

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201809041



# 火灾下钢-混凝土组合楼盖的 声发射监测及分析

张建春, 张大山, 董毓利, 王卫华, 卢鑫

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为研究火灾下钢-混凝土组合楼盖的损伤机理,利用声发射技术对组合楼盖不同位置处的声发射信号进行监测.通过声发射系统采集的振铃计数、幅值、能量和持续时间等基本参数,结合试验宏观现象,对声发射进行振铃计数分析、RA-AF 关联分析和  $b$  值-能量分析.研究表明:根据振铃计数信号,可判断构件的裂缝开展密集程度及内力变化,在降温阶段,次梁会对钢筋混凝土板产生剪切裂缝,使结构产生二次破坏;RA-AF 关联分析能准确地判断出组合楼盖的失效模式,可根据其失效模式进行相应的内力分析; $b$  值-能量分析可反映出试件破坏时的能量变化及试件的损伤程度,并推断出构件是否达到相应的破坏状态.

**关键词:** 组合楼盖; 声发射; 损伤监测; 火灾试验; RA-AF 分析;  $b$  值-能量分析

**中图分类号:** TU 375.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2019)02-0156-08

## Acoustic Emission Monitoring and Analysis of Steel-Concrete Composite Floor Under Fire

ZHANG Jianchun, ZHANG Dashan, DONG Yuli,  
WANG Weihua, LU Xin

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** To study the damage mechanism of steel-concrete composite floor under fire, an acoustic emission technology was used to monitor the acoustic emission signals at different positions of the composite floor. The basic parameters such as ringing count, amplitude, energy and duration collected by the acoustic emission system, combined with the experimental macroscopic phenomenon, ringing count analysis, RA-AF correlation analysis and  $b$  value-energy analysis were conducted for acoustic emission. The research shows that according to the ringing count signal, the cracks of the members and internal force changes can be judged; in the cooling stage, the secondary beams produces shear cracks on the reinforced concrete slabs, causing secondary damage to the structure; RA-AF correlation analysis can accurately determine the failure mode of the composite floor, and the corresponding internal force can be analyzed according to the failure mode; the  $b$  value-energy analysis can reflect the energy change of the specimen and the damage degree of the specimen, and infer whether the m-

**收稿日期:** 2018-09-22

**通信作者:** 张大山(1981-),男,副教授,博士,主要从事建筑结构极端条件下力学性能的研究. E-mail: zhangds@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51308233, 51778250); 福建省泉州市科技计划项目(2017T002); 华侨大学科研基金资助项目(2014KJTD05, ZQN-PY314); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(17011086007)

ember has reached the corresponding damage status.

**Keywords:** combination floor; acoustic emission; damage monitoring; fire test; RA-AF analysis;  $b$  value-energy analysis

由于声发射(AE)<sup>[1]</sup>信号随着力、温度等变化而变化,且声发射信号来自于材料或构件缺陷本身,因此,根据声发射信号可判断构件破坏的严重性<sup>[2]</sup>.通过对声发射基本参数的分析,可以对试验过程进行监测和对构件极限承载状态进行判定.根据声发射信号的特性,可以评价缺陷的危害程度、结构的完整性和残余变形程度.在钢结构和混凝土结构领域,国内外学者已对声发射技术进行了大量的试验和理论研究. Alireza<sup>[3]</sup>通过研究钢筋混凝土剪力墙,设计并验证自动损伤评估的监测系统,根据声发射和有效算法判定结构的安全性.张瑞等<sup>[4]</sup>阐述采用声发射监测混凝土中钢筋锈蚀的必要性和有效性,认为在锈蚀过程中,各声发射源的特征是混凝土中钢筋锈蚀定量评估的基础.葛若东等<sup>[5]</sup>对足尺钢筋混凝土简支梁进行声发射试验研究,根据声发射信号的特点和能量-平均频率关联图,分析简支梁破坏过程中的平均频率分布范围及变化特点.门进杰等<sup>[6]</sup>利用声发射技术对钢筋混凝土构件损伤进行定量检测,阐述基于矩张量理论的声发射检测技术原理,利用矩张量理论推导反演裂缝机制(裂缝位置、类型和走向)的定量表达式.张美琴等<sup>[7]</sup>通过对花岗岩进行锯切试验,将声发射均方值(AERMS)作为特征值,并对实验结果进行分析,结果表明,花岗石的抗压强度越高,AERMS值越大.李彬等<sup>[8]</sup>对Q345R型进行钢蠕变声发射监测实验,得出蠕变损伤过程的声发射活动与蠕变曲线相类似的阶段性特征.胡国华等<sup>[9]</sup>利用数理统计学,分析计数率数据变化规律,采用声发射计数率的离散系数对疲劳裂纹扩展过程进行识别,并得出Q345B型钢材声发射计数率的离散系数与应力强度因子幅值的关系. Ozawa等<sup>[10]</sup>在火灾发生时,研究声发射对高强度混凝土爆炸性剥落的机理,并分析内部温度和蒸气压的测量值与微裂纹产生的AE事件之间的关系,发现在AE事件中,爆炸性失效过程的状态可用 $b$ 值分析来研究破坏过程.文献[11-13]利用声发射技术对整体结构中钢筋混凝土双向板进行损伤监测,探讨受火过程中,板的声发射事件数、能量率和 $b$ 值的变化情况,并分析各个参数与板的裂缝开展、炉温及竖向位移的对应关系.综上所述,声发射技术在建筑结构中的应用大多局限于常温环境下,而对于火灾高温环境下的结构工作性能、失效模式预测等方面的应用较少.在建筑结构中,钢-混凝土组合楼盖不但自身有相对较高的承载力和弯曲刚度,对结构的整体性与侧向刚度也有较大贡献<sup>[14]</sup>.因此,本文基于声发射技术开展钢-混凝土组合楼盖火灾试验研究,将试验宏观现象与声发射信号相结合,进行声发射基本参数分析、RA-AF关联分析和 $b$ 值-能量分析,并对组合楼盖破坏过程中的相应规律与联系进行研究.

