

# 高温与冲击作用下钢筋混凝土梁的 损伤评定及影响因素研究\*

欧阳鑫<sup>1</sup>, 汪维<sup>1,2</sup>, 刘洁宁<sup>1</sup>, 周永旺<sup>1</sup>

(1. 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 江汉大学精密爆破国家重点实验室, 湖北 武汉 430056)

**摘要:** 为研究高温和冲击作用下钢筋混凝土 (RC) 梁的抗冲击性能, 在已有试验的基础上, 采用 LS-DYNA 软件建立高温下 RC 梁的冲击模型, 并验证数值模型的有效性。基于数值模型, 总结了高温和冲击作用下 RC 梁出现的 4 种破坏模式, 引入截面损伤因子对高温下 RC 梁的损伤程度进行评估, 并拟合了截面损伤因子与冲击高度、温度之间的预测公式, 重点分析了温度、跨高比、冲击位置、锤头形状对高温条件下 RC 梁抗冲击性能的影响。结果表明: 随着温度的升高, RC 梁的跨中位移增大, 而冲击力降低, 跨高比越大, 跨中位移达到峰值的时间越后; 相同冲击能量下, 锤头在跨中冲击产生的跨中位移大于靠近支座冲击产生的跨中位移, 接触面为平面的锤头相较于接触面为曲面的锤头对 RC 梁造成更大的损伤。

**关键词:** 钢筋混凝土梁; 高温; 冲击载荷; 抗冲击性能

中图分类号: 0383; O521.9

文献标识码: A

钢筋混凝土 (RC) 梁是现代建筑与基础设施中的结构构件<sup>[1-3]</sup>, 具有重要作用。它充分发挥了混凝土抗压强度高和钢筋抗拉性能优的特点, 二者协同工作, 形成了高效且经济的承重体系。然而, 随着建筑物事故和火灾的频发, RC 梁在使用过程中常常遭受冲击和高温的联合作用, 造成严重的人员伤亡和财产损失, 因此, 研究 RC 梁在高温下的抗冲击性能具有重要意义。

目前, 国内外学者对高温下梁体的抗冲击性能的研究取得了一定成果, 研究对象不仅包括常规的 RC 梁, 还涉及采用新型材料或加固技术的梁体<sup>[4-7]</sup>。例如, Yang 等<sup>[8]</sup>为研究剪切主导型超高性能混凝土梁在火灾下的结构性能, 采用 ISO834 标准火灾曲线对 10 根全尺寸 UHPC 梁进行了受火试验。Zhang 等<sup>[9]</sup>通过 28 个具有不同钢纤维体积分数 (0-2.0%) 的梁试样评估冷却方法对抗冲击性的影响。同时, 国内外学者对高温下梁体的抗冲击性能的影响因素开展了大量研究<sup>[10-12]</sup>, 金浏等<sup>[13, 14]</sup>结合混凝土细观非均质特征, 建立了钢筋混凝土梁的细观数值模型。基于该模型, 研究了高温持续时间和落锤冲击能量对梁抗冲击性能的影响, 并对高温中及高温后两种工况下 RC 梁在冲击作用下的力学响应进行了对比分析, 刘才玮等<sup>[15]</sup>通过对 12 根钢筋混凝土梁进行火灾试验及不同冷却方式处理后的静载试验, 并基于试验数据分析各研究变量对试件力学性能的影响规律, 并提出了适用于不同冷

\*收稿日期: 2026-02-02; 修回日期: 2026-03-21

基金项目: 国家自然科学基金 (11302261, 11972201)

第一作者: 欧阳鑫 (2001-), 男, 硕士研究生, 主要从事工程结构抗爆毁伤评估研究. E-mail: 13216692280@163.com;

通信作者: 汪维 (1983-), 男, 博士, 教授, 主要从事工程结构抗爆毁伤评估研究. E-mail: wangwei7@nbu.edu.cn

却方式下钢筋混凝土梁受弯承载力的计算方法。齐宝欣等<sup>[16]</sup>利用 ANSYS /LS-DYNA 有限元软件建立钢筋复合梁的有限元实体模型, 综合考虑梁的配筋参数、冲击速度、截面尺寸对钢筋复合梁抗冲击性能的影响。张威振<sup>[17]</sup>对高温后 16 根混凝土梁进行了试验研究并研究了升温时间、配筋率、冷却方式对高温后混凝土梁的力学性能的影响。

综上所述, 现有研究主要侧重于揭示高温下或高温后梁体在冲击荷载作用下的宏观力学响应(如承载力、变形模式、破坏形态)及参数敏感性分析。然而, 对于如何量化评估这种耦合作用所造成的损伤程度, 即建立“火灾-冲击”耦合损伤的定量评定体系的研究相对匮乏。目前尚缺乏统一的损伤指标、损伤等级划分标准, 尽管已有研究探讨了多种变量, 但主要集中在热-力参数(如加热时间、加热温度、冷却方式)和基本结构参数(如配筋率、截面尺寸、冲击速度)。而对其他因素研究较少。

针对上述研究的不足, 通过 LS-DYNA 软件建立高温冲击下 RC 梁数值模型, 总结 4 种高温冲击下 RC 梁的破坏模式, 提出基于截面损伤因子 D 的损伤评定方法, 并拟合损伤因子 D 的预测公式, 进一步分析了温度、跨高比、冲击位置、锤头形状等参数对高温下 RC 梁抗冲击性能的影响。以为高温冲击下 RC 梁的损伤评定及抗冲击设计提供参考。

## 1 试验概况

本研究在 Li 等<sup>[18]</sup>进行的高温 RC 梁冲击试验展开, 其试验装置如图 1 和图 2 所示, RC 梁长、宽、高分别为 2.8m、0.2m、0.4m。两支座之间的距离为 2.4m, 其纵筋包括上表面 2 根  $\phi 16$  和下表面 3 根  $\phi 25$  的 HRB400 钢筋, 箍筋使用的是  $\phi 8$  的 HRB300 钢筋, 箍筋间距为 0.1m, 锤头形状为圆柱形, 质量为 393kg, 试验温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ , 400 $^{\circ}\text{C}$  以及 600 $^{\circ}\text{C}$ , 冲击高度为 3m。试验梁的尺寸和配筋图见图 3。

