房枢纽设计的科学性和洞群的整体稳定性，有必要从另外一条思路探讨白鹤滩右岸厂址区域的地应力特征，尤其是最大主应力的方向和大小。

2.2 厂址勘探洞片帮特征

为查清白鹤滩右岸厂址探洞片帮发育特点，包含多个专业的联合调研组于2008年11月对厂址PD62、PD62-1、PD62-2、PD62-3、PD62-4共5条探洞围岩片帮进行了详细的调查。现场调查结果再次表明，探洞内发育的片帮是硬脆性玄武岩在较大初始地应力作用下的直接表现。同时，联合调查组采用5分制对片帮烈度进行了分级，获得了整个探洞群的片帮空间分布和烈度等级特征（见图2）。需指出的是，探洞内局部细微的岩体结构差异和结构面发育差异使得各个探洞的片帮并非完全连续，而现场调查测绘也只是有选取性地对探洞典型段进行烈度评估，但这些都无碍于认识厂址整个玄武岩片帮发育的基本规律。归纳5条探洞片帮发育特点，可获得两个基本规律：

(1) PD62-2和PD62-1探洞的片帮烈度最大，PD62探洞片帮烈度也较大，而PD62-3和PD62-4发育的片帮烈度相对较小，即探洞烈度关系为

$$S_{PD62-2} \approx S_{PD62-1} > S_{PD62} > S_{PD62-3} \approx S_{PD62-4} \quad (1)$$

(2) 除PD62-2探洞的片帮发育区位于探洞顶拱外，其余4条探洞片帮发育区一般都位于偏河谷上游侧的侧拱上。

3 右岸厂址区域宏观地应力方向估计

由于白鹤滩右岸探洞片帮与厂址区域地应力场存在根本上的关联性，因此，厂址地应力推测分析首先在阐明围岩片帮破坏的空间位置与岩体初始最大主应力关系基础上，通过5条探洞片帮烈度的强弱关系推论了3个主应力的方向和大体方向；然后在片帮劈裂纹方位角统计基础上给出最大水平主应力的方向；进而借助工程区地形特点和片帮发育区的位置估计了最大水平主应力的倾角。

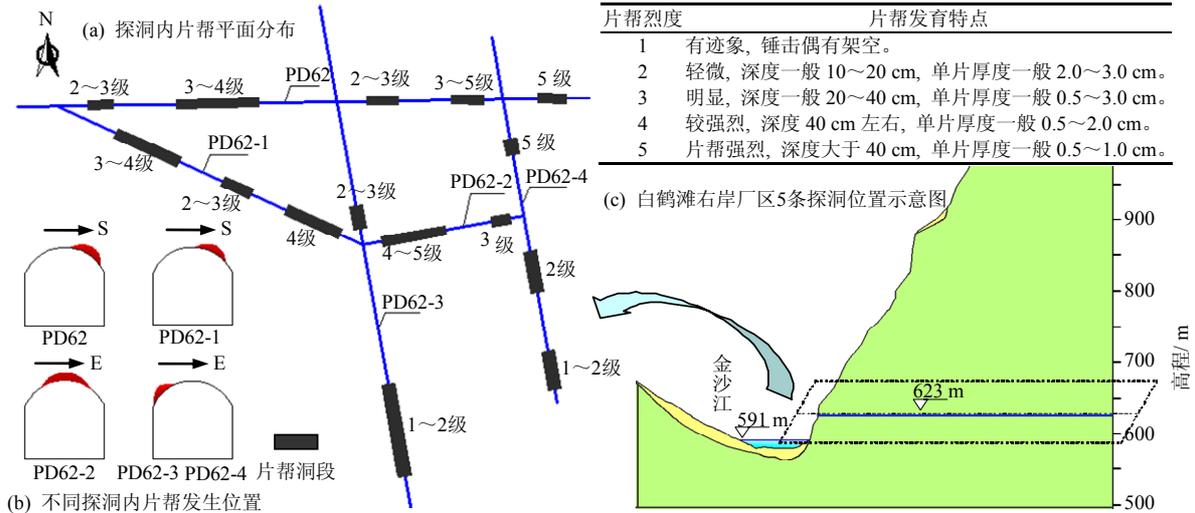


图2 右岸厂址探洞片帮的空间分布和烈度等级特征

Fig.2 Spatial distribution and intensity relationship of spalling at right powerhouse region

