

类岩石材料动态本构模型研究进展

陈思羽,王青成,杨立云*

中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083

摘要 类岩石材料的动态本构关系是研究冲击地压和岩爆等地质灾害现象、评估围岩或工程材料抗冲击破坏能力的重要手段,特别是高应变率下的类岩石材料动态本构关系对解决工程问题和设计施工方案具有重要参考意义。总结了类岩石材料动态本构方程的研究方法,阐述了损伤模型、动态黏弹性模型、动态黏塑性模型、动态黏弹塑性模型、经验模型等动态本构关系的优点和局限性;归纳了不同理论模型和经验模型的最新进展,并对动态本构关系的未来发展趋势进行了展望,提出使类岩石材料在动静组合加载下的理论计算值与试验数据较好地吻合是未来的一个发展趋势。

关键词 类岩石材料;动态本构关系;高应变率

类岩石材料的动态本构模型是研究地下工程突发性地质灾害、设计井巷工程掘进施工、分析军事人防工程安全稳定性的重要工具。类岩石材料包括混凝土、石膏、冻土等,由于其具有相似的物理力学性质,当研究类岩石材料的本构关系时,一般都会关注到与加卸载速率相关的时间效应。例如,在恒载作用下应变随时间而增加的蠕变效应;应变恒定时应力随时间而逐渐衰退的应力松弛效应;应力循环中滞回曲线显示的应力波传播的吸收和弥散;在冲击荷载作用下类岩石材料表现出的应变强化-软化等,都说明了类岩石材料的物理力学特征具有非常明显的时效性。此外,大量实验表明,岩石内部的损伤及其演化规律同样是本构关系中不

可忽视的因素。而材料的本构关系的研究又可以分为静态本构关系和动态本构关系,对于类岩石材料在准静态荷载下的本构模型,从古典理论到弹塑性本构关系,相关领域已经形成广泛共识^[1-3],但是对于中高应变率下的类岩石材料的本构模型还缺乏统一的认识。经过近几十年的发展,国内外专家学者对类岩石材料动态本构模型从不同角度进行分析,运用的理论不尽相同,适用条件也相差较大。其中,应用广泛的类岩石材料动态本构关系大致可分为组合元件模型理论、屈服面经验理论和损伤理论等。本文主要阐述常用动态本构关系的研究进展,总结不同动态本构关系的优缺点,针对部分动态本构模型提出使用条件,并展望类岩石材料动态

收稿日期:2020-11-12;修回日期:2021-01-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51974316,51934001);国家重点研发计划项目(2016YFC0600903);中国矿业大学(北京)越崎学者专项资金项目(800015Z1125)

作者简介:陈思羽,博士研究生,研究方向为工程爆破,电子信箱:bqt_siyuchen@163.com;杨立云(通信作者),教授,研究方向为工程爆破与岩石破碎,电子信箱:yangly@cumtb.edu.cn

引用格式:陈思羽,王青成,杨立云.类岩石材料动态本构模型研究进展[J].科技导报,2022,40(8):115-126;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.08.011

本构关系的未来发展趋势。

1 动态本构关系 7 种模型

1.1 损伤模型

在类岩石材料中,不论是研究宏观现象还是微观问题,损伤对材料各项物理特性的影响都不能忽视。尤其是在动态和超动态加载条件下,材料由于损伤软化效应而快速发生破裂,基于这种现象,Bui等^[4]在弹塑性力学的基础上提出动态断裂损伤模型,用有限元法分析弹塑性固体中损伤区域的动态裂纹扩展规律。朱万成等^[5]则用最大拉应力准则和摩尔库伦准则作为动态损伤的判据,把一维损伤模型推广到三维。Brooks等^[6]通过引入“高应力体积”及“连续损伤模型”量化了应变率的影响,所建立的组合模型用于预测应力速率对各种拉伸试验应力-应变上升曲线的影响。卢文波等^[7]修正了裂纹起裂和裂纹损伤的判断依据,推导出材料发生张拉或压剪破坏时的损伤阈值。认为应该首先使用最大拉应力准则判断类岩石材料是否发生破坏。陶俊林等^[8]利用SHPB系统研究了类岩石材料在不同温度下的动态本构关系。同时考虑类岩石材料损伤服从随机分布,提出了黏弹性率型损伤本构模型。Dubé等^[9]基于Perzyna黏塑性表达式,修正损伤模型表达式得到速率相关模型,并对塑性比例系数进行了修改。Deng等^[10]将连续损伤力学理论与基于最大熵分布的统计细观强度理论相结合,提出了一种具有应变软化特性的岩石统计损伤本构模型。Eibl等^[11]在连续损伤力学的基础上,结合实验提出了混凝土率型损伤演化方程,认为混凝土的强度在高应变率下应考虑应变历史的影响。Forquin等^[12]研究了含水率对混凝土动态损伤模型的影响。Addessio等^[13]从微观角度分析了损伤对脆性材料在高应变率下的影响。李庆斌等^[14-15]站在宏观力学角度,建立了单轴压缩下的动态损伤模型,考虑了动弹损伤模型中弹性模量的变化。Liu等^[16]推导了节理岩体的动态损伤方程,并认为宏观和微观裂纹对损伤模型均有影响。Zhu等^[17]和Zhang等^[18]分别将损伤引入到改进的黏塑性和ZWT黏弹性模型中,

考虑了冻土动态本构模型中温度效应和应变率效应的影响。

损伤模型将类岩石材料的各向异性考虑到本构关系中,使得本构模型的计算结果更趋近于实际情况。但从已建立的动态损伤本构模型中可发现很多损伤模型中所涉及到的参数较多,且很多都需要通过试验获得,确定起来很困难。已有模型难以全面描述类岩石材料在中高应变率下所表现出来的综合特性,包括材料的非线性弹性、塑性、损伤失效以及应变率相关性。另外,针对特殊情况下提出的损伤变量不具有普适性问题,迄今没有统一的标准,不便于实际工程的应用。同时,大多数学者还是局限于分析单次冲击试验所引起的岩体损伤,仍缺少对多次冲击试验所引起的类岩石材料损伤的探究;此外,现有的很多损伤理论模型仍停留在理论阶段,还应多结合室内或者现场试验来验证。