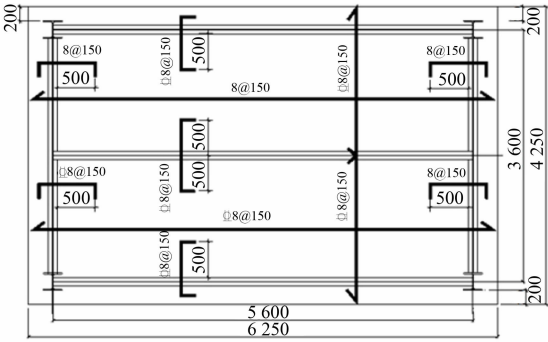
## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

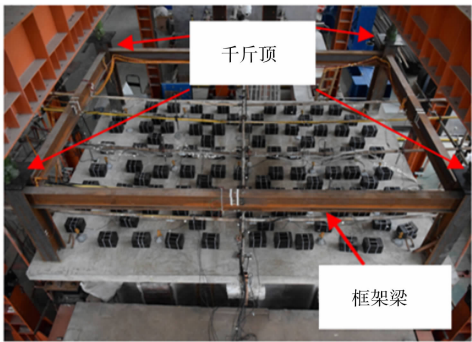
根据《混凝土结构设计规范》<sup>[15]</sup>《组合楼板设计与施工规范》<sup>[16]</sup>和实际使用到的楼板的轴线尺寸情况进行钢-混凝土组合楼盖设计.组合楼盖板底沿长向跨中处设置次梁(钢梁),与短向边梁焊接连接,钢柱之间设置框架梁进行约束,模拟出的整体结构实际受力状态,如图1所示.图1(a)中:构件轴线尺寸为5 600 mm×3 600 mm;板厚为150 mm;钢筋布置为双层双向;HRB400型热轧带肋钢筋直径为8 mm;间距为150 mm;组合楼盖的钢筋混凝土板采用C30商品混凝土;混凝土的保护层厚度为30 mm;试件钢柱型号为HW250 mm×250 mm×9 mm×14 mm;主梁和次梁型号为HN250 mm×125 mm×6 mm×9 mm.图1(b)中:混凝土立方体抗压强度 $f_{cu,m}$ 为42.51 MPa;混凝土含水率 $w$ 为1.94%;钢筋抗拉强度 $f_{st}$ 为595 MPa;钢筋伸长率 $\delta$ 为19.10%;钢筋弹性模量 $E_s$ 为0.205 TPa;钢筋屈服强度 $f_y$ 为430 MPa.

### 1.2 加载制度

依据建筑结构荷载规范<sup>[16]</sup>,对钢筋混凝土板施加2.0 kPa的均布荷载,放置质量为20 kg的铸铁加载块进行模拟.千斤顶位于柱角顶端,千斤顶加载为板角处固定约束荷载( $Z_0=300$  kN)(图1(b)).为模拟实际结构中钢-混凝土组合楼盖的受力性能,在各柱端使用千斤顶施加恒定荷载值,该荷载值由上部结构所传递的荷载设计值确定.文中只有次梁受火,且未做防火处理,边梁和钢柱未受火.