3.1 岩体初始主应力与片帮破坏的空间关系

Hoek^[12]较早认为,完整岩体中高地应力对隧洞围岩破坏具有控制作用,并且最大初始地应力方向与围岩应力型脆性破坏具有很好地对应关系。Read^[13]、Martin^[14]等通过对加拿大 AECL 的 Mine-by 花岗岩试验洞和 ASPO 闪长岩圆形试验洞的“V”型片帮(剥落)现象进行较详细的调查也获得了相同的结论,即:围岩脆性破坏发生在与隧洞横断面上最大主应力方向呈大夹角或近似垂直的洞周轮廓线上,如图3所示。实际上,隧洞围岩脆性破坏与岩体中初始最大主应力的空间对应关系在我国多个具有高地应力特征的公路、水电、矿山地下工程同样都得到了验证^[15-17]。从破坏发生的“源力”角度看,洞室(或巷道)开挖后出现的这种片帮坑本质上是在特定的初始地应力作用下,隧洞开挖后围岩应力重分布结果使得剥落区域出现较大的切向应力,即出现这种隧洞围岩片帮的本质原因还是岩体中初始最大主应力。因此,根据工程区的隧洞或探洞开挖后围岩的片帮破坏特征反分析工程区域的初始地应力方向是完全合理可行的。

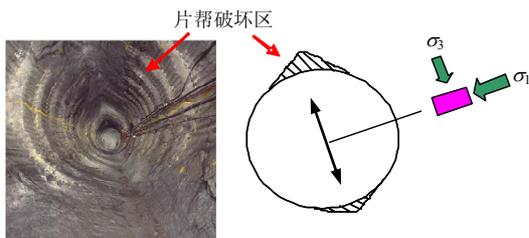


图3 Mine-by 试验洞片帮坑与主应力关系 (Read^[13], 2004)
 Fig.3 Relationship between spalling pit and principal stress at Mine-by experimental tunnel (Read^[13], 2004)

更进一步分析可知,虽然某一方位角纵轴线隧洞的围岩片帮可以分析垂直该隧洞轴线的平面上 2 个主应力方位和大小,但如果综合多条相互大角度交叉或垂直的隧洞片帮特征时,就可以联合确定该区域的三维宏观地应力特征了。如图4所示,首先通过沿某一方位轴线隧洞 A 的围岩片帮空间特征可以获得隧洞 A 横断面上两个主应力 σ_v 和 σ_{H1} 的方位和大小关系,然后再通过隧洞 B 围岩片帮空间特征还可以获得隧洞 B 横断面上两个主应力 σ_v 和 σ_{H2} 的方位和大小关系,再对比隧洞 A 和 B 的片帮烈度强弱,就可以确定 σ_v 、 σ_{H1} 和 σ_{H2} 三者的大小关系。这样,就可以初步得到洞群区的 3 个主应力的空间方位和大小关系。

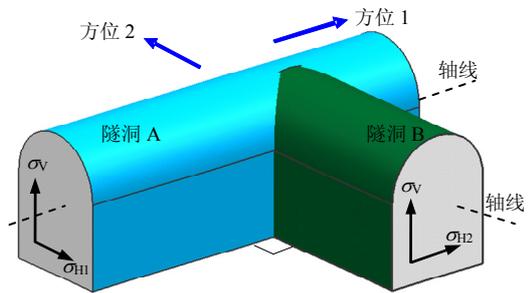


图4 交叉隧洞联合确定主应力方位和大小关系示意图
 Fig.4 Sketch map for determining the direction and value relationship of principal stresses in across tunnels