1.2 黏弹性本构模型

由于黏弹性本构模型,不能描述类岩石材料受到超过其自身强度荷载时的应力应变关系,对于材料塑性区的变化没有明确定义,因此一般在类岩石材料受较小荷载作用下时使用。最简单的黏弹性元件组合模型是由一个弹性元件和一个黏壶元件组合而成的麦克斯韦和开尔文模型。此外,唐志平在前人的基础上于1981年提出了著名的朱-王-唐(ZWT)模型,该模型是由2个麦克斯韦体模型和一个非线性弹簧并联而成^[19-20],该模型是在研究玻璃板的时候提出的,后广泛应用于类岩石材料的动态本构关系研究当中,模型示意如图1所示^[21-22]。

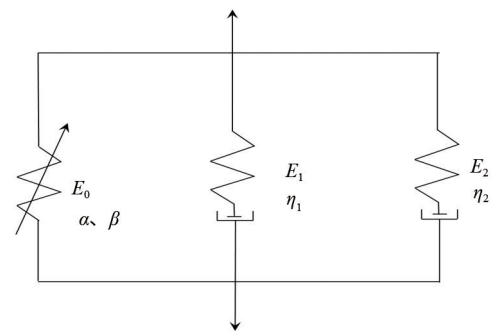


图1 朱-王-唐(ZWT)本构模型

模型的关系表达式为

$$\sigma = f(\varepsilon) + \phi(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} f(\varepsilon) = E_\varepsilon \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3 \\ \phi(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E_1 \int_0^t \varepsilon \exp\left(-\frac{t-r}{\theta_1}\right) dr + \\ E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-r}{\theta_1}\right) dr \end{cases} \quad (2)$$

式(1)中, $f(\varepsilon)$ 为关于应变 ε 的函数, 用于表达非线性弹性范围内的变化, E_ε 、 α 、 β 为材料对应的弹性常数; $\phi(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ 为应变和应变率的函数, 用于描述材料的非线性响应; 式(2)中 E_1 、 θ_1 分别为低频麦克斯韦体的弹性常数和松弛时间, E_2 、 θ_2 分别为高频麦克斯韦体的弹性常数和松弛时间, $\theta_1 = \eta_1/E_1$, $\theta_2 = \eta_2/E_2$, η_1 、 η_2 分别为低频麦克斯韦体和高频麦克斯韦体的黏性系数。

Zhou 等^[23]在唐志平^[24]提出的本构关系非线性弹性项中引入损伤参量, 建立了一个适用于更大变形范围、能描述“应力平台”及“本构失稳”的损伤型非线性黏弹性本构方程。Wang 等^[25]得到了聚合物聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 和混凝土的耦合损伤演化规律和率相关本构关系 (DM-ZWT 模型)。单仁亮等^[26]根据动荷载作用下软岩和混应变硬化和塑性流动的动态特性, 建立了基于 ZWT 模型的损伤型黏弹性动力本构方程。Tao 等^[27]、Zhao 等^[28]根据动荷载作用下类岩石材料的应变硬化和塑性流动的特性, 建立了基于 ZWT 模型的损伤型黏弹性动力本构方程。梁书峰^[29]研究发现, 花岗岩静态单轴压缩应力-应变曲线在弹性阶段呈线性, 又考虑到花岗岩破坏应变量级较小, 遂将朱-王-唐本构的非线性部分用线性替代, 建立了花岗岩损伤与应力波参数间定量关系准则和损伤演化方程。并在上述思想的基础上, 根据霍普金森压杆应变率范围, 将朱-王-唐模型中低频麦克斯韦体用弹性体替代, 利用黏弹性理论将一维花岗岩分段型本构模型扩展至三维应力状态, 最终推导出花岗岩的三维本构模型的增量表达式。Zhang 等^[30]通过 SHPB 测试玄武岩纤维混凝土的力学参数, 并在此基础上基于 ZWT 模型建立了玄武岩纤维混凝土的动态本构

关系。马冬冬^[31]通过对 ZWT 模型进行改进, 推导出能够综合考虑围压效应、温度效应、应变率效应等力学特性的冻土动态本构模型。Yang 等^[32]基于 ZWT 模型和宏观与微观缺陷耦合的观点, 建立了兼顾宏观和微观缺陷的节理软岩黏弹性损伤动力本构模型。郑永来等^[33-34]通过并联数个麦克斯韦体, 建立黏弹性损伤模型。该模型能模拟不同应变率下岩石强度和弹性模量的应变率效应, 但是该模型中的参数很多, 参数确定需要大量不同应变率试验。Izzuddin 等^[35]考虑混凝土的应变率效应, 把黏性系数表达为弹性应变率的函数从而建立单轴本构关系。单仁亮等^[36]分析了岩石在霍布金森杆 (SHPB) 冲击下的应力应变关系曲线, 通过实测数据将统计损伤模型和黏弹性模型相结合, 建立了一个简明的岩石冲击破坏时效损伤模型。Chong 等^[37]基于实验研究提出了黏弹性模型, 解释油页岩在压缩荷载作用下的应变率相关性。该模型由 2 个弹性元件 1 和 2 及一个黏性元件组成, 在低应变率下, 由于黏性元件的影响, 弹性元件 1 将失去作用, 仅仅由弹性元件 2 承受外荷载, 此时材料仅表现为弹性; 当材料处于高应变率作用时, 弹性元件和黏性元件共同发挥作用, 承受外来荷载, 呈现出黏弹性特征。设置 2 个弹性元件可以实现类岩石材料从弹性到黏性之间的转换。

1.3 黏塑性本构模型

当类岩石材料处于高应变率时, 应力与应变之间的非线性关系会凸显出来, 尤其是当材料表现出塑性屈服时, 此时可以把类岩石材料视为塑性材料。对于黏塑性本构关系的构建, 其中应用比较广泛的是 Malvern^[38]、Perzyna^[39]和 Lindholm 等^[40]建立的过应力模型。过应力指的是在动力作用下材料所承受的实际应力与材料相处同一应变时静态应力的差值^[41]。Fang 等^[42]采用有限元法模拟岩石动态拉伸试验并修正过应力模型。国内研究方面, 赵光明等^[43]、于亚伦^[44]用修正的过应力模型描述几种类岩石材料在较高应变率下的应力应变关系, 该修正后的模型可以很好地描述类岩石材料的动态力学行为, 并采用 SHPB 对软岩材料进行动态力学性能测试, 测试结果与理论推导一致, 软岩材料表现出

