

火灾下组合楼盖的次梁布置与声发射损伤分析

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 目的 研究组合楼盖中不同次梁布置方式对声发射损伤程度的影响, 确定组合楼盖破坏过程中声发射变化规律与联系, 推断组合楼盖的内部损伤程度和极限承载状态. 方法 对2块钢-混凝土组合楼盖CS1、CS2进行了足尺试验, 并对试验参数、声发射布置和试验现象进行了描述. 通过声发射特征参数撞击、累计计数、事件率和 b 值-能量, 结合试验现象对组合楼盖不同次梁布置方式的声发射特性进行分析. 结果 CS1和CS2板面出现多条 45° 斜裂缝, 并形成经典屈服线模型, CS1和CS2的残余变形程度约为停火时的46%和33%;升温时CS2中的撞击峰值信号和信号活跃性明显小于CS1, CS2对组合楼盖的承载更为有利;火灾试验不同阶段, 累计计数呈现出不同的变化趋势, 次梁和混凝土板膨胀率不同对声发射信号影响较大; 结论 声发射撞击信号可反映出组合楼盖的内力变化过程, 但不能以撞击数量来判定组合楼盖达到破坏的不利位置与损伤严重程度; 不同次梁布置方式对组合楼盖的内部损伤有较大影响, CS1次梁布置方式对组合楼盖的承载性能较为不利; b 值与能量变化均具有一定的规律性, 能够真实地反映和判断出裂缝开展及混凝土板内部损伤的程度.

关键词 火灾试验; 组合楼盖; 次梁; 声发射; 损伤分析

中图分类号 TU375.2 文献标志码 A

Secondary Beam Arrangement and Acoustic Emission Damage Analysis of Composite Floors under Fire

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

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

Abstract: The influence of different secondary beam arrangement modes on the acoustic emission damage degree of composite floor is studied to determine the variation rules and relations of acoustic emission during the destruction process of composite floor, and to deduce the internal damage degree and ultimate bearing state of composite floor. The full-scale test of two steel-concrete composite floor covers (CS1, CS2) was carried out, and the test parameters, acoustic emission arrangement and test phenomena were described. The acoustic emission characteristics of different second-

收稿日期: 2019-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778250); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51308233); 福建省自然科学基金项目(2019J01051); 泉州科技计划项目(2017T002)

作者简介: 张建春(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事组合结构抗火方面研究.

ary beam arrangements of composite floor was analyzed by the acoustic emission characteristic parameters, cumulative count, event rate and b value-Energy, combined with experimental phenomena. There are several 45° oblique cracks on the CS1 and CS2 plates, and the classic yield line model is formed. The residual deformation degree of CS1 and CS2 is about 46% and 33% at the time of the ceasefire; the impact peak signal and signal activity in CS2 during temperature rise was significantly smaller than CS1, CS2 is more favorable for the bearing of the combined floor; the cumulative count shows different trends in different stages of the fire test, and the difference between the expansion rate of the secondary beam and the concrete slab has a greater impact on the acoustic emission signal. The acoustic emission impact signal can reflect the internal force change process of the combined floor, but the number of impacts cannot be used to determine the unfavorable position and damage severity of the combined floor damage; the different secondary beam arrangement has greater influence on the internal damage of the composite floor, the secondary beam arrangement of CS1 is unfavorable to the bearing performance of the combined floor; b value and energy change have certain regularity, which can truly reflect and judge the extent of crack development and internal damage of concrete slab.

Key words: fire test; composite floor; secondary beam; acoustic emission; damage analysis

在外部条件应力、温度等作用下,材料或构件的局部缺陷部位因应力集中变形或开裂,以弹性波形式释放出应变能的现象,称为声发射(AE)^[1]. 土木工程结构往往构造复杂,荷载效应具有时变特征,损伤随机性强,结构失效前兆不明显,声发射监测技术可有效监测到相应的失效特征^[2]. 常温方面,Josef Kaiser^[3]根据金属在变形过程中的声发射现象,提出了声发射的不可逆效应,即Kaiser效应. 吴超等^[4]利用分形理论对预应力钢筋混凝土梁弯曲破坏过程声发射信号特征参数序列的关联维数演化特征进行了分析,正确地预测预应力钢筋混凝土梁结构临近极限承载力水平,对预应力钢筋混凝土简支梁结构健康监测和无损检测有重大帮助. 门进杰等^[5]基于矩张量理论的声发射检测技术原理,推导了利用矩张量理论反演裂缝机制的定量表达式,基于矩张量的声发射无损检测技术能定量地描述结构的裂缝机制,具有较好的准确性. 岳健广等^[6]利用水平低周反复加载试验与声发射监测技术,开展了受弯钢筋混凝土柱的宏/微观地震损伤演化试验研究,根据Park-Ang损伤模型,统计并分析了RC柱的概率损伤性能水准,得到了声发射

