DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0422-07

混凝土抗折动强度及其极值研究*

党发宁[1],焦 凯[1,2],潘 峰[1]
(1.西安理工大学土木建筑工程学院,陕西 西安 710048;
2.中国水利水电第三工程局有限公司,陕西 西安 710016)

摘要:混凝土类不均匀脆性材料的率敏感性主要是由于混凝土的不均匀性造成的,不均匀性使得不同速率的动裂纹发展路径不同,决定了不同速率的抗折动强度不同。基于此,提出混凝土抗折动强度由砂浆与骨料的抗折静强度的加权平均值再加上惯性项组成的代数表达式,并预测混凝土材料在爆炸冲击荷载条件下的极限抗折动强度。最后通过特殊设计的单一菱形净浆骨料三点弯实验,验证了不同加载速率时破坏裂纹的发展路径及抗折动强度变化规律。

关键词:固体力学;不均匀性;抗折动强度;冲击荷载;率效应
中图分类号:O347;TU435 **国标学科代码**:13015 **文献标志码**:A

混凝土作为主要的建筑材料,其动态力学性能对于建筑物抗震和安全防护具有重要意义。戚承志等[1]认为随着加载速率的逐渐增加,材料的宏观粘性阻尼机制出现,并逐渐占据主导地位,材料的惯性影响也逐渐明显。丁卫华等[2]认为混凝土动态强度提高的细观机理是动压条件下混凝土裂纹起裂点多,裂纹演化速度快造成的。S. A. Kaplan[3]认为由于自由水黏性作用,在高加载速率时孔隙水压力将增大,这将延迟固相中过量裂纹的发生,抗压强度增加。李庆斌等[4]提出混凝土强度是材料的固有属性,与加载速率无关,但由于动力荷载下混凝土中自由水分粘性和惯性的影响,使得实验中观察到混凝土的宏观强度随加载速率的增加而增大。马怀发等[5-6]提出在动载作用下混凝土材料变形滞后所产生的损伤滞后最终表现为应变率的强化效应。梁昕宇等[7]从起裂点数目和位置考虑得出静力计算时裂纹追随结构最弱方向发展,动力计算裂纹追随能量释放最快路径发展的观点。杜成斌等[8]认为当应变率大于 8 s^{-1}时材料惯性对全级配混凝土强度的动力增强因子影响增大,且应变速率越高其影响越大。秦川等[9]指出在高应变率条件下,更加分散的裂纹形态与能量需求的增加是导致混凝土动强度提高的主要机理。严成等[10]通过解析研究得到材料动态强度的应变率效应具有明显的结构响应特征。

学者们对不同速率荷载下混凝土动强度提高幅值的研究较多,但对引起静动强度差异的机理研究较少,原因在于基于实验测定的动强度是各种影响因素的耦合结果,无法在结果中将各因素解耦。对加载速率较高如导弹冲击荷载作用下的动强度则受实验设备的限制,鲜有问津。本文中认为混凝土类不均匀脆性材料的率敏感性主要是由于混凝土的不均匀性造成的,不均匀性使得不同速率的动裂纹发展路径不同,决定了不同速率的动强度不同。基于以上原理提出混凝土抗折动强度的代数表达式,探讨了混凝土材料在爆炸冲击荷载条件下的极限抗折动强度,并进行实验初步验证了理论的正确性。

1 混凝土抗折动强度提高的机理及解析理论

1.1 混凝土抗折动强度提高的机理

混凝土梁动态破坏时,材料内部的应变能积聚速度很快,应变能需要在瞬间得到释放,裂纹沿着能量释放最短路径向前发展,这时的裂纹穿过材料的部分高强度区(如混凝土中的骨料),使得材料的抗折

* **收稿日期**:2014-08-18;**修回日期**:2014-12-02
基金项目:水利部公益性行业科研专项基金项目(201501034-04);
陕西省科技统筹创新工程重点实验室基金项目(2014SZS15-Z01)
第一作者:党发宁(1962—),男,博士,教授,dangfn@mail.xaut.edu.cn。