(a) 组合楼盖尺寸及配筋图(单位:mm)



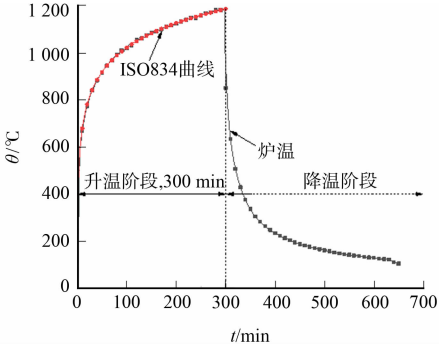
(b) 组合楼盖试验加载图

图 1 组合楼盖尺寸、配筋及加载图

Fig. 1 Combination floor size, reinforcement and loading diagram

1.3 升温曲线

炉温采用 ISO 834 国际标准升温曲线,其表达式为  $\theta_g - \theta_g(0) = 345 \lg(8t + 1)$ ,试验升温系统,如图 2 所示.图 2 中: $\theta$  为炉温; $t$  为时间;炉内四周均布置 S 型铠装热电偶,温度测量范围为  $0 \sim 1\,200\text{ }^\circ\text{C}$ .由图 2(a)可知:实际升温曲线与 ISO 834 标准升温曲线拟合良好.



(a) 炉温-时间曲线



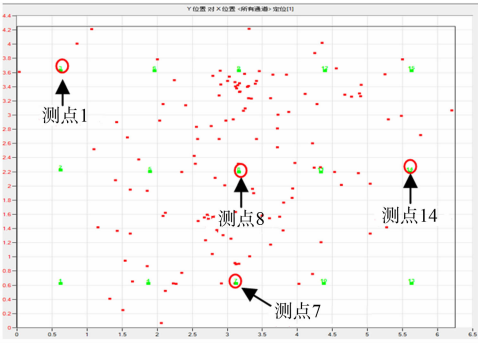
(b) 火灾试验炉

图 2 试验升温系统

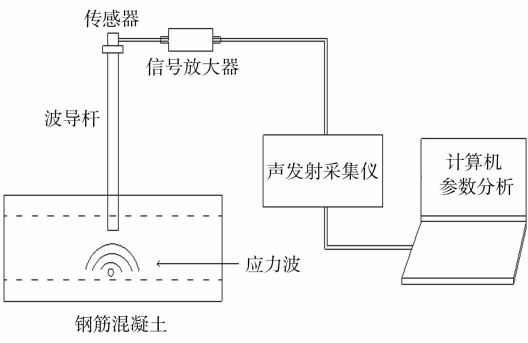
Fig. 2 Heating system of test

1.4 声发射仪器及传感器布置

声发射监测系统为 Micro-Ⅱ型多通道数字声发射系统,采集卡为 PCI-E 采集卡,声发射系统参数设置如下:传感器为 R6-A 谐振式;采样频率为  $20 \sim 100\text{ kHz}$ ;门槛为  $40\text{ dB}$ ;前置放大器为  $40\text{ dB}$ ;波形的采样率(MSPS)为 1;波形点数为 1 024;传感器个数为 15.在火灾的作用下,考虑到钢筋混凝土板的开裂、钢与混凝土间的相互作用等均会对声发射信号的产生、传播等造成影响,故板面布置 15 个声发射传感器,用来记录不同位置的声发射信号,声发射测点布置及工作原理,如图 3 所示.



(a) 声发射测点布置图



(b) 声发射工作原理

图 3 声发射测点布置及工作原理

Fig. 3 Acoustic emission measuring point arrangement and working principle

## 2 试验现象

组合楼盖破坏图,如图 4 所示. 由图 4(b)可知:升温试验过程中,在板角处出现的斜裂缝与板边约呈  $45^\circ$ ;随着试验的进行,挠度不断增大,材料性能逐渐降低,斜裂缝不断出现,间距约为 150 mm;同时,板角区域混凝土在短边和长边支承钢梁向外翘曲过程中,对板角区域混凝土产生拉裂破坏,形成明显的主裂缝,与板中区域椭圆形裂缝形成经典屈服线模式. 由图 4(c)可知:钢梁所受最高温度为  $1\,181\text{ }^\circ\text{C}$ ,受火时间为 300 min,钢梁表面形成炭黑色四氧化三铁,并出现剥落现象,在实际工程中,应对钢梁采取防火措施,提高组合楼盖的极限承载能力;钢梁跨中处残余的变形较小,未出现屈曲现象,仅在梁端受火边缘出现下翼缘屈曲.

钢梁与组合楼盖在整个试验阶段(升温段和降温段)出现轻微相对滑移现象,说明两者基本能够协同工作,共同提高组合楼盖的承载能力;同时,楼盖边梁(短向)随挠度的增加而出现扭转时,对钢梁产生受拉作用,减缓楼盖挠度下降,延长内力重分布时间,从而提高极限承载能力.