3.2 三维地应力方位角推测

基于“围岩脆性破坏发生在与隧洞横断面上最大主应力方向呈大夹角或近似垂直的洞周轮廓线上”这一认识,可以在综合分析探洞片帮形迹的基

基础上，对白鹤滩右岸厂址区域三维初始地应力方位做如下估计（见图 5）。

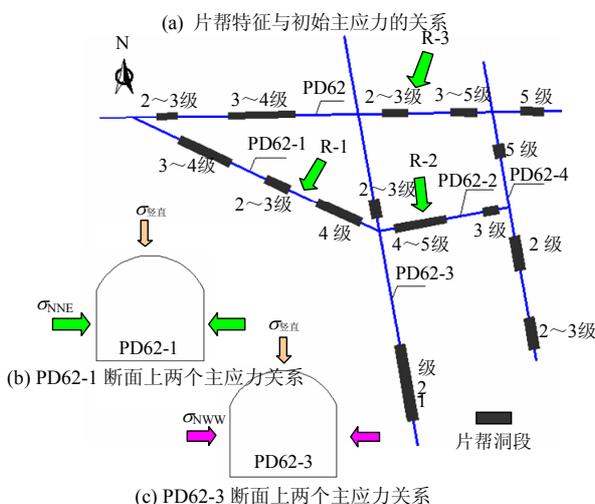


图 5 厂址探洞片帮与初始最大主应力关系示意图

Fig.5 Relationship between spalling at exploration tunnel and direction of initial maximum geostress

(1) 由于 PD62-1 探洞片帮烈度较大，则岩体初始最大主应力方向应该与探洞 PD62-1 轴线呈大夹角或垂直，最大主应力的“最佳方位”应如图中“R-1”所示；

(2) 由于 PD62-2 探洞片帮烈度也较大，则岩体初始最大主应力方向应该与探洞 PD62-2 轴线呈大夹角或垂直，最大主应力的“最佳方位”应如图中“R-2”所示；

(3) 为满足关系式 (1)，基于最大主应力与 PD62-1 和 PD62-2 探洞轴线尽量呈大夹角原则，并考虑探洞开挖后的围岩二次应力场中，最大水平主应力方向将会在初始最大主应力方向上发生一定程度偏转，则最大主应力方位应总体上应如图中“R-3”方向；

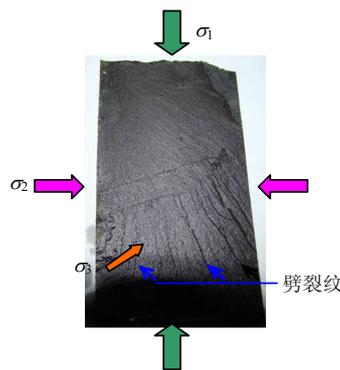
(4) 实际上，当厂址区最大主应力方位为图中“R-3”方向（NNE 向）时，该方向也与 PD62 探洞呈大夹角而与 PD62-3 和 PD62-4 探洞呈小夹角，也可较好地解释 PD62 探洞片帮也相当较发育，而 PD62-3 和 PD62-4 探洞片帮不发育的特点；

(5) 如果最大主应力方向为 NNE 向（R-3 方向）时，基于 3 个主应力正交的原则，那么中间主应力应为 NWW 向；又由于第 1 和第 2 主应力都近水平向才能使得片帮破坏发生在探洞顶拱，则最小主应力应大体为近竖直向。

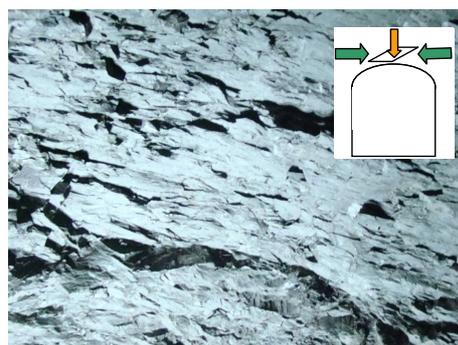
综上推定分析，可认为白鹤滩右岸厂址区域初始地应力场中最大主应力方向为 NNE 向，中间主应力为 NWW 向，最小主应力以竖直向为主。

