DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0428-09

综合考虑宏细观缺陷的岩体动态损伤本构模型*

张力民[1,2],吕淑然[3],刘红岩[4,5,6]

(1.北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083;
2.河北承德钢铁公司,河北 承德 067000;
3.首都经济贸易大学安全与环境工程学院,北京 100026;
4.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083;
5.西藏大学工学院,西藏 拉萨 850000;
6.中国地质大学(北京)国土资源部深部地质钻探技术重点实验室,北京 100083)

摘要:针对节理岩体同时含有节理、裂隙等宏观缺陷及微裂隙、微孔洞等细观缺陷的客观事实,提出了在节理岩体动态损伤本构模型中应同时考虑宏细观缺陷的观点。为此,首先对基于细观动态断裂机理的经典岩石动态损伤本构模型—TCK(Taylor-Chen-Kuszmaul)模型进行了阐述,其次基于 Lemaitre 等效应变假设推导了综合考虑宏细观缺陷的复合损伤变量(张量),进而在此基础上建立了相应的节理岩体动态损伤本构模型,并利用该模型讨论了载荷应变率及节理条数对岩体动态力学特性的影响规律。结果表明,在不同载荷应变率下试件在变形初始阶段是重合的,而后随着应变的增加,试件峰值强度、峰值应变及总应变均随载荷应变率的增加而增加;随着节理条数的增加,试件峰值强度逐渐降低,但降低趋势逐渐变缓并趋于某一定值。上述研究结论与目前的理论及实验研究结果的基本规律是一致的,说明了本模型的合理性。

关键词:爆炸力学;动态损伤本构模型;宏观缺陷;细观缺陷;动态断裂机理;复合损伤变量;节理岩体

中图分类号:O383;TJ410.33　　**国标学科代码**:13035　　**文献标志码**:A

自然界中的岩体是由节理、裂隙等宏观地质结构面和被其切割而成的岩石块体所组成,而宏观完整岩石又是由多种矿物颗粒胶结而成,因此其内部必然存在大量的微裂纹、微孔洞等细观缺陷。所以岩体是同时含有微裂纹、微孔洞等细观缺陷(细观损伤)及节理、裂隙等宏观缺陷(宏观损伤)的复合损伤地质材料,这两类损伤也分别以不同的作用机理对岩体力学特性产生影响。基于岩石爆破的实际需要,B. Budiamsky 等[1]采用细观力学对岩石中弥散分布的裂纹群进行了分析,并建立了相应的岩石爆破损伤模型,该模型也成为岩石爆破理论模型乃至整个岩石动力学模型的发展方向之一。D. E. Grady 等[2]认为岩石中含有大量服从双参数 Weibull 分布的原生裂纹,在外载下,其中一些裂纹被激活并扩展,由此提出了岩石爆破各向同性损伤模型,即 GK 模型。L. M. Taylor 等[3]引进 R. J. O'connell 等[1]的有效体积模量和泊松比与微裂纹密度的关系表达式和 D. E. Grady 等[2]给出的碎块尺寸表达式,建立了损伤变量与裂纹密度之间的关系式,并将损伤变量以率形式耦合到动态本构方程中从而建立了著名的 TCK 模型。而后,又有不少学者从岩石的细观动态断裂角度提出了多种损伤本构模型[4-7]。

上述本构模型由于没有考虑岩体中存在的节理、裂隙等宏观缺陷,因此仅能用于描述宏观上相对完整的岩石。为此,不少学者基于波传播理论对节理岩体的动态损伤本构模型进行了研究,如 Li Jianchun 等[8]基于粘弹性理论,提出了含 1 组平行节理的岩体动态等效连续介质模型。李宁等[9]通过分析单组裂隙细观特征对应力波传播特性的影响机理,提出了表达裂隙细观特征对波速影响的半连续介质

* **收稿日期**:2013-10-30;**修回日期**:2013-12-20
基金项目:国家自然科学基金项目(41002113,41162009);教育部科学技术研究重点项目(211175);
中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010ZY45);
2011 年度北京市属高等学校人才强教深化计划人才创新团队项目(PHR201107143)
第一作者:张力民(1970—),男,博士;**通讯作者**:刘红岩,lhyan1204@126.com。

动力损伤模型。但是上述 2 种模型虽然考虑了节理等宏观缺陷，但是却没有同时考虑存在于完整岩块内部的微裂隙等细观缺陷，而微裂隙等细观缺陷是不会因为节理等宏观缺陷的存在而消失。因此迄今为止，理论界还没有提出一种能够同时反映上述 2 种不同尺度缺陷对岩体力学性质影响的动态损伤本构模型。而相关实验表明[10]岩体内同时存在的宏细观损伤均对岩体的力学性质产生影响，且它们之间还可能存在着复杂的相互作用。因此，如何更好地同时反映这两类缺陷对岩体动态力学性质的影响则是目前岩体动态损伤力学研究中一个亟待解决的重要课题。外载下岩体内的初始细观损伤可以发展成为宏观损伤，而且从损伤的尺度与损伤识别的尺度来看，岩体的宏观损伤与细观损伤之间并无严格界限，通常与所研究问题的尺度有关。但是，为了工程分析方便，对岩体的宏观和细观损伤进行分类研究，然后进行耦合计算分析是十分必要的[11]。