动强度高于抗折静强度，且动态破坏时，加载的速率越高，应变能积聚的速度越快，应变能需要释放的速度也越快，能量释放形成的裂纹路径越短，裂纹穿过材料高强度区的能力越强，抗折动强度越高，破坏路径呈现出速率相关效应，因此称其为动态破坏能量释放率相关原理。当动载的加载速率较小时，抗折动强度提高的原因主要由于裂纹由穿越薄弱面转化为穿越高强度区引起，惯性力的贡献很小；当动载的加载速率较大时，抗折动强度提高的主要原因转化为惯性力的贡献；当裂纹面平直的穿越了材料的高强度区时，加载速率再提高，不均匀性对材料的抗折动强度提高的贡献就消失了，这时，就只有惯性力对抗折动强度的提高有贡献。因此，这类材料的抗折动强度提高是由不均匀性和惯性联合作用的结果。

1.2　断口的粗糙度对宏观均质脆性材料抗折静、动强度的影响

对混凝土类材料的抗折动强度提高机理研究限于细观力学尺度，在这一尺度上，岩石、混凝土中的砂浆(mortar)、骨料(aggregate)等均可看成是均质材料。假设有图 1 所示的理想抗折静强度为 R' 的宏观均质脆性材料三点弯曲梁，理想状态下，梁的破坏面是过中间横截面且面积为 $S=b\times h$ 的平面。实际中无论是岩石、纯砂浆从细观或微观看总是不均匀的，造成断口粗糙且不是平面，假设断口的实际面积为 S_r，定义 $\delta=S_r/(b\times h)=S_r/S$ 为断口的粗糙度，则实际测定的材料抗折静强度为：

$$R_s=\frac{R'S_r}{S}=\delta R' \tag{1}$$

均质脆性材料的抗折动强度主要由抗折静强度项和材料惯性力项组成，由于抗折实验中极限破坏荷载 F 与抗折静强度为 R_s 的换算关系为 $R_s=\dfrac{FL}{bh^2}$，因此，此类材料的抗折动强度可表示为抗折静强度与惯性项之和：

$$R_d=R_s+\frac{m\ddot{u}L}{bh^2}=\frac{R'S_r}{S}+\frac{m\ddot{u}L}{bh^2} \tag{2}$$

式中：u 是梁的挠度，$\ddot{u}$ 为梁加载时的动力响应加速度，m 是梁的质量，$m\ddot{u}$ 为梁所受的惯性力；L 为梁在 2 个支点间的距离。

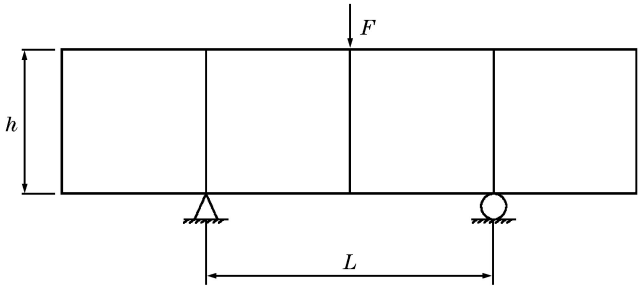

图 1　理想均质脆性材料三点弯曲实验示意图

Fig. 1　A schematic diagram for three-point-bending test of ideal homogeneous brittle materials