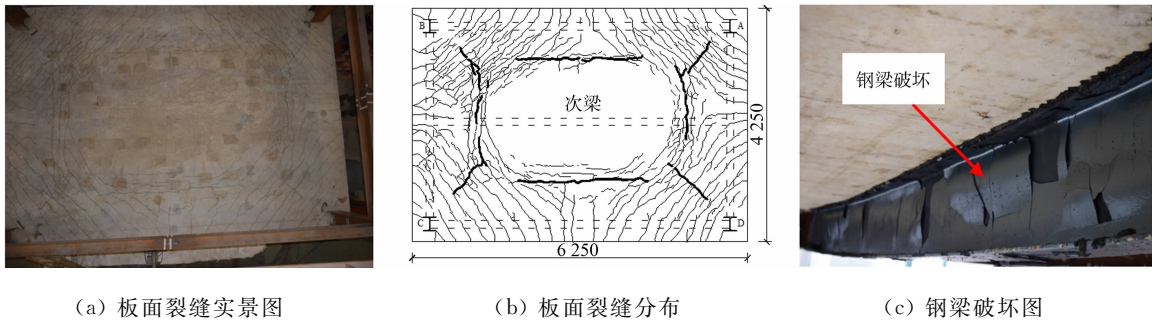


图 4 组合楼盖破坏图(单位:mm)

Fig. 4 Damage of combination floor damage map (unit: mm)

## 3 振铃计数分析

1) 钢-混凝土组合楼盖为复合材料构件,结构形式复杂,为各向异性介质. 声发射波形在组合结构内传播时,会发生能量减弱、模式转换等,加之在不同介质中,不同模式的波具有不同的传播速度,所以,在时差定位时,其准确性受到许多限制. 2) 钢筋混凝土板内裂缝开展多为突发型信号,持续时间较短,数据处理较繁琐. 综合以上两个原因,声源定位采用区域定位法<sup>[1]</sup>.

振铃计数( $n$ )表征参数分析法是描述和报告声发射数量的常用方法,可反映构件性能的变化. 根据试验现象及数据处理得知,组合楼盖在相同位置不同测点处,破坏现象基本相同. 故选取板角(测点 1)、长边跨中(测点 7)、跨中(测点 8)和短边跨中(测点 14)典型测点进行分析(图 3(a)),从而可全面分析组合楼盖的损伤机理,如图 5 所示.

测点 1 处,裂缝以斜裂缝为主,是板面的主要裂缝区. 由图 5(a)可知:试件升温初期,由于混凝土的热惰性,钢梁与混凝土板存在较大的温度梯度,加之此处负弯矩较大,7 min 时,振铃计数便达到峰值,此阶段裂缝开展最密集;125 min 后,振铃计数保持不变,Kaiser 效应较明显,说明此处无新的裂缝出现或已出现的裂缝停止扩展,截面内力处于平衡阶段.

由图 5(b)可知:振铃计数在试验过程中出现 3 个峰值点,分别为 A、B 和 C,且峰值依次减小;A 点时,计数值较高,说明在预加载阶段,此处裂缝正在形成;B 点处出现的峰值阶段对应于平面外位移增速减缓阶段,此时,板内钢筋受拉,板面混凝土开裂,形成塑性铰模式;由于边梁倾斜角度逐渐减小,带动 C 点处横向裂缝形成,使计数值继续升高.

由图 5(c)可知:试验过程中,板面跨中处无明显裂缝出现,板底出现密集网格状裂缝;与其他 3 处的测点不同,升温初期板面无明显裂缝,计数峰值较低(A 点);100 min 左右时,计数达到峰值(B 点),此时,板底钢梁和混凝土温度较高,材料性能迅速降低,同时,在正弯矩作用下,混凝土受拉破坏,形成密集微裂缝;停火后,炉内温度和板底次梁(钢梁)温度迅速降低,混凝土由于热惰性,温度继续上升;次梁在收缩时,板内栓钉对混凝土和钢筋产生剪切破坏,使振铃计数再次升高.



测点 14 位于组合楼盖短边跨中,此处为板面斜裂缝和横向裂缝交接处,受火阶段振铃计数-时间曲线与图 5(a)类似.由图 5(d)可知:计数峰值为测点 1 的 71.5%,这是由于在测点 14 处,板底裂缝几乎未出现,而测点 1 处在跨中钢梁和短边支承梁相互作用下,板底裂缝开展较为密集,与短边基本呈 90°分布,间距约为 150 mm.