3.3 基于片帮劈裂纹的最大主应力方位角估计

为了校正地应力方位角推测结果，可以进一步从片帮上的细观裂纹进行深入分析。通常在侧限为 0 或较小时，岩石在不断加载过程中将产生沿最大加载主应力方向的羽化劈裂纹并以非稳定性形式扩散，进而同向裂纹相互贯通形成宏观劈裂面^[18-19]。这种劈裂纹的发生和扩展的最大特点是劈裂纹走向与第 1 主应力方向近平行，而且薄层的宏观破裂平面近似垂直第 3 主应力方向。利用中国科学院武汉岩土力学研究所的 RT3 真三轴试验机，对白鹤滩玄武岩进行片帮模拟试验，在类似探洞应力条件下通过室内试验再现了片帮劈裂纹，而且这种劈裂纹纹理与现场勘探洞片帮劈裂纹一致（如图 6 所示）。这有力地表明：现场围岩片帮破坏后洞壁上残留的劈裂纹实际上反映了围岩片帮发生时的岩体主应力方向。因此，白鹤滩右岸厂址区域探洞片帮劈裂纹的方位实际上可以反映工程区最大主应力的方向。



(a) 真三轴试验再现片帮劈裂纹



(b) 现场片帮劈裂纹

图 6 真三轴试验获得的岩片劈裂纹和白鹤滩现场勘探洞片帮劈裂纹对比

Fig.6 Comparison between split veins from real triaxial test and spalling veins from local exploration tunnel

通过对白鹤滩右岸多条探洞内片帮劈裂纹方位角测量表明，厂址区域 5 条不同探洞的劈裂纹方位角具有一致性，走向都分布在 N20° E~N35° E 之

间, 尤其集中在 N20° E~N30° E 之间 (见表 1)。

因此, 综合多个探洞片帮空间分布特征和片帮劈裂纹方位角特点, 可以认为: 厂址区最大主应力方位约为 N20° ~30° E 左右, 这样中间主应力就应为 N60° ~70° W。进而考虑到多个探洞片帮发育区偏向河谷侧和厂址区域一定程度上受金沙江 V 型河谷地应力场影响^[5, 20], 则最大主应力方位应以小倾角方式稍倾向河谷侧。

表 1 白鹤滩右岸探洞典型洞段部分片帮劈裂纹走向
Table 1 Strike of split veins at exploration tunnels

洞段	桩号 /m	劈裂纹方向
PD62-2	138	N20° E
	85	N20° E
	56	N25° E
PD62-3	174	N25° E
	68	N25° E
	28	N30° E
PD62-1	248	N20° E
	180	N30° E
	103	N30° E
PD62	682	N20° E
	612	N25° E
	411	N20° E

4 右岸厂址区域宏观地应力量值估算

既然岩体中最大主应力是导致围岩片帮的根本原因, 则依据围岩片帮烈度也同样可以估计最大主应力的量级。Martin^[14]对多个硬岩地下试验洞的片帮调查研究认为, 片帮剥落的门槛应力值 σ_{sm} (隧洞开挖后表层围岩中最大主应力) 大体上为岩石单轴抗压强度 (σ_c) 的 0.4~0.6 倍。白鹤滩玄武岩室内试验研究表明, 右岸厂址完整性较好的玄武岩的 σ_c 约为 120 MPa^[10]。如果借鉴 Martin 对 AECL 的 Mine-by 试验洞在 420 水平获得片帮剥落应力门槛值关系式:

$$\sigma_{sm} = 0.56\sigma_c \quad (2)$$

则白鹤滩右岸厂址探洞的较强烈片帮(烈度为 4 级)门槛应力值约为 67.2 MPa。依据弹性力学中各向同性均匀弹性介质的孔周应力解析式可知, 探洞片帮区洞壁表层最大切向应力大体为

$$\sigma_\theta \approx 3\sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (3)$$

