

相似模拟试验声发射监测

汪文有，柔刚，许凤旌

（美国物理声学公司（PAC）北京代表处，北京 100029）

摘要：相似模拟试验声发射监测实现了实时在线监测结构体内部损伤萌生-发展-破裂的全过程。声发射方法可以通过多种参数和图形显示实时判断损伤开裂的起始时间。实时观看结构在外载荷作用下产生损伤的严重程度。声发射方法有效监测到损伤源随着载荷的增加，定位集中部位的发展变化趋势，有利于判断损伤从萌生、发展、开裂、直至最后贯通的全过程信息。结果表明，5Mpa 载荷作用下产生了贯通开裂后，声发射定位结果与实际开裂面吻合效果很好，同时声发射方法在 3Mpa 时监测到贯通裂纹前的裂纹萌生端部位位置。

关键词：声发射监测；相似模拟试验；损伤开裂；实时监测

引言

相似模拟试验用来模拟煤矿的真实地质条件下的应力载荷的动态分布状态，从几何尺寸以及应力分布模拟实际岩体巷道周边的应力重新分布状态，研究应力调整过程中岩体不同结构部位的内部损伤变化过程，产生的时间，发展趋势，通过相似模拟试验可以类比于现场的复杂工况下的煤岩损伤的变化过程。声发射是一种在线动态健康监测方法，具有实时、同步、在线监测煤岩内部损伤产生的应力波，通过多个传感器的空间布置，即可以监测到损伤发生的时间，同时可以在多维空间对煤岩内部损伤产生的位置进行定位，并可以实时显示损伤发展的变化趋势信息，有利于指导现场不同岩性岩层的支护方案设计。

1 模型制作

相似模拟试验使用“相似模拟试验试验台”水平双向侧板与底模板围成箱体后，分层浇注制作。模型箱体长 2000mm，宽 2600mm，深度 1000mm。模型分层浇注，一次浇筑层厚约 330mm，共三层，层间涂抹传声介质。

模型材料为水泥砂浆，河砂与水泥配比为 7:3，强度约 15Mpa。

2 模型试验

图 1 为相似模拟试验平台结构图。



图 1 相似模拟试验台

图 2 模型底部（下表面）铺设经纬网，网孔 $20\times 20\text{mm}$ ，进行锚杆支护，锚杆间排距 500mm，每排锚杆加装 W 钢带。



图 2 相似模拟试验底面全貌

3 模型试验过程声发射监测

利用声发射技术对试验过程模型内部损伤位置、损伤发展过程进行全程监测，一方面需要获得模型试验数据，另一方面探究声发射技术应用于物理模型试验的可能性，同时利用本次试验，基本确定物理模型声发射监测的音频范围与探头布置位置。具体内容如下：

- 1 根据模型尺寸，确定全面监测需要布置的探头数量；图 3 为模型上表面传感器布置位置。
- 2 巷道支护模拟试验台，顶部具有垂直方向施加主动载荷的 15 条油缸，水平双方向分别布置 6 条和 8 条油缸，两两对面布置，同侧油缸与一块模型侧板连接，控制试验过程顶部加载时模型水平方向的膨胀变形。
- 3 试验过程，水平四周侧板紧贴模型

侧立面，保持模型水平方向尺寸。

- 4 试验过程逐级加载，直至模型及支护材料发生破坏变形和失效，最终加载至 14Mpa。

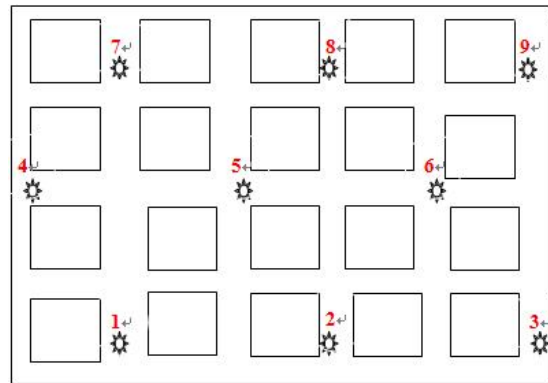


图 3 传感器布置分布图(俯视图)

4 数据分析概况：

针对每一个加载阶段，采用上表面平面定位，下表面平面定位，两组平面定位进行对比分析，同时采用三维定位，针对定位数据进行深度空间的分析。具体结果如下，不采取任何滤波处理，根据一定区域定位事件集中程度的严重度，分析损伤源所在的位置区域，以及不同载荷情况下，集中定位区域的变化状态。

图 4 为底面断裂线图，图 5、6、7 分别代表不同载荷下的声发射信号总图和细分特征图。

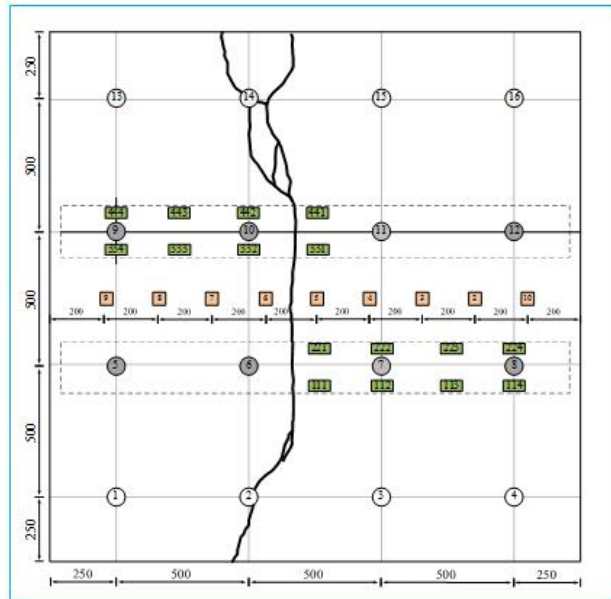


图 4 底面开裂曲线图

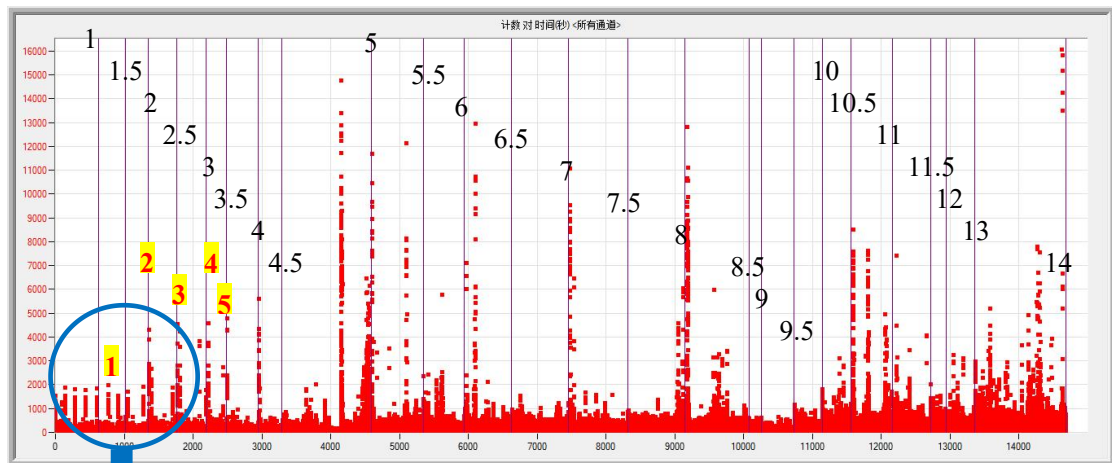


图 5 全过程计数-时间散点图(图中数字的单位是 Mpa)