1.3　不均匀性对脆性材料抗折静、动强度的影响

设有图 2 所示的由抗折静强度为 $R_{s,m}$ 的砂浆材料和抗折静强度为 $R_{s,a}$ 的骨料材料组成的理想不均匀材料三点弯曲实验模型，其中 $R_{s,m}<R_{s,a}$(这里假设骨料的抗折静强度足够大，可以使得静态加载时裂纹从骨料的边沿绕过骨料发展而不穿过骨料)。图 2 中的 4 条裂纹分别是设想的在 4 种不同加载速率下产生的，最右端 1 条对应的是静载荷，右数第 2、3、4 条裂纹对应的是加载速率依次提高时的结果。对于不同裂纹来说，其处于砂浆区的面积和处于骨料区的面积不同，这 2 个面积的相对大小与材料的应变率相关。因此，可以将裂纹处于砂浆区和骨料区的面积分别记为 $S_m(\dot{\varepsilon})$ 和 $S_a(\dot{\varepsilon})$。根据前文的分析，对于混凝土材料而言，材料抗折动强度的提高是由不均匀性和惯性力引起的提高值联合作用的结果，因此，不均匀脆性材料的抗折动强度可表达为砂浆、骨料的抗折静强度加权平均值与惯性项之和，此时的权重分别为裂纹处于砂浆和骨料区的面积占总面积的比例：

$$R_d=\frac{R_{s,m}S_m(\dot{\varepsilon})+R_{s,a}S_a(\dot{\varepsilon})}{S}+\frac{m\ddot{u}L}{bh^2} \tag{3}$$

下面对该公式在不同工况下的适应性进行分析：

(1)当材料受到静载荷作用时，裂纹绕骨料发展，如图 2 中所示的裂纹 1，材料的响应加速度 $\ddot{u}=0$、应变率 $\dot{\varepsilon}=0$，这使得骨料区的裂纹面积为 $S_{\mathrm{a}}(0)=0$，此时不均匀脆性材料的抗折动强度等于抗折静强度，由式(1)、(3)可得：

$$R_{\mathrm{s}}=\frac{R_{\mathrm{s,m}}S_{\mathrm{m}}(0)}{S}=\delta_{\mathrm{m}}R_{\mathrm{s,m}} \tag{4}$$

由于骨料的影响，静裂纹需要绕过骨料发展，此时的 $S_{\mathrm{m}}(0)$远大于无骨料的均质脆性材料时的裂纹面积 S，$R_{\mathrm{s}}=\delta_{\mathrm{m}}R_{\mathrm{s,m}}>\delta R_{\mathrm{s,m}}$，$\delta_{\mathrm{m}}>\delta$，很好地解释了混凝土的抗折静强度大于砂浆抗折静强度的原因。

(2)当材料受到动载荷作用时，$\ddot{u}\neq 0$，裂纹切割骨料发展，$S_{\mathrm{a}}(\dot{\varepsilon})\neq 0$，此时不均匀脆性材料的抗折动强度介于 $R_{\mathrm{s,m}}+\dfrac{m\ddot{u}L}{bh^2}$ 和 $R_{\mathrm{s,a}}+\dfrac{m\ddot{u}L}{bh^2}$ 之间；不同加载速率下，图 2 中所示的裂纹 3 大于裂纹 2 时，即 $\dot{\varepsilon}^{(3)}>\dot{\varepsilon}^{(2)}$ 时，$S_{\mathrm{m}}^{(3)}<S_{\mathrm{m}}^{(2)}$，$S_{\mathrm{a}}^{(3)}>S_{\mathrm{a}}^{(2)}$，但由于 $R_{\mathrm{s,m}}\ll R_{\mathrm{s,a}}$，且 $\ddot{u}^{(3)}>\ddot{u}^{(2)}$，因此由式(3)可得：

$$\frac{R_{\mathrm{s,m}}^{(3)}S_{\mathrm{m}}^{(3)}(\dot{\varepsilon})+R_{\mathrm{s,a}}^{(3)}S_{\mathrm{a}}^{(3)}(\dot{\varepsilon})}{S}+\frac{m\ddot{u}L}{bh^2}>\frac{R_{\mathrm{s,m}}^{(2)}S_{\mathrm{m}}^{(2)}(\dot{\varepsilon})+R_{\mathrm{s,a}}^{(2)}S_{\mathrm{a}}^{(2)}(\dot{\varepsilon})}{S}+\frac{m\ddot{u}L}{bh^2} \tag{5}$$

