

塑性损伤的发展与应用

Development and Application of Ductile Damage

张丁非^{1,2}, 戴庆伟^{1,2}, 胡耀波^{1,2}, 齐福刚^{1,2}, 李鹏程^{1,2}

(1 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045;

2 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044)

ZHANG Ding-fei^{1,2}, DAI Qing-wei^{1,2}, HU Yao-bo^{1,2}, QI Fu-gang^{1,2}, LI Peng-cheng^{1,2}

(1 College of Materials Science and Engineering, Chongqing University,

Chongqing 400045, China; 2 National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing 400044, China)

摘要: 本文介绍了塑性损伤的机制和建立塑性损伤模型的一般方法; 系统地分析比较了基于连续介质力学、细观力学、连续损伤力学等多种损伤理论, 推导了它们之间的内在联系; 综述了三轴度、应变路径、组织等对塑性损伤的影响, 重点阐述了损伤-塑性流变的耦合分析; 还介绍了电阻测量、统计与定量表征、有限元等塑性损伤的分析方法; 并且分析了目前塑性损伤研究中存在的问题, 同时指明了发展方向。

关键词: 塑性损伤; 损伤模型; 塑性流变; 连续损伤力学

中图分类号: O346.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)01-0092-07

Abstract: The mechanism of ductile damage and a general approach for the establishment of ductile damage model were reviewed. A variety of damage theories based on continuum mechanics, micromechanics, continuum damage mechanics were analyzed, as well as the intrinsic relationship among them was investigated. An overview of the effects of three-axis degrees, the strain path, and microstructure on ductile damage was carried on, especially the damage-plastic coupled analysis. The methods for studying ductile damage, such as the resistance measurement, statistics and quantitative characterization, finite element methods were described. The present problems in ductile damage investigation were analyzed, and the development direction was pointed out.

Key words: ductile damage; damage model; plastic flow; continuum damage mechanics

损伤力学是融合了固体物理学、材料力学、连续介质力学等学科的观点, 用以解决材料的破坏机制、建立损伤本构方程、预测工件使用寿命或材料加工中的损伤的学科。1977 年, Janson 和 Hult 第一次提出“损伤力学”的说法; 1978 年, 法国的 Lemaitre 和 Chaboche 等以不可逆热力学为基础, 综合连续介质力学, 得到了塑性损伤、疲劳损伤等数学模型, 使得损伤力学成为一门新的学科^[1]。经过 30 余年的发展, 损伤力学已经建立了较深厚的理论基础, 形成了初步的独立体系。所涉及的研究范围也由最初的以蠕变损伤、疲劳损伤为主, 扩展到延塑性损伤、动态损伤、混凝土损伤等范围。

在材料的加工过程中, 随着塑性变形的进行, 材料的损伤也在扩展。当达到一定的损伤门槛值, 材料将被破坏。所以现在很多的材料研究工作者都在研究材料加工过程中塑性损伤的发生和发展情况。Huang H C 等^[2]运用塑性损伤理论预测了压力容器的倾斜

断裂, 而且获得的数值结果得到了实验的证实。Tang 等^[3]研究了钣金成型中的各向异性损伤。Liang Xue 等^[4,5]用塑性损伤理论研究了延性断裂的开始和增值。塑性损伤研究就是要探明材料塑性变形过程中损伤的产生-发展规律, 建立损伤模型, 得到材料的加工成型极限条件, 为材料加工提供理论指导。

1 塑性损伤机制

塑性损伤是金属发生塑性变形直至断裂破坏的过程, 是金属中的空洞不断扩展的过程。目前, 大多数的研究都认为, 塑性损伤分为 3 个过程: 空洞形核—长大—聚合。

温彤^[6]将塑性损伤机制细分为以下过程: (1) 在应变只有百分之几时, 夹杂物自身开裂或与基体脱离形成空洞; (2) 空洞在应力作用下扩展, 长大; (3) 损伤后

期, 细微空洞沿中等粒子界面形核; (4) 在相邻空洞间的局部剪切带中, 细微空洞迅速长大; (5) 细微空洞汇合成片状, 形成宏观裂纹; (6) 宏观裂纹失稳扩展。

然而金属材料的损伤方式又受三轴应力状态影响, 不同三轴应力状态下损伤方式不同。赵震等^[7]研究了不同三轴度下材料的塑性损伤, 提出了 3 种延性损伤机理: 无空穴影响剪切损伤、剪切型空穴损伤和拉伸型空穴损伤。上述理论构成了从细观力学出发的塑性损伤理论机制的体系。