本文中在首先对基于细观损伤机理的经典岩石动态损伤本构模型（TCK 模型）进行阐述的基础上，根据 Lemaitre 应变等效假设建立综合考虑宏细观缺陷的损伤变量（张量），并由此建立相应的岩体动态损伤本构模型。

1　岩石细观动态损伤的 TCK 模型

如前所述，TCK 模型提出后获得了学术界的广泛认可。因此下面就以该模型为基础，对岩石细观动态损伤模型的建立过程进行探讨。

研究表明，岩石动态强度与破坏特性与其内部缺陷分布有关，在外载下岩石内部微裂纹将发生扩展、演化甚至贯通，进而导致其发生破坏。对岩石动态力学特性的描述可用介于 0～1 之间的损伤标量 ω 来描述。则岩石在受载下的弹性能 W 为：

$$W=\frac{1}{2}E(1-\omega)\varepsilon^2 \tag{1}$$

式中：E 为岩石材料的固有弹性模量，ε 为应变。

根据岩石微观断裂理论，损伤标量 ω 可表示为：

$$\omega=NV \tag{2}$$

式中：N 为单位体积岩石中理想片状圆形缺陷数；$V=\frac{4}{3}\pi r^3$ 是围绕半径为 r 的缺陷球状区域。因此，ω 也表示岩石单位体积里所包含的裂纹缺陷体积。

D. E. Grady 等[12-13]研究岩石脆性断裂缺陷分布时，假定裂纹密度服从 Weibull 分布：

$$n=k\varepsilon^m \tag{3}$$

式中：n 为应变 ε 水平以下缺陷数目，常数 k 和 m 表征断裂活动的材料性质。

由应变增量 $\mathrm{d}\varepsilon$ 引起的缺陷数增量为：

$$\mathrm{d}n=km\varepsilon^{m-1}\mathrm{d}\varepsilon \tag{4}$$

由于初始损伤的影响，岩石中实际参加活动的缺陷数为：

$$\mathrm{d}N=\mathrm{d}n(1-\omega)=km\varepsilon^{m-1}(1-\omega)\mathrm{d}\varepsilon \tag{5}$$

在某一时刻 t，裂纹扩展取决于经历的时间 $t-\tau$ 及应变 $\varepsilon(t)$，这里假定裂纹活化取决于裂纹的扩展速度 c_g，因此有：

$$V(t-\tau)=\frac{4}{3}\pi c_g^3(t-\tau)^3 \tag{6}$$

裂纹扩展速度是岩石断裂的一个重要特性，它控制着岩石动态断裂时的损伤率，损伤表达式为：

$$\omega(t)=\frac{4}{3}\pi c_g^3\int_0^t km\varepsilon^{m-1}\dot{\varepsilon}(1-\omega)(t-\tau)^3\mathrm{d}\tau \tag{7}$$

考察应变率对岩石动态断裂强度的影响，假定岩石断裂时的应变取决于应变速率 $\varepsilon(t)=\dot{\varepsilon}t$，$\dot{\varepsilon}$ 为常应变速率，因此损伤率的变化为：

$$\omega(t)=\frac{4}{3}\pi k m c_{\mathrm{g}}^{3}\dot{\varepsilon}^{m}\int_{0}^{t}\tau^{m-1}[1-\omega(\tau)](t-\tau)^{3}\mathrm{d}\tau \tag{8}$$

式(8)省略高阶项后可简化为：

$$\omega(t)=\alpha\dot{\varepsilon}^{m}t^{m+3} \tag{9}$$

式中：$\alpha=\dfrac{8\pi c_{\mathrm{g}}^{3}k}{(m+1)(m+2)(m+3)}$。

由此可得岩石单轴压缩动态本构关系即应力与应变及应变率的关系为：

$$\sigma(t)=E(1-\omega)\varepsilon(t)=E(1-\alpha\dot{\varepsilon}^{-3}\varepsilon^{m+3})\varepsilon \tag{10}$$

在该模型中需要确定的参数有裂纹扩展速度 c_{g}、k 和 m。研究表明裂纹扩展速度约等于理论瑞利波波速 c_{R} 的 0.34～0.66 倍，$c_{\mathrm{R}}\approx 0.58c_{\mathrm{L}}$，$c_{\mathrm{L}}$ 为弹性纵波速度)。若取裂纹扩展速度约等于理论瑞利波波速的 0.5 倍，则 $c_{\mathrm{g}}=0.29c_{\mathrm{L}}$。$k$、$m$ 是损伤模型引入的 2 个重要的岩石参数，参数 m 把岩石材料的极限拉伸应力和应变率联系起来，D. E. Grady 等[12-13]研究认为 m 为常数，并建议 $m=6$。材料参数 k 的定义和物理意义尚不明确，k 值的确定由不同应变率的拉伸断裂实验得出，到目前为止，仅有美国 Sandia 国家实验室提供了 1 组油母页岩的实验数据，L. M. Taylor 等[3]认为在恒应变率拉伸条件下：

$$k=\frac{9}{40}m\dot{\varepsilon}^{m-2}\frac{\rho c}{K_{\mathrm{IC}}}\frac{p_{\mathrm{m}}}{3K\dot{\varepsilon}\theta^{-1/m}} \tag{11}$$