即 $R_{\mathrm{d}}^{(3)}>R_{\mathrm{d}}^{(2)}$，说明加载速率越大，材料的抗折动强度越大，而且速率效应出现早期的材料抗折动强度提高主要依靠裂纹面切割骨料的面积增大(或者依靠穿越高强度区的面积增大)获得。

(3)当动载荷的速率足够大时，裂纹由试件中心垂直向上发展，如图 2 中的裂纹 4，破坏路径达到最短，将这一加载的临界应变率记为 $\dot{\varepsilon}^{(\mathrm{cr})}$，这是发挥骨料抗折动强度的极限应变率。材料的应变率超过以上临界值，即 $\dot{\varepsilon}>\dot{\varepsilon}^{(\mathrm{cr})}$ 时，由式(3)可得此时的抗折动强度表达式为：

$$R_{\mathrm{d}}^{(\mathrm{cr})}=\frac{R_{\mathrm{s,m}}S_{\mathrm{m}}^{(\mathrm{cr})}(\dot{\varepsilon})+R_{\mathrm{s,a}}S_{\mathrm{a}}^{(\mathrm{cr})}(\dot{\varepsilon})}{S}+\frac{m\ddot{u}L}{bh^2} \tag{6}$$

即不均匀脆性材料如混凝土的抗折动强度为砂浆的抗折静强度与骨料的抗折静强度的加权平均值再加上惯性项，此时权的大小等于混凝土中的砂浆率和骨料率。若混凝土的体积骨料率为 x，则该混凝土在受到导弹等高速冲击荷载作用时所能发挥的极限抗折动强度可用下式计算：

$$R_{\mathrm{d}}^{(\mathrm{cr})}=R_{\mathrm{s,m}}(1-x)+R_{\mathrm{s,a}}x+\frac{m\ddot{u}L}{bh^2} \tag{7}$$

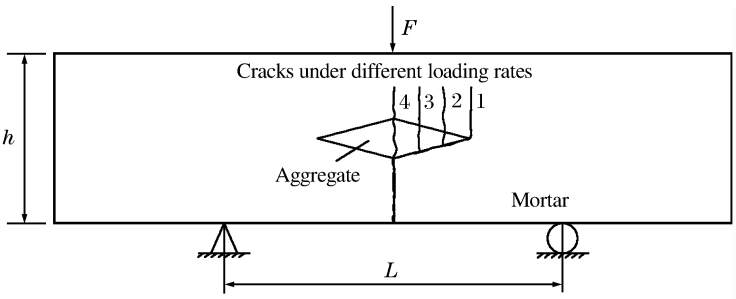

图 2 理想不均匀材料三点弯曲裂纹模型示意图

Fig. 2 A schematic diagram for ideal three-point bending crack model of uneven materials

2 冲击荷载作用下混凝土的极限抗折动强度

冲击荷载的主要类型包括：汽车冲击荷载、飞机冲击荷载、导弹冲击荷载以及高超音速飞行器冲击荷载，假定高超音速飞行器的冲击荷载即为本文中认为的极限速率荷载。

2.1 各种冲击荷载简介

2.1.1 汽车冲击荷载

根据《GB50009-2012 建筑结构荷载规范》汽车撞击荷载为 $p_{\mathrm{k}}=\dfrac{mv}{t}$，$m$ 为汽车质量，本文取为15 t；v 为汽车的行车速度，取为 22.2 m/s；假定汽车撞击的接触时间为 $t=1$ s，并假定材料响应的加速度等

于施加荷载物的加速度，则材料响应加速度 $\ddot{u}=22.2\ \mathrm{m/s^2}$。

2.1.2 飞机撞击荷载

以撞击世贸大厦的机型波音 767 为例，其巡航速度为 $0.8Ma$，约 272 m/s，假定接触时间 $t=1$ s，则材料响应加速度 $\ddot{u}=272\ \mathrm{m/s^2}$。