评估模型的表达式. 高温方面,吕锦飞等^[7]基于声发射参数表征热-力耦合作用下的混凝土的损伤程度,同时考虑初始损伤和临界损伤的影响,建立了较为吻合的损伤本构模型,很好地反映了各类纤维混凝土在热-力耦合作用下的损伤演化过程. 郭庆华等^[8]研究了火灾高温后混凝土立方体抗压强度,发现高温处理对混凝土声发射现象存在较大影响,高温后的混凝土较常温混凝土声发射信号较弱. I. S. Colombo等^[9]根据对混凝土桥梁的监测,提出一种 b 值分析方法来处理在局部监测过程中获得的声发射数据. 该方法与混凝土断裂过程的发展规律吻合较好,通过对整个加载周期和各通道的 b 值计算,得出了一些定量结论. Geng Jishi等^[10]利用声发射技术研究了温度(25~800℃)对混凝土的力学性能的影响. 试验结果表明,当温度低于400℃时,混凝土的抗压强度不明显,但随着温度的升高而降低,当温度达到800℃时,混凝土的抗压强度为室温时的20%. 整个加载过程中声发射活动、累积计数和声发射能量急剧增加到临界点C,直至试样完全破坏. 刘新星等^[11]对足尺钢筋混凝土双向板的火灾行为进行连续监测,得到双向板在火灾下

破坏过程中各个声发射参数的变化情况,并对声发射定位技术在混凝土中的应用进行了讨论,结果表明利用声发射对建筑结构在火灾下的监测是可行有效的. O. Mitsuo 等^[12]基于声发射对火灾下高强度混凝土爆裂的机理进行了研究,分析了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 AE 事件中爆裂失效过程的状态可用 b 值分析来研究破坏过程. 文献[13-15]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研究,考察了受火过程中板的声发射事件数、能量率和 b 值的变化,分析了各个参数与板的裂缝开展、炉温及竖向位移的对应关系. 鉴于对火灾下组合楼盖损伤过程中声发射产生机理的研究较少. 笔者根据试验宏观现象及声发射信号进行声发射特征参数分析、 b 值-能量分析,研究组合楼盖破坏过程中声发射变化规律与联系,推断组合楼盖的内部损伤程度和极限承载状态,为声发射技术在火灾建筑结构试验中的应用及理论分析提供数据支持.

1 试验

1.1 试件设计及加载

组合楼盖中钢筋混凝土板长宽高为 5 600 mm × 3 600 mm × 150 mm, 钢筋为双层双向布置, 直径为 8 mm 的 HRB400 热轧带肋钢筋, 间距为 150 mm, 混凝土为 C30 商品混凝土, 保护层厚度为 30 mm. 钢柱型号为 HW250 mm × 250 mm × 9 mm × 14 mm, 钢梁型号为 HN250 mm × 125 mm × 6 mm × 9 mm. 组合楼盖配筋及加载如图 1 所示. CS1 和 CS2 为钢-混凝土组合楼盖, 组合楼盖按照《建筑结构荷载规范》(GB50009—2012) 施加 2 kPa 的均布荷载, 角柱顶端安装千斤顶, 为板角处固定约束荷载 $Z_b = 300$ kN, 钢柱之间设置框架梁进行约束, 模拟整体结构中实际受力状态(见图 1(c)).