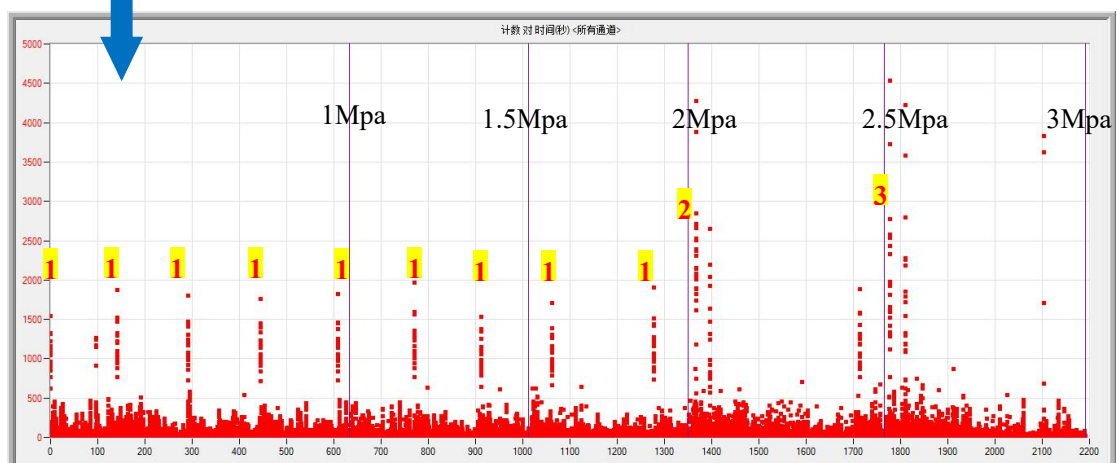


图 6 0-2200 秒数据展开图

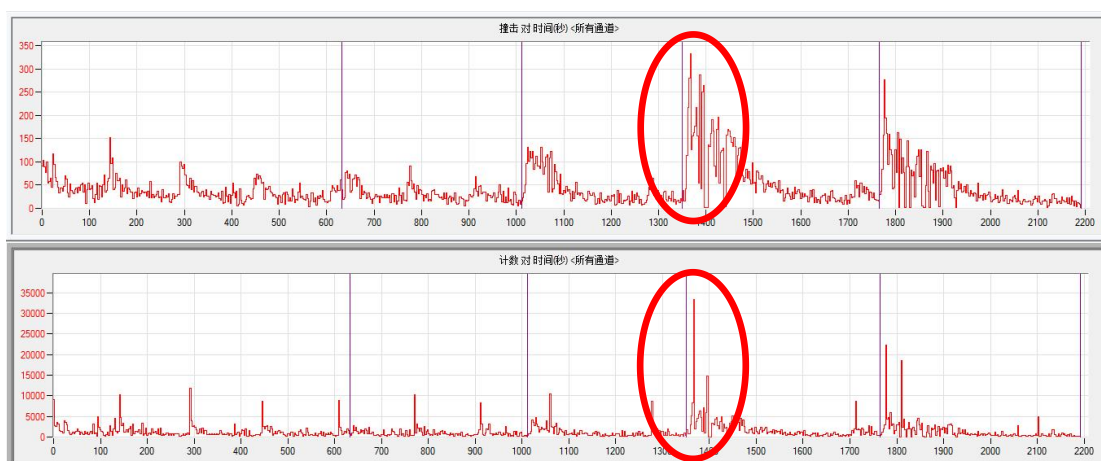


图 7 0-2200 秒撞击-计数展开图

表 1 图 5 和图 6 中 1、2、3、4、5 簇信号列
的接收通道顺序

3	15	15	12	12
12	18	18	15	15
2	9	12	18	13
11	17	17	14	18
15	14	13	9	4
6	13	10	10	10
1	12	3	13	17
14	10	6	3	1
10	8	11	11	6
5	11	14	6	3
9	2	9	17	14
13	4	2	2	9
18	1	8	8	11
8	6	5	1	2
17	7	1	5	8
4	16	4	4	5
7	3	7	16	16
16	5	16	7	7

由表 1 中看到图 5 和图 6 中标示黄色 1 时间点出现了近似周期性的信号簇特征，且每一簇的信号特征（声发射计数-能量）相差不大，而相似模拟材料非均质、各向异性的特点，在加载过程中不可能产生周期性规律的信号，初步判断黄色 1 标示的信号簇

来自于外界干扰，有可能来自于油缸的作动信息。

从 2Mpa 加载开始，不再出现周期性信号，而在每个加载瞬间出现大计数信号特征，初步判断从 2Mpa 开始出现典型的内部活动信号，这表征着信号损伤源的起始时间，具体位置信息参考如下记录。

5 各载荷条件下的数据分析：

5.1 1-1.5MPa：图 8 中在加载到 1Mpa 的时候，顶面东南角出现集中区域，底面东南角和南方中部出现定位集中区域，从三维定位图图 9 中看出，定位出现在三维体的东南顶端位置最为集中，表明初始加载过程表面压实，结构调整过程产生了大量的信号和集中地定位特征。

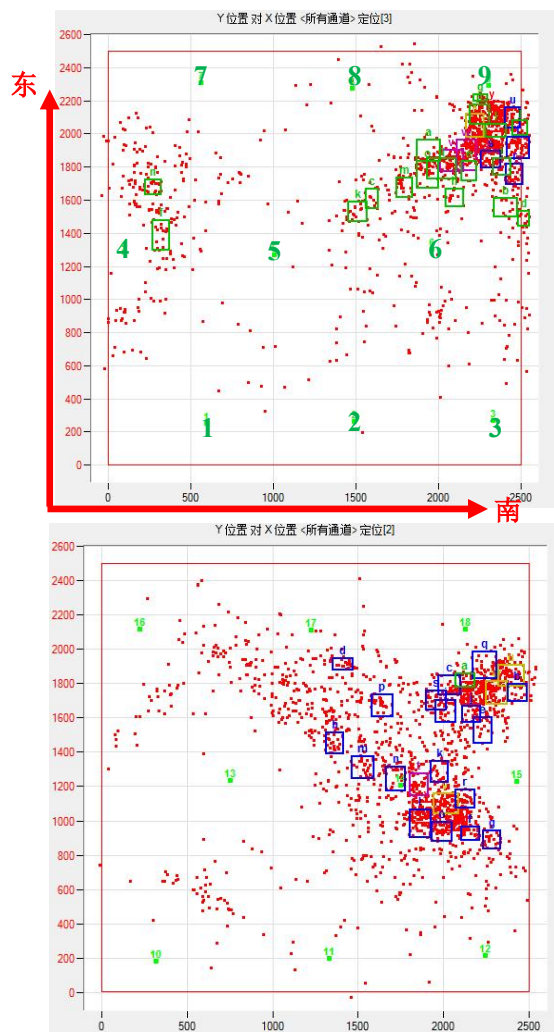


图 8 顶面 1-9 通道平面定位图/底面 10-16 通道平面定位图

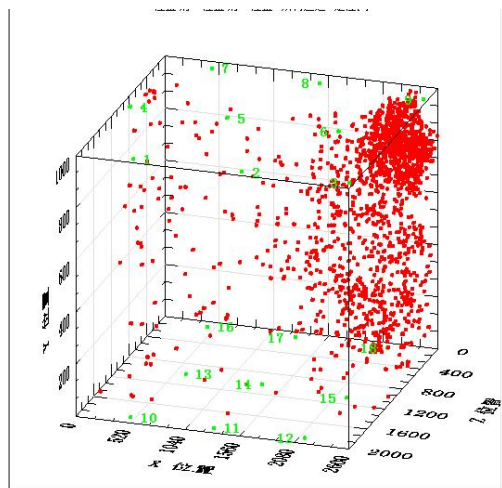


图 9 三维定位图

5.2 2Mpa: 模型内部应力块应力变化, 钢带应力继续变化, 螺杆负荷传感器变化。加载到 2Mpa 时, 图 10 显示顶

面东南角仍然有定位点, 同时东北部出现定位集中区域, 底面北端中部、西北部和南端中部出现定位集中区域, 新的定位区域的出现和原定位区域的改变, 表明内部损伤源在不同的区域萌生。图 11 中三维定位图南侧、北侧、中部均开始出现定位点。