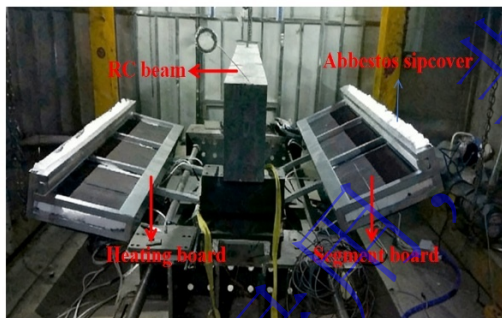


图 1 RC 梁加热装置<sup>[18]</sup>

Fig. 1 RC beam heating device<sup>[18]</sup>



图 2 RC 梁冲击装置<sup>[18]</sup>

Fig. 2 RC beam impact device<sup>[18]</sup>

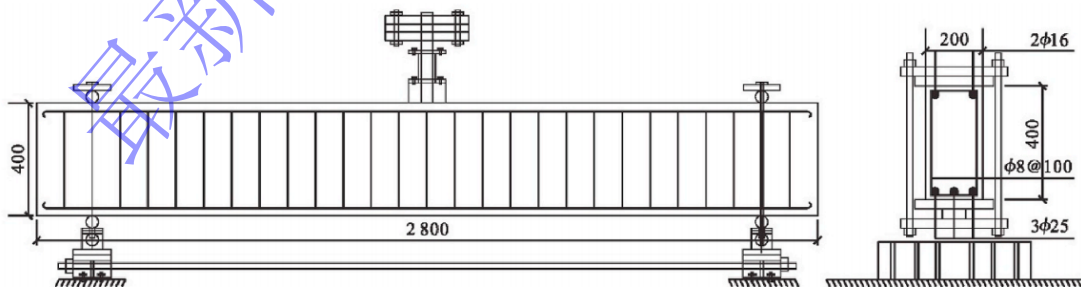


图 3 RC 梁尺寸图及配筋图<sup>[18]</sup>

Fig. 3 RC beam size diagram and reinforcement diagram<sup>[18]</sup>

## 2 数值模拟

## 2.1 有限元建模

### 2.1.1 单元类型选取

本节使用 LS-DYNA 有限元软件进行数值模拟，其中梁体、落锤、支座采用 Solid164 实体单元，钢筋采用 Beam161 梁单元。

### 2.1.2 材料模型及参数选取

选用 MAT\_CSCM\_CONCRETE (CSCM) 模型来模拟混凝土的力学行为，根据课题组完成的混凝土力学性能试验<sup>[19]</sup>结果拟合温度与抗压强度、动态增加系数 (DIF<sub>c</sub>) 之间的关系式，进而拟合出温度 T 与单轴压缩应变率参数 η<sub>c</sub> 的关系式，如公式 (3) 所示，基于近似关系 DIF<sub>t</sub> = 4DIF<sub>c</sub><sup>[20]</sup>，从而拟合得到不同温度下的抗拉应变率参数 η<sub>t</sub>，如公式 (4) 所示。不同温度下弹性模量以及泊松比的取值基于文献<sup>[21, 22]</sup>选取，如公式 (5) 和公式 (6) 所示。相关参数见表 1。

$$f_c = 0.029T + 30.31 \quad (1)$$

$$DIF_c = 1 + \frac{E\dot{\epsilon}\eta_c}{f_c} \quad (2)$$

$$\eta_c = 0.00077T + 0.72 \quad (3)$$

$$\eta_t = 0.00066T + 0.90 \quad (4)$$

$$\frac{E^T}{E} = 0.83 - 0.0011T \quad (60^\circ\text{C} \leq T \leq 700) \quad (5)$$

$$v = \begin{cases} 0.2 - 0.00025T & 0^\circ\text{C} \leq T \leq 200 \\ 0.15 + 0.0005T & 200^\circ\text{C} \leq T \leq 800 \end{cases} \quad (6)$$

表 1 混凝土材料参数

Table 1 Concrete material parameters

ρ/(g/cm <sup>3</sup> )	f <sub>c</sub> /(MPa)	E/(GPa)	v	η <sub>c</sub>	η <sub>t</sub>
2.3	式(1)	式(2)	式(3)	式(4)	式(5)

钢筋的本构模型选用 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC。其参数选取基于文献<sup>[23]</sup>。应变率效应则借由 Cowper-Symonds 模型加以考虑，C 和 P 分别取 40.4 和 5<sup>[24]</sup>。钢筋的具体材料参数详见表 2。

$$\frac{f_{yT}}{f_y} = (100.19 - 0.0159T) \times 10^{-2} \quad (20^\circ\text{C} \leq T < 600) \quad (7)$$

$$\frac{E_{sT}}{E_s} = (100.5 - 0.0265T) \times 10^{-2} \quad (20^\circ\text{C} \leq T < 900) \quad (8)$$

式中，f<sub>yT</sub>、E<sub>sT</sub> 为温度 T 时的屈服强度和弹性模量，f<sub>y</sub>、E<sub>s</sub> 为常温时的屈服强度和弹性模量。

表 2 钢筋材料参数

Table 2 Rebar material parameters

ρ/(g/cm <sup>3</sup> )	f <sub>y</sub> /(MPa)	E/(GPa)	v	C	P
7.8	式(7)	式(8)	0.3	40.4	5

在模拟中，落锤与支座均采用 \*MAT\_RIGID (刚体材料模型) 进行建模。落锤及支座的具体材料参数<sup>[25]</sup>列于

表 3。

表 3 落锤及支座材料参数

Table 3 Drop hammer and support material parameters

ρ/(g/cm <sup>3</sup> )	E/(GPa)	v
7.8	210	0.3

### 2.1.3 模型建立

利用 LS-DYNA 仿真软件建立数值模型如图 5 所示。根据试验装置进行全比例建模，通过关键字“INITIAL\_VELOCITY\_GENERATION”对落锤施加初速度，初速度通过公式  $v = \sqrt{2gh}$  计算，不考虑重力作用。使用

“CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE”关键字模拟混凝土与其余部分之间的接触。对上下支座进行全约束，落锤保留 Y 向自由度，其余部分不做约束。对网格进行敏感性分析，分别设置网格为 4mm、6mm、8mm，其在常温下跨中位移对比如图 4 所示，网格为 4mm、6mm、8mm 时的跨中位移误差分别为 15.00%、8.49%、25.63%，因此，选择网格尺寸为 6mm，有限元模型具有 1142641 个实体单元和 48742 个梁单元，其余参数选取如表 4 所示。

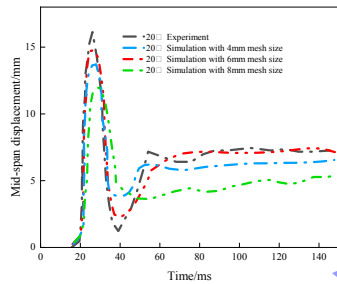


图 4 网格敏感性分析

Fig. 4 Grid sensitivity analysis

表 4 数值实现细节表

Table 4 Numerical implementation details table

Keyword	Core parameters	Value basis
Static friction coefficient	0.1	Reference <sup>[26]</sup>
Dynamic friction coefficient	0.15	Reference <sup>[26]</sup>
System damping constant	0.005	Reference <sup>[26]</sup>
Hourglass coefficient	0.14	Reference <sup>[26]</sup>