明显的塑性效应。Tashman等^[45]通过将屈服函数中的应力不变量替换为描述骨料方向分布的应力和微观结构张量的不变量,将材料的各向异性包含在模型中,提出微观结构的沥青混凝土永久变形黏塑性连续体模型。该模型描述了影响沥青混凝土变形的影响因素,包括应变率相关性、围压相关性、体积扩容、各向异性及损伤。Winnicki^[46]提出了一种关于混凝土的黏塑性本构模型,该模型基于各向同性形式的Hoffman屈服函数,并对其进行了扩展,以包括材料拉伸和压缩过程中的硬化和软化行为。该模型理论上较为严密,但模型中的待定参数较难测得,计算时较为繁琐。王哲等^[47]以不可逆热力学为基础,选用Helmholtz自由能为状态函数、应变和温度为外变量,通过一系列假设,建立了内、外变量间的关系。

1.4 黏弹塑性本构模型

黏弹塑性本构模型由于较好地反映了侧向流变变形规律的缺点,近年来研究越来越广泛。Bianić等^[48]在单轴实验的基础上,修正Perzyna模型的相关参数。夏才初等^[49]以Cristescu模型为基础修正的动态本构模型本构^[50],克服了以往三轴加载情况下元件模型不能反映侧向流变变形的缺点,确定了卸荷效应下动态本构模型参数。翟越^[51]通过考虑应变率强化和损伤弱化,并使用弹性元件、黏性元件、塑性元件以及损伤元件的串并联组合建立了类岩石材料的动态弹性损伤本构方程。之后,将类岩石材料作为各项异性组成的物体,并推导出黏弹塑性损伤动态本构模型的微分表达式^[52]。Huang等^[53]基于改进的Burgers模型,综合考虑时间、延迟系数和应力水平对黏滞系数的影响,以及延迟系数和初始黏滞系数对加速时效变形的影响,提出了考虑应力状态影响的变参数黏弹塑性模型。Pu等^[54]为了建立循环荷载下岩石的本构方程,基于分数阶黏性元建立了循环荷载下的分数阶黏塑性体。将构造的分数阶黏塑性体与Burgers模型相结合,建立了岩石分数阶黏弹塑性模型。张俊等^[55-56]在研究沥青混合料时在Burgers黏弹性模型基础上串联一个黏塑性元件,并引入一个能反映应变率影响的变量因子,构建出一个可以体现加载频率的黏弹塑

性损伤演化模型。黏弹塑性模型解决了材料加速和减速变形时压力梯度随时间变化的变化规律,其模型的构建从一定程度上反映了类岩石材料中裂缝刚性中心层的发展(程度取决于流体性质)、压力梯度的大小、裂缝孔径和表面粗糙度。但由于黏弹塑性动态本构模型是在黏弹性或是黏塑性上延伸出来的模型,兼顾了类岩石材料的黏、弹、塑性,所以相关研究仍处于起步阶段。

1.5 屈服面经验模型

1983年,Johnson和Cook针对金属材料高温高压物理环境下的变形特征,提出了Johnson-Cook损伤本构模型(JC模型)^[57]。由于该本构模型使用方便简单、参数物理意义明确,在金属类材料的动态力学研究中得到广泛应用。但是大量理论研究和实验数据表明,材料的剪切模量 G 和压力、温度等影响因素密不可分。因此,需要对JC模型进行相应的修正。针对JC模型,研究者主要从2个方面提出修正:(1)在模型中引入应变率影响因子,以适应高应变率下材料的应变率效应问题;(2)为了将模型应用于屈服强度与静水压正相关的脆性材料,Johnson^[58]和Holmquist等^[59]分别提出了JH-1、JH-2模型。JH-1模型是在研究陶瓷类材料时建立的,状态方程包括应变率、静水压力以及与损伤相关的强度模型,此模型可以反应脆性材料在大变形、高应变率下的强度和应变率效应。JH-2在JH-1的模型基础上,考虑了材料的连续损伤劣化,即材料一开始处于线弹性状态,当满足一定条件时触发损伤。对于高速撞击实验的数值模拟,JH-2模型可以很好地预测粒子自由面速度、侵彻深度和速度^[60]。JH模型体现了材料在冲击荷载下非线性变形的特征。由于模型中各项物理意义明确且形式简单,同时本构模型中的待定参数可通过试验方式测得,因此其表达方式常通过数值计算编程应用在几乎所有大型商业软件中。

Holmquist等^[61]基于等效思想,提出了HJC强度模型,能够描述材料在荷载作用下的非线性变形和断裂破坏特征,表达式为

$$\sigma^* = [A(1 - D) + Bp^{*N}] [1 + C \ln \dot{\epsilon}^*] \quad (3)$$

式(3)中, $\sigma^* = \sigma/\sigma_{c,s}$ 为归一化等效应力, $p^* = p/\sigma_{c,s}$ 为归一化压力, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为归一化应变率, 其中 σ 为实际等效应力, p 为单元内的静水压力, $\sigma_{c,s}$ 为准静态单轴抗压强度, $\dot{\varepsilon}$ 为响应变率, $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0/s$ 为参考应变率; 材料常数 A 是归一化黏性强度, B 是归一化压力硬化系数, C 是应变率影响系数, N 是压力硬化指数, D 是损伤变量, 由等效塑性应变和塑性体积应变累计得到, 演化方程为

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon_p + \Delta\mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (4)$$

式(4)中, $\Delta\varepsilon_p$ 、 $\Delta\mu_p$ 分别为等效塑性应变增量和塑性体积应变增量; ε_p^f 、 μ_p^f 分别为常压下破碎时的等效塑性应变和塑性体积应变。 p 为实际静水压力, 由图2所示的状态方程曲线确定。