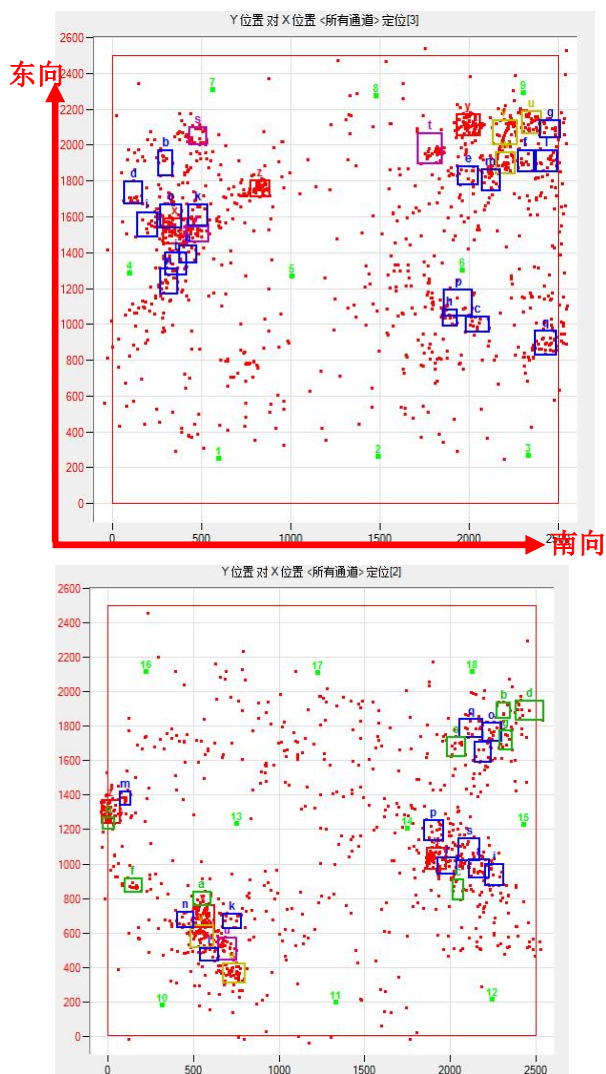


图 10 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面 10-16 通道平面定位图 (下)

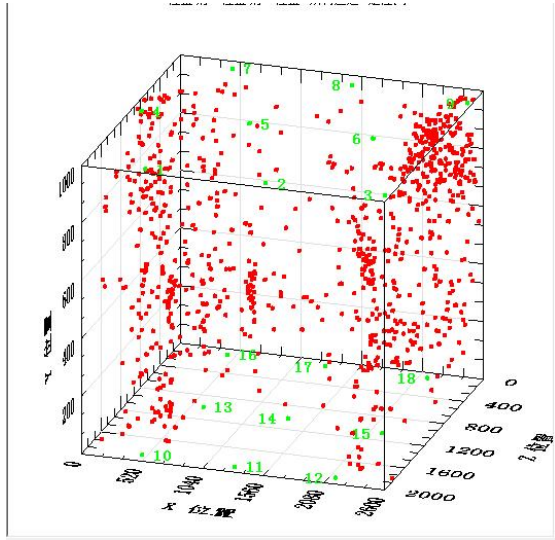


图 11 三维定位图

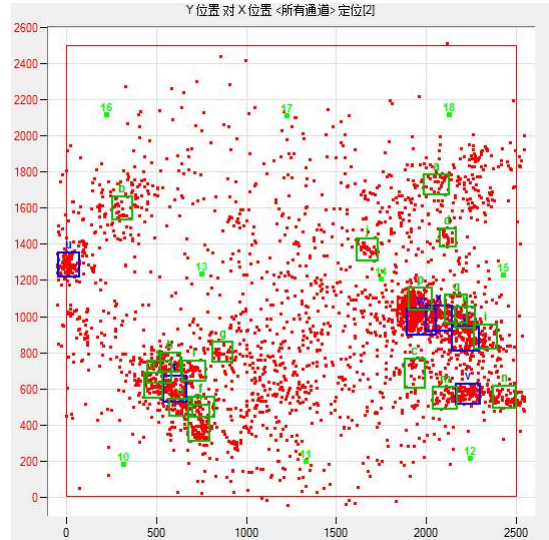


图 12 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面
10-16 通道平面定位图 (下)

5.3 2.5Mpa: 3#位移传感器发生变化, 跳动。图 12 显示顶面定位以东南部和东北部为主, 底面定位以西北部, 北端中部, 西南部大量出现集中区域, 三维定位的图形中表明, 加载开始由于加载头位于顶端, 因此顶端信号更加集中, 随着加载过程的持续, 应力的调整与重新分布, 图 13 三维体的中部, 下部开始出现集中定位点。

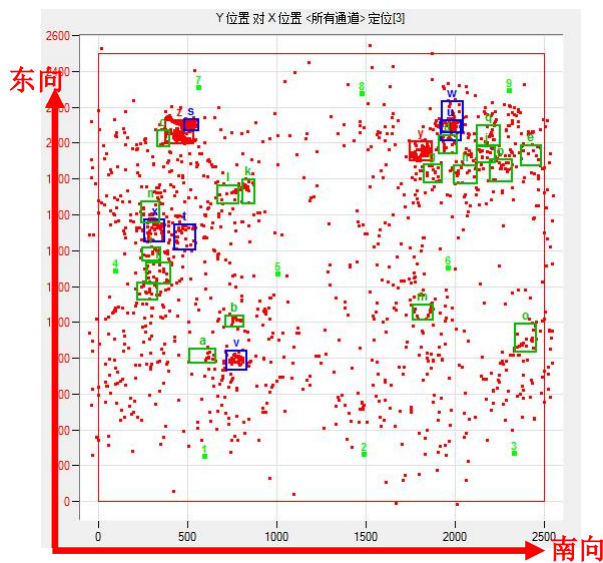


图 13 三维定位图

5.4 3-3.5Mpa: 4#、3#、2#位移传感器变化。图 14 显示顶面定位以东南部和东北部为主, 底面定位以西北部, 北端中部, 西南部大量出现集中区域, 定位图形中表明, 加载开始由于加载头位于顶端, 因此顶端信号更加集中, 随着加载过程的持续, 应力开始调整与重新分布。随着载荷的增加, 结构内部应力增大, 微破裂持续

发生，微破裂之间的贯通产生较强的声发射信号，直到外载荷的增加使得微破裂持续贯通产生大损伤，释放出较大的应力波，从而开始下一次的能量释放的累积过程，这个过程是间断的，没有具体规律，但与外加能量具有较大的相关性。