2 损伤模型建立的一般方法

建立损伤模型是塑性损伤研究中很重要的环节。模型的建立是通过模型的抽象, 用少数几个简单的损伤变量来定性或者定量地描述损伤的发生和发展直至材料发生破坏的过程。塑性损伤模型的建立一般要经过以下步骤^[8]: (1) 选择合适的塑性损伤变量。损伤变量是描述材料中损伤状态的场变量。损伤变量的选取应考虑到如何与宏观力学量建立联系并易于测量。不同的塑性损伤过程, 可以选取不同的损伤变量; 同一损伤过程, 也可以选取不同的损伤变量。(2) 建立塑性损伤演变方程。材料内部的损伤是随应力、应变、总变形量、温度等外界因素变化而变化的。为了描述塑性损伤的发展, 需要建立描述损伤发展的方程即损伤演变方程, 此方程必须反映材料真实的损伤状态。(3) 建立材料的流变损伤本构关系。考虑了损伤的本构关系, 在耦合计算中占有重要地位, 能够真实地反映材料的塑性变形情况, 起着关键或核心的作用。(4) 根据初始条件、边界条件等界定条件求解材料各点的流变参数和损伤值。由计算得到的损伤值, 可以判断各点的损伤状态。在损伤达到临界值时, 认为该体积元破裂, 然后根据新的损伤分布状态和新的边界条件, 再作类似的反复计算, 直至达到构件的破坏准则而终止。这一过程通常通过有限元软件来实现, 而且可以实现损伤单元的剥离。

3 塑性损伤理论

最初的损伤理论是建立在连续介质理论的基础上, 随着研究的深入, 对塑性损伤的微观机制有了深入的认识后, 逐渐建立了基于细观力学的损伤理论。而连续损伤理论是损伤理论发展几十年的成就。它被广泛用于分析材料塑性加工与成型中的损伤和断裂。

3.1 基于连续介质理论的模型

连续介质理论认为材料是不可压缩、均匀连续的,

基于连续介质理论的损伤理论一般认为塑性损伤是由应力、应变引起的。基于连续介质力学的损伤模型代表了早期的损伤理论, 主要有以下 3 个:

Crookroft & Latham^[9]认为断裂与拉伸主应力有关, 由此提出以下断裂准则: 对于给定的材料, 在一定的温度、应变率下, 当最大拉伸应力-应变能达到临界值时断裂产生, 即

$$\int_0^{\epsilon_f} \sigma_{\max} d\bar{\epsilon} = C \quad (1)$$

式中: $\bar{\epsilon}$ 为断裂等效应变; σ_{\max} 为最大拉伸应力; $d\bar{\epsilon}$ 为等效应变增量; C 为由压缩实验计算得到的材料常数。由于该理论很容易融入到有限元模块中, 因此已被广泛地应用于体积成形的缺陷预测。

后来, Brozzo 等^[10]对 Crookroft & Latham 的理论进行了修改, 他们认为断裂方程应与静水应力有关, 即

$$\int_0^{\epsilon_f} \frac{2\sigma_{\max}}{3(\sigma_{\max} - \sigma_m)} d\bar{\epsilon} = C \quad (2)$$

式中: σ_{\max} 为最大拉伸应力; σ_m 为静水压力。

大矢根通过对多孔体的压缩塑性本构关系的研究, 提出了变形引起断裂的塑性断裂准则, 即

$$\int_0^{\epsilon_f} C_1 + \frac{\sigma_m}{C_2 \sigma} d\bar{\epsilon} = 1 \quad (3)$$

式中: C_1, C_2 为材料常数^[6]。

3.2 基于细观力学的模型

经典塑性理论通常不考虑塑性体积变形, 认为静水压力对材料的屈服无明显影响, 如 Crookroft & Latham 理论, 这些简化对无细观损伤的连续介质是可以接受的。由于空洞的成核与扩展, 体积不可压缩的假设受到挑战。尽管基体材料的力学行为可以用经典塑性理论来描述, 但空洞的长大却使材料体积膨胀, 因此需要发展考虑宏观体积变化的塑性理论。

Oyane 等^[11]建立了基于空洞生长的损伤模型:

$$\int_0^{\epsilon_f} 1 + \frac{\sigma_m}{A \sigma} d\bar{\epsilon} = C \quad (4)$$

在韧性塑性损伤本构理论中, 由 Gurson^[12]提出的本构方程占有十分重要的地位。Gurson 认为宏观元素是可以由具有细观结构的元素表征的, 可以建立适当的基于细观结构的模型来表征材料损伤, 于是提出了体胞模型。经过推导, Gurson 得出如下的流动势方程:

$$\varphi = \left(\frac{\sigma}{\sigma_f}\right)^2 + 2f \cosh \frac{3\sigma_m}{2\sigma_f} - (1 + f^2) \quad (5)$$