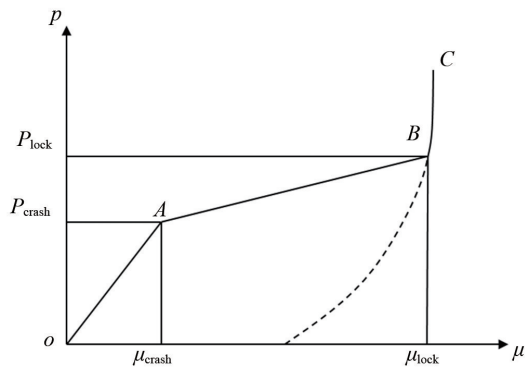


图2 HJC模型分段式状态方程

由图2可知, HJC模型压缩过程可分为以下3个阶段^[62]。

1) 弹性压缩阶段

$$p = K_e \mu \quad p \leq p_{crush} \quad (5)$$

式(5)中, $K_e = p_{crush}/\mu_{crush}$ 为材料的弹性体积模量, p_{crush} 为压碎压力, μ_{crush} 为材料弹性极限应变; μ 为单元的体积应变。

2) 塑性应变阶段

在此阶段内材料内部空隙压缩并产生不可逆的塑性变形, 表达式为

$$p = p_{crush} + K_{lock} (\mu - \mu_{crush}) \quad p_{crush} \leq p \leq p_{lock} \quad (6)$$

式(6)中, $K_{lock} = \frac{p_{lock} - p_{crush}}{\mu_{lock} - \mu_{crush}}$, μ_{lock} 为材料的压实体

应变, p_{lock} 为材料的压实应力。

3) 压实阶段

此时材料已完全破碎, 满足

$$p = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3 p_{lock} \quad (7)$$

式(7)中, $\bar{\mu} = \frac{\mu - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}}$, K_1 、 K_2 、 K_3 为材料常数。

HJC模型常被用于类岩石材料的断裂破坏过程, 但是其只适用于压缩损伤效应, 对材料在拉伸状态下的损伤没有明确定义。HJC模型未给出进入塑性段后的应力-应变关系。HJC模型没有考虑类岩石材料在弹性变形过程中的应变率效应, 但经研究发现, 动态加载和静态加载下类岩石材料损伤变化不同, 使得类岩石材料在弹性阶段的弹性模量、泊松比等也会有增加趋势。此外, HJC本构模型无法清晰描述处于弹性极限应力面到失效力面之间的线性强化阶段; 在进一步细化描述围压情况下, HJC本构模型未能较好地描述材料在部分损伤或全部损伤条件下继续抵抗剪切变形的残余应力面。Polanco-Loria等^[63-66]对HJC模型在类岩石材料的拉伸行为方面做了进一步改进。与HJC本构模型不同, RHT本构模型^[67]考虑了应力张量第三不变量和罗德角的影响, 并且新加入3个极限面, 对材料的本构关系模拟得更加精准。Tu等^[68-69]对类岩石材料在RHT数值模拟应用的参数方面做了进一步修正。

LLNL模型最初是由美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory)研发出来并率先应用于DYNA3D软件中^[70]。LLNL模型的弊端是其拉压子午线相同, 并且对抗拉强度的定义不是很合理。Malvar模型^[71]是Malvar等对LLNL模型修正后提出的, 该模型将混凝土受拉压时的塑性流动按Praudtl-Reuss流动法则(体积守恒)处理, 并采用径向回归算法实现。由于该模型消除了体积响应和剪切响应的影响, 导致该模型并没有考虑剪切膨胀。在损伤较小及侧向约束较大的情况下, 该模型所能反应的软化比实际值要高。

TCK模型是Taylor等^[72]引进Budianshy等^[73]的有效体积模量建立的。该模型率先把损伤变量以

率效应形式引入动态本构方程中,可以较好地预测拉伸荷载下的动态本构关系。Grady 和 Kipp^[73]提出的 GK 模型提出可以用能量法获得岩石块度与应变率的关系。Kuszmaw^[74]在 TCK 和 GK 模型的基础上,提出 KUS 模型,该模型考虑了裂纹变化率对损伤的影响。此外,还有 Thorne 模型^[75]和 Yang 模型^[76],其中, Thorne 模型在裂纹密度和损伤表达式方面与 TCK、KUS 相似, Yang 模型认为只有当体积应变足够大时后续的裂纹才可以继续扩展,并考虑了裂纹密度的时效性。上述 5 种模型均认为类岩石材料受到压力荷载时微裂纹不扩展,材料表现为理想弹塑性。但是在遇到实际问题时,类岩石材料在高应变下的损伤不仅表现为拉伸状态下的损伤,而且是拉-压-剪复合型的损伤,这些都是上述模型没有考虑到的。随着屈服面模型的逐渐发展,又有一些学者对早期的屈服面模型提出了一些新的见解。Yang 等^[77]采用分数关联流动法则和洛德角描述岩石的剪胀行为,将反映岩石速率敏感性的动态增长因子引入屈服面函数中,提出了一种考虑围压和应变速率对岩石在动载荷作用下强度和峰后行为影响的本构模型。该模型可以反映塑性变形和体积变形有关的压缩和拉伸损伤。Xie 等^[78]针对岩石在强动载荷作用下的破坏特征和破坏模式,在 JH-2 模型、流变动力学模拟(RDA)模型^[79]和 Liu 模型^[80]的基础上,提出了 Johnson-Holmquist-Rock (JHR) 损伤模型。该模型综合考虑了应变率效应和能量引起的变形破坏机制。Yang 等^[81]认为忽略剪切膨胀和可能导致数值模拟预测的不准确,通过充分考虑材料的损伤演化、剪切膨胀和应变率相关的材料特性,提出一种新的本构模型。但该本构模型没有考虑罗德角和偏应力张量第三不变量对结果的影响。屈服面经验模型的思想是在大量实验基础之上,采用理论方法把应力应变关系建成函数表达式的形式。但是屈服面经验模型大都基于各向同性的假定,没有考虑实际工程材料中软弱结构面的影响。