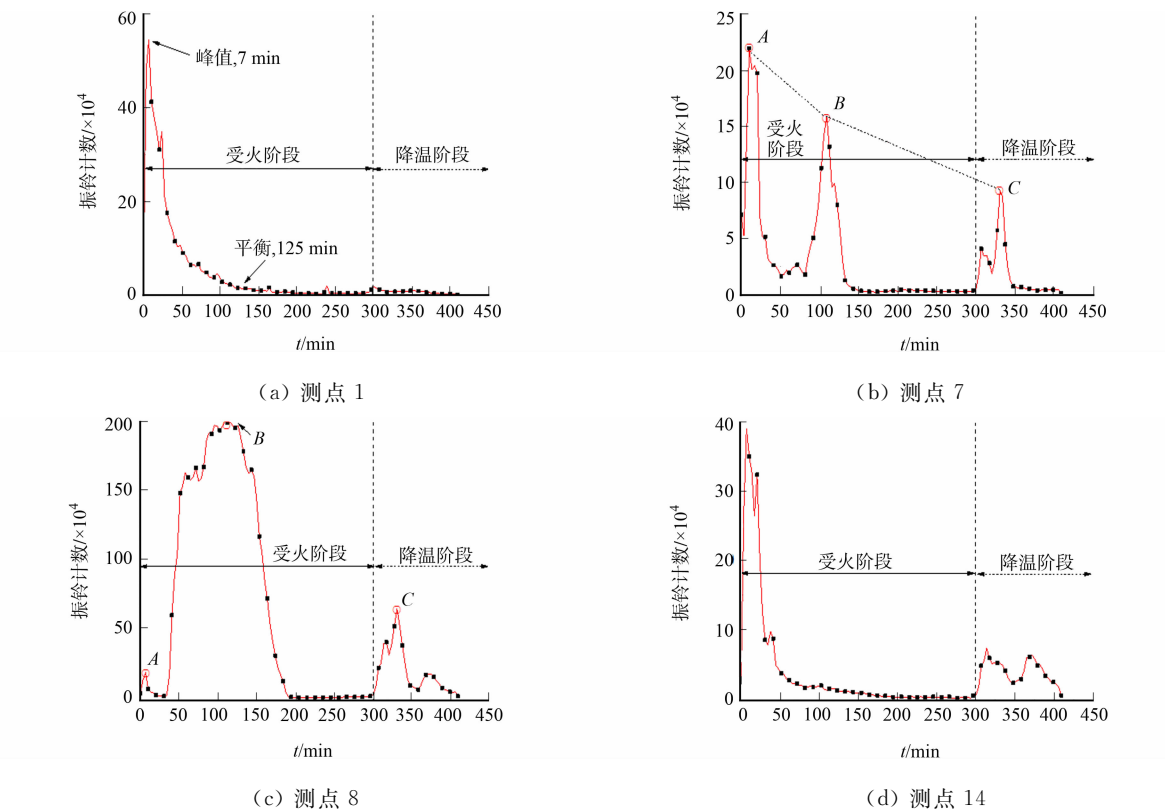


图 5 振铃计数-时间曲线图  
Fig. 5 Ringing count-time curve

综上所述,根据振铃计数的峰值变化和试验宏观现象,钢-混凝土组合楼盖在不同部位的内力变化差异较大;在跨中和长边跨中处,内力变化较丰富,温度效应较明显;在升温初期,内力在板角和短跨跨中处较大.

4 RA-AF 关联分析

声发射信号在钢-混凝土组合楼盖内传播时,受多种因素影响,很难通过一个声发射参数进行分析,因此,需要通过多个声发射参数或多个参数关联分析,以准确判定组合楼盖的破坏状态和损伤模式.

在混凝土的失效模式中,声发射参数 RA-AF 关联分析已得到广泛应用<sup>[17-19]</sup>.通过对参数 RA 与 AF 关联分析,可定性判断结构损伤失效模式.参数 AF 定义为声发射撞击振铃计数与持续时间的比值,参数 RA 定义为声发射事件上升时间与幅值的比值<sup>[20]</sup>,RA-AF 关联分析包括整个试验阶段(升温段和降温段).通过振铃计数分析,可以确定裂缝开展的密集程度,但不能确定结构损伤失效模式,如是否为剪切破坏还是张拉破坏,通过 RA-AF 关联分析可得出其失效模式.RA-AF 关联分析,如图 6 所示.

根据组合楼盖受力分析可知,测点 1 处的板面主要承受负弯矩,混凝土主要出现拉裂破坏.结合试验宏观现象,由图 6(a)可知:板面主要为张拉裂缝,此时,AF 值多集中在 0.020 0~0.032 5 kHz 之间,张拉裂缝出现时间早于剪切裂缝,后期出现零星剪切裂缝是因为降温段在次梁和边梁共同作用下,板面出现垂直于斜裂缝的剪切裂缝(图 4(b)).

由图 6(b)可知:前期主要承受张拉破坏,AF 值主要在 0.020 0~0.040 0 kHz 之间,后期主要承受剪切破坏,RA 值主要集中在 2~7  $\mu\text{s} \cdot \text{V}^{-1}$  之间;随着构件挠度逐渐增大,板角处的斜裂缝逐渐往板内扩展,纵向钢筋拉力逐渐增大,使混凝土产生剪切破坏,从而出现平行于次梁的横向裂缝.