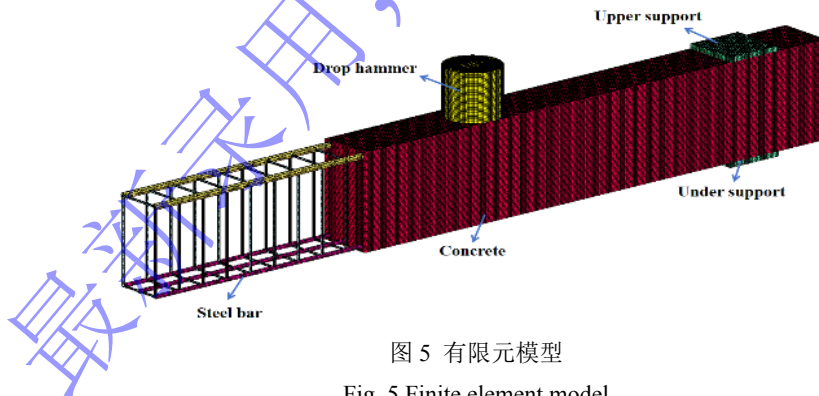


图 5 有限元模型

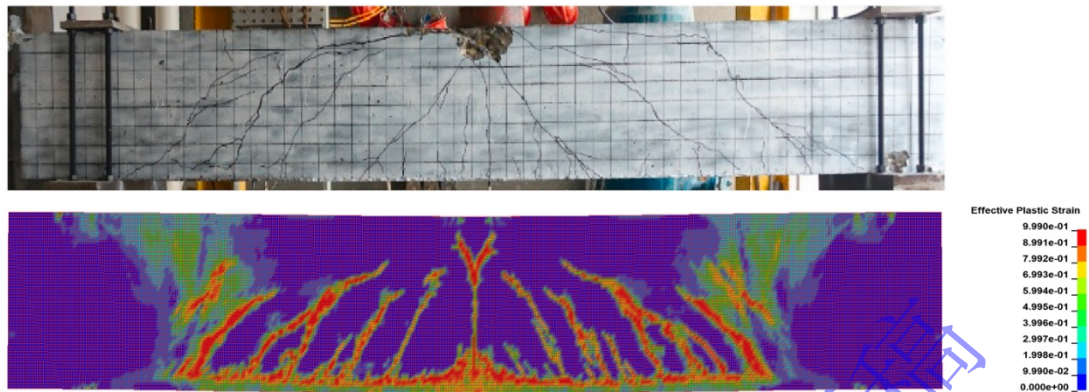
Fig. 5 Finite element model

## 2.2 有限元模型验证

### 2.2.1 破坏形态对比

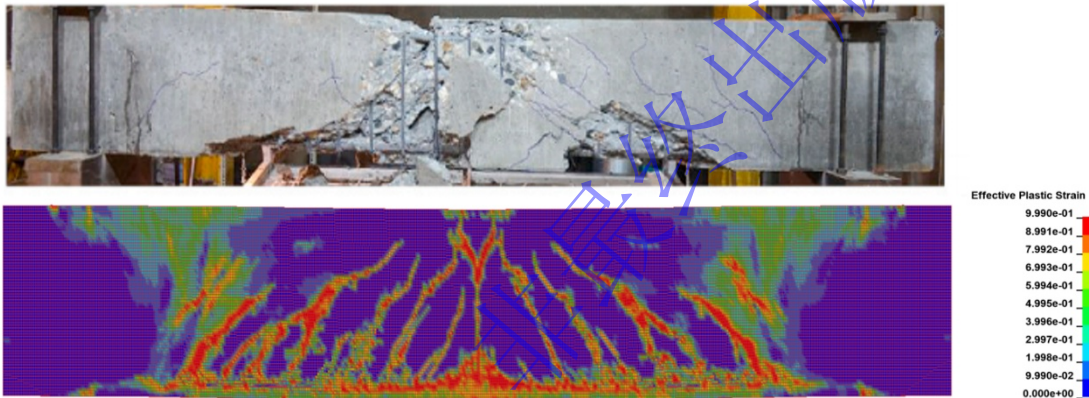
不同工况下 RC 梁试验损伤结果与数值模拟损伤云图对比如图 6 所示，当温度为 20℃ 时，RC 梁表面出现几条明显的斜向裂缝，但 RC 梁体整体保持完好，对应的仿真结果同样在相同位置出现大致相同数量的裂缝，且梁体未出现明显弯曲或混凝土脱落现象，如图 6(a)所示。当温度为 400℃ 时，此时 RC 梁体表面出现相较于 20℃ 发展更加完全的斜向裂缝，裂缝出现的区域更向支座靠近，且 RC 梁出现局部混凝土脱落现象。对应的仿真云图的裂纹同样发展更加完全且位置及数量与实验结果相同，如图 6(b)所示。当温度为 600℃ 时，

RC 梁表面除几条明显的斜向裂缝外, 伴随着大量细小裂纹, 这些裂缝相互连接形成一张裂纹网, 而对应的仿真云图中 RC 梁表面同样出现大量的细小裂纹且同样连接成裂纹网, 如图 6(c)所示。



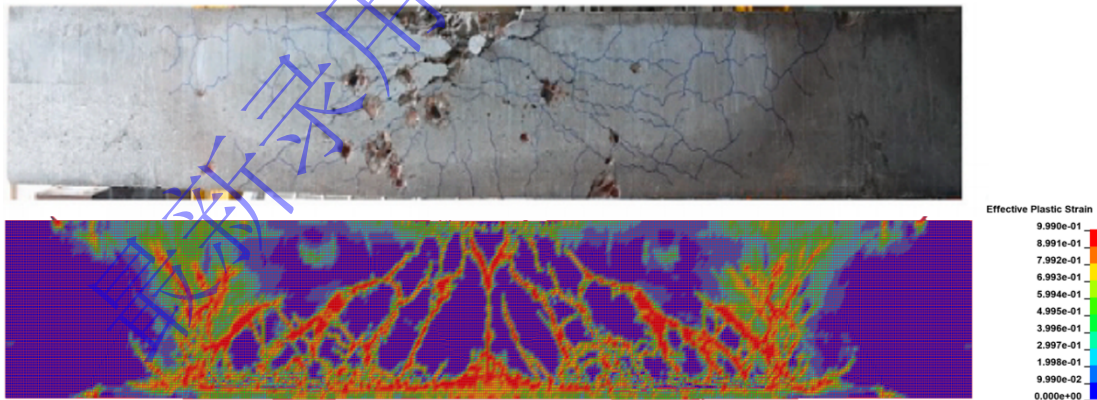
(a) 20°C破坏模式对比

(a) Comparison of damage pattern at 20°C



(b) 400°C破坏模式对比

(b) Comparison of damage pattern at 400°C



(c) 600°C破坏模式对比

(c) Comparison of damage pattern at 600°C

图 6 不同温度下破坏模式对比图

Fig. 6 Comparison of damage modes at different temperatures

### 2.2.2 冲击力时程曲线对比

对试验与数值模拟所得的冲击力时程曲线进行了对比分析, 如图 7 所示。结果显示, 冲击力时程曲线在第一次冲击时达到峰值并迅速回落, 之后出现第二个较小的峰值并出现

振荡现象，对应的数值模拟冲击力时程曲线具有大致相同的变化趋势和峰值，峰值对比如表 5 所示。在 20℃、400℃和 600℃条件下，冲击力峰值的误差分别为 4.39%、4.74%和 5.08%，均处于合理的误差范围。

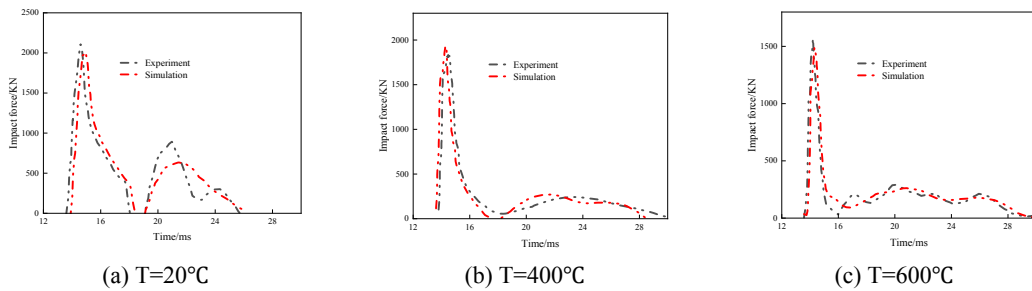


图 7 不同温度下冲击力时程曲线对比

Fig. 7 Comparison of impact force time history curves at different temperatures

表 5 冲击力峰值对比

Table 5 Comparison of peak impact force

Temperature (°C)	Maximum impact force (KN)		Error/%
	Experiment	Simulation	
20	2107.65	2015.11	4.39%
400	1924.01	1832.76	4.74%
600	1569.29	1489.55	5.08%

### 2.2.3 跨中位移时程曲线对比

对试验与模拟所得的跨中位移时程曲线进行了对比分析，如图 8 所示。结果显示，跨中位移时程曲线在达到峰值后出现一次明显回落，随后出现一次明显增长后趋于稳定，对应的数值模拟跨中位移时程曲线具有大致相同的变化趋势和峰值，峰值对比如表 6 所示。在 20℃、400℃和 600℃条件下，跨中位移峰值的误差分别为 8.49%、5.71%和 5.01%，均处于合理的误差范围。

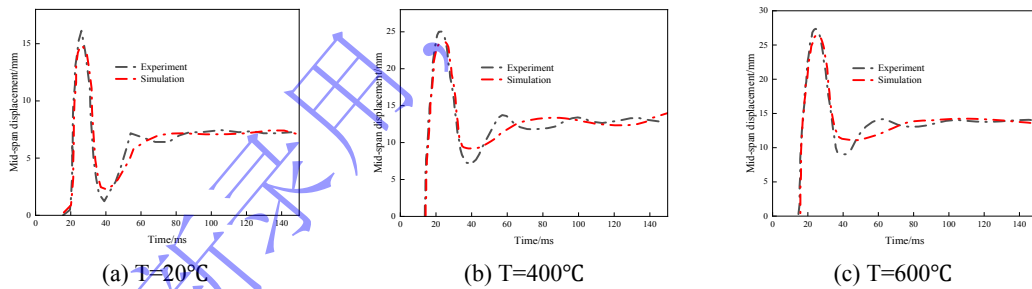


图 8 不同温度下跨中位移时程曲线对比

Fig. 8 Comparison of time history curves of mid span displacement at different temperatures