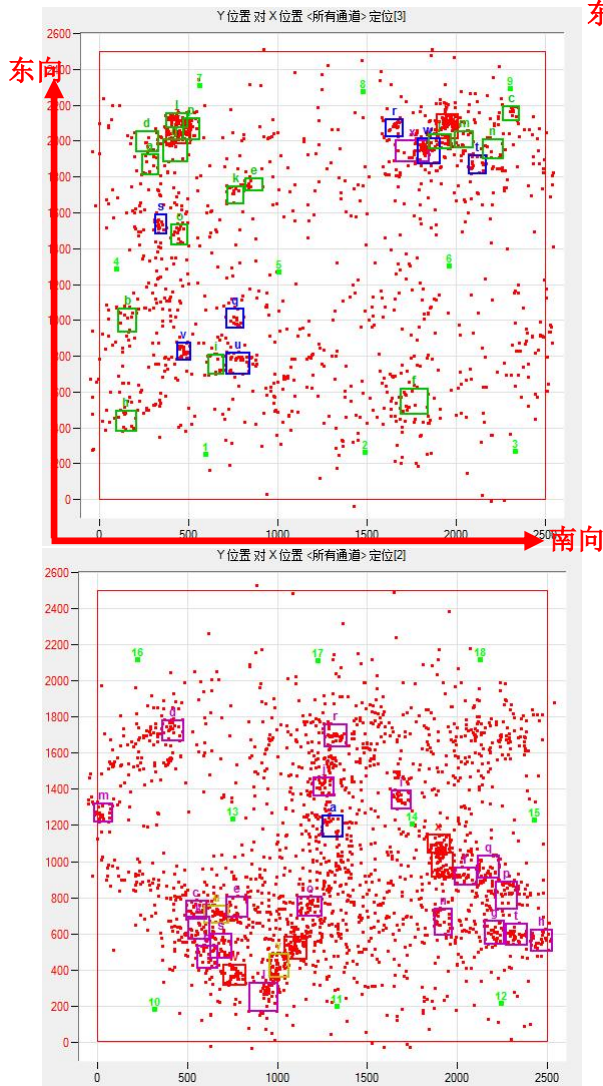


图 14 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面

10-16 通道平面定位图（下）

5.5 4Mpa：3#、4#位移跳动，2#稳定。
图 15 显示顶面定位以东南部和东北部为主，底面定位以西北部，北端中部，

西南部大量出现集中区域，定位图形中表明，加载开始由于加载头位于顶端，因此顶端信号更加集中，随着加载过程的持续，应力的调整与重新分布，结构体的中部，下部开始出现集中定位点。