2.1.3 导弹撞击荷载

导弹的速度约为 $3Ma$，约 1 021 m/s，仍假定接触时间 $t=1$ s，对应的加速度 $\ddot{u}=1\ 021\ \mathrm{m/s^2}$。

2.1.4 高超音速飞行器撞击荷载

高超音速飞行器 X-43A 的速度约为 $7Ma$，约 2 400 m/s，假定接触时间 $t=1$ s，对应的加速度 $\ddot{u}=2\ 400\ \mathrm{m/s^2}$。

2.2 冲击荷载作用下混凝土的极限抗折动强度

按照小湾拱坝工程实际混凝土优化配合比（1 $\mathrm{m^3}$ 混凝土中水为 104 kg、水泥为 173.3 kg、粉煤灰为 74.3 kg、砂为 638.3 kg、石为 1 464.5 kg），采用粒径为 5～20 mm，代表粒径为 13.5 mm 的一级配骨料，骨料密度为 2 800 $\mathrm{kg/m^3}$，砂浆的密度为 2 400 $\mathrm{kg/m^3}$，进行混凝土抗折静、动强度实验，混凝土各相组分材料参数如表 1，其中 E 为材料的弹性模量，ν 为泊松比，实验测得的混凝土实际抗折静强度为 3.58 MPa；应变率为 $1\times10^{-4}\ \mathrm{s^{-1}}$ 时，抗折动强度提高 1.33 倍；应变率为 $1\times10^{-3}\ \mathrm{s^{-1}}$ 时，抗折动强度提高 1.38 倍。根据混凝土配合比可计算出其骨料率 $x=62.3\%$。

表 1 混凝土各相组分材料参数

Table 1 The parameters of concrete materials

材料	E/GPa	ν	R_s/MPa
骨料	58.731	0.241	9.25
砂浆	17.458	0.196	2.78
粘结界面	13.967	0.200	1.56

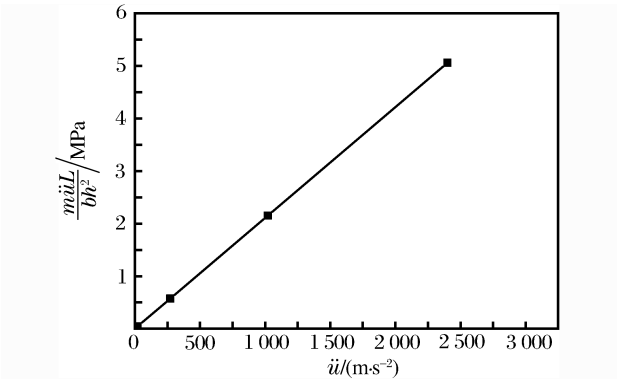

图 3 惯性引起的混凝土抗折动强度

Fig. 3 The improvement of concrete dynamic flexural strength caused by the inertia

不同冲击荷载作用下运用抗折动强度式(3)计算的惯性引起的混凝土抗折动强度如图 3 所示。按此高超音速飞行器的撞击加速度计算惯性力项时，惯性力对抗折强度的贡献值是混凝土的抗折静强度的 1.41 倍；假定裂纹平直展开，穿过了所有骨料，则骨料与砂浆对抗折动强度的贡献为：

$$R_{\mathrm{d}}^{(\mathrm{cr})}=R_{\mathrm{s,m}}(1-x)+R_{\mathrm{s,a}}x=6.81\ \mathrm{MPa} \tag{8}$$

高超音速飞行器的撞击产生的混凝土抗折动强度惯性项为 5.058 MPa，抗折动强度总值为 11.87 MPa，是抗折静强度 3.58 MPa 的约 3.32 倍。可见在高超音速飞行器冲击荷载作用下，混凝土的抗折动强度提高幅值是很大的。

2.3 骨料率对混凝土冲击抗折动强度的影响

根据式(7)可以分析骨料率对混凝土抗折动强度的影响规律。分别采用骨料率为 20%、30%、40%、50%、60%、70%和 80%进行计算，得到骨料全裂开时不同骨料率对混凝土抗折动强度的影响规律（未计入惯性影响），如图 4 所示。