式中: σ_{max} 为原岩初始最大主应力; σ_{min} 为原岩初始最小主应力。当假定工程区近竖直的最小主应力

基本可按自重进行估计, 根据探洞埋深可以计算出 $\sigma_{min} \approx 10$ MPa。令切向力 σ_θ 等于片帮门槛值 σ_{sm} , 那么右岸探洞岩体初始最大主应力可做如下估算:

$$\sigma_{max} \approx (\sigma_{sm} + \sigma_{min})/3 = (67.2 + 10)/3 = 25.7 \text{ MPa} \quad (4)$$

即右岸厂址区域初始最大主应力量级大体为 26 MPa 左右。

此外, 考虑到 PD62-3 和 PD62-4 探洞横断面上也有零星低烈度的片帮(烈度约 2~3 级), 同样采用 Martin 对 AECL 的 Mine-by 试验洞在 420 水平的获得的起裂应力门槛值 (σ_{ci}) 关系式:

$$\sigma_{ci} = 0.45\sigma_c \quad (5)$$

参照式 (3)、(4) 可以计算出工程区域岩体初始中间主应力:

$$\sigma_{mid} \approx (\sigma_{ci} + \sigma_{min})/3 = (54 + 10)/3 = 21.3 \text{ MPa} \quad (6)$$

5 宏观地应力推定结果的检验分析

5.1 多工况的数值对比分析

为了检验上述右岸厂址高程区域地应力估计的正确性, 需要进一步采用数值方法进行验证分析。根据国内外多个专业咨询机构对右岸厂址地应力场的研究认识, 这里设计了 3 种可能的最大水平主应力方向计算工况, 分别为 N15° W (NNW)、N25° E (NNE) 和 N65° E (NEE)。3 个工况计算的主应力量值均采用前节推算结果, 而计算结果显示, 主要是通过苏国韶等^[21]提出的表征围岩脆性破坏烈度的局部能量释放率 (LERR) 来表征探洞片帮烈度, 并规定出现明显片帮的 LERR 值应大于 $3 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ 。3 种工况合理性的判别依据是工程现场的探洞片帮基本特征, 即:

条件 1: 满足片帮烈度关系式 (1); 条件 2: 片帮发生部位是探洞顶拱偏河谷上游侧。

分析 3 种计算工况下获得的局部能量释放率结果 (见表 2) 可得

(1) 工况 1 计算结果反映出 5 条探洞的计算片帮烈度 (Sc) 关系为式 (7), 与实际片帮烈度关系式 (1) 存在差别, 不满足条件 1; 计算结果显示顶拱片帮位置与现场实际片帮基本一致, 满足条件 2;

$$Sc_{PD62-2} > Sc_{PD62-5} > Sc_{PD62-1} \approx Sc_{PD62-3} \approx Sc_{PD62-4} \quad (7)$$

(2) 工况 2 计算结果反映出 5 条探洞的计算片帮烈度关系为式 (8), 与实际片帮烈度关系式 (1)

相同；且计算结果显示出顶拱片帮位置与现场实际片帮位置基本一致，同时满足 2 个条件

$$Sc_{PD62-2} \approx Sc_{PD62-1} > Sc_{PD62} > Sc_{PD62-3} \approx Sc_{PD62-4} \quad (8)$$