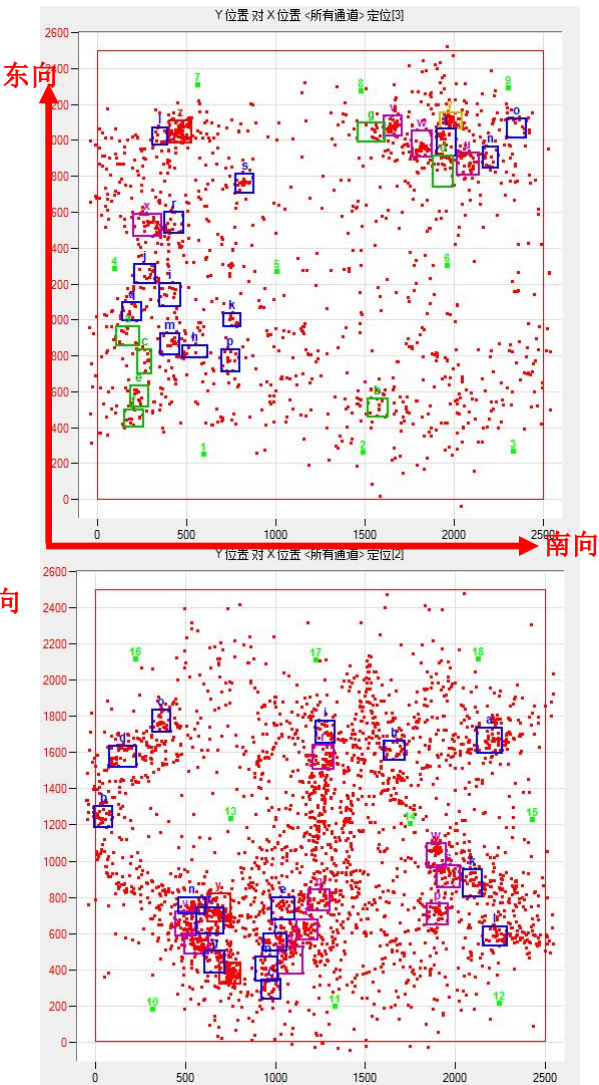


图 15 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面

10-16 通道平面定位图（下）

5.6 4.5Mpa：2#、3#、4#、6#位移跳动，在载荷的持续作用下，应力的调整以及微破裂的发生以及相互贯通，使得一些应力集中部位的能量得以释

放，也使得最大应力处的能量累积增加，并呈现集中释放区域，如图 16 所示，底面处于最大张应力作用下，出现了非常明显的集中地定位带。

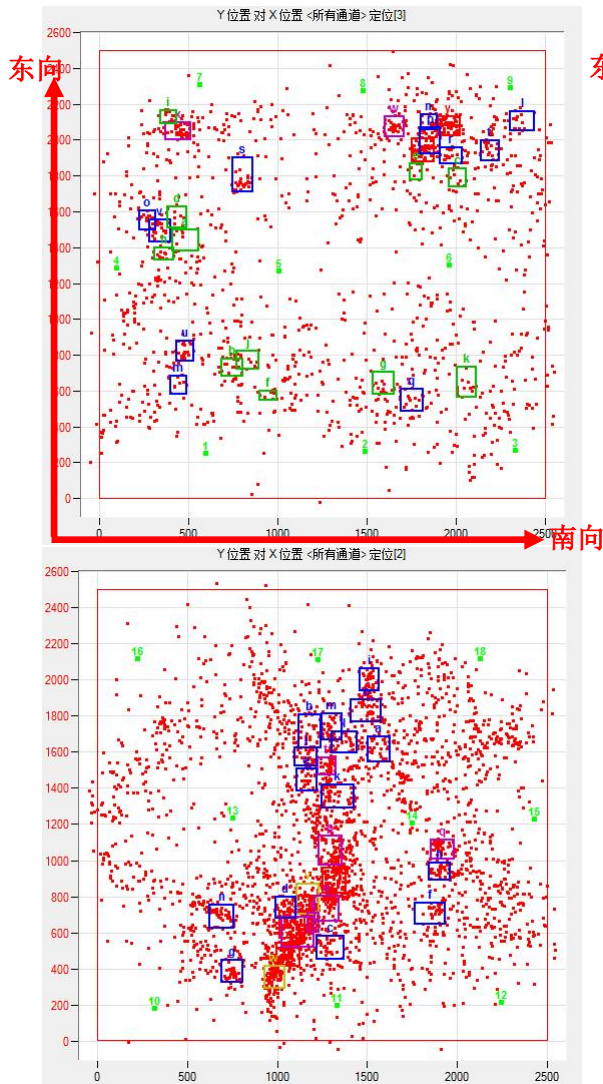


图 16 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面
10-16 通道平面定位图（下）

声发射定位的立体图像，Y-X 面投影图显示了接近于正中心的位置的定位集中面，Y-Z 投影图显示了定位集中面内存在的集中区域。

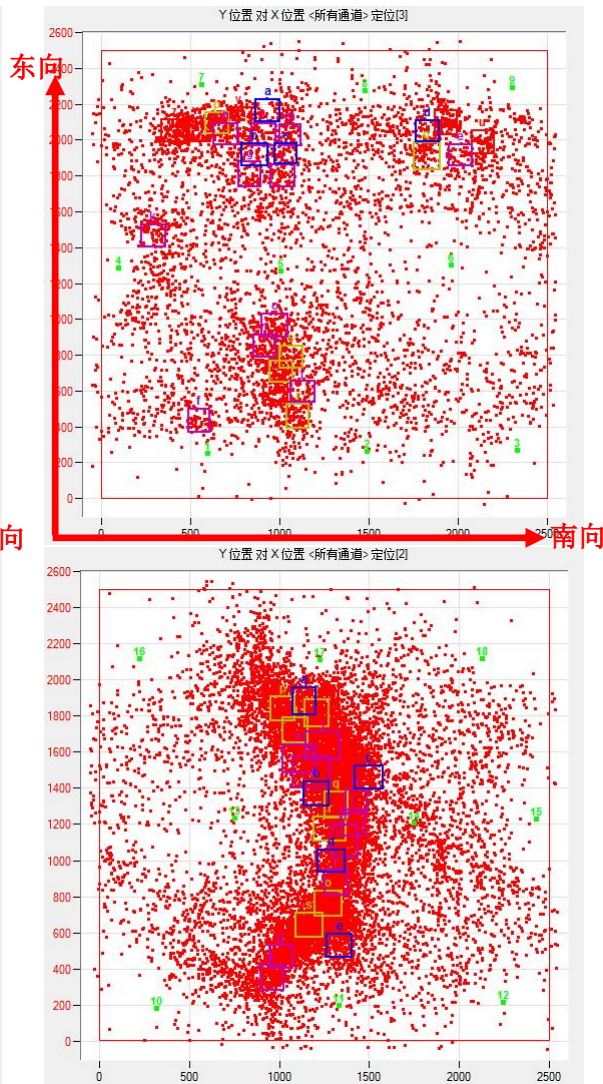


图 17 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面
10-16 通道平面定位图（下）

5.7 5Mpa：8#、3#位移传感器跳动，5#位移传感器位移 1.5mm，其余 0.5mm。图 17 显示顶板中部西至东通裂，至此试样贯通的定位结果，底面的平面定位集中一条曲线状，这与结构的实际开裂面完全符合，三维定位图显示了

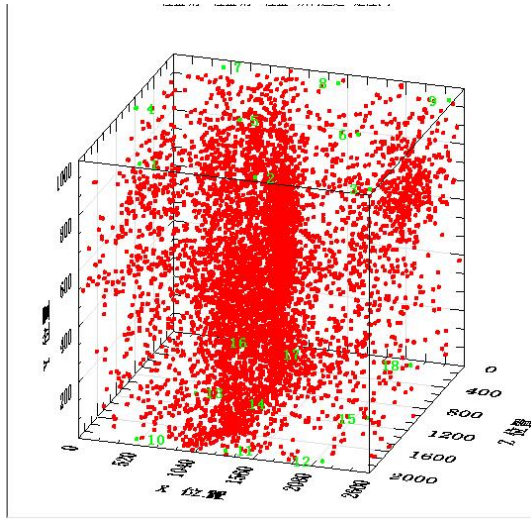


图 18 三维定位图

5.8 5.5Mpa: 加载后再开裂, Y 向加压 3Mpa, 3#位移传感器跳动。由于 5Mpa 加载过程的贯通开裂, 使得结构体内部的能量大量释放, 因此在 5.5Mpa 时定位点趋于减少, 持续加载的载荷会使得结构内部能量重新累积, 图 19 表明定位点主要集中在开裂后的应力集中端部。

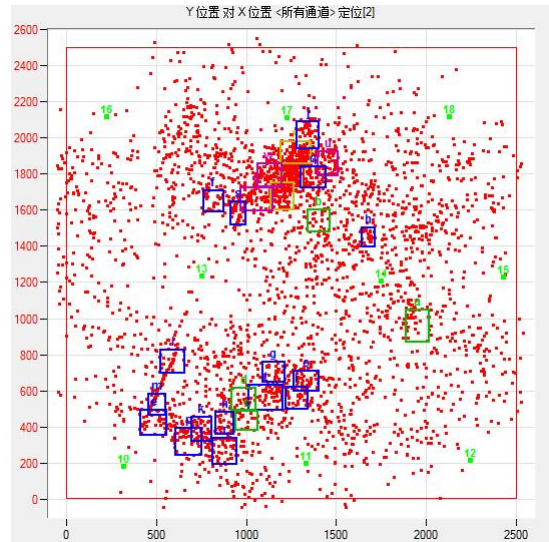
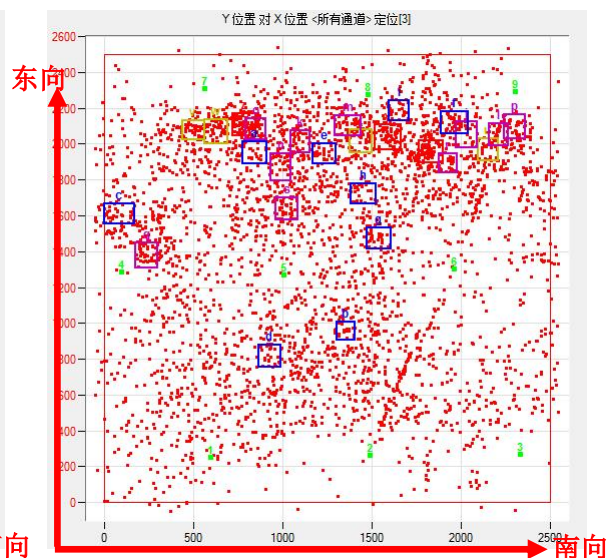
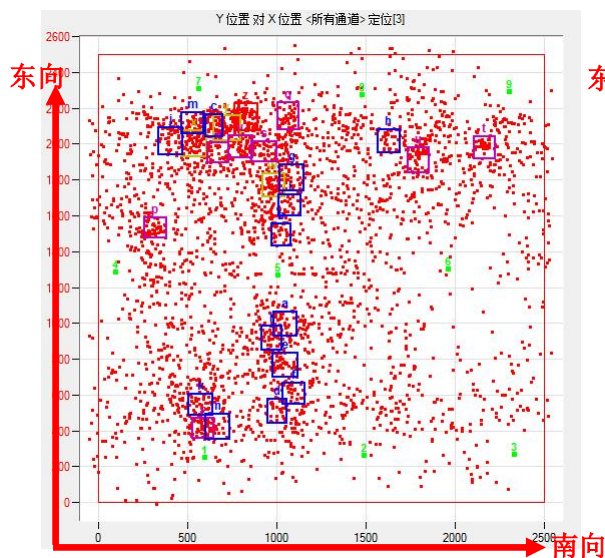


图 19 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面

10-16 通道平面定位图 (下)

5.9 6-7Mpa: 结构体出现裂缝宽, 顶面延展, 宽度西向 8mm-6mm, 西-东 5mm; 裂缝向深部扩展。结构体内部的能量大量释放后, 定位点趋于减少, 持续加载的载荷会使得结构内部能量重新累积, 图 20 表明定位点主要集中在开裂后的应力集中端部。