3 混凝土抗折动强度理论的实验验证

为了验证理论的正确性，采用特殊设计的三点弯实验对理论进行验证，试件采用 100 mm×100 mm×400 mm 的长方体试件，在梁的中部设置 1 个菱形骨料。菱形骨料的尺寸是根据砂浆和骨料的抗折强度计算确定的，其目的是保证静载实验时裂纹面绕骨料发展，以便验证动载速率越高裂纹穿过

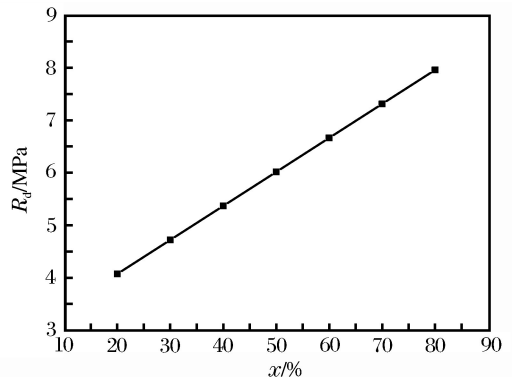

图 4 混凝土抗折动强度和骨料率的关系

Fig. 4 Relationship between dynamic flexural strength and aggregate ratio of concrete

骨料的能力越强，如图 5 所示。骨料采用净浆人工制备，净浆骨料和砂浆的抗压强度分别为 98.3 和 11.9 MPa，抗折静强度分别为 11.5 和 2.9 MPa，净浆骨料和砂浆中水和水泥质量之比分别为 0.30 和 0.84，龄期分别为 60 和 3 d。

实验仪器采用美特斯 SHT4305 伺服式万能试验机。分别采用 0.1 和 140 mm/min 的速率进行加载实验。由图 6中实验结果可以看出，试件的破坏形态表现为裂纹从试件底部生成并逐渐向上发展，当裂纹到达骨料时，裂纹沿骨料和砂浆的交界面开裂。4 个试件的实验数据汇总如图 7 所示，图 7 中 1～4 号试件的破坏荷载分别为 7.043、8.652、9.057 和 8.141 kN，平均值为 8.22 kN。从加载开始至峰值点所消耗的应变能分别为 2 507、3 241、3 520、3 100 N·mm，平均值为 3 092 N·mm。