由图 6(c)可知:张拉破坏和剪切破坏区分较为明显,RA 值集中在  $0 \sim 175 \mu\text{s} \cdot \text{V}^{-1}$  之间,说明此处受到的剪切力较大,升温初期,跨中挠度增长较快,在外荷载产生的正弯矩作用下,板底混凝土产生受拉破坏;随着试验的进行,跨中挠度进一步增大,次梁上剪力连接件(栓钉)对混凝土产生剪切破坏,RA 值进一步增大。

由图 6(d)可知:在张拉阶段,变化趋势较为集中,斜裂缝基本为贯穿斜裂缝,剪切区域声发射信号较弱,栓钉对混凝土的剪切破坏不明显。

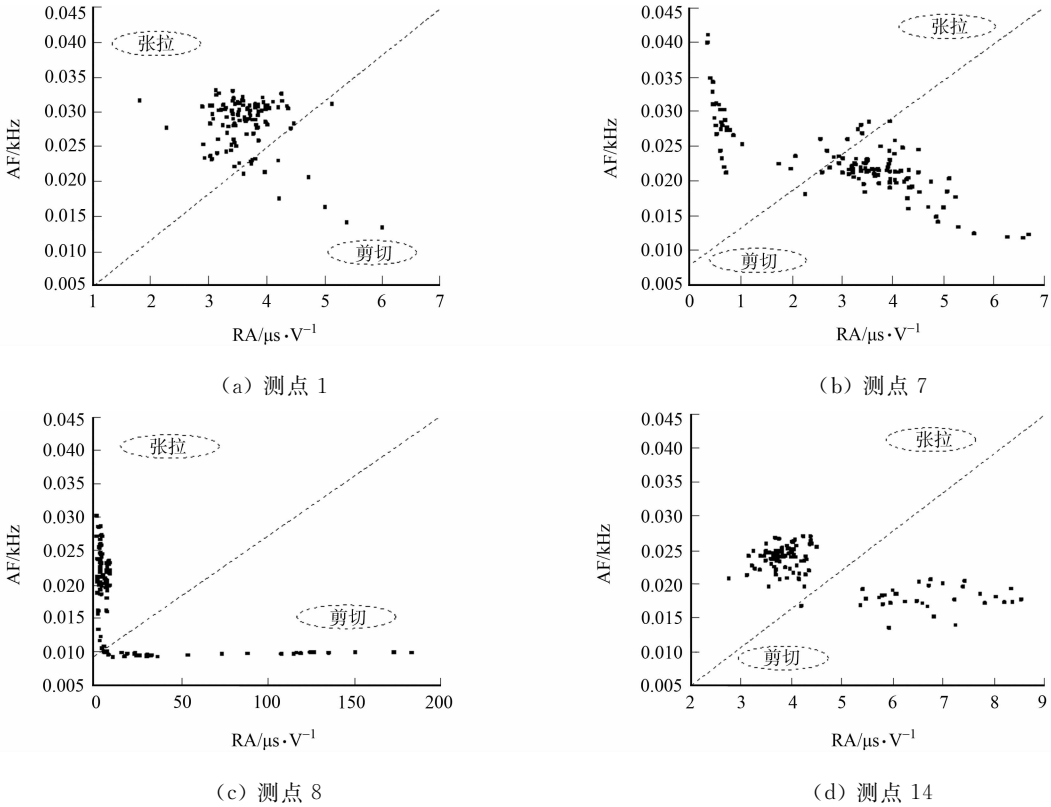


图 6 RA-AF 关联分析图

Fig. 6 RA-AF correlation analysis chart

通过 RA-AF 关联分析可知:不同位置处的钢筋混凝土板面,其失效模式不同,在板角和短跨跨中处,易发生张拉破坏;在长跨跨中处,易产生剪切破坏;在跨中处,易形成不利于试件承载的拉剪破坏。根据其失效模式可大致判定组合楼盖的内力变化,为后续理论分析提供数据支持。

5 b 值-能量分析

$b$  值最初是表征地震频度与震级关系的重要参数,在地震分析中起到重要作用。随着声发射技术的进步与推广,目前  $b$  值也广泛应用于火灾下建筑结构声发射信号的分析<sup>[21]</sup>。其事件数( $N$ )与幅值( $A$ )的关系式为

$$\lg N = a - b \cdot \lg A. \tag{1}$$

式(1)中: $a$  为常数; $b$  值为在火灾作用下,钢-混凝土组合楼盖混凝土板面裂缝的扩展程度。当板面裂缝开裂幅度较大时,幅度较大的信号成分比例较大,声发射  $b$  值较小;当板面裂缝开裂幅度较小时,幅度较小的信号成分比例较大,则声发射  $b$  值较大。

声发射能量分析可评价和衡量裂缝开裂和混凝土内部损伤的程度。结合  $b$  值分析和能量分析的各自优点,能够准确地判断试件破坏时的能量变化及开裂幅度,从而可进一步研究试件极限破坏状态。 $b$  值与能量随时间的变化,如图 7 所示。图 7 中: $E$  为能量。

由图 7(a)可知:在升温初期,测点 1 处  $b$  值迅速下降,主要裂缝出现时,释放较大的能量, $b$  值转折处为新裂缝出现或大裂缝开展;100 min 后, $b$  值逐渐增大,说明此处组合楼盖截面内力趋于平衡;偶尔

有新裂缝出现,但能量值较低;临近停火时,钢柱处出现贯通裂缝, $b$  值又迅速下降.