式中: σ 为宏观等效应力; σ_f 为基体材料的等效应力; f 为空穴密度(空洞体积分数); σ_m 为宏观静水应力。

Gurson 模型从韧性断裂的微观机制出发, 物理背景清晰, 是一套比较完整的用以描述空洞影响材料塑

性行为的本构方程。它标志着细观损伤力学的重大进展。

Gurson 模型表达了韧性材料中以空洞形式表征的杂质或第二相粒子所占的体积比,但是,没有考虑细观空洞大小和空洞间距的尺度概念。所以由该模型发展而得到的失稳时的应变比实验得到的可塑性要高很多。Tvergaard 和 Needleman^[13,14] 建议通过使用变量 f^* 来代替空穴密度,以及使 f^* 在临近断裂时比 f 增大得快来加强空洞响应的影响。他们将 Gurson 方程修正为

$$\varphi = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_f}\right)^2 + 2f^* q_1 \cosh \frac{3\alpha_m}{2\sigma_f} - (1 + q_2 f^2) \quad (6)$$

式中: q_1 和 q_2 为实验常数; f^* 和 f 双线性相关。

Bensaddiq 等^[15] 确定了 Gurson-Tvergaard-Needleman 连续损伤模型中的参数,并且用此模型进行了局部损伤分析。用空洞体积比较小的 NiCr 钢进行了实验,对模型进行了修正。

3.3 基于连续损伤力学的模型

连续损伤力学将材料内部微缺陷视为宏观平均的连续变化的损伤变量,从而建立起相应的“连续损伤场”的概念,从而在连续介质力学范畴里发展损伤材料力学和损伤演化的理论。这种理论使损伤力学得以迅速发展。

基于连续损伤力学的塑性损伤模型在金属塑性加工领域得到了广泛的运用。Lemaitre^[16] 以弹性应变能为热力学势能,得出如下韧性损伤准则:

$$D = \frac{D_c}{\varepsilon_t - \varepsilon_b} \left\{ p \left[\frac{2}{3} (1 + \nu) + 3(1 - 2\nu) \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} \right)^2 \right] - \varepsilon_b \right\} \quad (7)$$

式中: D 为损伤变量; p 为累积塑性应变; D_c 为损伤阈值; σ 为等效应力; σ_m 为静水压力; ν 为泊松比; ε_t 和 ε_b 分别为一维条件下损伤开始时的应变和产生宏观裂纹时的应变。

但式(7)的应力三轴度被表示为 $(\frac{\sigma_m}{\sigma})^2$, 不能反映应力三轴度为负值的情况。在塑性加工中,变形体基本应力状态除冲压中的少数工序和拉拔外,在大多数的塑性加工方法中,变形体的基本应力状态为负值。为了克服上述模型的不足,吴诗悖等^[17] 提出将考虑损伤的塑性势作为热力学势能,并以此导出了韧性损伤演化方程:

$$D = \frac{D_c}{\varepsilon_t - \varepsilon_b} \left\{ \exp \left[B \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} - \frac{1}{3} \right) \right] p - \varepsilon_b \right\} \quad (8)$$

连续损伤模型在材料的加工成型中得到了广泛应用。Dhar 等^[18] 用连续损伤力学理论和弹塑性有限元

法预测了塑性损伤材料的裂纹生长情况,并且实验验证了所用的理论和相关的参数。但是, Nicola Bonora 等^[19] 通过对 A533B 低合金钢的研究发现,连续损伤模型不能正确反映材料在多种三轴应力状态下的损伤演变情况。

3.4 能量模型

材料内部塑性损伤要耗散一定的能量,随着材料损伤的累积,其耗散的能量也在不断增加,直至临界破坏,其间有着——对应的关系。因此,可以采用材料在受力变形过程中累积耗散的能量来度量材料损伤。能量模型可以克服有效应力法的局限,完整描述材料在延性损伤全过程中的损伤变化,而且实测方便,精度容易保证。

材料在塑性变形过程中,当其特征区域单位体积所吸收的塑性变形能达到一定值时,材料就产生宏观裂纹。这就是早期的单位体积塑性功准则,可表示为

$$\int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon = W_c \quad (9)$$

式中: σ 为等效应力; $d\varepsilon$ 为等效应变增量; ε 为断裂等效应变。

王永康^[20] 利用材料单轴静载下的损伤等于塑性应变能与可恢复的弹性应变能之比的原理,推导了塑性损伤的能量方程:

$$D = \frac{K}{(1+n)W_f} \varepsilon_p^{1+n} \quad (10)$$

式中: W_f 为断裂韧性; n 为材料的应变硬化指数; ε_p 为塑性应变; K 为材料常数。通过单轴拉伸试验验证了此损伤方程的正确性。经推广,此方程可以用在多轴应力状态下。