表 6 跨中位移峰值对比

Table 6 Comparison of peak mid-span displacement

Temperature (°C)	Maximum mid-span displacement (mm)		Error/%
	Experiment	Simulation	
20	16.13	14.76	8.49%
400	25.02	23.59	5.71%
600	27.37	26.00	5.01%

上述分析表明，所采用的建模方法能够有效模拟高温与冲击荷载共同作用下钢筋混凝土梁的动力响应。出现的误差可能来源于材料本构在高应变率与高温条件下的不确定性，或由于仿真模型的简化及离散化处理所致。

### 3 高温下 RC 梁的抗冲击性能分析

#### 3.1 破坏模式

基于上述仿真模型，本节以冲击高度（3m、4m、5m）和温度（20°C、200°C、400°C、600°C）为变量，对高温下 RC 梁破坏模式进行研究。对不同冲击高度和温度下 RC 梁的破坏模式进行总结。控制锤头质量 393kg，纵筋直径不变，仿真工况如表 7 所示。

表 7 仿真工况  
Table 7 Simulation samples

Test	Temperature (°C)	Impact height (m)
T20H3	20	3
T20H4	20	4
T20H5	20	5
T20H6	20	6
T200H3	200	3
T200H4	200	4
T200H5	200	5
T200H6	200	6
T400H3	400	3
T400H4	400	4
T400H5	400	5
T400H6	400	6
T600H3	600	3
T600H4	600	4
T600H5	600	5
T600H6	600	6

当温度为 200°C，冲击高度为 3m 时，即工况 T200H3，RC 梁跨中表面出现垂直裂缝并延伸至跨中顶部，支座附近出现发展不完全的斜向裂缝，裂缝数量较少，RC 梁整体未出现明显弯曲现象，如图 9(a)所示。当温度为 200°C，冲击高度为 5m 时，即工况 T200H5，此时，RC 梁表面斜向裂缝占据主导，跨中区域的斜裂缝延伸至跨中顶部，支座附近的斜裂缝数量以及宽度都呈现明显增长，RC 梁体出现可观察的弯曲现象，如图 9(b)所示。当温度为 400°C，冲击高度为 5m 时，即工况 T400H5，相较工况 T200H5，裂缝未进一步发展，但在 RC 梁 1/4 跨处出现表面混凝土脱落现象，RC 梁弯曲程度继续增大，如图 9(c)所示，当温度为 600°C，冲击高度为 6m 时，即工况 T600H6，此时，RC 梁跨中底部也出现混凝土脱落现象形成中空区域，梁体 1/4 跨处的混凝土脱落区域进一步扩大，锤头与 RC 梁接触面出现混凝土压溃，RC 梁弯曲程度进一步增大，如图 9(d)所示。

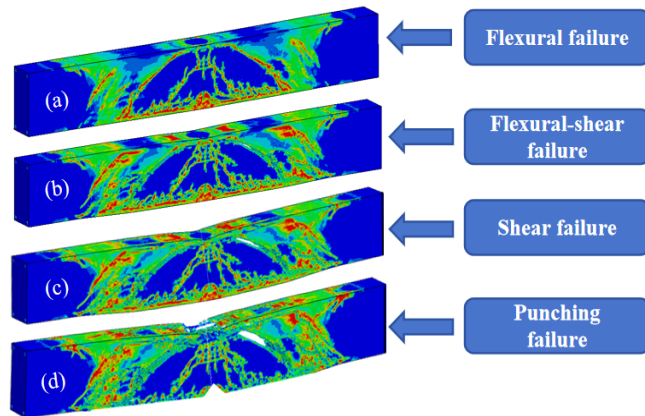


图9 高温下 RC 梁破坏模式

Fig. 9 Failure mode of RC beam under high temperature

宋春明等<sup>[27]</sup>对 RC 梁在冲击作用下的破坏模式进行划分, 本节引用其划分标准对高温冲击作用下 RC 梁破坏模式进行划分, 定义如下: 弯曲破坏, 裂缝主要出现在 RC 梁跨中区域且垂直裂缝占主导地位, 伴随着少许斜裂缝, 沿着梁的纵向方向逐渐向上扩展, 且裂缝不明显, 数量和宽度较小, RC 梁体弯曲不明显; 弯剪破坏, 斜裂缝迅速发展为主要裂缝, 裂缝数量和宽度明显增大, 出现在跨中及支座附近, RC 梁的弯曲程度明显增加; 剪切破坏, 裂缝发展程度较完全, 数量及宽度不再出现明显增大, RC 梁表面出现混凝土脱落现象, 弯曲程度继续增加; 冲切破坏, 裂缝不再发展, RC 梁表面混凝土脱落区域增大, 跨中底部出现中空区域, 冲击点位置出现混凝土压溃现象。对所有工况进行破坏模式进行划分, 如表 8 所示。

表 8 破坏模式总结

Table 8 Summary of failure modes

Test	Temperature (°C)	Impact height (m)	Failure modes
T20H3	20	3	Flexural failure
T20H4	20	4	Flexural failure
T20H5	20	5	Flexural failure
T20H6	20	6	Flexural-shear failure
T200H3	200	3	Flexural-shear failure
T200H4	200	4	Flexural-shear failure
T200H5	200	5	Flexural-shear failure
T200H6	200	6	Shear failure
T400H3	400	3	Flexural-shear failure
T400H4	400	4	Shear failure
T400H5	400	5	Shear failure
T400H6	400	6	Punching failure
T600H3	600	3	Shear failure
T600H4	600	4	Shear failure
T600H5	600	5	Punching failure
T600H6	600	6	Punching failure

### 3.2 损伤评定

连续盖帽模型可以反映混凝土单元在冲击载荷下的损伤程度，因此基于该特点引入截面损伤因子  $D$  来划分高温下 RC 梁的损伤等级，将截面单元的损伤因子的平均值作为该截面的截面损伤因子。即

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d$$

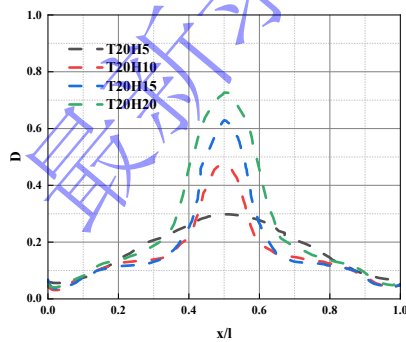
式中  $d$  为截面单元损伤因子， $n$  为单元数目。

为了便于衡量 RC 梁的损伤等级，基于截面损伤因子划分等级的标准如下：轻度损伤， $D=0\sim 0.3$ ；中度损伤， $D=0.3\sim 0.6$ ；重度损伤， $D=0.6\sim 0.9$ ；构件失效， $D=0.9\sim 1.0$ 。表 9 对 16 种工况的截面损伤因子进行总结，图 10 给出了所有工况的截面损伤因子的分布曲线。

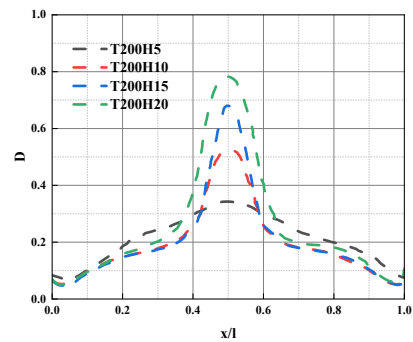
表 9 不同工况下载面损伤因子总结

Table 9 Summary of sectional damage factors under different tests

Test	Temperature (°C)	Impact height (m)	D
T20H3	20	3	0.298
T20H4	20	4	0.474
T20H5	20	5	0.629
T20H6	20	6	0.727
T200H3	200	3	0.343
T200H4	200	4	0.524
T200H5	200	5	0.680
T200H6	200	6	0.782
T400H3	400	3	0.392
T400H4	400	4	0.595
T400H5	400	5	0.675
T400H6	400	6	0.813
T600H3	600	3	0.433
T600H4	600	4	0.665
T600H5	600	5	0.776
T600H6	600	6	0.895



