

冲击压缩下脆性材料中失效波的灾变模型*

姜智捷 夏蒙芬 汪海英

(中国科学院力学研究所非线性国家重点实验室, 100190)

摘要 平板撞击下,玻璃、陶瓷等脆性材料在冲击应力小于材料冲击弹性极限(HEL)时,会出现失效波现象,实验观测表明失效波阵面前后材料性质发生了突变.本文对玻璃、陶瓷等脆性材料的力学性能进行了分析,基于弹性-统计脆性(ESB)模型,模拟了脆性材料在冲击下的响应.发现脆性材料在冲击应力小于HEL时,可能发生灾变,物理上即表现为失效波.数值模拟表明,模型与实验结果基本吻合,较好地反映了失效波的形成机理.

关键词: 失效波, 弹性-统计脆性模型, 韦伯分布, 失效波速

一、引言

关于平板撞击下,玻璃、陶瓷等脆性材料中的失效波现象,有以下观测:失效界面由撞击面产生,以小于冲击波速的失效波速向板内传播.失效波后正应力几乎不变,剪切强度显著降低,层裂强度几乎为零^[1].研究者对失效波开展了大量的研究,但目前关于失效波的形成机理、失效波形成条件、失效波速等仍缺乏普遍接受的理论模型.

二、理论模型

对于脆性不均匀材料,我们认为材料的不均匀性仅体现在微观单元的剪切强度上,即各个微观单元有相同的弹性模量,但它们的剪切强度 τ_c 可能不同.双参数韦伯分布可以很好的表现材料剪切强度 τ_c 的分散性^[2].假设材料的剪切强度 τ_c 服从双参数韦伯分布,当作用在材料上的剪切应力为 τ_{meso} ,材料的宏观损伤 D 为:

$$D = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\tau_{meso}}{\eta}\right)^m\right) \quad (1)$$

其中,形状因子 $m > 0$ 表现了材料的均匀度,强度因子 $\eta > 0$ 表现了材料的宏观强度.基于实验观测,我们认为损伤发生后,材料的抗压强度不变,抗畸变能力显著退化.由此我们得到了一维应变下的应力-应变关系(应力、应变以压为正).

$$\sigma_{ij} = K_0 \theta \delta_{ij} + 2G_0 \exp\left(-\left(\frac{G_0 \gamma}{\eta}\right)^m\right) \left(\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \theta \delta_{ij}\right) \quad (2)$$

由式(2)可以得到ESB模型,如图1所示.为简化计算,我们认为灾变前材料是线弹性的,并使用Mie-Grüneisen方程^[3]刻画飞板材料的应力应变状态.

*国家自然科学基金(Nos. 11172311, 11021262)资助