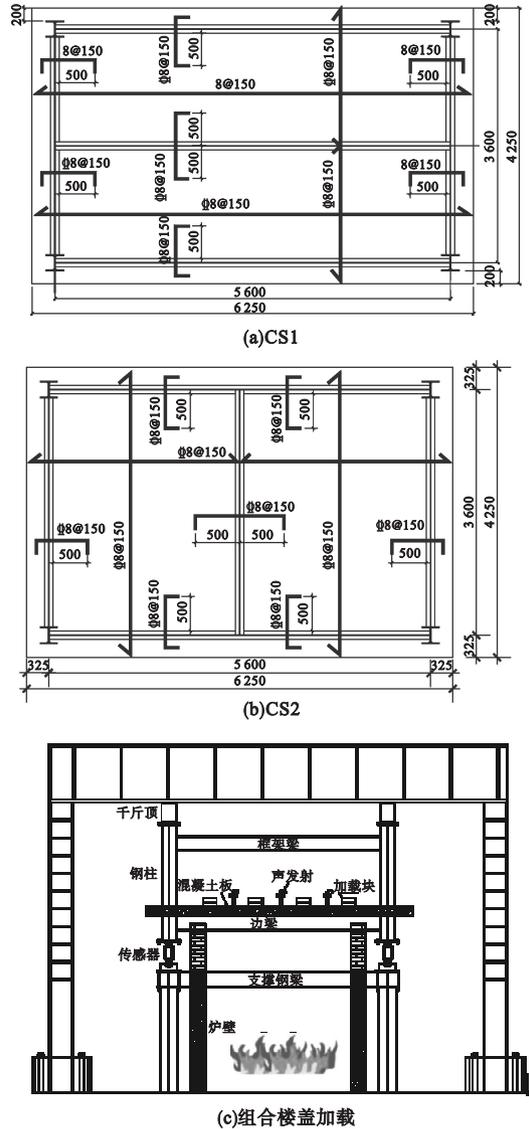


图 1 组合楼盖配筋及加载图

Fig. 1 Combination floor reinforcement and loading diagram

组合楼盖的设计参数如表 1 所示. 其中, $f_{cu,m}$ 为混凝土立方体抗压强度; w 为混凝土含水率; f_y 为钢筋屈服强度; f_{st} , 钢筋抗拉强度; δ 为钢筋伸长率; E_s 为钢筋弹性模量.

表 1 组合楼盖设计参数

Table 1 Design parameters of composite floor

楼盖名称	$f_{cu,m}/$ MPa	$f_y/$ MPa	$E_s/$ GPa	$f_{st}/$ MPa	$w/$ %	$\delta/$ %
CS1	42.51	430	205	595	1.94	19.1
CS2	44.57	440	205	605	2.25	18.9

1.2 升温曲线

炉温采用 ISO - 834 标准升温曲线,其表达式为

$$T_g - T_g(0) = 345 \log_{10}(8t + 1). \quad (1)$$

式中: t 为时间; T_g 为时间 t 的平均温度; $T_g(0)$ 为火灾发生前的平均空气温度.

1.3 声发射仪器及传感器布置

声发射传感器将构件表面的应力波转换为电信号,经前置放大器放大、滤波器滤波、主放大器再放大后,由数据采集卡(模/数转换器)进行采集,送入计算机进行数据处理和分析,判断、评定声发射源特性,并将结果进行显示,声发射采集流程与采集原理如图 2 所示.

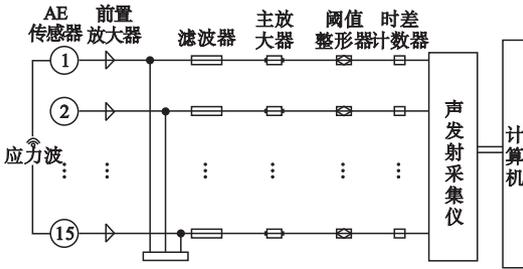


图 2 声发射信号采集原理

Fig. 2 Principle of acoustic emission signal acquisition

考虑到火灾作用下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,CS1 和 CS2 板面布置了 15 个声发射传感器记录不同位置处的声发射信号(见图 3).

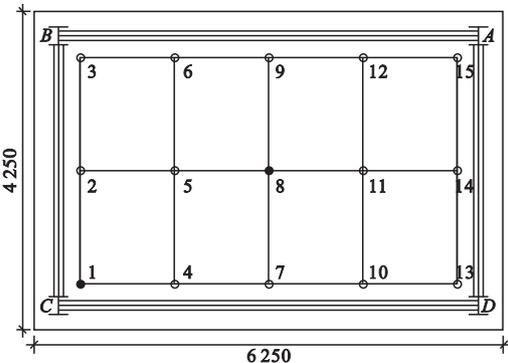


图 3 声发射测点布置

Fig. 3 Acoustic emission measuring point arrangement

从图 3 可以看出,板角处出现大量宏观斜裂缝,跨中处板底裂缝最为密集,且声发射

信号较为典型,笔者对 CS1 和 CS2 板角和跨中处声发射测点进行分析,研究火灾下组合楼盖中次梁不同布置方式的声发射损伤影响.声发射系统参数设置如表 2 所示.

表 2 声发射传感器及采集系统参数设置

Table 2 Acoustic emission sensor and acquisition system parameter setting

传感器	频率/ kHz	阈值/ dB	增益门 值/dB	采样率/ MSPS
R6 - A 谐振式	20 ~ 100	40	40	1

2 试验现象

试验过程中 CS1 和 CS2 试验现象有相似之处,升温后板面裂缝首先在板角处出现,与板边呈 45° 方向.随着挠度的下降,裂缝逐渐向板内移动,至跨中时裂缝与板长边角度呈 90°. 18 min 左右,积水首先在板跨中处出现,逐渐向板边扩散,积水扩散的过程即为温度场发展的过程(见图 4). 97 min 时,混凝土板面四周翘曲明显,板面裂缝由板边向板中进一步发展,柱角处板侧边均出现 1 mm 的斜裂缝,沿板厚方向向板底发展.组合楼盖裂缝如图 5 所示. CS1 在 109 min 时,板面开始出现“椭圆形”塑性铰线,沿板角方向出现垂直于初始斜裂缝的大裂缝,形成经典屈服线模型(见图 5(a)). CS2 未出现此模型,但跨中附近裂缝较密集,出现多条与次梁平行的