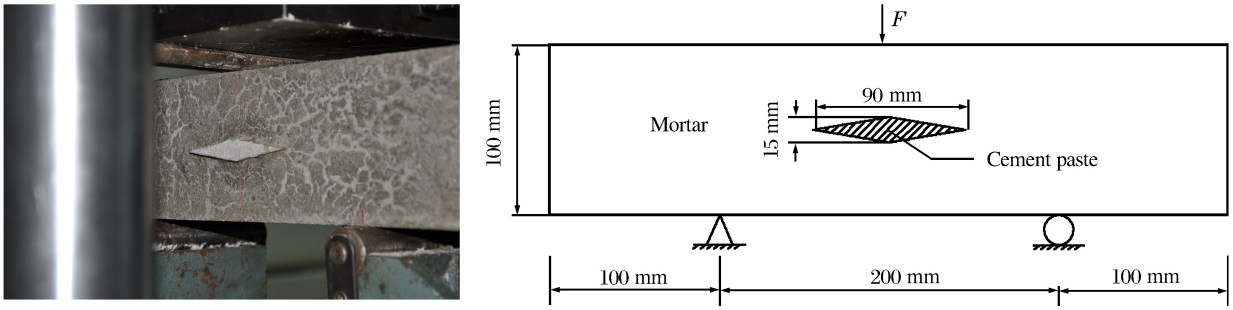

图 5 三点抗弯实验加载和试件尺寸示意图

Fig. 5 Schematic diagrams for the three-point-bending test and specimen sizes



图 6 慢速加载试件破坏形态图

Fig. 6 Failure maps at a low loading rate

快速加载时破坏的形态见图 8 所示，由图 8 试件破坏形态可以看出，试件的破坏形态表现为裂纹从试件底部生成并逐渐向上发展，裂纹切断骨料沿试件中部贯穿。将 5 个试件的实验数据汇总见图 9 所示。由 1～5 号试件的荷载位移关系曲线可以看出，试件的破坏荷载离散性较小，破坏荷载分别为 9.363、9.376、9.142、9.632、9.952 kN，平均破坏荷载为9.49 kN，快速加荷是慢速加荷破坏荷载的 1.15 倍。从加载开始至峰值点对应的应变能分别为 3 715、3 765、4 088、4 304、4 299 N·mm，平均值为 4 034 N·mm，快速加荷是慢速加荷破坏应变能的 1.3 倍。

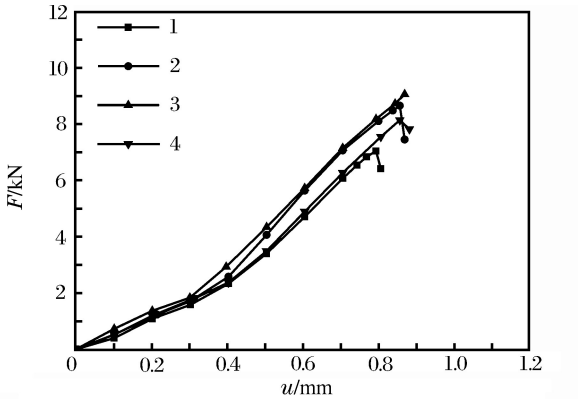

图 7 慢速加载下荷载位移曲线图

Fig. 7 Load-displacement curves at a low loading rate



图 8 快速加载试件破坏形态图

Fig. 8 Failure maps at a high loading rate

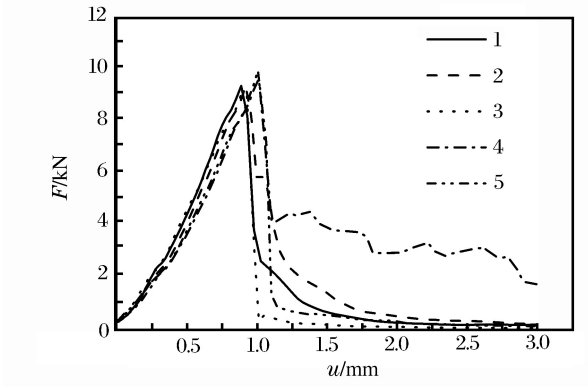

图 9 快速加载下荷载位移曲线图

Fig. 9 Load-displacement curves at a high loading rate

4 结　论

(1)动力加载至破坏时，动态裂纹追随能量释放最短路径发展，裂纹由穿越薄弱面转化为穿越高强度区，需要的能量更大。因此，材料的抗折动强度大于抗折静强度，而且加载速率越大抗折动强度越高，材料的不均匀性是抗折动强度提高的主要根源。

(2)当动载的加载速率较小时，抗折动强度提高的原因主要由于裂纹由穿越薄弱面转化为穿越高强度区引起，惯性的影响较小；当动载的加载速率充分大，裂纹面平直的穿越了材料的高强度区时，不均匀性对材料抗折动强度的贡献就消失了，这时就只有惯性力对抗折动强度的提高有贡献了。因此，这类材料的抗折动强度提高是由不均匀性引起的提高值和惯性力引起的提高值联合作用的结果。

(3)在以上理论分析的基础上，本文中给出了能够同时考虑材料的不均匀性和惯性力对强度贡献的抗折动强度解析表达式，针对不同加载速率阶段讨论了该式的适应性，通过特殊设置的试样验证了新提出的理论的正确性。

参考文献：

[1] 戚承志，钱七虎. 岩石等脆性材料动力强度依赖应变率的物理机制[J]. 岩石力学与工程学报，2003，22(2)：177-181.
Qi Chengzhi, Qian Qihu. Physical mechanism of dependence of material strength on strain rate for rock like material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 177-181.