式中：p_{m} 为常应变率下的岩石最大抗拉强度，K 为体积模量，K_{IC} 为岩石断裂韧性，θ 为体积应变，ρ 为岩石密度，其余参数同前。

2 考虑宏细观损伤耦合的岩体动态损伤本构模型

2.1 仅考虑宏观缺陷的岩体损伤本构模型

节理等宏观缺陷将导致岩体力学性质的弱化及各向异性，为反映这种影响，目前常采用损伤理论进行研究。假定损伤后的岩体本构关系仍服从胡克定律，则节理对岩体的损伤就体现为弹性常数的弱化，即节理岩体的弹性常数与损伤张量之间的关系，可以表示为：

$$\boldsymbol{E}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{\chi})\boldsymbol{E}_{0} \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{E}_{0}$、$\boldsymbol{E}$ 分别为完整岩块和节理岩体的弹性张量；$\boldsymbol{I}$ 为单位张量，$\boldsymbol{\chi}$ 为节理岩体损伤张量。

节理岩体损伤本构模型的研究就归结为损伤张量的计算。下面以平面二维问题为例，讨论节理岩体损伤张量计算方法。目前常用二阶张量描述岩体的各向异性损伤，许多学者基于不同角度也提出了多种定义方法。T. Kyoya 等[14]和 T. Kawamoto 等[15]将含有 1 组平行节理的岩体损伤张量定义为：

$$\boldsymbol{\chi}=\frac{l}{V}\sum_{k=1}^{N}a_{k}(\boldsymbol{n}_{k}\otimes\boldsymbol{n}_{k}) \tag{13}$$

式中：l 为节理平均间距，V 为样本体积，N 为样本中节理数，a_{k} 为样本中第 k 条节理表面积，$\boldsymbol{n}_{k}$ 为样本中第 k 条节理表面上的单位法向矢量。

孙卫军等[16]假定节理面是一个无厚度、二维延展的圆盘，应用岩体结构的概率统计模型，可以估算节理岩体的损伤张量。例如对于第 i 组节理，建议用下式表示其损伤张量：

$$\boldsymbol{D}_{i}=\left[1-\exp\left(-\frac{\pi}{4}\lambda_{i}d_{i}^{2}\right)\right]\boldsymbol{n}_{\mathrm{i}}\otimes\boldsymbol{n}_{\mathrm{i}} \tag{14}$$

式中：λ_{i} 为第 i 组节理面密度，d_{i} 为第 i 组节理平均直径，一般取为平面上的迹长；$\boldsymbol{n}_{i}$ 为第 i 组节理的单位法向矢量。同时还有其他一些学者也提出了类似的节理岩体损伤变量计算方法。

2.2 宏细观缺陷耦合的损伤变量计算方法

根据损伤理论，损伤变量的定义是损伤模型建立的前提和基础，因此下面首先讨论同时考虑宏细观缺陷的节理岩体损伤变量计算方法。工程岩体总是包含着节理、裂隙的宏观损伤特性和节理间岩石的细观损伤特性，这 2 种不同尺度损伤缺陷的耦合集中表现为损伤变量的耦合[11]。

在计算节理岩体损伤变量的耦合时，采用如下基本假设[11]：(1)宏观损伤与细观损伤以人的肉眼可见与不可见划分，并认为宏观损伤为各向异性损伤，而细观损伤为各向同性损伤。(2)在描述岩体损伤时，细观损伤和宏观损伤分别采用不同的描述方法，具体见前文。(3)在考虑宏细观损伤耦合时应遵循损伤力学基本假设——Lemaitre 假设[17]，即应变等效原理进行耦合，而不能将 2 种损伤简单叠加。

损伤耦合的条件是在一定应力作用下，2 种损伤分别引起的损伤应变之和等于耦合损伤引起的应变量，如图 1 所示，假设图 1(a)～(d)分别为同时含有宏观和细观损伤的岩体、仅含宏观损伤的岩体、仅含细观损伤的岩体及完全不含损伤的岩体，其弹性模量分别为：E_{12}、E_1、E_2 和 E_0，其在外力 σ_0 作用下产生的应变分别为：ε_{12}、ε_1、ε_2、ε_0，那么根据 Lemaitre 应变等效假设，则有：