(a) T=20°C



(b) T=200°C

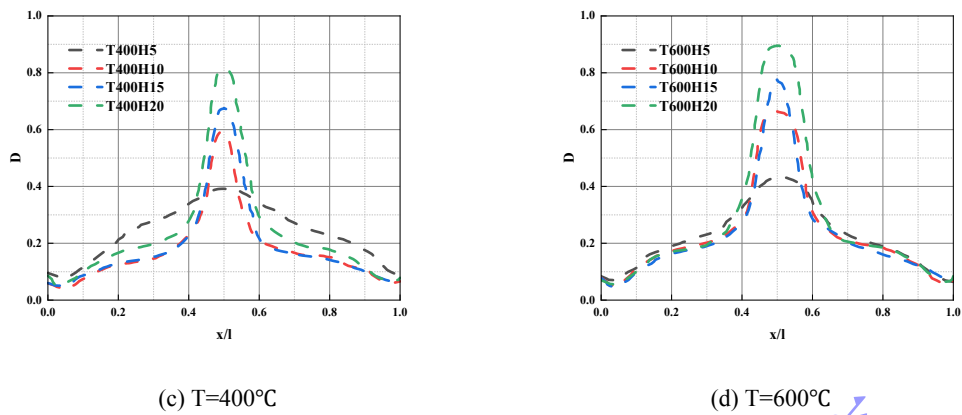


图 10 不同工况下截面损伤因子分布

Fig. 10 Distribution of section damage factor under different tests

为更好地预测不同工况下的 RC 梁损伤等级，绘制  $D$  与温度  $T$ 、冲击高度  $H$  的关系曲面，如图 11 所示，并拟合三者之间的关系表达式 (9)， $R^2=0.94$ 。绘制截面损伤因子模拟值  $S_D$  与拟合公式计算值  $F_D$  对比图，如图 12 所示，可以看出， $F_D$  均匀分布在  $y=x$  直线两侧且误差较小，再次印证了公式具有较好的拟合效果，需要说明的是，该公式仅适用具有相同几何尺寸的 RC 梁。

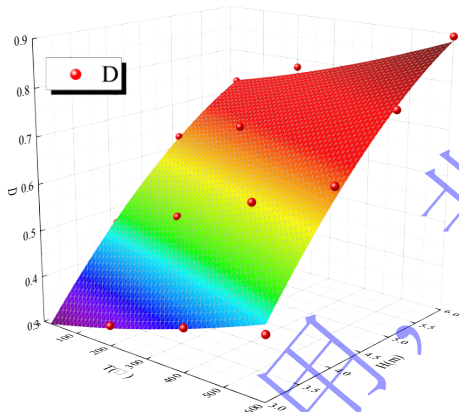


图 11  $D$ 、 $T$ 、 $H$  之间的拟合曲面

Fig. 11 Fitting surface between  $D$ ,  $T$ , and  $H$

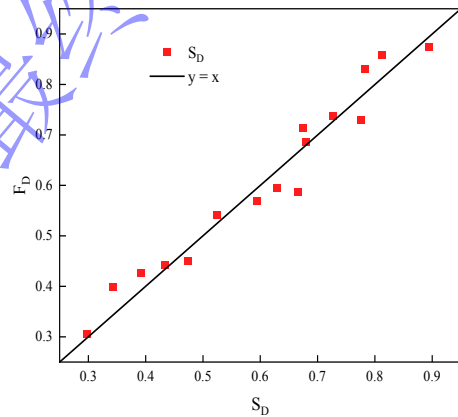


图 12  $S_D$  与  $F_D$  对比图

Fig. 12 Comparison chart between  $S_D$  and  $F_D$

$$D = 0.040 \ln(T) + 0.144 * H - 0.246 \quad (20^\circ\text{C} \leq T \leq 600 \quad 3\text{m} \leq H \leq 6\text{m}) \quad (9)$$

## 4 影响因素分析

现有研究对 RC 梁抗冲击性能影响因素分析主要集中在冲击高度、配筋率、配箍率等参数，而对其他参数研究较少。因此，本节基于上述数值模型开展温度、跨高比、冲击位置、锤头形状对 RC 梁抗冲击性能的影响研究。

### 4.1 温度的影响分析

本节对不同温度 (20°C、200°C、400°C、600°C) 下 RC 梁的抗冲击性能进行研究，控制冲击高度为 6m，锤头质量为 393kg。图 13 给出 RC 梁在不同温度下的破坏云图对比，当温度为 20°C 时，RC 梁跨中底部出现延伸至顶部的垂直裂缝以及两条 45° 斜向裂缝，梁体未见弯曲及混凝土脱落现象。当温度为 200°C 时，裂缝进一步发展，梁体跨中顶部发展出垂直裂缝，支座处也发展出细小裂缝，梁体仍未见弯曲及混凝土脱落现象。当温度为

400℃时，梁体跨中斜向裂缝继续发展，跨中底部出现混凝土脱落，冲击点位置出现混凝土压溃，梁体弯曲程度明显增大。当温度达到 600℃时，梁体跨中弯曲现象更加明显且跨中底部出现混凝土脱落形成中空区域。图 14、图 15 给出了不同温度下跨中位移、冲击力时程曲线对比，随着温度的升高，跨中位移呈现增大的趋势，相较于 20℃工况，200℃、400℃、600℃时的跨中位移分别增大了 31.37%、160.33%、220.95%，而冲击力呈现减小的趋势。主要原因是温度为 200℃时，高温对混凝土及钢筋的力学性能的折减并不明显，而当温度为 400℃和 600℃，高温会引起混凝土微观结构劣化，导致材料力学性能与刚度大幅降低，RC 梁变形明显增大，整体抗冲击能力减弱。

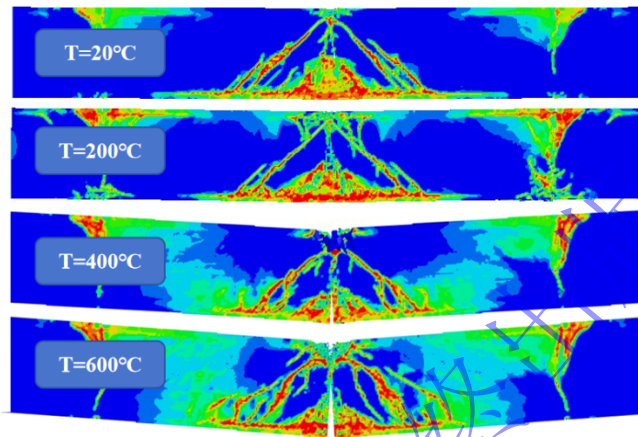


图 13 不同温度 RC 梁损伤云图对比

Fig. 13 Comparison of failure modes of RC beams at different temperatures

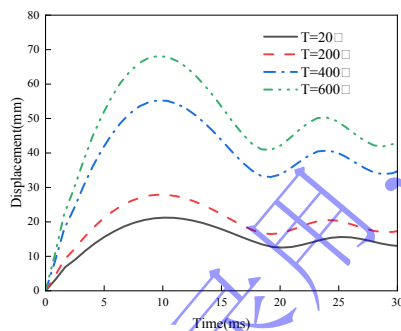


图 14 不同温度 RC 梁跨中位移对比

Fig. 14 Comparison of mid span displacement of RC beams at different temperatures

