

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0411

动态本构关系简介*

本构关系,也称本构方程、物理方程、物性方程、本构模型等,是描述质点的应力应变关系,是理解物体变形响应、求解内部变量和进行结构设计必要的方程。而动态本构关系描述的是动态载荷下连续介质内部变量之间的力学关系,通常材料的弹性、伪弹性、黏性、塑性、黏流性等力学性能以及它们的叠加组合对温度、加载率、材料微观组织结构等比较敏感,例如金属材料的动态本构关系是一个或一组方程,可将应变率 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 与应力 σ_{ij} 、应力率 $\dot{\sigma}_{ij}$ 、温度 T 、材料的热力学历史以及材料的许多结构参数 s_1 、 s_2 、 s_3 等联系起来。这些结构参数包括位错密度、位错本身及其相互作用、晶粒尺寸等。这样,其本构的率关系可以用一个统一的方程 $\dot{\epsilon}_{ij} = f(\sigma_{ij}, \dot{\sigma}_{ij}, T, s_1, s_2, s_3, \dots)$ 来表示。

对材料动态响应的研究可以追溯到 19 世纪末,科学家们先后在 Hopkinson 杆实验和 Charp 实验等中发现材料在冲击加载下的性能与准静态下的性能具有显著差异,由此开启了对材料率效应的广泛研究,而对动态本构关系的研究可追溯到 20 世纪初。热激活理论的提出是金属材料动态本构关系发展的里程碑,揭示了应变率与温度耦合效应的物理基础。两次世界大战后,出于对战争、恐怖主义威胁的警惕,对地震、海啸等自然灾害的预防,以及航空航天、航海、能源开采、核工业等工程领域的发展需求,材料和结构在冲击与爆炸载荷下的动态变形失效方面的研究大量涌现。20 世纪 60 年代以来,随着计算力学的快速发展,建立适用于分析复杂极端工况下的结构力学响应的材料动态本构模型成为关键环节。

建立材料动态本构关系也是冲击动力学最基本的问题之一。从本构模型的类型来说,唯象本构模型具有简洁的解析形式,在工程中应用广泛,具有物理基础的本构模型则可以更好地反映材料变形过程中的内在物理机制,而近年来出现的基于人工神经网络的本构模型则具有更好的预测精度和灵活性。由于大量新材料和具有特殊性能结构材料的涌现,目前建立兼具科学性和工程适用性的材料动态本构关系仍具有很大的挑战。如多维材料、微结构调控材料、微纳米结构材料、增材制造材料、高熵合金等,其动态本构关系的建立受到研究者的极大关注。动态本构关系向着多变量复杂化、高准确度等方向发展,可从以下两方面看出。

(1) 典型金属材料在一定率-温范围内可能出现如动态应变时效、变形孪晶、冲击相变和不同于静载下的位错交滑移(Kear-Wilsdorf lock 现象)等微观机制,使得材料会出现反常的应变率和温度敏感性,这时传统本构模型不再适用,需要建立考虑这类微观机制和准确描述反常率-温耦合效应的动态本构模型。

(2) 以往,由于实验条件限制,揭示材料力学行为采用单轴加载,本构方程以单轴一维应力应变状态建立。这些都与实际结构中材料的力学状态不一致,且材料在不同应力状态下的本构行为具有差异性(如拉-压不对称性),应力三轴度、罗德角等应力状态参数与应变率的耦合关系的物理基础还不明确,实际上,材料在三轴复杂应力状态下的本构行为也并非单轴应力状态下的简单叠加。因此,建立考虑复杂应力状态的三维动态本构模型就很有意义。

经特邀和按照《爆炸与冲击》期刊的严格审稿流程,本专题特别呈现了不同材料类型、不同研究方向的专家,就最新的动态本构关系建立和本构关系的发展报道了各自最新的研究成果,在此对他们表示衷心的感谢,对《爆炸与冲击》编辑部和曾月蓉老师的有力支持表示感谢!

西北工业大学 郭伟国 教授