$$\varepsilon_{12}=\varepsilon_1+\varepsilon_2-\varepsilon_0 \tag{15}$$

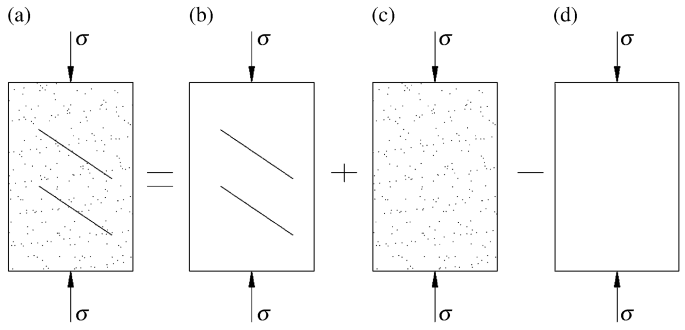

图 1 应变等效计算示意图

Fig. 1 Calculation of the equivalent strain

若假设宏、细观损伤在荷载作用方向上的损伤变量分别为 D_1、D_2 及其耦合损伤变量为 D_{12}，则有：

$$\frac{\sigma_0}{E_{12}}=\frac{\sigma_0}{E_1}+\frac{\sigma_0}{E_2}-\frac{\sigma_0}{E_0} \tag{16}$$

所以有：

$$\frac{1}{E_{12}}=\frac{1}{E_1}+\frac{1}{E_2}-\frac{1}{E_0} \tag{17}$$

由 Lemaitre 假设知：

$$\begin{cases}E_{12}=E_0(1-D_{12})\\E_1=E_0(1-D_1)\\E_2=E_0(1-D_2)\end{cases} \tag{18}$$

将式(15)代入式(14)，并经过整理后可得：

$$D_{12}=1-\frac{(1-D_1)(1-D_2)}{1-D_1D_2} \tag{19}$$

对于 2 种极端情况，即岩体仅含宏观损伤时，那么将 $D_2=0$ 代入式(18)可得 $D_{12}=D_1$，即此时岩体的耦合损伤变量等于其宏观损伤变量，符合实际情况。同样当岩体仅含微观损伤时，$D_1=0$，可得 $D_{12}=D_2$，即此时岩体的耦合损伤变量等于其细观损伤变量，也符合实际情况。这说明通过该方法建立的宏细观耦合损伤变量是合理的。

同样基于 Lemaitre 假设，杨更社等[11]经过推导认为岩体的宏细观耦合损伤变量为：

$$D_{12}=1-\frac{(1-D_1)(1-D_2)}{(1-D_1)+(1-D_2)} \tag{20}$$

可以看出，对于式(19)当 $D_1=0$ 时，$D_{12}=\dfrac{1}{(2-D_2)}$，即 $D_{12}\neq D_2$，也就是说当岩体内仅含细观损伤时，岩体的总损伤变量即耦合损伤变量并不等于细观损伤变量，显然不符合实际情况。通过对其推导过程的分析认为，假设 $\varepsilon_{12}=\varepsilon_1+\varepsilon_2$，是重复计算了 1 次完全无损伤弹性体产生的应变，即没有减去图 1(d)所产生的应变，因而所得结果也不甚合理。而刘红岩等[18]认为岩体宏细观耦合损伤变量为：$D_{12}=D_1+$

$D_2-D_1D_2$，但从建立过程来看，该方法缺乏严格的理论基础。

对上述 3 种不同宏细观耦合损伤变量的计算结果进行对比分析，如图 2 所示。

由图 2 所示的变化规律可以看出，曲线 1 是由本文中方法计算出的耦合损伤变量，其值最小，而随着宏细观损伤变量的增加，由文献[18]中方法计算出的耦合损伤变量(曲线 2)逐渐大于由文献[11]中方法的计算结果(曲线 3)。这说明文献[11,18]所提出的方法过大地估计了宏细观损伤的耦合影响，分析认为产生这种情况的主要原因是由于文献[11]过大地估计了由损伤产生的应变，而文献[18]则缺乏相应的理论基础，因此认为本文提出的计算方法较为合理。

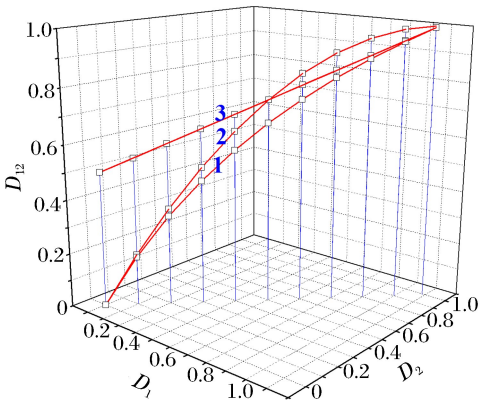

图 2 耦合损伤变量随宏细观损伤变量变化规律

Fig. 2 Change law of the coupled damage variable varied with macroscopic and mesoscopic damage

由于宏观损伤具有奇异性，上面所采用的 D_1 仅为荷载作用方向上的损伤变量值，因此必须对张量化以反映岩体宏观损伤的各向异性。张量化的方法很多，在此采用 T. Kawamoto 等[15]的方法，引入损伤张量 $\boldsymbol{\Omega}$，则 $\boldsymbol{\Omega}=D_1\boldsymbol{N}$，其中 $\boldsymbol{N}$ 是一个二阶对称张量，其计算方法为：