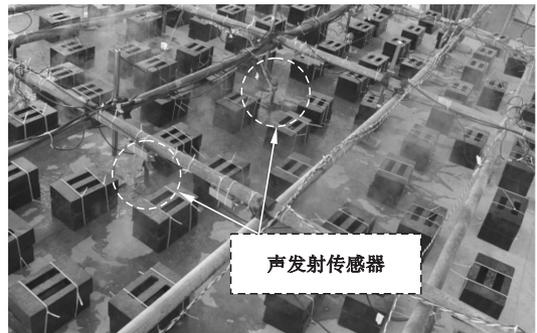


图 4 组合楼盖试验中现象

Fig. 4 Phenomenon in composite floor test

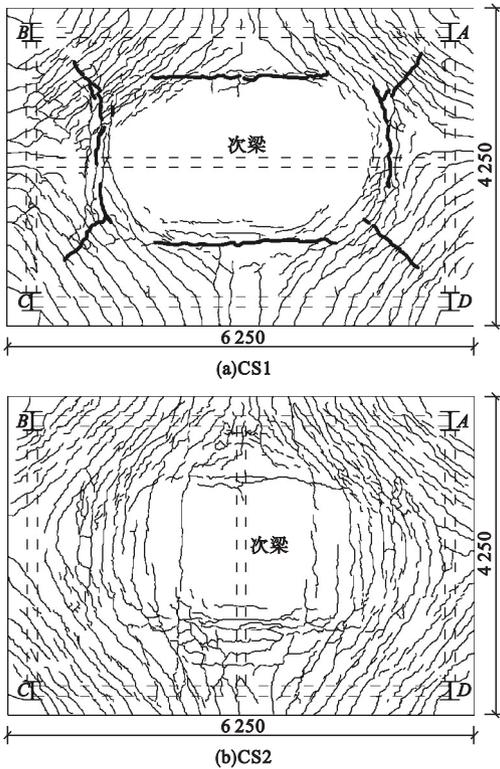


图5 组合楼盖裂缝图

Fig. 5 Combination floor damage map

大裂缝. 停火后, CS1 和 CS2 挠度均出现“回弹”现象, 残余变形程度约为停火时的 46% 和 33%.

3 撞击分析

撞击 - 时间曲线如图 6 所示. 图 6(a) 中, 在升温初期撞击数均以不同的速率上升, CS1-1 处出现大量宏观斜裂缝, 首先在此处发生破坏, 对组合楼盖的承载能力产生不利影响. 相对于 CS1-1、CS1-8 处撞击数变化较活跃, 反映出了组合楼盖的内力变化过程. A~B 阶段, 温度荷载逐渐增大, 材料性能不断下降, 随着挠度的不断增加, 板面裂缝不断向跨中处靠近, 撞击数迅速增加至 184 582 个; B~C 阶段, 组合楼盖内力逐渐趋于平衡, 至 C 点时板面经典屈服线模型形成后撞击数处于谷底, 活跃度较低; C~D 阶段, 组合楼盖承载主要由钢筋竖向分量承担, 挠度下降时钢筋伸长做功使板底混凝土受拉破坏, 板底裂缝开展较密集, 撞击数值又迅速增

加, 至 D 点时达到峰值. 198~300 min 时, 声发射撞击信号为 0, 材料性能进一步退化, 组合楼盖内力处于平衡阶段, 几乎未出现新的裂缝. 图 6(b) 中, A'~B' 阶段变化趋势和变化原理与 CS1 中 A~B 相同, B' 之后与 CS1 有所不同, 撞击信号逐渐降低. 54~95 min 撞击信号出现平衡波动, 此阶段组合楼盖内力保持相对平衡. CS2 中板面塑性铰线趋势不明显, 钢筋的竖向分量对组合楼盖极限承载力的提高不能充分发挥作用, 使得撞击信号持续减少. 120 min 后声发射撞击信号为 0, 撞击信号未出现增长趋势. 利用声发射进行撞击参数分析时, 不能以撞击数量来判定组合楼盖达到破坏的不利位置与损伤严重程度, 应结合试验宏观现象与撞击曲线变化进行分析. 同时, CS2 中的峰值信号明显小于 CS1, 说明火灾中 CS2 活性明显弱于 CS1, 对组合楼盖的承载更为有利.