1.6 内时理论模型

内时理论用一个时间标度定义材料的变形和温度,这个时间标度代表材料的一种内在属性^[82],

是塑性时间的一种特殊表达方式^[83]。内时理论用一个基本变量描述材料性质和内部结构变化对本构关系的影响,不需要屈服函数。塑性理论、黏塑性理论和弹性理论可以认为是内时理论的特例。1978 年, Bazant 等^[84]将内时理论引入到混凝土材料中,随后引入弹性模量和峰值应力的应变率增大系数^[85],使得内时理论可以考虑混凝土材料的应变率效应。宋玉普等^[86]采用内时理论描述混凝土的塑性变形,应用损伤理论描述混凝土的裂缝扩展和刚度退化,并对钢筋混凝土简支梁进行了数值分析,有效模拟了动态荷载下混凝土材料的应变率效应。刘思恩等^[87]在内时理论的基础上,研究了层面倾角对本构关系的影响,并建立各项异性内时本构方程。Jeremiah 等^[88]通过引入第三应力不变量扩展了早期的内时模型,提出 Multi-Mechanical 模型,该模型可以很好地反映类岩石材料的短期孔隙压力响应、剪切引起的颗粒材料的体积变化和应力硬化效应以及反复加载条件下不可逆材料属性。

内时理论由不可逆热力学定律推导而来,其理论基础完备,而且不需要定义屈服面。在数值计算当中不需要进行复杂的加卸载判断和保证一致性条件的数值迭代,能够很好地模拟混凝土等类岩石材料的加卸载、应变软化、滞回等特性。但由于参数众多且难以从试验数据中直接获得,因此很少在实际工程中应用。

1.7 微平面理论模型

微平面模型是基于微观力学提出的一种理论模型。Bazant 等^[89]在 Taylor^[91]、Batdorf 和 Budiansky^[92]等提出的微平面思想上,提出了描述类岩石材料断裂速度和裂纹扩展的微平面模型。之后, Bazant 等^[90-91]在第四代微平面模型 M4 中考虑了裂缝发展的率相关性,推出了率相关微平面模型。M4 仍然存在应力锁定的现象。这是因为当拉应变很大时,它通过运动学约束投影会在一些与裂缝方向交角较大的微平面上产生拉应变,从而出现应力锁定的现象。经过计算后保留有较大的残余拉应力。为解决这一问题,第五代微平面模型 M5 重新加入静力学约束,同时加入了隐式内迭代,提升了数值收敛性的同时也导致计算成本增加^[92-93]。第

七代微平面模型M7^[94-95]由于舍弃了受拉段的体积-偏差(即V-D)分解,对于受压段的V-D分解只提供了正应力的应力-应变边界,对体积应变、偏应变进行整体定义,从而避免了应力锁定与隐式内迭代。此外,M7引入了主应变差来区分静水压工况与强约束下单轴受压工况。

微平面理论认为,材料中宏观上任意一点的应力应变是该点所有应力应变的矢量和。由于在不同加载情况下,每个微平面具有不同的力学特性,固微平面模型可以较好地反应类岩石材料的各项异性。除此之外,微平面理论对于类岩石材料的软化及剪胀特性、静水压力作用下由脆性逐渐转为塑性等都能很好地模拟。但在数值计算中,要获得材料积分点的应力需要分别计算积分点处每个微平面的应力,通常微平面的数量有20个甚至更多,其计算量远远大于普通本构模型。微平面模型虽然能较好地描述快速加载作用下的问题,但模型复杂,待定系数较多,其精确性也有待更多的实验数据来验证。

2 分析

损伤模型近年来运用广泛是研究的热点,但仍有一些不足之处。一是对于损伤阈值这个最重要部分的定义和计算一直未得到公认的结论。从大量文献中提到的动态损伤本构模型中可发现,很多损伤模型中所涉及到的参数较多,且很多参数需要试验获得,确定起来很困难。二是损伤模型难以全面描述岩石在中高应变率下所表现出来的包含非线性弹性、塑性、损伤失效以及应变率相关性在内的综合特性。三是大多数研究者局限于分析单次冲击试验所引起的岩体损伤,缺少对多次冲击试验所引起的类岩石材料损伤的研究。

对于类岩石材料的弹塑性问题,已有大量学者进行研究并已在学术界引起了广泛共识。但是对于动态本构关系中的流变效应,国内外学者有着不同的看法和认识。当考虑流变对类岩石材料的影响时,即动态本构关系中加入黏性进行分析,可以把本构模型分为黏弹性本构关系、黏塑性本构关系

以及黏弹塑性本构关系。其中黏弹性本构关系由于没有考虑塑性的影响,只适用于研究材料变形幅度不大的低应变率荷载下的应力应变关系。黏塑性本构关系则可以较好地描述材料在受到较高应变率、非线性大变形下的应力应变关系。黏弹塑性本构模型结合了黏弹性本构模型和黏塑性本构模型的优点,不仅考虑应力路径的影响而且很好地反映了侧向流变变形的缺点。

屈服面经验模型近年来发展迅速,已经产生了很多新的模型并有大量相关文献。其中,HJC模型常被用于模拟岩石、混凝土等脆性材料的断裂破坏过程,但是其只适用于脆性材料的压缩损伤行为,对拉伸状态下的损伤没有明确定义。Johnson和Holmquist提出的JH-1、JH-2模型,由于在处理脆性材料的非线性大变形、高应变率下的损伤劣化时有较好描述,遂迅速引起重视。在此基础上所提出的HJC模型和RHT模型,模型中各项物理意义明确且形式简单,同时本构模型中的待定参数可通过试验方式测得,由于模型采用连乘方式融合各种岩石力学效应,因此其模型表达式通过数值计算编程应用在几乎所有大型商业软件中,使得类岩石材料的数值模拟研究得到广泛发展。Malvar模型是在LLNL模型基础上提出的,由于该模型消除了体积响应和剪切响应的影响,导致该模型并没有考虑剪切膨胀。在损伤较小以及侧向约束较大的情况下,该模型所能反应的软化比实际值要高。TCK、GK、KUS、Thorne、Yang模型是根据计算和实验结果,在本构模型的基础上对损伤和裂纹密度进行修正,是一种切实有效的方法。但是屈服面经验模型大都基于各向同性的假定,没有考虑实际工程材料中软弱结构面的影响。

内时理论由不可逆热力学定律推导而来,理论基础完备,而且不需要定义屈服面,在数值计算中不需要进行复杂的加卸载判断和保证一致性条件的数值迭代,能够很好地模拟混凝土的加卸载、应变软化、滞回等特性。