(1)对于含单组非贯通裂隙的岩体，假定非贯通裂隙的法向与 x 轴夹角为 β，如图 3 所示，设该组非贯通裂隙的单位法向矢量为 $\boldsymbol{n}$，则有：$\boldsymbol{N}=\boldsymbol{n}\otimes\boldsymbol{n}=\begin{pmatrix}\cos^2\beta & \sin\beta\cos\beta\\ \cos\beta\sin\beta & \sin^2\beta\end{pmatrix}$。

(2)对于含 2 组以上非贯通裂隙的岩体，$\boldsymbol{N}$ 的计算方法是：设岩体中有 M 组非贯通裂隙，其单位法向矢量分别为 $\boldsymbol{n}^{(m)}(m=1,2,\cdots,M)$，而 $\boldsymbol{N}^{(m)}=\boldsymbol{n}^{(m)}\otimes\boldsymbol{n}^{(m)}$，$N_{ij}=\dfrac{1}{M}\sum_{k=1}^{N}N_{ij}^{(m)}(i,j=1,2,3)$。

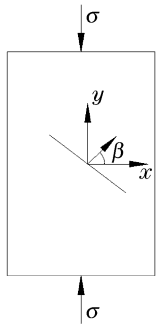

图 3 含裂隙岩体的受力模型

Fig. 3 Mechanical model of cracked rock mass

根据上述方法，对式(19)进行张量化，若假设节理等宏观缺陷引起的损伤张量为 $\boldsymbol{\Omega}$、微裂纹等细观缺陷引起的损伤变量为 D，那么这 2 种不同尺度的缺陷所引起的耦合损伤变量 $\boldsymbol{\Omega}_{12}$ 为：

$$\boldsymbol{\Omega}_{12}=\boldsymbol{I}-\frac{(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{\Omega})(1-D)}{\boldsymbol{I}-\boldsymbol{\Omega}D} \tag{21}$$

2.3 基于岩石细观动态损伤本构模型的岩体动态损伤本构模型

当仅考虑岩石中存在的微裂纹等细观缺陷时，前人已建立了如式(10)所示的岩石细观动态损伤本构模型。但是由于工程岩体都含有节理、裂隙等宏观缺陷，因此如何根据岩石细观动态损伤本构模型的研究思路建立节理岩体的动态损伤本构模型则是一个亟待解决的重要问题。

由损伤理论可知，当岩体内同时含有宏、细观等 2 种不同尺度的缺陷时，在损伤模型中则体现为损伤变量的变化。根据这一思路，把式(10)中的损伤变量 $\omega(t)$ 用式(20)中耦合损伤变量 $\boldsymbol{\Omega}_{12}$ 替换即可，而其中的细观损伤变量 D 则相应地用 $\omega(t)$ 来替换，即可得到节理岩体的单轴动态损伤本构方程为：

$$\boldsymbol{\sigma}(t)=\boldsymbol{E}\frac{(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{\Omega})(1-\omega(t))}{\boldsymbol{I}-\boldsymbol{\Omega}\omega(t)}\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{E}\frac{(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{\Omega})(1-\alpha\dot{\varepsilon}^{-3}\varepsilon^{m+3})}{\boldsymbol{I}-\boldsymbol{\Omega}\alpha\dot{\varepsilon}^{-3}\varepsilon^{m+3}}\boldsymbol{\varepsilon}=$$
$$\boldsymbol{E}\frac{(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{\Omega})(1-\alpha\dot{\varepsilon}^{-3}t^{m+3})}{\boldsymbol{I}-\boldsymbol{\Omega}\alpha\dot{\varepsilon}^{-3}t^{m+3}}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}t \tag{22}$$

式中：$\alpha=\dfrac{8\pi c_g^3k}{(m+1)(m+2)(m+3)}$，其余参数同前。

3　算例分析

岩石试件的二维计算模型取为如图 4 所示，模型上部受到动荷载 σ_d 的作用，下部固定。模型中含有一条贯通的 45°节理，那么它将对岩体产生宏观的各向异性损伤，这里采用式(13)计算其损伤变量，裂隙的外法线方向为 $\boldsymbol{n}=\left(\frac{1}{\sqrt{2}},\frac{1}{\sqrt{2}},0\right)$，$\lambda_i=200$，$d_i=0.071$ m。计算可得其损伤张量为：$\boldsymbol{\Omega}=\begin{pmatrix}0.27 & 0.27 & 0\\ 0.27 & 0.27 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{pmatrix}$。为了与完整岩石进行对比分析，这里同时对节理岩体与完整岩石的应力应变曲线进行计算，除节理参数外，二者的其余参数取值均相同。由于 TCK 模型中的 k、m 等参数是由动态拉伸断裂实验确定，为此借鉴 L. M. Taylor 等[3]的实验资料。即认为当岩石的杨氏弹性模量为 10.8 GPa、体积模量为 6 GPa，泊松比为 0.2，塑性屈服应力为 200 MPa，密度为 2 270 kg/m^3，断裂韧性为 1.0 MPa·m$^{1/2}$，及应变率分别为 10^2 s^{-1}时，k 和 m 可分别取为 5.12×10^22 m^{-3}和 7。根据前述讨论，可取裂纹的扩展速度 $c_g=0.29c_L$，$c_L=\sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$，计算可得裂纹扩展速度为 666.7 m/s。按照平面应力问题进行求解。根据上述参数，可得节理岩体与完整岩石的单轴压缩动态曲线如图 5 所示。