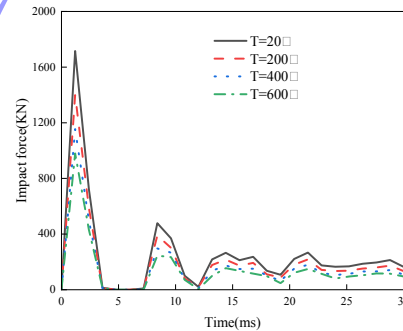


图 15 不同温度 RC 梁冲击力对比

Fig. 15 Comparison of impact force of RC beams at different temperatures

## 4.2 跨高比的影响分析

本节研究高温下 RC 梁跨高比 ( $\beta=3, \beta=4, \beta=5, \beta=6, \beta=7$ ) 对其抗冲击性能的影响，控制温度为 200℃，锤头质量为 393kg，落锤速度为 5m/s。不同跨高比的 RC 梁损伤对比如图 16 所示，可以发现，随着 RC 梁跨高比的增大，其裂缝发展的程度逐渐降低，当跨长为 1.2m，RC 梁跨中形成明显的中空裂缝及发展完全的斜向裂缝，而当跨长增大到 2.8m 时，RC 梁跨中只出现发展不完全的斜向裂缝。图 17、图 18 给出了不同跨长的 RC 梁跨中位移和冲击力时程曲线对比图，随着跨高比的增大，RC 梁跨中位移也呈现增大的趋势，且跨中位移达到峰值的时刻也随之推迟，在跨中位移达到峰值后迅速回落，之后到达第二个峰值后继续回落，然后逐渐趋于平稳，如图 17 所示。RC 梁冲击力随着 RC 跨高比的增大而增大，在冲击荷载作用初始，冲击力和时间成线性关系，在受冲击后的前 3 ms 内，各 RC 梁的冲击力时程曲线趋势基本一致；随着 RC 梁跨高比的增大，最大冲击力逐渐增加；跨

中位移的也随之增大，且振幅更小，如图 18 所示。而不同跨高比冲击力较为一致，跨中位移产生较大变化的原因可能是在冲击发生的初始瞬间（通常 0-5ms），锤头与梁顶面的接触区混凝土产生高度局部化的应力波传播和压碎变形。此时，梁的整体边界条件（包括跨长）尚未对冲击力产生显著影响，而长跨梁的质量更大，冲击过程中产生的分布惯性力更为显著。惯性力在梁全长上分布，对跨中位移产生复杂影响，而短跨梁的惯性效应更集中于冲击点附近<sup>[28, 29]</sup>。

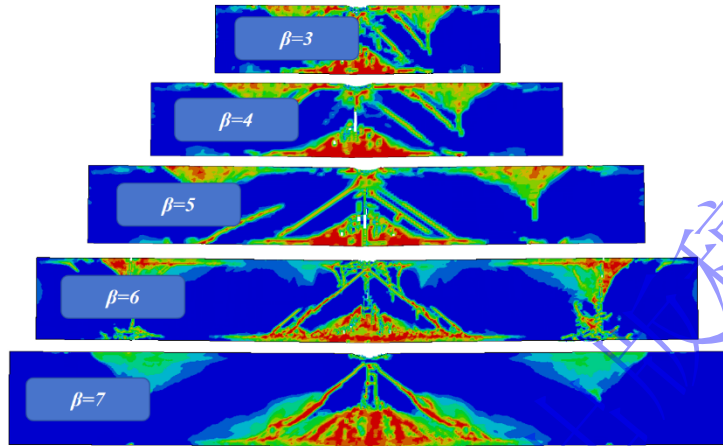


图 16 不同跨高比 RC 梁损伤云图对比

Fig. 16 Comparison of failure modes of RC beams with different span to height ratios

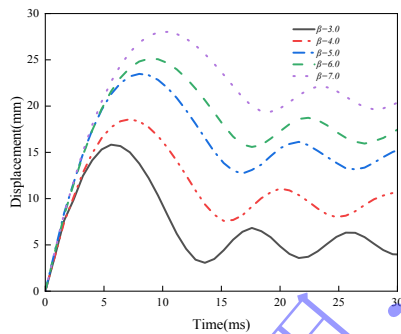


图 17 不同跨度 RC 梁跨中位移对比

Fig. 17 Comparison of midspan displacement in RC beams with different span to height ratios

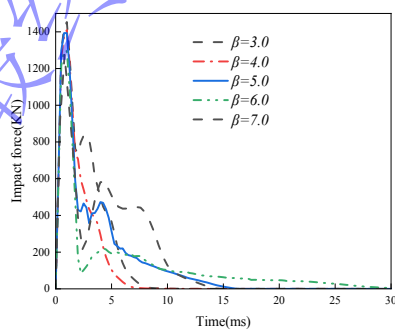


图 18 不同跨度 RC 梁冲击力对比

Fig. 18 Comparison of impact force in RC beams with different span to height ratios

### 4.3 冲击位置的影响分析

为研究冲击位置在高温对 RC 梁抗冲击性能的影响，引入参数  $\alpha$  描述锤头位置，定义为：

$$\alpha = \frac{A}{L/2} \quad (10)$$

式中： $A$  表示锤头到 RC 梁最近一侧的距离， $L$  表示 RC 梁跨长。

共设置 4 个不同的冲击位置 ( $\alpha=0.571$ ,  $\alpha=0.714$ ,  $\alpha=0.857$ ,  $\alpha=1$ )，如图 19 所示。控制温度为 200°C，锤头质量 393kg，冲击速度为 5m/s。图 20~图 22 给出了不同冲击位置 RC 梁损伤云图以及跨中位移、冲击力时程曲线对比。当冲击点靠近支座时，在冲击点下方形成陡峭的斜裂缝，裂缝数量较多，宽度较大，而随着冲击点向跨中靠近，RC 梁裂缝数量和宽度都随之减小。如图 20 所示。在相同冲击能量下，冲击位置靠近跨中产生的最大位移相较于冲击位置靠近支座冲击产生的位移更大，但整体差距较小，如图 21 所示。而冲击力则呈现相反的趋势，但冲击力脉冲的持续时间更短，如图 22 所示。主要原因是当冲击点靠近支座时，荷载通过混凝土斜压杆直接传递至支座，形

成陡峭的斜向压力路径，形成斜裂缝，并且靠近支座时，梁的有效刚度增大，冲击点至支座距离短，应力波往返传播时间短，所以冲击力增大但作用时间更短<sup>[3]</sup>。

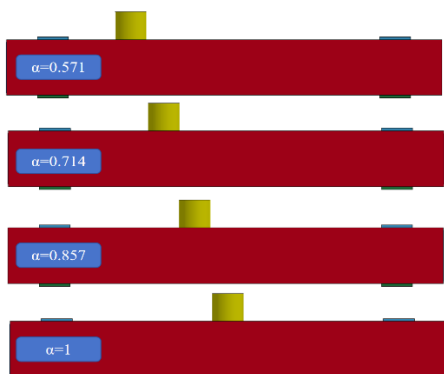


图 19 不同冲击位置示意图

Fig. 19 Schematic diagram of different impact positions

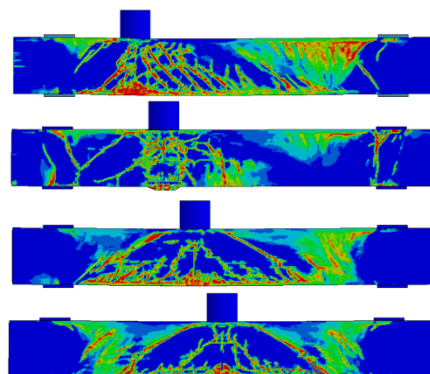


图 20 不同冲击位置 RC 梁损伤云图对比

Fig. 20 Comparison of failure modes of RC beams with different impact locations

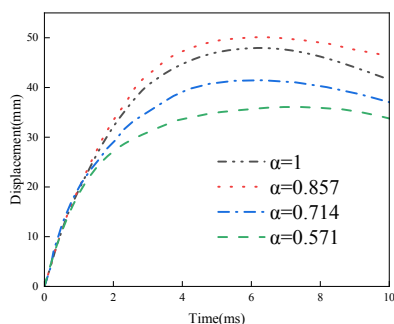


图 21 不同冲击位置 RC 梁跨中位移对比

Fig. 21 Comparison of mid span displacement of RC beams at different impact positions