微平面模型虽然能较好地描述快速加载作用下的问题,但在数值计算中,要获得材料积分点的应力需要分别计算积分点处每个微平面的应力,通

常微平面的数量有 20 个甚至更多,其计算量远远大于普通本构模型,其精确性也有待更多的实验数据验证。

近年来动态本构关系有些新的突破和发展,具体体现在反演分析、宏微观裂纹的计算、多个强度准则的统一等方面。其中,Zhai 等^[96]在反演计算中使用不同的优化算法,从而提高反演计算的准确性。把各参数视为随机变量,基于贝叶斯理论和差分进化自适应梅特罗波利斯算法预测类岩石材料的峰值强度,准确地量化动态本构模型参数的不确定性。Li 等^[97]基于翼裂纹模型、莫尔-库仑破坏准则、裂纹应变关系以及轴向应变率有关的动态断裂韧度,建立了动态压剪断裂模型。Wu 等^[98]利用主裂纹算法(DCA)研究脆性材料动态拉伸响应的微观统计模型。在 DCA 模型中,用主裂纹的扩展描述损伤演化。采用非线性回归方法粒子群优化(PSO)算法对微观参数进行优化。DCA 模型可较好地描述类岩石材料的动态拉伸响应和预测类岩石材料的动态拉伸强度。Yang 等^[99]提出了一种新的损伤塑性本构模型,该模型考虑了围压和应变率对岩石在动荷载作用下的强度和峰后行为的影响。

3 结论

现有本构模型要么基于近似理论和假设,其中参数物理意义模糊;要么基于试验数据,模型过于复杂,参数确定起来很困难,如何恰当地选取特征参数提高模型对材料描述的准确性成为难题之一。同时这些模型都难以全面描述岩石在中高应变率荷载作用下,表现出来的非线性、塑性、应变硬化-软化效应、损伤失效以及体积缩放等综合响应特性。另一方面,随着数值模拟计算技术在动力学研究中的广泛应用,在试验数据的基础上,如何对失效单元进行精准定位,在单元失效后不影响后续计算过程;如何在材料参数加载过程中发生持续劣化的情况下,对参数劣化过程进行有效地模拟;以及如何采用反演分析方法或是基于深度学习和机器学习从大量的试验数据库中获得有效的本构模型参数,确定出类岩石材料的各项力学参数,从而能

够使类岩石材料在动静组合加载下的理论计算值与试验数据较好地吻合是未来的一个发展趋势。

参考文献(References)

- [1] Labuz J F, Zang A. Mohr-Coulomb failure criterion[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(6): 975-979.
- [2] Drucker D C, Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, 10(2): 157-165.
- [3] Hoek E, Brown E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(8): 1165-1186.
- [4] Bui H D, Ehrlacher A. Propagation of damage in elastic and plastic solids[C]//*Proceedings of the 5th International Conference of Fracture*, Cannes: Pergamon Press, 1981: 533-551.
- [5] 朱万成, 唐春安, 左宇军. 深部岩体动态损伤与破裂过程[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [6] Brooks J J, Samaraie N H. Influence of rate of stressing on tensile stress-strain behavior of concrete[C]//*Fracture of Concrete and Rock: Recent Developments*. London: Elsevier, 1989: 397-408.
- [7] 卢文波, 杨建华, 严鹏. 深部岩体开挖瞬态卸荷机制与效应[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [8] 陶俊林, 李奎. 水泥砂浆的一个热粘弹性率型损伤本构模型[J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(3): 268-273.
- [9] Dubé J F, Pijaudier C G, Christian L B. Rate dependent damage model for concrete in dynamics[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1996, 122: 939-947.
- [10] Deng J, Gu D S. On a statistical damage constitutive model for rock materials[J]. *Computers and Geosciences*, 2011, 37(2): 122-128.
- [11] Eibl J, Schmidt H B. Strain-rate-sensitive constitutive law for concrete[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1999, 125(12): 1411-1420.
- [12] Forquin P, Erzar B. Dynamic fragmentation process in concrete under impact and spalling tests[J]. *International Journal of Fracture*, 2010, 163(1/2): 193-215.
- [13] Addessio F L, Johnson J N. A constitutive model for the dynamic response of brittle materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 67(7): 3275-3286.
- [14] 李庆斌, 张楚汉, 王光纶. 单压状态下混凝土的动力损伤本构模型[J]. *水利学报*, 1994(3): 85-89.