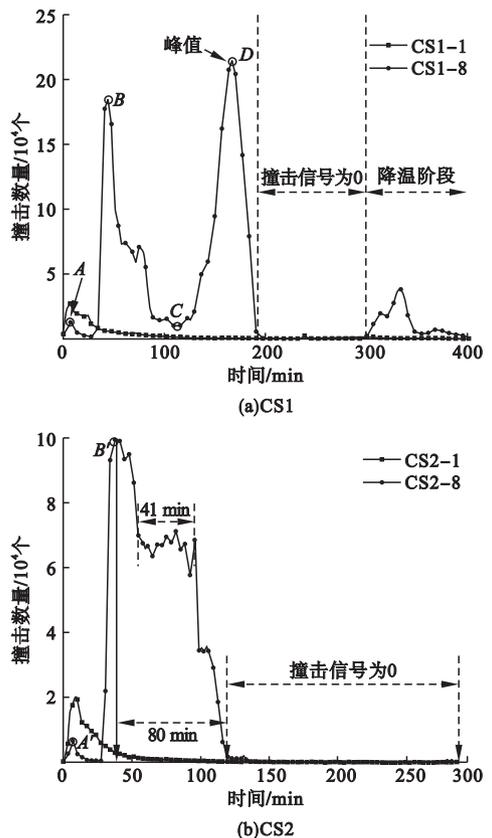


图6 撞击数量 - 时间曲线图

Fig. 6 Hit - time curve

4 累计计数分析

累计计数指在一个声发射过程中某一特征量的累加值,描述了声发射的总强度,属过程参数.图7为累计计数-时间曲线.CS1中,分为①、②、③和停火阶段.阶段①中,板角斜裂缝迅速开展,与板边呈 45° 方向,此处声发射强度较大,CS1-1曲线迅速升高;CS1-8在跨中处声发射活动较弱,曲线保持平稳状态.阶段②组合楼盖进入塑性发展状态,塑性铰线和受拉薄膜效应逐渐形成.板底裂缝迅速开展,CS1-8以 4.3×10^5 个/min的速率线性增加,CS1-1处斜裂缝贯穿,声发射信号传递受到抑制,故保持不变,在A点处CS1-8大于CS1-1.阶段③,板内温度应力逐渐减小,板底处微裂缝完全开展,两点曲线均保持平稳,说明钢梁与混凝土板未出现相对滑移现象,能够较好地协同工作.停

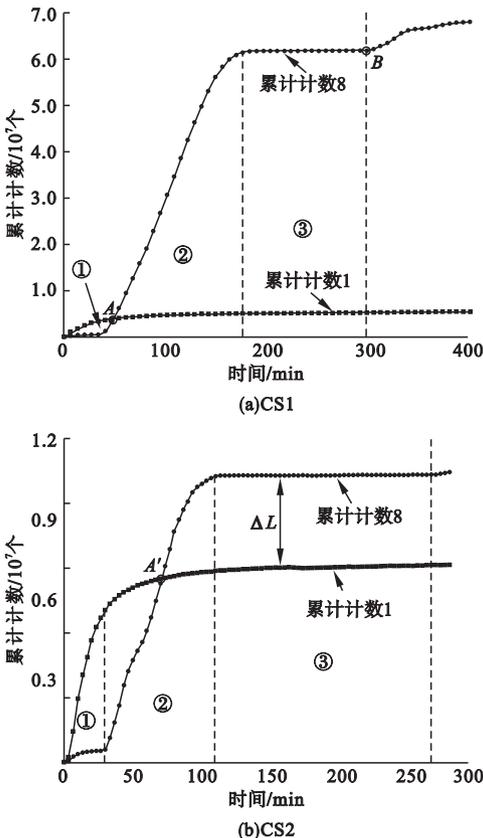


图7 累计计数-时间曲线

Fig. 7 Cumulative count-time curve

火阶段,跨中处CS1-8曲线逐渐增加,这是由于次梁和混凝土板膨胀率不同,收缩过程中栓钉对混凝土板产生剪切破坏,使声发射信号继续增强.CS2中,①、②和③阶段累计计数变化趋势与CS1相同,但累计计数数值差异较大,CS1中最大值为 6.8×10^7 ,CS2中最大值为 1.07×10^7 .声发射信号较强,裂缝数量较多,说明CS1次梁布置方式对组合楼盖的承载能力较不利,工程实践中相同条件下应尽量选取CS2布置方式.

5 事件率分析

声发射事件为产生声发射的一次材料局部变化,整个事件中每分钟产生的声发射的个数称之为事件率,用于声发射源的活动性评价.

图8为事件率-时间变化曲线.CS1在升温初期,随着炉温的升高组合楼盖内部温度应力逐渐增大,钢筋混凝土板内部出现大量微裂缝,且CS1-1处出现大量宏观斜裂缝,事件率迅速达到526个/min,对应的炉温为 717°C .此后,随着裂缝的形成,事件率变化逐渐降低,至170min时基本为0.CS1-2处事件率在整个试验过程中出现A、B、C、D4处峰值点,分别对应试验过程中的不同时刻.A点峰值时事件率为350个/min,对应的炉温为 717°C ,与CS1-1峰值点一致,说明事件率首次达到峰值时刻所对应的炉温,即为温度应力达到的最大值.B点峰值为2143个/min,炉温 951°C ,此阶段在板面“椭圆形”塑性铰附近出现大量平行于短边和长边的裂缝.C点峰值最大点为2386个/min,炉温为 1061°C ,塑性铰线形成后在“椭圆形”板底区域内微裂缝不断开展,声发射源活动最为密集.此后在组合楼盖火灾试验过程中应注意,即使板面宏观裂缝大量出现后,板内裂缝开展仍然较活跃,时刻保持警惕.D点峰值在停火后出现,可推断出火灾试验时组合结构在抗剪连接件的作用下,由于不均匀收缩会产生剪切破坏.CS2中CS2-1与CS1-