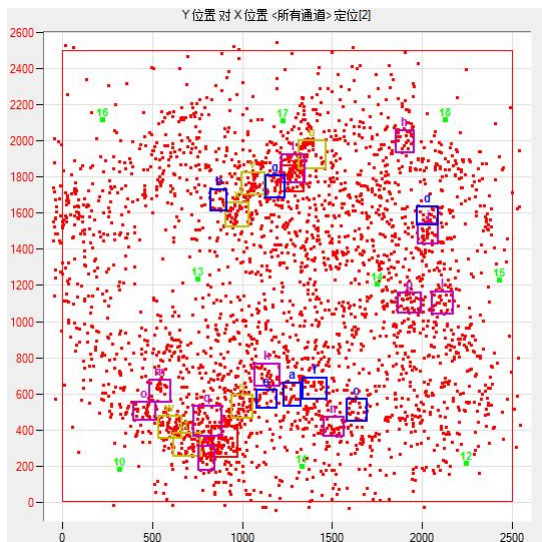


图 20 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面

10-16 通道平面定位图（下）

5. 10 8-8.5Mpa: 位移变化发生在西，西二排东分别为 8mm, 8mm6mm, 同位置为 12-14-7mm。持续加载的载荷会使得结构内部能量重新累积，图 21 表明定位点主要集中在开裂后的应力集中端部，底部的开裂面不断增大，主要承力部位不断上移，这使得顶面的定位不断集中，出现集中定位区域。

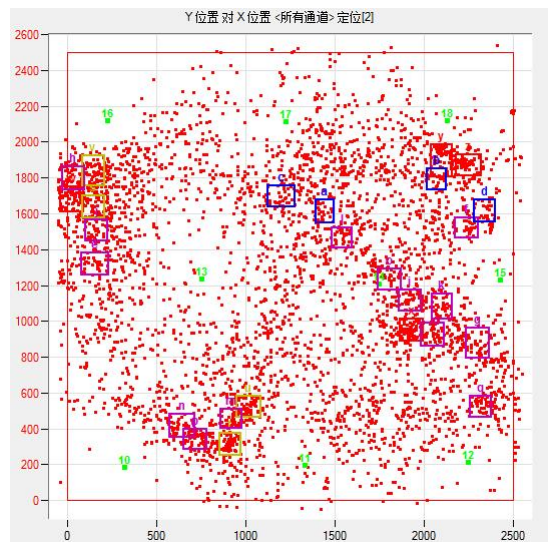
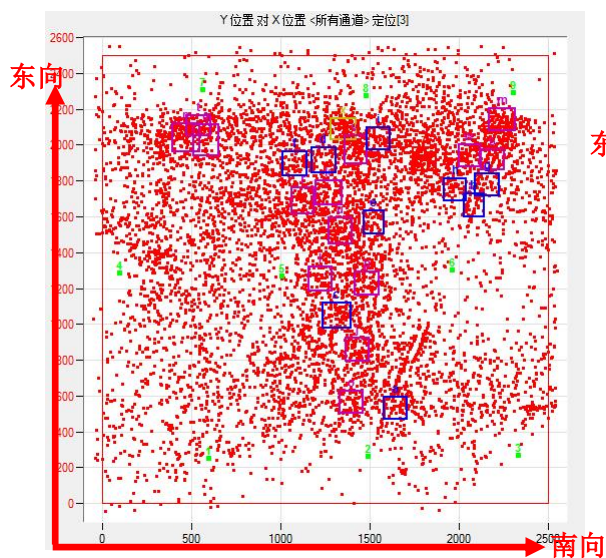
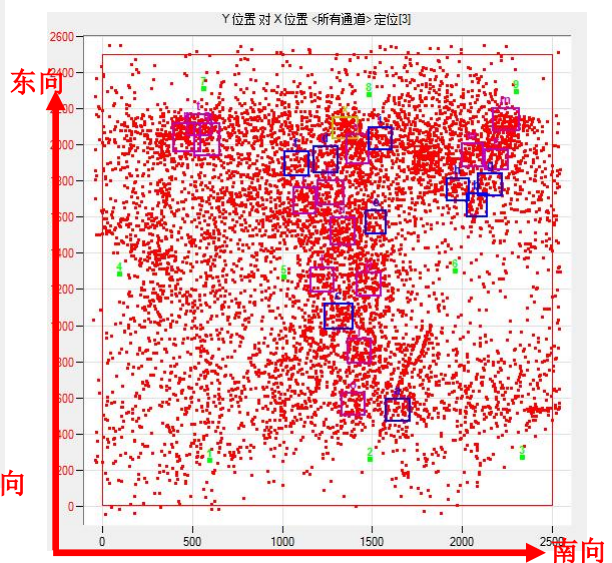


图 21 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面

10-16 通道平面定位图（下）

5. 11 9Mpa: 开裂延展，锚杆内力增加，西 2 排，中北，东工作中南锚杆载荷增加显著，开裂震动后垂直系统压力自升至 10.8MPa，东北角及两侧柱墩向内翘；持续加载的载荷会使得结构内部能量重新累积，图 22 表明定位点主要集中在开裂后的应力集中端部，底部的开裂面不断增大，主要承力部位不断上移，使得顶面的定位集中。



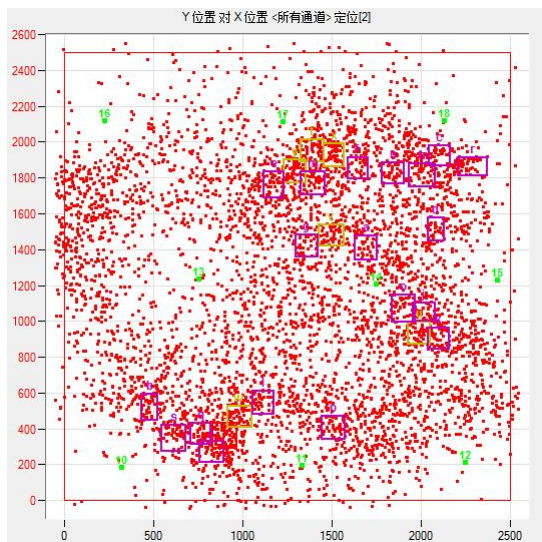


图 22 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面
10-16 通道平面定位图（下）

9. 5-10. 5Mpa: 无变化，能量的释放导致应力集中部位钝化改变、消失，开始进入到下一个能量累积-释放的过程，这个过程由于开裂面的相对活动，以及相对位移的变化，图 23 显示定位点的出现不具有很强的相关性。