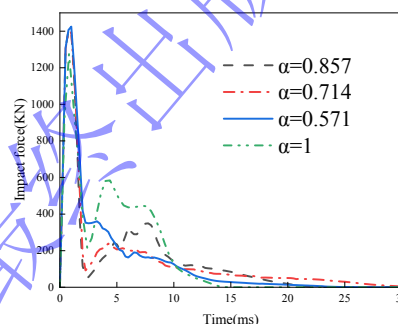


图 22 不同冲击位置 RC 梁冲击力对比

Fig. 22 Comparison of impact force of RC beams at different impact positions

#### 4.4 锤头形状的影响分析

本节建立 3 种不同的锤头形状（圆底矩形 impactor1、半球形 impactor2、圆柱形 impactor3）研究锤头形状对高温下 RC 梁抗冲击性能的影响，如图 23 所示。控制温度为 200℃，锤头质量为 393kg，冲击速度为 5m/s，图 24 给出了不同锤头形状的损伤云图对比。可以看出，圆底矩形和半球形锤头工况的损伤程度差别较小，都表现为 RC 梁跨中出现发展出斜向裂缝，而圆柱形锤头工况除在跨中发展出斜向裂缝外，还在跨中两侧底部发展出延伸至跨中顶部的长 45° 斜裂缝以及在 1/4 跨处出现发展不完全的斜裂缝。三种锤头形状下 RC 梁的跨中位移大致相同，如图 25 所示，而冲击力展现较大差距，圆柱形锤头冲击力急剧增大，然后迅速衰减至零；而圆底矩形和半球形锤头的冲击力则相对比较平缓，且二者的冲击力峰值也远小于圆柱形锤头，如图 26 所示。原因可能是圆底矩形（线接触）与半球形（点接触）锤头冲击能量主要通过冲击点下方的局部压溃和弯曲变形耗散。由于接触几何的对称性，应力波主要沿梁高向下传播，激发梁底受拉区开裂，形成斜向裂缝，而与点接触或横向线接触不同，圆柱锤头的纵向接触使得冲击能量沿梁长度方向扩散。能量不再集中于跨中单点耗散，而是向两侧传播，激发更远处的损伤。这解释了 1/4 跨处出现不完全斜裂缝的现象<sup>[30]</sup>。

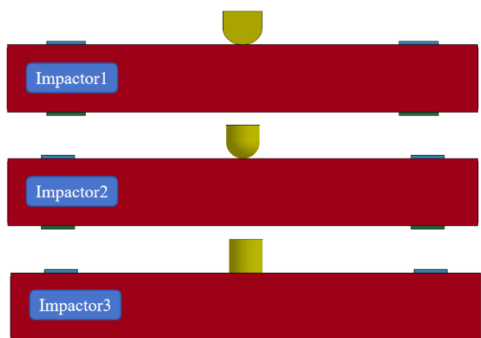


图 23 锤头形状示意图  
Fig. 23 Diagram of hammer shape

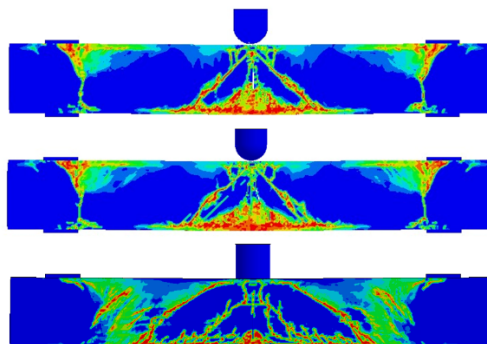


图 24 不同锤头形状 RC 梁损伤云图对比  
Fig. 24 Comparison of failure modes of RC beams with different hammer shapes

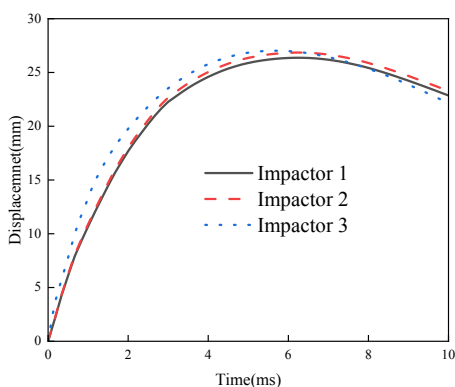


图 25 不同锤头形状跨中位移对比  
Fig. 25 Comparison of mid span displacement of different hammer shapes

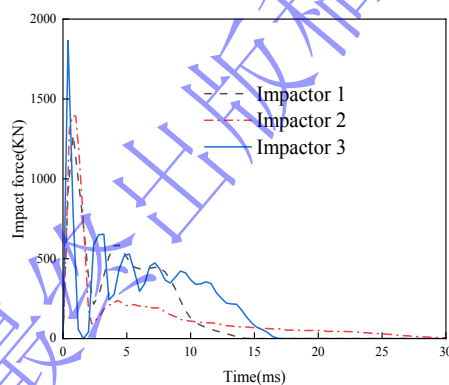


图 26 不同锤头形状冲击力对比  
Fig. 26 Comparison of impact force of different hammer shapes

## 5 结论

本文在已有试验的基础上采用 LS-DYNA 仿真软件对高温冲击作用下 RC 梁的冲击响应进行了数值模拟研究,总结了 4 种破坏模式,提出了高温冲击下 RC 梁损伤评定方法,并讨论了温度、跨高比、冲击位置、锤头形状对高温下 RC 梁抗冲击性能的影响规律,主要结论如下:

(1) 依据划分标准可将高温冲击下 RC 梁的破坏模式系统划分为:弯曲破坏、弯剪破坏、剪切破坏和冲切破坏。

(2) 提出了一种基于截面损伤因子  $D$  的损伤评定方法,当  $D=0-0.3$  时,RC 梁发生轻度损伤,当  $D=0.3-0.6$  时,RC 梁发生中度损伤,当  $D=0.6-0.9$  时,RC 梁发生重度损伤,当  $D=0.9-1.0$  时,RC 梁发生失效。拟合了  $D$  与温度、冲击高度之间的预测公式,给出了适用范围。

(3) 随着温度的升高,RC 梁跨中位移随之增大,冲击力随之降低,随着跨高比的增大,RC 梁跨中位移和冲击力都随之增大,且跨高比越大,跨中位移达到峰值的时间越后,相同冲击能量下,锤头在跨中冲击产生的跨中位移大于靠近支座冲击产生的跨中位移,而冲击力则相反,接触面为平面的锤头相较于接触面为曲面的锤头会对 RC 梁造成更大损伤。