3.5 其他模型

目前连续损伤理论已经有了很大的发展。但是简单地取有效应力代替无损伤材料本构方程中的应力得到的损伤本构方程难以反映损伤对材料特性的影响。在理论上很难将损伤史对材料本构关系的影响用显式本构方程表示出来,尤其对塑性损伤交互影响的材料损伤的演化方程更是难以显式地得到。基于这些原因郭少华^[21] 采用了有效应力的概念,同时提出有效塑性内变量的观点,通过热力学状态的等效关系,得到了有效的广义摩擦系数,并结合上述两种观点发展一种新的弹塑性损伤本构方程及损伤演化方程理论。他的三维弹塑性损伤本构如下:

$$\dot{D}^\beta |_{\varepsilon_p} = \frac{d\varphi}{dX^\beta} \quad (11)$$

式中: ε_p 为有效塑性应变; φ 为系统耗散势函数; X^β 为广义摩擦力; \dot{D}^β 为损伤内变量。

温彤^[6]建立了较为完整的塑性损伤流动方程:

$$\dot{D}_{ijkl} = \left[\frac{w_0}{2S} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \pm \frac{w_0}{S} \delta_{ik} \delta_{jl} \right] \dot{\lambda} \quad (12)$$

此方程的求解涉及损伤算子, 应变张量, 弹性应变张量, 塑性应变增量, 累积塑性应变率, 背应力率张量, 各向同性硬化速率, 塑性乘子等 8 个变量以及 S , X_∞ , γ , R_∞ 和 b 等 5 个材料参数, 综合考虑了塑性变形中的很多因素, 是较为完整的一个塑性损伤方程。但是求解非常困难, 不利于实际应用。

其他的一些新的损伤模型和理论也相继诞生。Zhang Lin 等^[22]将基体和空洞视为分别独立的个体, 建立了简化的损伤模型, 而且用钼屑样品进行实验得到了验证。Rolf Manhnken^[23]也建立了新的损伤模型得到了实验和理论验证。赵震等^[7]提出了金属材料在不同三轴应力状态下的 3 种延性损伤机理, 建立了基于应力三轴度和应力偏张量对空穴体积和空穴形状共同作用的适用于拉伸和精冲过程中空穴长大的一种新的延性损伤模型。

3.6 塑性损伤模型之间的联系

通过各种塑性损伤模型的比较, 可以发现, 虽然很多模型的物理意义不尽相同, 但是它们最终的形式相似。比如, 对 Oyane 微空洞模型和大矢根塑性损伤模型进行简单的推导, 发现 Oyane 模型和大矢根模型殊途同归, 有异曲同工之妙。将大矢根方程(式(3))两边同除以 C_1 , 两个方程就变成了统一形式, 且 Oyane 模型(式(4))中的 $A = C_1/C_2$, $C = 1/C_1$; 其中 C_1 , C_2 为式(3)中的参数。

将 Brozzo 连续介质力学模型(式(2))进行简单的变换,

$$\begin{aligned} \int_0^{\epsilon_f} \frac{2\alpha_{max}}{3(\sigma_{max} - \alpha_m)} d\bar{\epsilon} &= \\ \int_0^{\epsilon_f} \frac{2\alpha_{max} - 2\alpha_m + 2\alpha_m}{3(\sigma_{max} - \alpha_m)} d\bar{\epsilon} &= \\ \int_0^{\epsilon_f} \frac{2}{3} + \frac{2\alpha_m}{3(\sigma_{max} - \alpha_m)} d\bar{\epsilon} &= C \end{aligned} \quad (13)$$

不难看出 Brozzo 模型和 Oyane 模型也有相似的形式。这也说明连续介质力学模型和细观力学模型虽然基于的基本理论不同, 但是得到的最终结论是相近的。

4 塑性损伤的影响因素

经过 40 余年的发展, 塑性损伤理论已经有了很大的进步。从最初的研究单轴应力状态到三轴多轴应力状态, 从单纯的考虑等效应力到静水压力的引入, 每一步都推动着塑性损伤理论的进步。现在塑性损伤理论已形成体系, 而且这种理论能够相互作证, 这标志着塑

性损伤理论已经接近成熟。随着研究的不断深入, 三轴度、应变路径、塑性变形、温度和应变速率对损伤的影响, 以及塑性变形理论和损伤的耦合研究、塑性损伤与材料组织的相互影响等已经成为塑性损伤研究的重点。