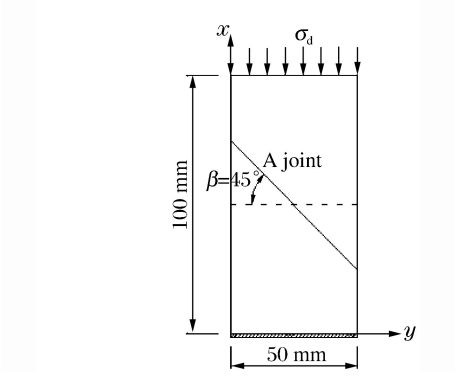

图 4　岩石试件二维计算模型

Fig. 4　Two-dimensional calculation model of rock

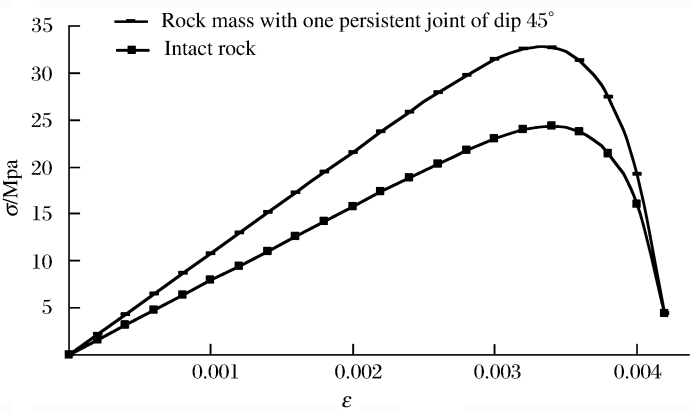

图 5　岩体单轴压缩动态应力应变曲线

Fig. 5　Stress-strain curves of rock under axial dynamic compression

由图 5 可以看出：(1)从曲线形态上来看，当岩石内部仅含有微裂纹等细观损伤时，基于微裂纹扩展演化的细观动态损伤本构模型能够很好地反映岩石动态应力应变曲线特征，而基于此建立的节理岩体动态损伤本构模型也包含了应力应变曲线的线性段、峰值段及破坏软化阶段。(2)从试件峰值强度来看，当岩体内含有节理裂隙等宏观缺陷时，其力学性质明显软化，表现为峰值应力有所减小。对本算例而言，节理岩体的峰值应力为 24.35 MPa，而相应完整岩石的峰值强度则为 32.71 MPa，因此仅为其 74.4%，这说明宏观损伤即节理的存在将在一定程度上削弱了岩体峰值强度，即表明宏、细观两种不同尺度的缺陷对岩体的强度均有影响。(3)从试件的应变大小来看，节理岩体的总应变明显大于完整岩石的应变，这说明节理岩体在压缩荷载作用下不仅岩石块体产生压缩变形而且试件还将沿节理面发生剪切滑移及压缩变形，因而相对于完整岩石试件，相应的节理岩体试件将发生更大的变形，进而产生较大的应变。因此，认为节理存在还降低了试件刚度，增大了其柔性。

3.1　载荷应变率对岩体动态力学特性的影响

载荷应变率对岩体力学特性及强度也有很大影响，下面利用上文中提出的模型研究载荷应变率对单节理岩体试件力学特性的影响。采用的计算模型仍为图 4 所示，取载荷应变率分别为 100、200 和 300 s^{-1}，其余计算参数同上。计算结果如图 6 所示。首先由图 6 可以看出，在不同载荷应变率下试件在应变较小时即在弹性变形阶段是重合的，同时随着载荷应变率的增加，试件峰值强度逐渐变大、对应

的峰值应变及总应变也随之增加，这与于亚伦[19]对完整岩石在不同载荷应变率下得到的压缩应力应变曲线的变化规律是一致的。这说明节理岩体动态力学特性与完整岩石同样具有应变率效应，只是二者对应变率效应的响应程度会存在一定差异。同时在应变率为 100～300 s^{-1}范围内，节理岩体的峰值强度随应变率的增加近似成线性增长。