1 变化趋势相似,均在升温初期达到峰值点. CS2-1 在 A' 时达到峰值为 793 个/min, 炉温为 740 °C, 变化原理同 CS1. CS2-8 中峰值点在前 100 min 内出现且事件率 326 个/min 远小于 CS1-8 中的 2 386 个/min, 停火后变化值较小, 说明 CS2 在跨中处声发射活

动频率弱于 CS1. 原因在于组合楼盖极限承载能力主要由短向钢筋控制, CS2 中次梁布置方向与短向钢筋一致, 次梁与短向钢筋的相互作用较弱. CS1-1 和 CS2-1 出现明显的 Kaiser 效应.

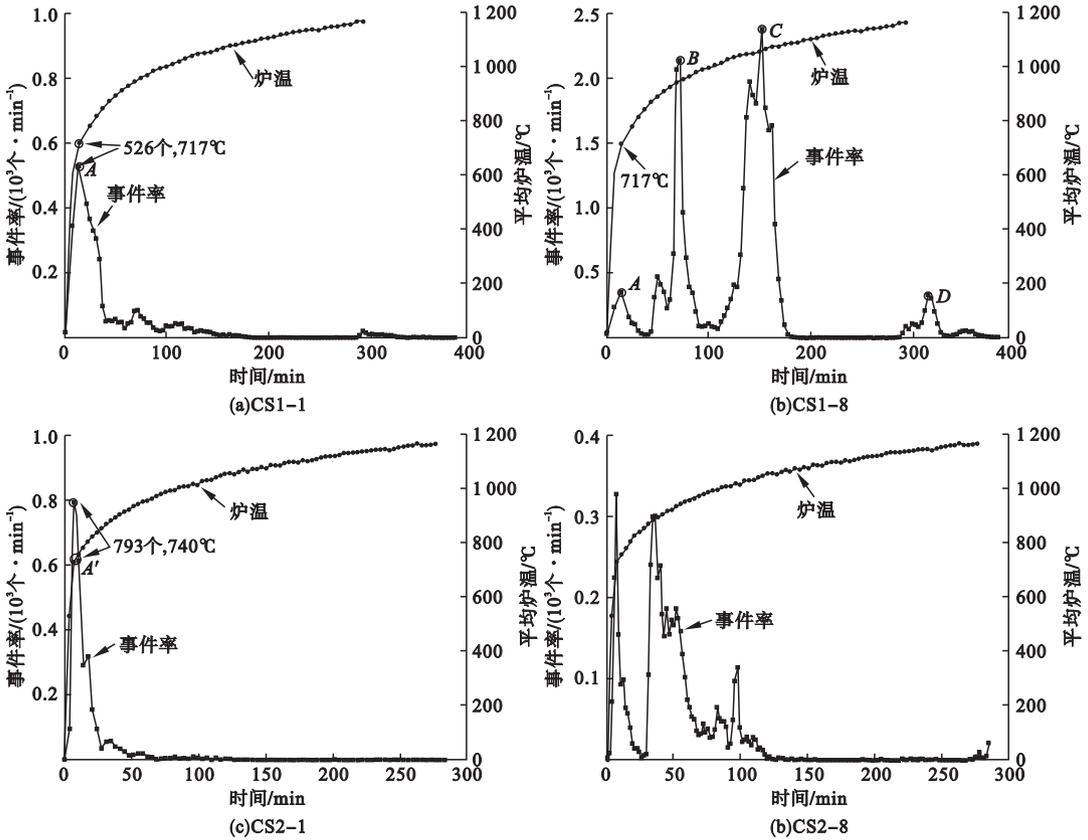


图 8 事件率 - 炉温 - 时间曲线

Fig. 8 Event rate-furnace temperature-time curve

6 b 值 - 能量分析

声发射能量分析能够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, 通过 *b* 值 - 能量分析能够准确判断试件破坏时的能量变化及开裂幅度, 从而进一步研究试件极限破坏状态. 声发射 *b* 值信号分析在火灾下建筑结构中广泛应用^[16]. 其事件数与幅值的关系式为

$$\log N = a - b \log A \quad (2)$$

式中: *a* 为常数; *N* 为事件数; *A* 为幅值.

图 9 为 *b* 值 - 能量变化曲线. 笔者规定

b 值的物理意义是: 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.