4.1 三轴度对塑性损伤的影响

大多数从 Lemaitre 理论发展来的损伤理论都是采用比例加载的假说, 来确定材料参数。这种假说适用于光滑的拉伸试样, 而且把应力三轴度假设为单轴, 忽略颈缩带来的三轴度的改变。La Rosa 等分析了一些含有三轴度参数和应变对数关系的连续损伤模型, 研究了它们的三轴度敏感性^[24]。他们的研究表明在材料的塑性加工中, 损伤对三轴度敏感, 不能忽略三轴度的影响。

Michael Brunig 等^[25]通过光滑和预制锯齿缺口的试样得到一系列不同的应力三轴度, 建立了基于损伤张量的动力学定义的塑性损伤准则。Mashayekhi 等^[26]通过实验和有限元法研究了 A533 钢在各种三轴应力状态下的损伤, 验证了损伤模型。

Mediavilla 等^[27]建立了一个非局部的损伤-塑性框架来描述连续的塑性损伤。他们用一个三轴度相关的局部损伤驱动变量来表征应力三轴度的作用, 而这个变量的非局部部分则能通过计算推广得到。他们还将用此模型得到的拉伸试验的结果和文献报道的其他模型得到的结果进行了对比。而 Nicola Bonora^[19]等通过实验确定了连续损伤模型的参数, 而后用有限元和实验研究了各种三轴应力状态下的损伤情况。他们的研究证实 A533B 低合金钢在多种三轴应力状态下不符合连续损伤模型。

4.2 应变路径对损伤的影响

Rimma Lapovok 等^[28]研究了应变路径对损伤的影响, 并将应变路径准则引入损伤积累和复合的张量模型, 建立了预测金属塑性损伤的模型。张志远等^[29]基于伊留辛塑性理论并考虑加载路径的影响, 建立了塑性损伤演化方程; 并用该方程分析了单调拉-扭加载下金属的塑性损伤。在破坏应变方面, 分析结果与实验结果相一致。Tasan 等^[30]也研究了不同应变路径下的损伤机制和成型极限。

4.3 塑性损伤和组织的关系

Tasan 等建立了组织-损伤的关系, 研究发现: 损伤源少的单相组织中的损伤开始于局部流变失稳, 因此损伤对成型极限影响不大, 而在多种损伤机制的组织中, 损伤将严重影响颈缩和成型极限^[30]。

Sommitsch 等^[31]就 80A 合金热加工过程中的软化和塑性损伤, 以及损伤和动态再结晶的关系进行了

研究。发现再结晶减少了累积变形,从而减缓了损伤的开始。Hfaiedh 等^[32]将塑性损伤变量引入晶体的滑移理论,来表征材料中微缺陷的形核、长大,研究了面心立方多晶材料的连续晶内损伤以及损伤对再结晶组织的影响。

4.4 损伤理论和塑性流变理论的耦合研究

很多塑性损伤的研究和理论都是针对某一温度和应变速率下的损伤情况,而忽略了温度和应变速率这两个塑性加工过程中的重要因素的影响。只有 Nicola Bonora 和 Pietro Paolo Milella^[33]建立了考虑塑性材料的应变速率、温度和损伤的本构模型,而且用有限元法进行了模拟。他们指出计算机模拟材料成型的关键是动态本构模型的正确性,所以必须综合考虑应变速率、温度和损伤等因素。温彤^[6]的研究考虑了应变速率对损伤的影响,但是得到的塑性损伤本构方程,参数过多,形式复杂,难以实际应用。张士宏等^[34]将 Zener-Hollomon 参数引入塑性损伤演化模型,能够很好地预测 TC11 合金较低应变速率下的损伤行为,但是不能准确地预测较高应变速率下的损伤。而 WANG Xuebin^[35]研究发现材料高应变速率下的损伤很难测定。所以,研究塑性加工参数对损伤的影响是今后损伤研究中急需解决的问题之一。

Jean-Claude Boyer 等^[36]认为损伤是热力耦合有限元模型面临的重大挑战。为了考虑剪切应力对空洞生长的影响,他们建立了基于连续损伤理论和相应的流变准则的屈服方程,并且得到了改进的 Rice-Tracey 模型的验证。Marcelo Elgueta^[37]的工作验证了在钣金成型工艺中运用连续损伤概念的可行性,而且从热动态理论中提取集成了损伤的弹塑性本构方程,并用三维有限元模型模拟了成型工艺。

Rashid 等^[38]将各向异性损伤和塑性模型进行了耦合研究。耦合模型得到的结果和实验吻合。Satrabh Gupta 等^[39]基于连续损伤力学用大变形弹塑性有限元法预测了轴对称镦粗中的延性断裂。