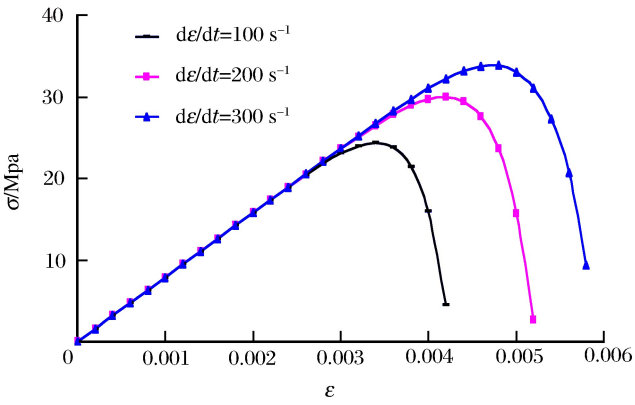

图 6 不同应变率下试件动态应力随应变变化关系

Fig. 6 Relation between dynamic stress of rock varied with strain under different load strain rates

3.2 节理条数对岩体动态力学特性的影响

节理条数对岩体力学特性及强度也有很大影响，下面利用本文所提出的模型对多节理岩体试件的力学特性及强度等进行了研究，采用的计算模型仍为图 4 所示，取平行节理条数为 1～4 条，计算结果如图 7 所示。可以看出：(1)随着节理条数增加，岩体应力应变曲线斜率降低，这说明岩体弹性模量随着节理条数的增加而降低，即节理岩体刚度减小、柔性增大；(2)随着节理条数增加，岩体峰值强度逐渐降低，当节理条数为 1～4 条时，对应的岩体峰值强度分别为 24.35、19.94、18.17 和 17.09 MPa，相比相应完整岩石的峰值强度 32.71 MPa 均有不同程度的下降，且随节理条数的增加，试件峰值强度的下降趋势逐渐变缓。同时从下降幅度来看，当节理条数由 1 条增加到 2 条时，强度下降幅度最大，而当增加到 3、4 条时，强度下降幅度明显减小，这说明节理之间存在着相互作用，作用结果将导致岩体的总体强度更加弱化，与节理岩体的静力学特性一样不符合单纯的线性组合原理。因此，该计算结果也从另一侧面说明本文所提出的模型是合理的。

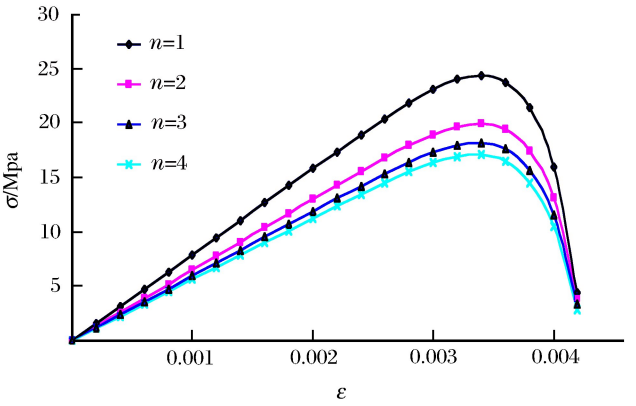

图 7 1～4 条平行节理试件应力应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of the jointed rock mass with 1～4 parallel joints

4 结 论

(1)根据动载下微裂纹的扩展机理，介绍了仅考虑细观缺陷的岩石动态损伤 TCK 本构模型。

(2)根据 Lemaitre 应变等效假设，推导了同时考虑宏细观缺陷的损伤变量(张量)。然后采用能够同时反映宏、细观缺陷的损伤变量(张量)替换 TCK 模型中仅考虑细观缺陷的损伤变量，由此建立了综合考虑宏、细观缺陷的节理岩体动态损伤本构模型，该模型同时考虑了载荷应变率及宏、细观两类不同尺度缺陷对岩体动态力学特性影响。

(3)利用建立的本构模型讨论了节理岩体与完整岩石动态应力应变曲线的差异，说明了节理等宏观缺陷对岩体动态特性的影响，就本文算例而言，当岩体中含有一条倾角为 45°的贯通节理时，其峰值应力仅为相应完整岩石的 74.4%。然后利用该模型讨论了载荷应变率及节理条数对岩体动态力学特性的影响规律，所得结果与相关已有研究成果的基本规律是一致的，说明了模型的合理性。

参考文献：

[1] Budiansky B, O'Connell R J. Elastic moduli of a cracked solid[J]. International Journal of Solids Structures,

1976，12(2)：81-97.

[2] Grady D E，Kipp M L. Continuum modeling of explosive fracture in oil shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，1980，17(3)：174-157.

[3] Taylor L M，Chen E P，Kuszmaul J S. Microcrack induced damage accumulation in brittle rock under dynamic loading[J]. Computer Method in Applied Mechanics & Engineering，1986，55(3)：301-320.

[4] Zuo Q H，Disilvestro D，Richter J D. A crack-mechanics based model for damage and plasticity of brittle materials under dynamic loading[J]. International Journal of Solids and Structures，2010，47(2)：2790-2798.

[5] Zhou X P，Yang H Q. Micromechanical modeling of dynamic compressive responses of mesoscopic heterogenous brittle rock[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics，2007，48(1)：1-20.

[6] Wang Zhi-liang. Li Yong-chi，Wang J G. A damage-softening statistical constitutive model considering rock residual strength[J]. Computers & Geosciences，2007，33(1)：1-9.