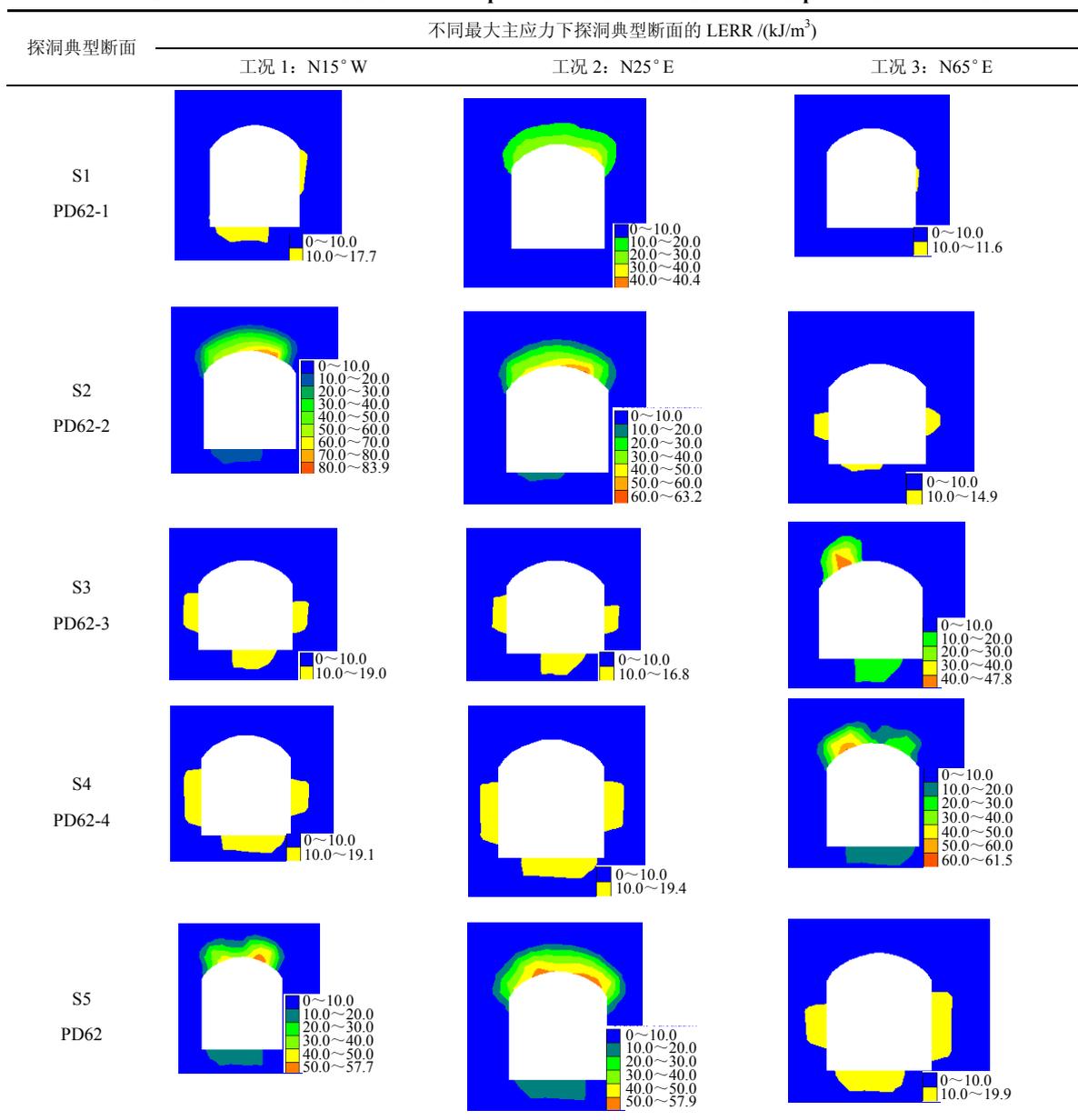
(3) 工况 3 计算结果反映出 5 条探洞的计算片帮烈度关系为式 (9)，与实际片帮烈度关系式 (1) 存在差别；且计算显示出 PD62-1 和 PD62-2 探洞顶拱无明显片帮，与现场这 2 条探洞片帮较发育现象

不一致，2 个条件都不满足

$$Sc_{PD62-4} > Sc_{PD62-3} > Sc_{PD62-1} \approx Sc_{PD62-2} \approx Sc_{PD62} \quad (9)$$

以上 3 种工况的计算分析表明，只有在最大主应力方向为 NNE 向（工况 2）下，计算的探洞片帮空间位置和烈度才能与实际情况较为一致，这反证了上节关于工程区地应力方向和量值推测的合理性。

表 2 不同最大水平主应力方向作用下 5 条探洞典型断面的局部能量释放率分布
Table 2 Distributions of LERR in five exploration tunnels of different computational conditions