## 参考文献

- [1] 张丛琨, 张仲昊, 汪维, 等. HTRB600 钢筋混凝土梁动态损伤机理和承载力研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2024, 37(06): 51-60.  
ZHANG C K, ZHANG Z H, WANG W, et al. Dynamic failure mechanism and flexural capacity of HTRB600 reinforced concrete beams[J]. Journal of Ningbo University(Natural Science & Engineering Edition) 2024, 37(06): 51-60.
- [2] 张丛琨, 张仲昊, 汪维, 等. 超高强钢筋混凝土梁在静态加载下的抗弯性能试验[J]. 兵工学报, 2023, 44(S1): 107-116.  
ZHANG C K, ZHANG Z H, WANG W, et al. Experimental Study on Bending Performance of Ultra-high Strength reinforced Concrete Beams under Static Loading[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(S1): 107-116.
- [3] Liang G C, Li H W, Chen W S, et al. Impact force frequency characteristics and their influence on damage modes of reinforced concrete beams [J]. International Journal of Impact Engineering, 2026, 209: 105584.
- [4] LIU C F, CHEN J Y, MA H F, et al. Research on flexural performance of prefabricated reinforced concrete composite beams based on fire test and numerical calculation [J]. Structures, 2025, 76: 108971.
- [5] 居敏悦, 毛小勇, 朱勇, 等. 高温下局部无黏结钢筋混凝土梁受弯性能研究[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2025, 38(03): 33-36.  
JU M Y, MIAO X Y, ZHU Y, et al. A study on the flexural performance of RC concrete beam with local unbonded rebar at elevated temperatures[J]. 2025, 38(03): 33-36.
- [6] 祝恩丛. 高温下梁端约束蜂窝组合梁受力性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.  
ZHU E C. Study on the stress performance of honeycomb composite beams with beam end constraints under high temperature [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023.
- [7] 何翥蕙. 高温高湿环境下 CFRP 布增强二次加载后钢筋混凝土梁力学性能分析[J]. 混凝土, 2025, (06): 73-79.  
HE Q H. Analysis of mechanical properties of reinforced concrete beams reinforced with CFRP sheets after secondary loading in high temperature and high humidity environment[J]. Concrete, 2025, (06): 73-79.
- [8] YANG J C, YAN K, DOH J H, et al. Experimental study on shear performance of ultra-high-performance concrete beams at elevated temperatures [J]. Engineering Structures, 2023, 291: 116304.
- [9] ZHANG Y P, WANG W J, MO Z L, et al. Comparative study on the post-fire impact resistance of steel fibre reinforced concrete beams under different cooling methods [J]. Construction and Building Materials, 2025, 500: 144109.
- [10] 钱凯, 王联刚, 黄楷铅, 等. 高温火灾后 RC 梁抗冲击性能数值模拟[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2022, 47(06): 1434-1445.  
QIAN K, WANG L G, HUANG K Q, et al. Numerical simulation of impact behavior of reinforced concrete beams after high temperature fire[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2022, 47(06): 1434-1445.
- [11] DAS A, BOSNJAK J, SHARMA A. Investigations on the effects of rebar diameter on the post-fire bond capacity of RC flexural members and development of a novel post-fire bond model [J]. Developments in the Built Environment, 2024, 20: 100536.
- [12] 魏朝园. 高温和冲击作用下钢筋混凝土梁动力性能数值分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.  
WEI C Y. Numerical analysis of dynamical behaviour of reinforced concrete beams under high temperature and impact load [D]. Beijing: Beijing University Of Technology, 2018.

- [13] 金浏, 兰钰昌, 张仁波, 等. 高温下/后钢筋混凝土梁抗冲击性能: 细观分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50(02): 120-130.  
JIN L, LAN Y C, ZHANG R B, et al. Impact resistances of RC beams at/after high temperature: Meso-scale analysis[J]. SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 2020, 50(02): 120-130.
- [14] 金浏, 张仁波, 徐建东, 等. 高温下钢筋混凝土梁抗冲击性能的细观数值分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(06): 651-661.  
JIN L, ZHANG R B, LAN Y C, et al. Mesoscale simulations of the impact resistance performance of reinforced concrete beams exposed to high temperature[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2018, 48(06): 651-661.
- [15] 刘才玮, 杨蒙, 李康, 等. 不同冷却方式下受火钢筋混凝土梁抗弯性能研究[J]. 工程科学与技术, 2024: 1-15.  
LIU C W, YANG M, LI K, et al. Research on flexural performance of RC beams subjected to fire under different cooling methods[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024: 1-15.
- [16] 齐宝欣, 李宜人. PVA-ECC-钢筋复合梁抗冲击的影响因素及破坏特性研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(02): 236-244.  
QI B X, LI Y R. Influence factors and failure characteristics of impact resistance of PVA-ECC-reinforced composite beams[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Social Science), 2022, 38(02): 236-244.
- [17] 张威振. 高温后钢筋混凝土梁的试验及有限元分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(04): 181-184.  
ZHANG Z W. Experimental investigation and FEM analysis on simple reinforced concrete beams after elevated temperature[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(04): 181-184.
- [18] LI L, Wang H W, Wu J, et al. Experimental and numerical investigation on impact dynamic performance of steel fiber reinforced concrete beams at elevated temperatures [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 47: 103841.
- [19] 张仲昊, 汪维, 张国凯, 等. 不同高温作用后混凝土劣化损伤性能[J]. 兵工学报, 2023, 44(S1): 152-159.  
ZHANG Z H, WANG W, ZHANG G K, et al. Study on deterioration and damage performance of concrete at different high temperatures[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(S1): 152-159.
- [20] F MOHEE. The Effects of Strain Rate on Concrete Strength under Dynamic Impact Load [J]. Journal of Bangladesh Electronics Society, 2016, 16: 2-17.
- [21] 过镇海. 钢筋混凝土的高温性能及其计算 [M] 北京: 清华大学出版社, 2003.  
GUO Z H. High temperature performance and calculation of reinforced concrete [M] Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [22] 徐明, 王韬, 陈忠范. 高温后再生混凝土单轴受压应力-应变关系试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(02): 158-164.  
XU M, WANG T, CHEN F Z. Experimental research on uniaxial compressive stress-strain relationship of recycled concrete after high temperature[J]. 2015, 36(02): 158-164.
- [23] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能 [M] 北京: 科学出版社, 2003.  
WU B. Mechanical properties of reinforced concrete structures after fire [M] Beijing: Science Press, 2003.
- [24] YANG C., JIA X., HUANG Z., et al. Damage of full-scale reinforced concrete beams under contact explosion [J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 163.
- [25] 宋敏, 王志勇, 闫晓鹏, 等. 落锤冲击下钢筋混凝土梁响应及破坏的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2018, 32(03): 60-67.  
SONG M, WANG Z Y, YAN X P, et al. Numerical simulation of reesponse and failure modes of reinforced concrete beams under drop-weight impact loadings[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(03): 60-67.
- [26] 钱凯, 翁运昊. ANSYS/LS-DYNA 在混凝土结构工程中的应用 [M] 北京: 机械工业出版社, 2020.

- QIAN K, WENG Y H. Application of ANSYS/LS-DYNA in concrete structure engineering [M] Beijing: China Machine Press, 2020.
- [27] 宋春明, 钟家和, 徐吉威, 等. 钢筋混凝土梁冲击动力响应和破坏模式转化试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(01): 132-150.
- SONG C M, ZHONG J H, XU J W, et al. Experimental study on dynamic response and failure mode transformation of reinforced concrete beams under impact[J]. Explosion and impact, 2024, 44(01): 132-150.
- [28] LI J, ZHANG R B, JIN L, et al. Peak displacement scaling effects in RC beams under varying impact velocities: Experiment, simulation, and prediction [J]. International Journal of Impact Engineering, 2025, 206: 105446.
- [29] 耿佳. 冲击荷载作用下钢筋混凝土梁的尺寸效应研究[D]. 济南: 济南大学, 2020.
- GEN J. The study of the size effect on reinforced concrete beam under impact loading [D]. Jinan: Jinan university, 2020.
- [30] ZHANG Q L, YUAN R F, WANG D C, et al. The impact fracture characteristics of concrete slabs under different hammerhead shapes, impact velocities and concrete strengths [J]. Construction and Building Materials, 2023, 392: 131919.

最新录用, 非最终出版稿

## Damage Assessment and Study Of Influencing Factors in Reinforced Concrete Beams under Combined High Temperature and Impact

OUYANG Xin<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>, LIU Jiening<sup>1</sup>, ZHOU Yongwang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education, Ningbo University,  
Ningbo 315211, Zhejiang, China;

2. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan 430056, Hubei,  
China)

**Abstract:** To study the impact resistance performance of reinforced concrete (RC) beams under high temperature and impact loading, a numerical model of RC beams under high temperature was established using LS-DYNA software based on existing experiments, and the validity of the numerical model was verified. Based on the numerical model, four failure modes of RC beams under high temperature and impact loading were summarized. The section damage factor  $D$  was introduced to evaluate the damage degree of RC beams under high temperature, and a predictive formula for the section damage factor in relation to impact height and temperature was fitted. The influence of temperature, beam span, impact location, and hammer shape on the impact resistance performance of RC beams under high-temperature conditions was analyzed. The results show that as the temperature increases, the mid span displacement of RC beams increases, while the impact force decreases. The larger the span to height ratio, the longer it takes for the mid span displacement to reach its peak. Under the same impact energy, the mid-span displacement caused by impact at the mid-span is greater than that caused by impact near the supports. Furthermore, hammerheads with flat contact surfaces cause greater damage to RC beams compared to those with curved contact surfaces.

**Keyword:** reinforced concrete beam; high temperature; impact load; impact resistance