[7] Tang C A，Liu H，Lee P K K，et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression：Part Ⅰ：Effect of heterogeneity[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences，2000，37(4)：555-569.

[8] Li Jian-chun，Ma Guo-wei，Zhao Jian. An equivalent viscoelastic model for rock mass with parallel joints[J]. Journal of Geophysical Research，2010，115(B3)：1-10.

[9] 李宁，张平，段庆伟，等. 裂隙岩体的细观动力损伤模型[J]. 岩石力学与工程学报，2002，21(11)：1579-1584.
Li Ning，Zhang Ping，Duan Qing-wei，et al. Dynamic meso-damage model of jointed rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechancis and Engineering，2002，21(11)：1579-1584.

[10] 刘红岩，邢闯锋，刘冶，等. 宏微观缺陷对岩体力学特性影响规律试验研究[J]. 自然灾害学报，2013，2(5)：134-139.
Liu Hong-yan，Xing Chuang-feng，Liu Ye，et al. Test study on the law of macro and micro flaws effects on the mechanical properties of rockmass[J]. Journal of Natural Disaster，2013，2(5)：134-139.

[11] 杨更社，谢定义. 岩体宏观细观损伤的耦合计算分析[C]// 第六次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 武汉，2000：327-329.

[12] Grady D E，Kipp M E. Continuum modeling of explosive fracture in oil shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts，1987，17(3)：147-157.

[13] Grady D E，Kipp M E. The micromechanics of impact fracture of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts，1979，16(5)：293-302.

[14] Kyoya T，Ichikawa Y，Kawamoto T. A damage mechanics theory for discontinuous rock mass[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics. Nagoya，Japan，1985：469-480.

[15] Kawamoto T，Ichikawa Y，Kyoya T. Deformation and fracturing behavior of discontinuous rock mass and damage mechanics theory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts，1988，25(4)：1-30.

[16] 孙卫军，周维垣. 裂隙岩体弹塑性-损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报，1990，2(9)：108-119.
Sun Wei-jun，Zhou Wei-yuan. An Elasto-plastic damage mechanics constitutive model for jointed rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，1990，2(9)：108-119.

[17] Lemaitre J. A course on damage mechanics[M]. Spring-Verlag，1996.

[18] 刘红岩，吕淑然，丹增卓玛，等. 节理岩体宏微观损伤耦合的三维本构模型研究[J]. 水利与工程学报，2013，11(3)：85-88.
Liu Hong-yan，Lü Shu-ran，Danzeng Zhuo-ma，et al. Study on 3-D constitutive model for jointed rock mass by coupling macroscopic and microscopic damge[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering，2013，11(3)：85-88.

[19] 于亚伦. 用三轴 SHPB 装置研究岩石的动载特性[J]. 岩土工程学报，1992，14(3)：76-79.
Yu Ya-lun. Study on the dynamic characteristic of rock by tri-axial SHPB[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，1992，14(3)：76-79.

A dynamic damage constitutive model of rock mass by comprehensively considering macroscopic and mesoscopic flaws

Zhang Li-min[1,2], Lü Shu-ran[3], Liu Hong-yan[4,5,6]

(1. *Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*;
2. *Hebei Chengde Iron and Steel Corporation, Chengde* 850000, *Hebei*, *China*;
3. *School of Safety and Environment Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing* 100083, *China*;
4. *College of Engineering & Technology, China University of Geoseiences (Beijing), Beijing* 100083, *China*;
5. *School of Engineering, Tibet University, Lasa* 850000, *Xizang*, *China*;
6. *Key Laboratory on Deep GeoDrilling Technology, Ministry of Land and Resources, China University of Geoseiences (Beijing), Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In view of the fact that the jointed rockmass contains both macroscopic flaws such as the joint and crack and the mesoscopic flaws such as the microcrack and microhole, the viewpoint that the above two kinds of flaws should be considered at the same time in the dynamic damage constitutive model of the jointed rockmass is proposed. Therefore, the rock classic dynamic damage constitutive model namely TCK model based on mesoscopic dynamic fracture mechanism is discussed, then the compound damage variable (tensor) comprehensively considering macroscopic and mesoscopic flaws based on Lemaitre equivalent strain hypothesis is deduced. Finally, the corresponding dynamic damage constitutive model is established, and the effect law of the load strain ratio and joint set on rock mass dynamic mechanical property is discussed with this model. The results show that under different load strain rates, the initial deformation stage of the samples coincides with each other, and then with increase of strain, the climax strength, strain and the total strain of the samples all increase. With increase in joint sets, the climax strength of the samples gradually decreases, but the reduction degree gradually becomes little and tends to a certain value. The basic law between the above research conclusions and the current experimental and theoretical results is the same, which demonstrates the rationality of this model.

Key words: mechanics of explosion; dynamic damage constitutive model; macroscopic flaw; mesoscopic flaw; dynamic fracture mechanism; compound damage variable; jointed rock mass

(责任编辑 王易难)