注：对于 S1、S2 和 S5 断面，图左为下游北侧，图右为上游南侧；对于 S3 和 S4 断面，图左为近河谷西侧，图右为远河谷东侧。

5.2 推定地应力与实测地应力对比分析

分析白鹤滩右岸厂址探洞内的实测地应力特点可见（见图 7），基于片帮推测的最大主应力方向与

水压致裂法测量的最大主应力方向较为一致，而与应力解除法测量结果存在一定差别。虽然实测地应力离散性较大的可能原因多样，但这还是从另一个

侧面说明推定的地应力方向具有一定的合理性。另外，厂区实测地应力值的统计表明，厂区实测最大主应力平均值约为 22.3 MPa，最小主应力平均值约为 8.5 MPa。考虑到地应力测量本身就存在一定的误差^[7, 22]，故可认为地应力推算值与实测值还是具有一致性。

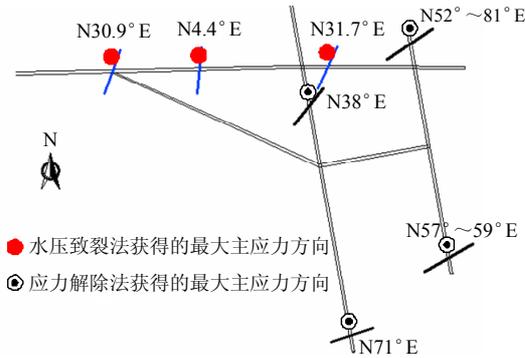


图 7 白鹤滩右岸探洞内实测最大主应力方向示意图
Fig.7 Directions of measured geostresses at tunnels

6 结 论

针对白鹤滩右岸厂址区域实测地应力方向较离散导致工程区地应力场特征不清晰的难题，本文形成了基于探洞片帮形迹的工程区宏观地应力估计方法。该方法的最大特点是通过对比多个交叉探洞的片帮空间分布特点和烈度强弱关系，以及统计片帮劈裂纹方位角综合确定工程区岩体的三维主应力方向，然后借助硬岩的片帮应力门槛值和起裂门槛值推算三维地应力的大小。该方法的正确性已通过多工况的数值计算分析和部分现场实测地应力数据所验证。更进一步分析还发现，根据该方法推定的宏观最大主应力方向与工程区总体构造背景也相协调。

同时需指出的是，由于本文采用的地应力量级推算方法是建立在经验的片帮应力门槛值基础上，故针对具体工程岩体较完善的片帮应力门槛值和地应力量值估算方法还有待深入研究。

还需要注意的是，本文提出的工程区宏观地应力估计方法前提条件是具有硬岩应力型脆性破坏特征的地下隧洞或洞室，故针对具体问题分析时应注意区分围岩应力型破坏和结构性破坏。

此外，由于地应力特征是深部大型地下工程设计需考虑的关键因素之一，而工程区复杂的地质条件常使得地应力实测数据离散性较大，故基于工程区勘探洞围岩破坏特征的地应力估计方法可作为整体上认识工程区地应力场特征和校验实测地应力的