[2] 丁卫华，陈厚群，刘少聪，等. 基于 CT 的混凝土动力破坏过程的试验研究[J]. 水力发电，2009，35(5)：21-23.
Ding Weihua, Chen Houqun, Liu Shaocong, et al. Test and study on dynamic damage process of concrete based on computed tomography[J]. Water Power, 2009, 35(5): 21-23.

[3] Kaplan S A. Factors affecting the relationship between rate of loading and measured compressive strength of concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1980, 32(111): 79-88.

[4] 李庆斌，郑丹. 混凝土动力强度提高的机理探讨[J]. 工程力学，2005，22(S1)：188-193.
Li Qingbin, Zheng Dan. Micro-mechanism on the enhancement of dynamic strength for concrete[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(S1): 188-193.

[5] 马怀发，王立涛，陈厚群，等. 混凝土动态损伤的滞后特性[J]. 水利学报，2010，41(6)：659-664.
Ma Huaifa, Wang Litao, Chen Houqun, et al. Mechanism of dynamic damage delay characteristic of concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6): 659-664.

[6] 马怀发，陈厚群，徐树峰. 预静载作用下混凝土动态强度数值分析[J]. 水利学报，2012(S1)：37-45.
Ma Huaifa, Chen Houqun, Xu Shufeng. Numerical analysis of concrete dynamic strength with static preload[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012(S1): 37-45.

[7] 梁昕宇,党发宁,田威,等.不同加载率对混凝土试件动力特性的影响研究[J].水力发电学报,2009,28(5):35-40.
Liang Xinyu, Dang Faning, Tian Wei, et al. Dynamic property influences and studies of concrete cylinder at different loading rates[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009,28(5):35-40.

[8] 杜成斌,孙立国,江守燕,等.全级配混凝土梁动强度提高机理研究[J].河海大学学报:自然科学版,2012,40(3):294-299.
Du Chengbin, Sun Liguo, Jiang Shouyan, et al. Dynamic strength enhancement mechanism of a fully-graded concrete beam[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012,40(3):294-299.

[9] 秦川,武明鑫,张楚汉.混凝土冲击劈拉实验与细观离散元数值仿真[J].水力发电学报,2013,32(1):196-205.
Qin Chuan, Wu Mingxin ,Zhang Chuhan. Impact splitting tensile experiments of concrete and numerical modeling by meso-scale discrete elements[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013,32(1):196-205.

[10] 严成,欧卓成,段卓平,等.脆性材料动态强度应变率效应[J].爆炸与冲击,2011,31(4):423-427.
Yan Cheng, Ou Zhuocheng, Duan Zhuoping, et al. Strain-rate effects on dynamic strength of brittle materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(4):423-427.

Investigation on concrete dynamic bending intensity and limit flexural intensity

Dang Faning[1], Jiao Kai[1,2], Pan Feng[1]

(1. *School of civil Engineering and architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048, *Shaanxi, China*;
2. *Sinohydro Bureau* 3 *Co. Ltd., Xi'an* 710016, *Shaanxi, China*)

Abstract: The rate sensitivity of concrete-like brittle materials results mainly from their inhomogeneity, which leads to their different paths of crack development at different load rates and accounts for their different dynamic flexural strengths. On the basis of the above theoretical analysis, this paper presents the algebraic expression of the dynamic flexural strength, which consists of the weighted average of the flexural strength of mortar and aggregate and the inertia term, predicts the limit flexural intensity of concrete materials under different impact loads and, finally, investigates their crack paths and intensity variations at different loading rates by the three-point bending beam test with a special rhombus aggregate.

Key words: solid mechanics; inhomogeneity; dynamic bending intensity; impact load; rate effect

(责任编辑 王易难)