从图 9 可以看出, CS1 中板角处宏观大裂缝出现时 *b* 值减小, 能量迅速增加, 随着裂缝不断向板内开展 *b* 值与能量曲线呈波动性变化. 跨中处能量值变化较大, 升温初期在外荷载作用下板底出现少量裂缝并释放出一定的能量. 105 ~ 139 min 时板底裂缝大量出现, 能量曲线较密集, 最大能量值为 5 277 mV·μs. 组合楼盖内力平衡之后能量值较小, *b* 值在 1.95 ~ 2.05 波动. 停火后, *b* 值迅速下降, CS2-8 处能量值迅速增加, 在整

个试验过程中能量值最高,说明跨中处在停火时的内力变化对组合楼盖的承载能力有较大影响,应着重关注. CS2 中板角处 b 值和能量值变化与 CS1 相似,180 min 至停火阶段,组合楼盖长边和短边翘曲时对板角底部混凝土产生受拉破坏,出现大量裂缝,能量值也进一步增大. CS2 - 1 与 CS2 - 8 处能量值差异较大,究其原因因为跨中处裂缝开展幅度较小,细微裂缝较多,能量值较小. CS1 和 CS2 中,

b 值与能量变化均具有一定的规律性,能够真实地反映和判断出裂缝开展及混凝土板内部损伤的程度. 其中,CS1 - 8 和 CS2 - 8 中 b 值变化趋势及能量值差异较大,CS2 的次梁布置方式使得混凝土板跨中处的损伤相对较小. 可见,次梁不同布置方式对组合楼盖跨中处的声发射能量影响较大,能量越大裂缝开展越密集,开裂幅度越大,越不利于组合楼盖的承载.

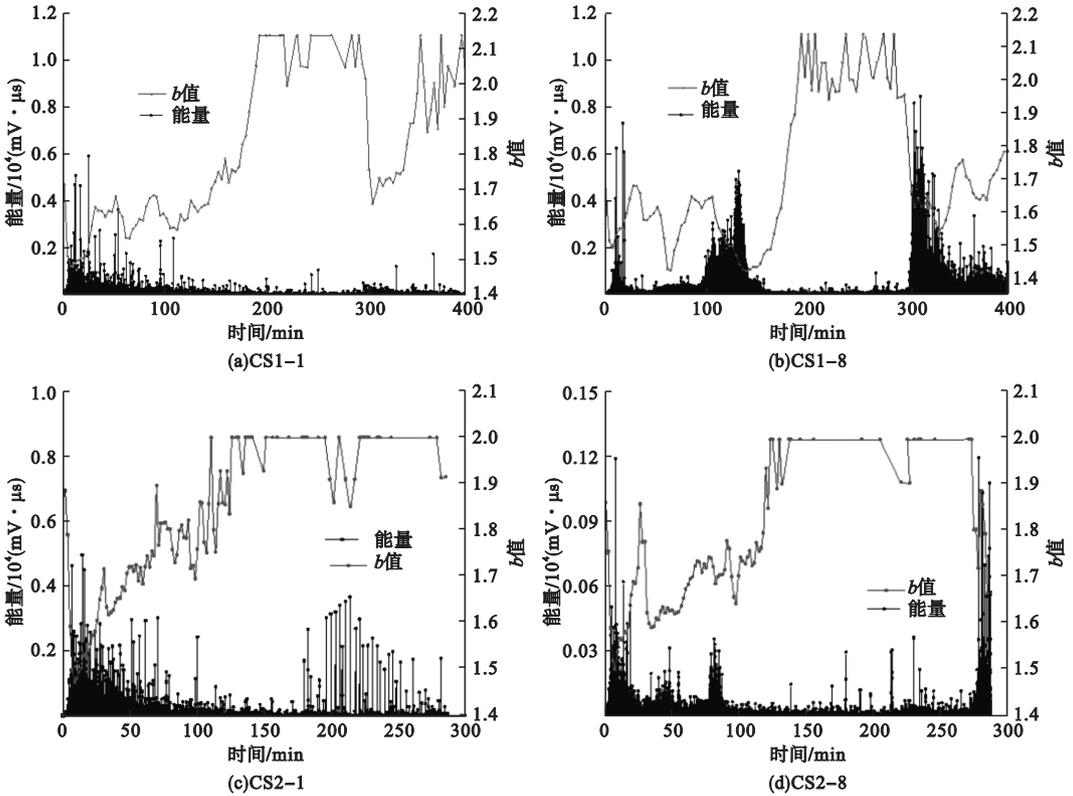


图9 b 值 - 能量 - 时间曲线

Fig. 9 b value - energy - time curve

7 结 论

(1) 声发射撞击信号在组合楼盖损伤评估应用中具有有效性和准确性,可反映出组合楼盖的内力变化过程,但不能以撞击数量来判定组合楼盖达到破坏的不利位置与损伤严重程度,应结合试验宏观现象与撞击曲线变化进行分析.