由图 7(b)可知:测点 7 与测点 1 处变化趋势基本相同,但测点 7 升温前期, $b$  值变化幅度较小,说明柱角处内力变化比边梁处复杂.

由图 7(c)可知:测点 8 在跨中处受次梁影响较大,升温初期,裂缝开展释放的能量大于测点 1 和 7 处的裂缝开展释放的能量.这是由于跨中处温度梯度最大,在附加弯矩和正弯矩共同作用下,使板底产生张拉裂缝.

由图 7(d)可知:测点 14 在升温初期, $b$  值变化较小,但能量较高,说明在次梁和边梁共同作用下,内力变化产生的能量值较大,应引起重视.

由图 7(a)~(d)还可知:在降温段,由于混凝土板荷载不变,截面平均温度继续升高,弹性模量继续下降,但仍有新裂缝出现;测点 1,7,14 处的  $b$  值变化相对较大,变化幅度为 74%~81%,产生的能量较小;测点 8 处的  $b$  值变化相对较小,为 15%,但产生的能量较大.说明次梁对火灾后组合楼盖的截面内力变化的影响较大,在降温段,往往会出现结构的破坏.

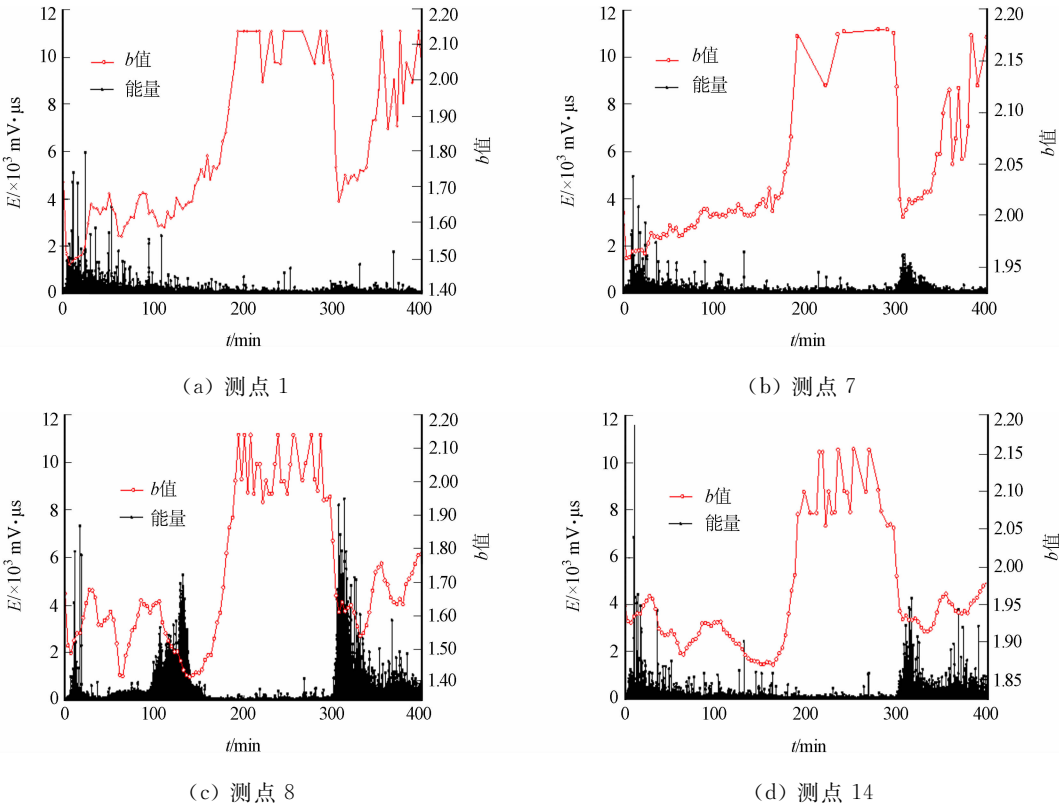


图 7  $b$  值-能量-时间曲线  
Fig. 7  $b$  value-energy-time curve

综上所述, $b$  值-能量分析能够准确地判定试件裂缝开展的能量变化,组合楼盖周边负弯矩区在升温初期损伤最严重;跨中处正弯矩区在降温段损伤最严重;板周边形成塑性绞线模式后,产生受拉薄膜效应.由于受拉薄膜效应有助于提高组合楼盖的极限承载能力,导致挠度下降减缓,以及板面新裂缝和裂缝开展较缓慢,从而使  $b$  值较平缓,能量值较低.