5 塑性损伤的研究方法

塑性损伤的研究方法有很多种,目前主要有超声波法等测量方法,损伤统计方法和应用非常普遍的有限元方法。

5.1 损伤的测量

目前广泛应用的测试材料损伤的一般方法有超声波法,弹性模量法,变形梯度法等。

罗迎社等^[40]认为 Lemaitre 在推导材料的损伤方程时,没有明确试件的表现应力 $\bar{\sigma}$ 和名义应力 σ 的区别,

从而没有明确真实损伤 D_T 和名义损伤 D 的区别。 D 不能正确反映金属材料的损伤,它主要是横向收缩的结果。所以他们研究了用电阻测试法测量塑性损伤,得到了理想的实验结果。

5.2 损伤的统计与定量表征

在塑性损伤研究中,损伤的定量分析一直是损伤力学的重要内容。

祁美兰等^[41]讨论了动态冲击下延性金属材料中的损伤分布,对微空洞的面密度、体密度以及损伤度等特征物理量进行了分析。针对层裂损伤试样微空洞统计数量少等问题,对 Schwartz-Saltykov 方法进行的损伤统计进行了修正。统计结果较好地描述了延性金属材料内部微损伤的分布及演化特征,为层裂损伤的理论建模、数值模拟提供了物理依据。

宋美娟等^[42]研究了镁合金的塑性损伤,并且确定了空洞和应变为指数变化关系即

$$C_v = C_{v0} \exp(\eta \varepsilon) \quad (14)$$

式中: C_v 为变形过程中的空洞体积分数; C_{v0} 为变形前的空洞体积分数; ε 为真应变; η 为空洞生长速率。并且通过回归得到了方程中的参数。

Ochsner 等^[43]采用实验和数值模拟研究了铝合金中的塑性损伤,而且用 Archimedes 理论研究了损伤所占的体积。Besson^[44]研究了材料在多种塑性、黏塑性变形下的损伤。用空洞的体积分数这一单一变量来表征损伤。

5.3 有限元方法

在材料的塑性加工过程中,损伤和断裂发生区域以及发生阶段的预测是塑性损伤学科要解决的问题。这项工作需要一定的理论支撑,更需要大量的计算。有限元方法是用于塑性损伤研究的较普遍的一种研究手段。它能够将材料的流变本构方程、损伤方程或者耦合了损伤的材料本构方程来定义材料的性质进行加工过程的模拟,得到材料发生损伤和损伤演变的结果。许多学者采用这种行之有效的方法来研究塑性损伤,并且取得了一定的成果。Andrade Pires 等^[45]用有限元法对一定变形下损伤的演变和断裂进行了预测。Shankar 等^[46]利用连续敏感的方法研究了热塑性耦合有限应变下的塑性损伤问题,而且用一些典型的实验验证了改进的拉格朗日有限元分析和设计技术的正确性和有效性。Soon Wan Chung 等^[47]用有限元方法研究了镦粗过程中的损伤,而且实验验证了有限元模型的合理性。Kim Lau Nielsen^[48]采用微空洞的形核和长大理论及弹-黏塑性本构理论,用有限元法研究了搅拌摩擦焊中的损伤。Jackiewicz 等^[49]研究了材料损伤有限元模拟的非局部规则化问题。Pirondi 和

Bonora^[50]用有限元法研究了反复循环加载下的塑性损伤。Khelifa^[51]用有限元方法预测了板材成型中断裂产生的位置和时间。Marcus Stoffel^[52]用有限元方法预测了波动敲击板的损伤和失效,并得到了实验的验证。

6 结束语

随着材料加工成型技术的发展,迫切要求塑性损伤理论的更新与完善。现在的塑性损伤理论已经被用于各种材料加工方式中的材料损伤和断裂以及成型极限的预测,其理论也已较深入,涉及细观力学、连续损伤、能量理论等很多体系,能够准确预测和分析简单加载或者加工下材料的损伤。但是,依然存在一些亟需解决的问题:(1)在复杂加载条件下,特别是多轴应力加载下的研究还较少;(2)在多轴应力状态下,现在的连续损伤理论也受到了挑战,需要建立新的更完善的理论;(3)很多工作都是单纯地研究塑性损伤,而忽略了损伤-变形-组织的耦合作用,因此对损伤-变形-组织耦合作用的研究还需要加强,特别是把温度、应变速率等变形参数引入损伤-流变本构方程,以全面、正确地研究材料塑性变形中的损伤行为。