- [15] 李庆斌, 邓宗才, 张立翔. 考虑初始弹模变化的混凝土动力损伤本构模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(8): 1088-1091.
- [16] Liu H Y, Lü S R, Zhang L M, et al. A dynamic damage constitutive model for a rock mass with persistent joints [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 75: 132-139.
- [17] Zhu Z W, Cao C X, Fu T T. SHPB test analysis and a constitutive model for frozen soil under multiaxial loading[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2019 (4): 626-645.
- [18] Zhang F L, Zhu Z W, Fu T T, et al. Damage mechanism and dynamic constitutive model of frozen soil under uniaxial impact loading[J]. Mechanics of Materials, 2019, 140: 103217.
- [19] 谢理想, 赵光明, 孟祥瑞. 软岩及混凝土材料损伤型黏弹性动态本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 857-864.
- [20] 朱兆祥, 徐大本, 王礼立. 环氧树脂在高应变率下的热粘弹性本构方程和时温等效性[J]. 宁波大学学报(理工版), 1988(1): 58-68.
- [21] 陈江瑛, 王礼立. 水泥砂浆的率型本构方程[J]. 宁波大学学报(理工版), 2000(2): 1-5.
- [22] 胡时胜, 王道荣. 冲击载荷下混凝土材料的动态本构关系[J]. 爆炸与冲击, 2002(3): 242-246.
- [23] Zhou F H, Wang L L, Hu S S. A damage-modified nonlinear visco-elastic constitutive relation and failure criterion of PMMA at high strain-rates[J]. Explosion and Shock waves, 1992, 12(4): 333-342.
- [24] 唐志平. 高应变率下环氧树脂的力学性能研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 1981
- [25] Wang L L, Zhou F H, Sun Z J, et al. Studies on rate-dependent macro-damage evolution of materials at high strain rates[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2010, 19(7): 805-820.
- [26] 单仁亮, 程瑞强, 高文蛟. 云驾岭煤矿无烟煤的动态本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(11): 2258-2263.
- [27] Tao J L, Li K. A thermo-viscoelastic rate-dependent constitutive equation for cement mortar with damage[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(3): 268-273.
- [28] Zhao G M, Xie L X, Meng X R. A constitutive model for soft rock under impact load[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(2): 126-132.
- [29] 梁书锋. 恒应变率冲击作用下花岗岩的损伤演化与本构模型研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京)岩土工程系, 2016.
- [30] Zhang H, Wang B, Xie A, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 152(2017): 154-167.
- [31] 马冬冬. 动静组合加载下人工冻土动态力学特性及本构模型研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
- [32] Yang J M, Zhang Y H, Li Q W, et al. Dynamic constitutive model of penetrating jointed rock mass based on ZTW model[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol: IOP Publishing, 2019, 237 (3): 032110.
- [33] 郑永来, 夏颂佑. 岩石黏弹性连续损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增刊1): 428-432.
- [34] 尚仁杰. 混凝土动态本构行为研究[D]. 大连: 大连理工大学, 1994.
- [35] Izzuddin B A, Fang Q. Rate-sensitive analysis of framed structures part I: Model formulation and verification[J]. Structural Engineering and Mechanics, 1997, 5(3): 221-237.
- [36] 单仁亮, 薛友松, 张倩. 岩石动态破坏的时效损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(11): 1771-1776.
- [37] Chong K P, Borese A P. Strain rate dependent mechanical properties of new albany reference shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1990, 27(3): 199-205.
- [38] Malvern L E. The propagation of longitudinal waves of plastic deformation in a bar of material exhibiting a strain-rate effect[J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18: 203-208.
- [39] Perzyna P. Fundamental problems in viscoplasticity[J]. Advances in Applied Mechanics, 1966, 9: 243-377.
- [40] Lindholm U S, Yeakley L M, Nagy A. The dynamic strength and fracture properties of dresser basalt[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1974, 11(2): 181-191.
- [41] 孙建运, 李国强. 动力荷载作用下固体材料本构模型研究的进展[J]. 四川建筑科学研究, 2006(5): 144-149.
- [42] Fang X Y, Xu J Y. A modified overstress model to simulate dynamic split tensile tests and its experimental validation[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2016, 49(9): 3823-3828.
- [43] 赵光明, 谢理想, 孟祥瑞. 软岩的动态力学本构模型[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(2): 126-132.
- [44] 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.
- [45] Tashman L, Masad E, Little D, et al. A microstructure-based viscoplastic model for asphalt concrete[J]. *International Journal of Plasticity*, 2005, 21(9): 1659-1685.
- [46] Winnicki A, Pearce C J, Biani N. Viscoplastic Hoffman consistency model for concrete[J]. *Computers & Structures*, 2001, 79(1): 7-19.
- [47] 王哲, 林皋, 逯静洲. 混凝土的单轴率型本构模型[J]. *大连理工大学学报*, 2000(5): 597-601.
- [48] Bianić N, Zienkiewicz O C. Constitutive model for concrete under dynamic loading[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1983, 11(5): 689-710.
- [49] 夏才初, 闫子舰, 王晓东, 等. 大理岩卸荷条件下弹黏塑性本构关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(3): 459-466.
- [50] Cristescu N D. A general constitutive equation for transient and stationary creep of rock salt[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(2): 125-140.
- [51] 翟越. 岩石类材料的动态性能研究[D]. 西安: 长安大学结构工程系, 2008.
- [52] 翟越, 赵均海, 李寻昌, 等. 岩石类材料损伤黏弹塑性动态本构模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011 (Suppl 2): 3820-3824.
- [53] Huang S, Zhang C, Ding X, et al. Viscoelastic-plastic constitutive model with non-constant parameters for brittle rock under high stress conditions[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020(3): 1-19.
- [54] Pu S Y, Zhu Z D, Song L, et al. Fractional-order visco-elastoplastic constitutive model for rock under cyclic loading[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(9): 326-337.
- [55] 张俊, 李志伟. 循环荷载作用下沥青混合料的黏弹塑性损伤本构模型[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(10): 1496-1503.
- [56] Zhang J, Wang Y D, Su Y. Fatigue damage evolution model of asphalt mixture considering influence of loading frequency[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 218: 712-720.
- [57] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.
- [58] Johnson H G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2011, 78(5): 051003.
- [59] Holmquist T J, Johnson G R, Gerlach C A. An improved computational constitutive model for glass[J]. *Philosophical Transactions*, 2017, 375(2085): 20160182.
- [60] 杨震琦, 庞宝君, 王立闻, 等. JH-2模型及其在 Al_2O_3 陶瓷低速撞击数值模拟中的应用[J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(5): 463-471.
- [61] Holmquist T J, Johnson G R, Grady D E, et al. High strain rate properties and constitutive modeling of glass [C]//*Proceedings of 15th International Symposium on Ballistics*. Jerusalem: Sandia National Labs, 1995: 234-244.
- [62] 李世民, 李晓军. 几种常用混凝土动态损伤本构模型评述[J]. *混凝土*, 2011(6): 19-22.
- [63] Polanco-Loria M, Hopperstad O S, Børvik T, et al. Numerical predictions of ballistic limits for concrete slabs using a modified version of the HJC concrete model[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(5): 290-303.
- [64] Xie L X, Lu W B, Zhang Q B, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut basting design under high in-situ stresses[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2017, 66: 19-33.
- [65] Liu K, Wu C Q, Li X B, et al. A modified HJC model for improved dynamic response of brittle materials under blasting loads[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 123: 103584.
- [66] Kong X Z, Fang Q, Wu H, et al. Numerical predictions of cratering and scabbing in concrete slabs subjected to projectile impact using a modified version of HJC material model[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 95: 61-71.
- [67] Riedel W. Beton unter dynamischen lasten meso- und makromechanische modelle und ihre parameter[D]. Freiburg: Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, 2000: 210.
- [68] Tu Z, Lu Y. Modifications of RHT material model for improved numerical simulation of dynamic response of concrete[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(10): 1072-1082.
- [69] Abdel-Kader M. Modified settings of concrete parameters in RHT model for predicting the response of concrete panels to impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132: 103312.
- [70] LS-DYNA keyword manual version 971[R]. Livermore:

- Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [71] Malvar L J, Crawford J E, Wesevich J W, et al. A plasticity concrete material model for DYNA3D[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(9/10): 847–873.
- [72] Taylor L M, Chen E P, Kuszmaul J S. Microcrack-induced damage accumulation in brittle rock under dynamic loading[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 1986, 55(3): 301–320.
- [73] Budiansky B, O'Connell R J. Elastic moduli of a cracked solid[J]. *International Journal of Solids Structures*, 1976, 12(2): 81–97.
- [74] Grady D E, Kipp M E. Continuum modelling of explosive fracture in oil shale[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1980, 17(3): 147–157.
- [75] Kuszmaul J S. A new constitutive model for fragmentation of rock under dynamic loading[C]//*Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. Columbia, USA: Colorado Keystone, 1987: 412–423.
- [76] Throne B J, Hommert P J, Brown B. Experimental and computational investigation of the fundamental mechanisms of cratering[C]//*International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Brisbane, 26–31 Aug, 1990.
- [77] Yang R, Brwden W F, Katsabanis P D. A new constitutive model for blast damage[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1996, 33(3): 245–254.
- [78] Yang L, Wang G S, Zhao G F, et al. A rate- and pressure-dependent damage-plasticity constitutive model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 133: 104394.
- [79] Xie L X, Yang S Q, Gu J C, et al. JHR constitutive model for rock under dynamic loads[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 108: 161–172.
- [80] Milasinovic D D, Landovic A. Rheological-dynamical analogy for analysis of vibrations and low cycle fatigue in internally damped inelastic frame structures[J]. *Computers & Structures*, 2018, 196: 76–93.
- [81] Liu L Q, Katsabanis P D. Development of a continuum damage model for blasting analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(2): 217–231.
- [82] Yang L, Lin X, Li H Y, et al. A new constitutive model for steel fibre reinforced concrete subjected to dynamic loads[J]. *Composite Structures*, 2019, 221: 110849.
- [83] Valanis K C. A theory of viscoplasticity without a yield surface. Part 1. General Theory[R]. Iowa: University of Iowa, 1970.
- [84] 胡亚元. 论塑性因子与塑性时间的一般关系[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008(Suppl 2): 3490–3497.
- [85] Bazant Z P, Ching-Long S. Endochronic model for non-linear triaxial behavior of concrete[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1978, 47(2): 305–315.
- [86] Bazant Z P, Oh B H. Strain rate effect in rapid triaxial loading of concrete[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division-ASCE*, 1982, 108(5): 764–782.
- [87] 宋玉普, 刘浩. 混凝土率型内时损伤本构模型[J]. *计算力学学报*, 2012, 29(4): 589–593.
- [88] 刘运思, 王世鸣, 郭志广, 等. 横观各向同性岩体内时损伤本构模型研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(7): 1407–1414.
- [89] Jeremiah M S, John F P, Youssef H, et al. A kinematic hardening model based on endochronic theory for complex stress histories[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 114(10): 103117.
- [90] Bazant Z P, Xiang Y, Adley M, et al. Microplane model for concrete. II: Data delocalization and verification[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1996, 122(3): 255–262.
- [91] Taylor G I. Plastic strain in metals[J]. *Journal of the Institute of Metals*, 1938, 62(1938): 307–324.
- [92] Batdorf S B, Budiansky B. A mathematical theory of plasticity based on the concept of slip[R]. Washington DC: National Advisory Committee for Aeronautics, 1949.
- [93] Bazant Z P, Caner F C, Adley M D, et al. Fracturing rate effect and creep in microplane model for dynamics [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126(9): 962–970.
- [94] Li J B, Tue N V, Caner F C. Microplane constitutive model M4L for concrete. II: Calibration and validation [J]. *Computers & Structures*, 2013, 128: 146–159.
- [95] Bažant Z P, Caner F C. Microplane model M5 with kinematic and static constraints for concrete fracture and anelasticity. I: Theory[J]. *Journal of Engineering Mmechanics*, 2005, 131(1): 31–40.
- [96] Bažant Z P, Caner F C. Microplane model M5 with kinematic and static constraints for concrete fracture and anelasticity. II: Computation[J]. *Journal of Engineering mechanics*, 2005, 131(1): 41–47.
- [97] Caner F C, Bažant Z P. Microplane model M7 for plain

- concrete. I: Formulation[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2012, 139(12): 1714–1723.
- [98] Caner F C, Bažant Z P. Microplane model M7 for plain concrete. II: Calibration and verification[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2012, 139(12): 1724–1735.
- [99] Zhai Y, Zhao R F, Li Y B, et al. Stochastic inversion method for dynamic constitutive model of rock materials based on improved DREAM[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 147: 103739.
- [100] Li X Z, Qi C Z. A micro–macro dynamic compressive–shear fracture model under static confining pressure in brittle rocks[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 122: 109–118.
- [101] Wu B B, Yao W, Xia K W. Theoretical modeling of the dynamic tensile response of Laurentian granite using the dominant crack algorithm[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123: 104077.
- [102] Yang L, Wang G S, Zhao G F, et al. A rate– and pressure–dependent damage–plasticity constitutive model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 133: 104394.

Review of dynamic constitutive models of rock–like materials

CHEN Siyu, WANG Qingcheng, YANG Liyun*

School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology–Beijing, Beijing 100083, China

Abstract The dynamic constitutive relationship of the rock–like materials is important in the study of the failure threshold of the rock structures and the impact resistance of the structures surrounding the rock and the engineering materials. Especially, the dynamic constitutive relation of the rock–like materials under high strain rate is important for solving engineering problems and designing construction schemes. This paper reviews the dynamic constitutive models of the rock–like materials, focusing on the advantages and the limitations of various dynamic constitutive models, such as the damage model, the dynamic viscoelastic model, the dynamic viscoplastic model, the dynamic viscoelastic plastic model and the empirical model, as well as the latest developments of different theoretical and empirical models, and the future development trend of the dynamic constitutive models. It is pointed out that as a development feature, the theoretical calculation values of the rock–like materials under combined dynamic and static loading are in good agreement with the experimental data.

Keywords rock–like material; dynamic constitutive relation; high strain rate ●



(责任编辑 王志敏)