(2) CS1 中声发射累计计数信号较强,裂缝数量较多,次梁布置方式对组合楼盖的

承载能力较不利,工程实践中相同条件下应尽量选取 CS2 布置方式.

(3) 组合楼盖极限承载能力主要由短向钢筋控制,CS2 在跨中处声发射活动频率弱于 CS1,CS2 中次梁布置方向与短向钢筋一致,次梁与短向钢筋的相互作用较弱,即使板面宏观裂缝大量出现后,板内裂缝开展仍然较活跃.

(4) 组合楼盖中, b 值与能量变化均具有一定的规律性,能够真实地反映和判断出裂

缝开展及混凝土板内部损伤的程度,次梁不同布置方式对组合楼盖跨中处的声发射能量影响较大,停火时的能量变化对组合楼盖的承载能力有较大影响。

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.
(YANG Nengjun, YAO Chunjiang, YUAN Xiaojing, et al. Acoustic emission based material damage detection technology [M]. Beijing: Beihang University Press, 2016.)
- [2] 李冬生,杨伟,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.
(LI Dongsheng, YANG Wei, YU Yan. Acoustic emission monitoring and evaluation of structural damage in civil engineering—theory, method and application [M]. Beijing: Science Press, 2017.)
- [3] KAISER J. A study of acoustic phenomena in tensile tests[D]. Berkeley: Lawrence Radiation Laboratory, 1964.
- [4] 吴超,石启印,杨帆.预应力钢筋混凝土梁损伤声发射分形特征试验研究[J].防灾减灾工程学报,2016,36(6):895-912
(WU Chao, SHI Qiyin, YANG Fan. Experimental study on fractal dimension of acoustic emissions on the damage to reinforced concrete [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2016, 36(6): 895-912)
- [5] 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):822-841.
(MEN Jinjie, ZHAO Qian, ZHU Le, et al. Moment-tensor-based acoustic emission detection method for reinforced concrete structure [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2017, 37(5): 822-841.)
- [6] 岳健广,镇东.受弯钢筋混凝土柱宏/微观损伤演化声发射监测试验与评估研究[J].建筑结构学报,2017,38(8):156-166
(YUE Jianguang, ZHEN Dong. Acoustic emission monitoring experiments and assessment method for macro-micro-scale seismic damage evolution of bending-type reinforced concrete columns [J]. Journal of building structures, 2017, 38(8): 156-166.)
- [7] 吕锦飞,杨鼎宜,李玉寿,等.热-力耦合作用下混凝土劣化特性及其损伤本构模型的研究[J].硅酸盐通报,2018,37(12):3877-3882.
(Lü Jinfei, YANG Dingyi, LI Yushou, et al. Deterioration characteristics and damage constitutive model of concrete under thermo-mechanical coupling [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2018, 37(12): 3877-3882.)
- [8] 郭庆华,邵保平,田俊斌,等.火灾高温后隧道衬砌混凝土力学特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(5):1316-1323.
(GUO Qinhua, XI Baoping, TIAN Junbin, et al. Experimental research on mechanical property of tunnel concrete lining after high temperature of fire [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015, 11(5): 1316-1323.)
- [9] COLOMBO I S, MAIN I G, FORDE M C. Assessing damage of reinforced concrete beam using “b-value” analysis of acoustic emission signals [J]. Journal of materials in civil engineering, 2003, 15(3): 279-286.
- [10] GENG Jishi, SUN Qiang, ZHANG Weiqiang, et al. Effect of high temperature on mechanical and acoustic emission properties of calcareous-aggregate concrete [J]. Applied thermal engineering, 2016, 6(107): 1200-1208.
- [11] 刘新星,董毓利,王滨,等.火灾下钢筋混凝土双向板损伤的声发射试验研究[J].青岛理工大学学报,2008,29(2):14-20.
(LIU Xinxing, DONG Yuli, WANG Bin, et al. Acoustic emission testing of full-scale two-way reinforced concrete simply-supported slabs under fire [J]. Journal of qingdao technological university, 2008, 29(2): 14-20.)
- [12] MITSUO O, SHINYA U, TOSHIRO K, 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.
- [13] 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.
(YANG Zhinian. Research on fire resistance of two-way reinforced concrete slabs with different edge restraints [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [14] 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.
(ZHU Chongji. Studies on fire resistance properties of full-scale two-way reinforced concrete slabs [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [15] ZHU Chongji, DONG Yuli, XIE Qun. Real-time monitoring of the full-scale flate-plate floor subjected to fire by acoustic emission and energy rate analysis [J]. Transportation and environment, 2016(31): 229-234.
- [16] FARHIDZADEH A, DEGHAN-NIRI E, SALAMONE S, et al. Nonlinear Kalman Filtering for acoustic emission source localization in anisotropic panels [J]. Journal of structural engineering, 2013, 139(12): 1-10.
(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)