虽然,塑性损伤理论不断受到实验的检验和挑战,但是,它正在逐步完善,而且将在材料加工中发挥重要的作用。

参考文献

- [1] 吴诗惇. 损伤力学在塑性加工中的应用[J]. 中国机械工程, 1994, 5(3): 44– 46.
- [2] HUANG H C, XUE L. Prediction of slant ductile fracture using damage plasticity theory[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009, 86(5): 319– 328.
- [3] TANG C Y, CHOW C L, SHEN W, et al. Development of a damage-based criterion for ductile fracture prediction in sheet metal forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 91(1– 3): 270– 277.
- [4] LIANG XUE, TOMASZ WIERZBICKI. Ductile fracture initiation and propagation modeling using damage plasticity theory[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(11): 3276– 3293.
- [5] LIANG XUE. Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(16): 5163– 5181.
- [6] 温彤. 韧性损伤模型及其在金属塑性加工中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1999.
- [7] 赵震, 谢晓龙, 李明辉. 空穴长大延性损伤新模型[J]. 金属学报, 2007, 43(10): 1037– 1042.
- [8] 熊先仁. 损伤力学的最新发展[J]. 江西电力职业技术学院学报, 2006, 19(1): 1– 2.
- [9] COCKCROFT M G, LATHAM D J. The Effect of Stress System on the Workability of Metals[R]. Scotland: National Engineering Lab, 1966.
- [10] BROZZO P, BRAMANTE M. Fracture mechanics of steels for welded structures: present status and future outlook[J]. Rivista Italiana Della Saldatura, 1976, 28(5): 299– 310.
- [11] ABE TAKEJI, KUBO KATSUSHI, OYANE MORIYA. Central cracking of extruded product of brittle metal in hydrostatic extrusion-2 analysis[J]. Bulletin of the JSME, 1972, 15(89): 1357– 1363.
- [12] GURSON A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part I—yield criteria and flow rules for porous ductile media[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1977, 99(1): 2– 15.
- [13] TVERGAARD VIGGO. On localization in ductile materials containing spherical voids[J]. International Journal of Fracture, 1982, 18(4): 237– 252.
- [14] TVERGAARD V, NEEDLEMAN A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar[J]. Acta Metallurgica, 1984, 32(1): 157– 169.
- [15] BENSEDDIQ N, IMAD A. A ductile fracture analysis using a local damage model[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(4): 219– 227.
- [16] LEMAITRE J. Three-dimensional ductile damage model applied to deep-drawing forming limits[J]. Pergamon Press, 1984, 2: 1047– 1053.
- [17] WU Shi-chun, LIANG Hua. A kinetic equation for ductile damage at large plastic strain[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1992, 3(21): 295– 302.
- [18] DHAR S, DIXIT P M, SETHURAMAN R. A continuum damage mechanics model for ductile fracture[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2000, 77(6): 335– 344.
- [19] NICOLA BONORA, DOMENICO GENTILE, PIRONDI A, et al. Ductile damage evolution under triaxial state of stress: theory and experiments[J]. International Journal of Plasticity, 2005, 21(5): 981– 1007.
- [20] 王永康, 万春荣. 延性损伤的能量模型[J]. 航空学报, 1993, (14) 7: A415– 419.
- [21] 郭少华. 弹塑性损伤材料的三维本构描述[J]. 西安冶金建筑学院学报, 1992, 24(1): 75– 82.
- [22] ZHANG Lin, CAI Ling-cang, LI Ying-lei, et al. Simplified model for prediction of dynamic damage and fracture of ductile materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(24– 25): 7063– 7074.
- [23] MANHNKEN ROLF. Theoretical, numerical and identification aspects of a new model class for ductile damage[J]. International Journal of Plasticity, 2002, 18(7): 801– 831.
- [24] LA ROSA G, MIRONE G, RISITANO A. Effect of stress triaxiality corrected plastic flow on ductile damage evolution in the framework of continuum damage mechanics[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68(4): 417– 434.
- [25] MICHAEL BRUNIG, OLIVER CHYRA, DANIEL ALBRECHT, et al. A ductile damage criterion at various stress triaxialities[J]. International Journal of Plasticity, 2008, 24(10): 1731– 1755.