有效手段之一。

致谢：感谢中水顾问集团华东勘测设计研究院徐建荣、徐建强、石安池、宋肖斌、宋刚、陈云华等提供的白鹤滩工程地质、地应力等方面测绘资料。

参 考 文 献

- [1] 段乐斋, 王永年, 周文铎, 等. 水利水电工程地下建筑物设计手册[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1993.
- [2] TAN Chen-xuan, WANG Rui-jiang, SUN Ye, et al. Numerical modelling estimation of the 'tectonic stress plane' (TSP) beneath topography with quasi-U-shaped valleys[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41: 303-310.
- [3] 李锦飞. 琅琊山抽水蓄能电站厂房位置及轴线方向的优化选择[J]. *工程地质学报*, 2003, 11(4): 416-420.
LI Jin-fei. Optimized selection on the location and axis for the underground plant building of Langyashan pumped-storage hydroplant[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2003, 11(4): 416-420
- [4] 盛谦, 黄正加, 邬爱清. 三峡工程地下厂房定位块体分析与厂方轴线选择[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(增1): 1958-1961.
SHENG Qian, HUANG Zheng-jia, WU Ai-qing. Reasonable selection of underground house axis based on the stability of determinde blocks in the Three Gorges project[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(Supp. 1): 1958-1961
- [5] ZHU Wei-sheng, LI Guang, WANG Ke-jun. Analyses of diskng phenomenon and stress field in the region of an underground powerhouse[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1985, 18: 1-15.
- [6] FAIRHURST C. Stress estimation in rock: A brief history and review[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40: 957-973
- [7] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [8] 王成虎, 郭敬良, 丁立丰, 等. 工程区高地应力判据研究及实例分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2359-2364.
WANG Chen-hu, GUO Qi-liang, DING Li-feng, et al. High in-situ stress criteria for engineering area and a case analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2359-2364.
- [9] 康红普, 林健, 张晓, 等. 潞安矿区井下地应力测量及分布规律研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(3): 827-831.

- KANG Hong-pu, LIN Jian, ZHANG Xiao, et al. In-situ stress measurements and distribution laws in Lu'an underground coal mines[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 827—831.
- [10] 石安池, 唐鸣发, 单治钢, 等. 金沙江白鹤滩水电站可行性研究坝线选择专题研究报告[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2008.
- [11] 陈文华, 马鹏, 彭书生, 等. 金沙江白鹤滩水电站工程地应力测试研究分析专题报告[R]. 杭州: 杭州华东工程检测技术有限公司, 2009.
- [12] HOEK E, KAISER P K, BAWDEN W F. Support of underground excavations in hard rock[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995.
- [13] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41: 1251—1275.
- [14] MARTIN C D, CHRISTIANSSON R. Estimating the potential for spalling around a deep nuclear waste repository in crystalline rock [J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46: 219—228.
- [15] 汪波, 何川, 吴德兴, 等. 基于岩爆破坏形迹修正隧道区地应力及岩爆预测的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 811—887.
- WANG Bo, HE Chuan, WU De-xing, et al. Study on modification of geostress and forecast of rockburst based on destructive size of rockburst[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(4): 811—887.
- [16] 陆家佑, 王昌明. 根据岩爆反分析岩体应力研究[J]. 长江科学院院报, 1994, 11(3): 27—30.
- LU Jia-you, WANG Chang-ming. Study on back analysis for stress of rock mass from information of rockbursts[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 1994, 11(3): 27—30.
- [17] 许博, 谢和平, 涂扬举. 瀑布沟水电站地下厂房开挖过程中岩爆应力状态的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 2894—2900.
- XU Bo, XIE He-ping, TU Yang-ju. Numerical simulation of rockburst stress state during excavation of underground powerhouse of Pubugou hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp. 1): 2894—2900.
- [18] 赵永红, 黄杰藩, 王仁. 岩石微破裂发育的扫描电镜即时观测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(3): 284—294.
- ZHAO Yong-hong, HUANG Jie-fan, WANG Ren. Real-time observation of microfracturing process in rock during compression test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1992, 11(3): 284—294.
- [19] ZHANG Xiao-chun, WANG Jun-qiang. Research on the mechanism and prevention of rockburst at the Yinxin gold mine[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2007, 17(4): 541—545.
- [20] 江权, 冯夏庭, 陈建林, 等. 锦屏二级水电站厂址区域三维地应力场非线性反演[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3003—3010.
- JIANG Quan, FENG Xia-ting, CHEN Jian-lin, et al. Nonlinear inversion of 3D initial geostress field in Jinping II Hydropower Station region[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(11): 3003—3010.
- [21] 苏国韶, 冯夏庭, 江权, 等. 高地应力下地下工程稳定性分析与优化的局部能量释放率新指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2453—2460.
- SU Guo-shao, FENG Xia-ting, JIANG Quan, et al. Study on new index of local energy release rate for stability analysis and optimal design of underground rockmass engineering with high geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2453—2460.
- [22] SJOBERG J, CHRISTIANSON R, HUDSON J A. ISRM suggested methods for rock stress estimation-Part 2: Overcoring methods[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40: 999—1010.