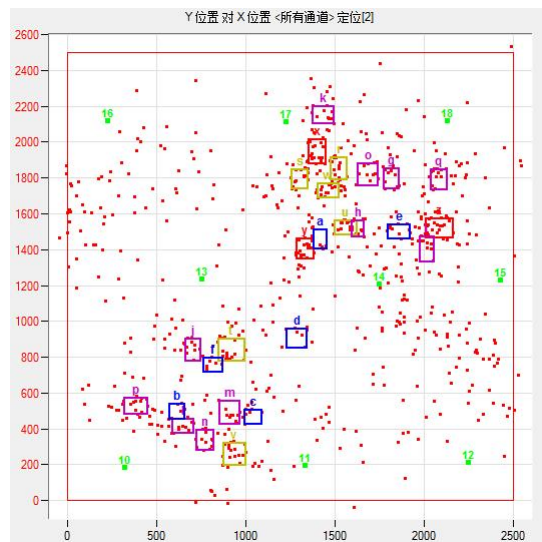
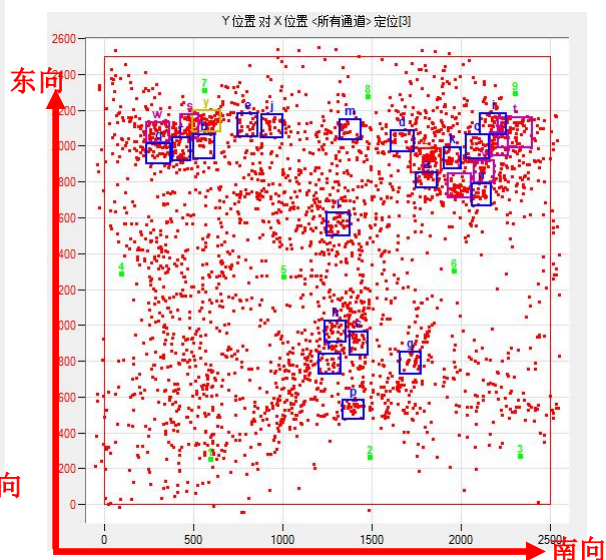
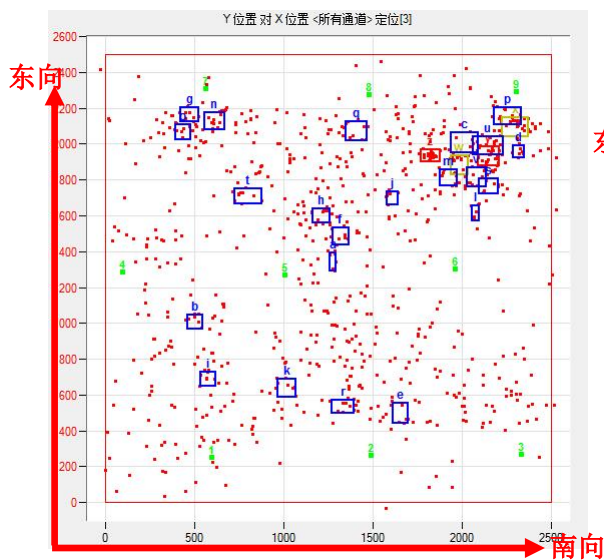


图 23 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面
10-16 通道平面定位图（下）

5. 12 11Mpa: 顶层有声音信号，其他仪器数据无变化，随着载荷的增加，破裂面以及结构体内部的能量累积达到一定极限，特别是载荷的作用使得结构体的形状、位移发生变化，图 24 表明这使得结构体的应力集中部位发生新的开裂。



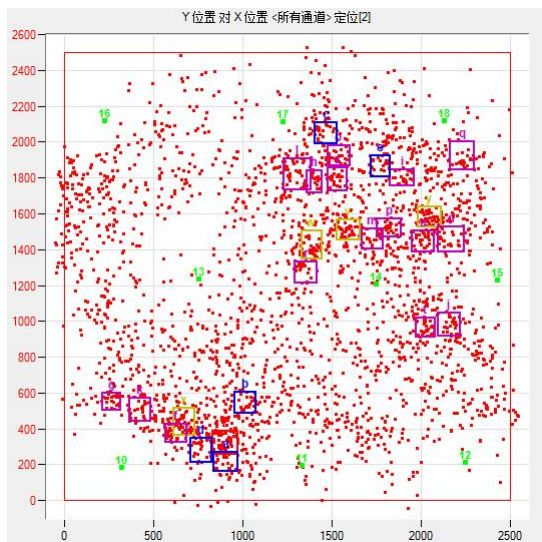


图 24 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面

10-16 通道平面定位图（下）

5.13 11.5-12Mpa: 发生开裂，垂直系统压力降至 10.6MPa，自动回升 11.5MPa，裂缝深度 1.8，进深 500mm，随着载荷的增加，破裂面以及结构体内部的能量累积达到一定极限，特别是载荷的作用使得结构体的形状、位移发生变化，吐 5 显示结构体的应力集中部位发生新的开裂。

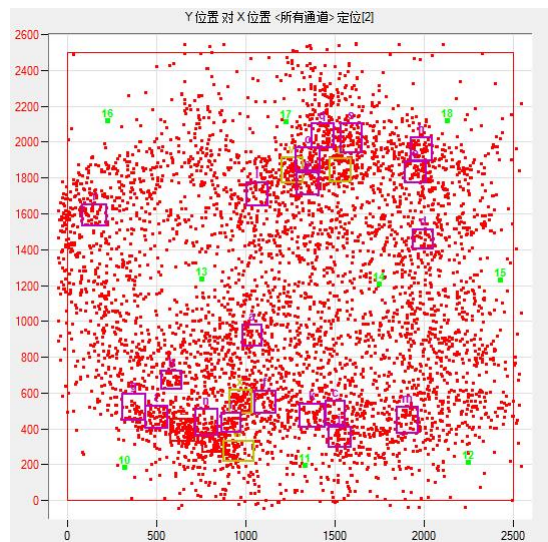
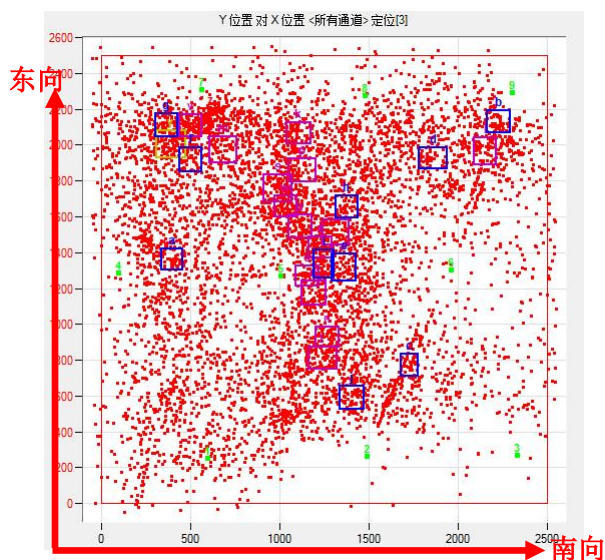


图 25 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面

10-16 通道平面定位图（下）

5.14 13-13.5Mpa: 无变化，有声音。随着载荷的增加，破裂面以及结构体内部的能量累积达到一定极限，特别是载荷的作用使得结构体的形状、位移发生变化，这使得结构体的应力集中部位发生新的开裂。

西，西二排，东分别为 8mm-8mm-6mm，同位置为 12-14-7mm。持续加载的载荷会使得结构内部能量重新累积，定位点主要集中在开裂后的应力集中端部，底部的开裂面不断增大，主要承力部位不断上移，这使得顶面的定位不断集中，出现集中定位区域。

开裂延展随着载荷的增加，破裂面以及结构体内部的能量累积达到一定极限，特别是载荷的作用使得结构体的形状、位移发生变化，图 26 显示构体的应力集中部位发生新的开裂。