- [26] MASHAYEKHI M, ZIAE-RAD S. Identification and validation of a ductile damage model for A533 steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177(1-3): 291-295.
- [27] MEDIAVILLA J, PEERLINGS RHJ, GEERS MGD. A non-local triaxiality-dependent ductile damage model for finite strain plasticity[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, 195(33-36): 4617-4634.
- [28] LAPOVOK RIMMA, HODGSON D. A damage accumulation model for complex strain paths: prediction of ductile failure in metals[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2009, 57(11): 1851-1864.
- [29] 张志远, 黄西成. 变形路径对金属塑性损伤的影响[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2003, 40(4): 719-723.
- [30] TASAN CC, HOEFNAGELS JPM, TEN HORN CHLJ, et al. Experimental analysis of strain path dependent ductile damage mechanics and forming limits[J]. *Mechanics of Materials*, 2009, 41(11): 1264-1276.
- [31] SOMMITSCH C, POLT P, RUF G, et al. On the modelling of the interaction of materials softening and ductile damage during hot working of alloy 80A[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177(1-3): 282-286.
- [32] HFAIEDH N, SAANOUNI K, FRANCOIS M, et al. Self consistent intragranular ductile damage modelling in large plasticity for FCC polycrystalline materials[J]. *Procedia Engineering*, 2009, 1(1): 229-232.
- [33] NICOLA BONORA, PIETRO PAOLO MILELLA. Constitutive modeling for ductile metals behavior incorporating strain rate, temperature and damage mechanics[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 26(1-10): 53-64.
- [34] 张士宏, 宋鸿武, 程明. TC11 钛合金热锻成形过程中延性损伤演化模型的建立[J]. *塑性工程学报*, 2008, 15(3): 128-131.
- [35] WANG Xue-bin. Analysis of damage localization for ductile metal in process of shear band propagation[J]. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 2006, 16(1): 153-158.
- [36] BOYER JEAN-CLAUDE, EMMANUELLE VIDAL-SALLE, CAROLE STAUD. A shear stress dependent ductile damage model[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 121(1): 87-93.
- [37] MARCELO ELGUETA. Ductile damage analysis of sheet metal forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 121(1): 148-156.
- [38] RASHID K ABU AL-RUB, GEORGE Z VOYIADJIS. On the coupling of anisotropic damage and plasticity models for ductile materials[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40(11): 2611-2643.
- [39] SAURABH GUPTA, VENKATA REDDY N, DIXIT PM. Ductile fracture prediction in axisymmetric upsetting using continuum damage mechanics[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 141(2): 256-265.
- [40] 罗迎社, 杨建平, 高蕴昕, 等. 金属塑性损伤的电阻测试法[J]. *湘潭大学自然科学学报*, 1987, (4): 51-56.
- [41] 祁美兰, 贺红亮. 延性金属材料中损伤分布的统计方法[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 30(8): 23-26.
- [42] 宋美娟, 王智祥, 汪凌云, 等. 镁合金的超塑性损伤定量分析[J]. *稀有金属*, 2006, 30(3): 300-303.
- [43] OCHSNER A, GEGNER J, WINTER W, et al. Experimental and numerical investigations of ductile damage in aluminium alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 318(1-2): 328-333.
- [44] BESSON J. Damage of ductile materials deforming under multiple plastic or viscoplastic mechanisms[J]. *International Journal of Plasticity*, 2009, 25(11): 2204-2221.
- [45] ANDRADE PIRES FM, DE SOUZA NETO EA, OWEN DRJ. On the finite element prediction of damage growth and fracture initiation in finitely deforming ductile materials[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, 193(48-51): 5223-5256.
- [46] SHANKAR GANAPATHYSUBRAMANIAN, NICHOLAS ZABARAS. Computational design of deformation processes for materials with ductile damage[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2003, 192(1-2): 147-183.
- [47] SOON WAN CHUNG, SEUNG JO KIM, JIN HEE KIM. Finite element simulation of metal forming and in-plane crack propagation using ductile continuum damage model[J]. *Computers and Structures*, 2002, 80(23): 1771-1788.
- [48] KIM LAU NIELSEN. Ductile damage development in friction stir welded aluminum (AA2024) joints[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(10): 2795-2811.
- [49] JACKIEWICZ J, KUNA M. Non-local regularization for FE simulation of damage in ductile materials[J]. *Computational Materials Science*, 2003, 28(3-4): 684-695.
- [50] PIRONDI A, BONORA N. Modeling ductile damage under fully reversed cycling[J]. *Computational Materials Science*, 2003, 26: 129-141.
- [51] KHELIFA M, OUDJENE M, KHENNANE A. Fracture in sheet metal forming: effect of ductile damage evolution[J]. *Computers and Structures*, 2007, 85(3-4): 205-212.
- [52] MARCUS STOFFEL. Experimental validation of anisotropic ductile damage and failure of shock wave-loaded plates[J]. *European Journal of Mechanics A*, 2007, 26(4): 592-610.

基金项目: 国家 973 重大基础研究项目(2007CB613700); 国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2007BAG06B04); 国家杰出青年科学基金(50725413); 重庆市科技攻关项目(CSTC2009AB4008); 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS10132202)

收稿日期: 2009-12-16; 修订日期: 2010-05-05

作者简介: 张丁非(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事轻合金材料及加工技术研究, 联系地址: 重庆市沙坪坝区沙正街 174 号(400030), E-mail: zhangdingfei@cqu.edu.cn

通讯作者: 戴庆伟(1984—), 联系地址: 重庆市沙坪坝区沙正街 174 号, 重庆大学材料学院(400030), E-mail: daiqingwei@cqu.edu.cn