6 结论

利用声发射技术对火灾下钢-混凝土组合楼盖进行损伤监测,通过对声发射信号采集和分析,结合试验结果对火灾下组合楼盖的失效模式和破坏状态进行研究,得出以下 3 点主要结论.

- 1) 利用声发射技术可准确对火灾下钢-混凝土组合楼盖进行损伤监测,根据声发射参数中的振铃计数的变化趋势,判断构件的裂缝开展密集程度及内力变化,确定应力集中区域.
- 2) 由 RA-AF 关联分析可知,不同位置的钢筋混凝土板面,其失效模式不同,跨中处次梁对火灾后

组合楼盖的截面内力变化影响较大,产生的剪切破坏对构件的承载影响不利.在工程实践中,性能化的设计应考虑此影响.

3) 钢-混凝土组合楼盖在外部荷载影响下,通过 $b$ 值-能量分析能够反映出组合楼盖破坏时的局部能量变化,推断出构件是否达到相应的破坏状态,这对防止结构失稳、内部损伤等具有重要的借鉴意义.

## 参考文献:

- [1] 阳能军,姚春江,袁晓静,等.基于声发射的材料损伤检测技术[M].北京:北京航空航天大学出版社,2016.
- [2] 秦四清,李造鼎,张俤元,等.岩石声发射计数概论[M].成都:西南交通大学出版社,1993.
- [3] ALIREZA F. Acoustic emission monitoring of a reinforced concrete shear wall by  $b$ -value: Based outlier analysis[J]. Structural Health Monitoring, 2012, 12(1): 3-13. DOI: 10.1177/1475921712461162.
- [4] 张瑞,徐港,蒋赏,等.钢筋混凝土结构锈蚀状态的声发射监测[J]. 混凝土, 2017, 10(1): 34-39. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2017.01.010.
- [5] 葛若东,刘茂军,吕海波.钢筋混凝土梁破坏过程的声发射特征试验研究[J]. 广西大学学报, 2011, 36(1): 160-165. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2011.01.018.
- [6] 门进杰,赵茜,朱乐,等.基于矩张量的钢筋混凝土构件损伤声发射检测方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(5): 822-828. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2017.05.019.
- [7] 张美琴,高振,吴海融,等.花岗石锯切过程声发射信号特征的实验[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 615-619. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.2015.06.0615.
- [8] 李彬,张颖,温泽明,等. Q345R 钢蠕变过程声发射特性实验研究[J]. 实验力学, 2017, 32(2): 232-238. DOI: 10.7520/1001-4888-16-121.
- [9] 胡国华,丁真真,朱泉水,等.基于声发射的 Q345B 钢失稳断裂模式识别[J]. 无损检测, 2018, 40(2): 15-19. DOI: 10.11973/wsjc201802004.
- [10] OZAWA M, UCHIDA S, KAMADA T, *et al.* Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2012, 37(6): 621-628. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.070.
- [11] 杨志年.不同边界约束条件的混凝土双向板抗火性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [12] 朱崇绩.足尺钢筋混凝土双向板抗火性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [13] ZHU Chongji, DONG Yuli, XIE Qun. Real-time monitoring of the full-scale flate-plate floor subjected to fire by a-acoustic emission and energy rate analysis[J]. Transportation and Environment, 2016(31): 229-234. DOI: 10.2991/iccte-16.2016.38.
- [14] 潘立.混凝土梁板楼盖中次梁设计方法研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(10): 82-85. DOI: 10.19701/j.jzjg.2010.10.021.
- [15] 中冶建筑研究总院有限公司.组合楼板设计与施工规范: CECS 273—2010[S].北京:中国计划出版社,2010.
- [16] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [17] SOULIOTI D, BARKOULA N M, PAIPETIS A, *et al.* Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(12): 3532-3536. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.042.
- [18] AGGELIS D G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters[J]. Mechanics Research Communications, 2011, 38(3): 153-157. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2011.01.011.
- [19] SHAHIDAN S, PULIN R, BUNNORI N M, *et al.* Damage classification in reinforced concrete beam by acoustic emission signal analysis[J]. Construction and Building Materials, 2013, 45(13): 78-86. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.095.
- [20] 李冬生,杨凯舜,喻言.土木工程结构损伤声发射监测及评定:理论、方法与应用[M].北京:科学出版社,2017.
- [21] FARHIDZADEH A, DEGHAN-NIRI E, SALAMONE S, *et al.* Monitoring crack propagation in reinforced concrete shear walls by acoustic emission [J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(12): 1-10. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000781.