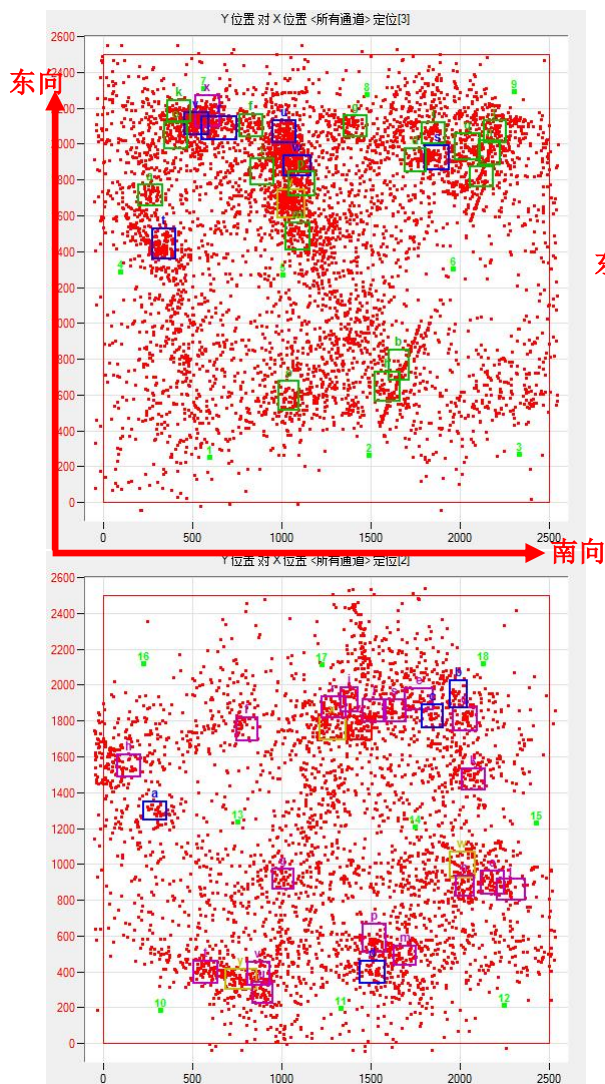


图 26 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面

10-16 通道平面定位图 (下)

5.15 14Mpa: 开裂延展, 底槽钢拉梁由东 2, 西 2, 西 1, 东 1 顺序有焊口拉断, 北侧底座内翘倾斜, 试验终止。随着载荷的增加, 破裂面以及结构体内部的能量累积达到一定极限, 特别

是载荷的作用使得结构体的形状、位移发生变化, 图 27 显示结构体的应力集中部位发生新的开裂。

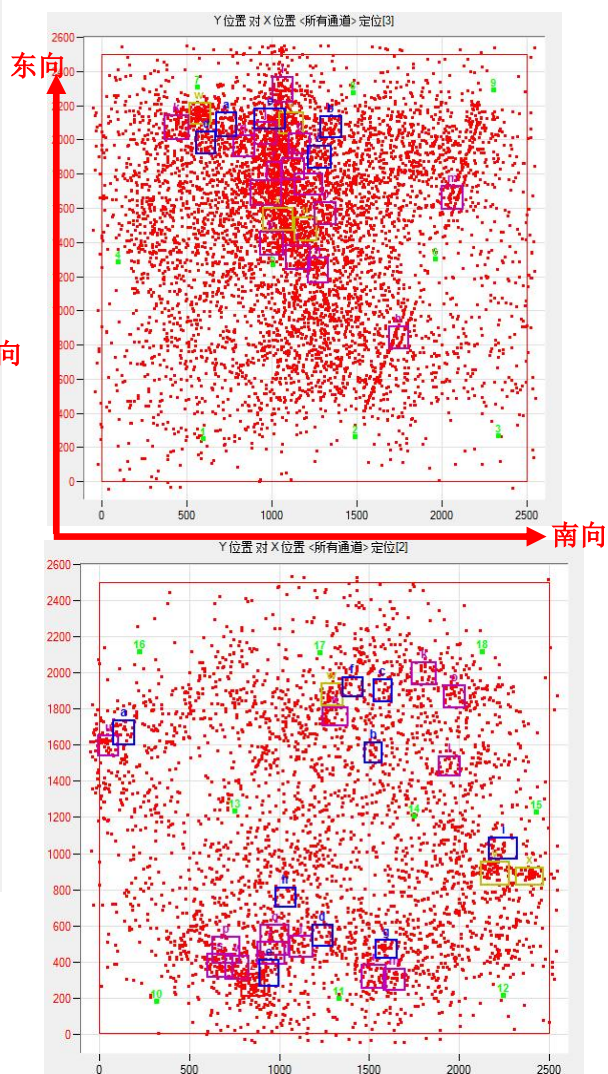


图 27 顶面 1-9 通道平面定位图(上)/底面

10-16 通道平面定位图 (下)

6 结论:

- 1、相似模拟试验声发射监测实现了实时在线监测结构体内部损伤萌生-发展-破裂的全过程。
- 2、声发射方法可以通过多种参数和图形显示实时判断损伤开裂的起始时间点。实时观看结构在外载荷作用下产生损伤的严重程度。
- 3、声发射方法有效监测到损伤产生的位置，损伤源随着载荷的增加，定位集中部位的发展变化趋势，有利于判断损伤从萌生、发展、开裂、直至最后贯通的全过程信息。
- 4、结果表明，5Mpa 载荷作用下产生了贯通开裂后，声发射定位结果与实际开裂面吻合效果很好，同时声发射方法在 2.5Mpa-3Mpa 之间即显现出贯通裂纹前的裂纹萌生端部位置，起到了预报作用，同时在肉眼无法观察和人耳无法听到的时候，声发射即可以实时告知损伤发生的时间和具体位置。
- 5、由上可知，声发射起到了预测预报损伤萌生、发展、贯通等变化过程，有利于根据信号的识别实时判断结构内部的微观、宏观变化过程，根据声发射信号的聚集程度和集中趋势，可以有效判断非均值材料结构的动态损伤严重程度。

7 改进与建议:

此次试验证实了声发射起到了监测损伤源发生的时间，损伤源发生的位置，以及结构体内部损伤源的实时动态发展变化趋势，但在高度方向由于结构面的多层布置，对结果会有一定影响，考虑下次试验过程在侧面部位加装传感器，有利于在高度方向进行实时定位判断。

根据此次试验结果，在声发射参数和传感器位置选择上进一步优化，在实时现场监测过程中做好现场实时记录，有利于后续结果的分析判断。

参考文献:

- [1] 耿荣生,吴克勤,景鹏,傅刚强. 全尺寸飞机机体疲劳试验时中央翼与外翼连接区域疲劳损伤的声发射监测.无损检测, 2008 年第 30 卷第 1 期:145-148
- [2]沈功田,戴光,刘时风.中国声发射检测技术进展学会成立 25 周年纪念.无损检测,2003,第 25 卷第 6 期:302-307
- [3]耿荣生, 等.飞机主梁疲劳李文萌生声发射信号的识别方法[J].航空学报, 1996, 17 (3): 368-372
- [4]沈功田, 耿荣生, 刘时风.声发射信号处理和分析技术[J].无损检测, 2002, 24 (1) 23-28
- [5]沈功田, 耿荣生, 刘时风.声发射信号的参数分析方法[J].无损检测, 2002, 24 (2) 72-77
- [6]沈功田, 耿荣生, 刘时风.声发射源定位技术[J].无损检测, 2002, 24 (3) 114-117
- [7]沈功田, 耿荣生, 刘时风.连续声发射信号的源定位技术[J].无损检测, 2002, 24 (4) 164-167
- [8]耿荣生, 沈功田, 刘时风.模态声发射基本理论[J].无损检测,2002,24(7): 302-306
- [9]李光海, 刘时风, 耿荣生, 等.声发射源特征识别的最新方法[J].无损检测, 2002, 24 (12): 534-538