引文格式：贾东昇，何　涛，霍元明，等. 金属塑性损伤力学模型研究进展［J］. 塑性工程学报，2022，29（1）：11-17. JIA Dongsheng，HE Tao，HUO Yuanming，et al. Review on development of mechanics model of metal ductile damage［J］. Journal of Plasticity Engineering，2022，29（1）：11-17.

金属塑性损伤力学模型研究进展

贾东昇，何　涛，霍元明，高建烨，李诗谦
（上海工程技术大学 机械与汽车工程学院，上海 201600）

摘　要：针对金属塑性损伤力学模型进行综述，总结和介绍了连续介质损伤力学模型以及细观损伤力学模型各自的优缺点及应用范围，并简要概括了两种模型的区别。以韧性断裂准则为出发点，总结了包括 Kachanov-Rabotnov 模型、Bao-Wierzbicki 模型以及 GTN 模型在内的各模型的发展历程，在此期间，应力三轴度和 Lode 角参数的引入对各模型的发展具有积极的推动作用。在显微观察及有限元仿真等技术的影响下，各模型得到了更加深入的研究。结果表明，连续介质损伤力学模型对微观塑性损伤的预测精度更高、应用范围更广，具有广阔的应用前景。

关键词：塑性损伤；连续介质损伤力学；细观损伤力学；韧性断裂准则
中图分类号：TG376　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1007-2012（2022）01-0011-07
doi：10. 3969/j. issn. 1007-2012. 2022. 01. 002

Review on development of mechanics model of metal ductile damage

JIA Dong-sheng，HE Tao，HUO Yuan-ming，GAO Jian-ye，LI Shi-qian
（School of Mechanical and Automotive Engineering，Shanghai University of Engineering Science，Shanghai 201600，China）

Abstract：Metal plastic damage mechanics model was reviewed，the advantages and disadvantages of the continuum damage mechanics model and the meso-damage mechanics model as well as the range of application were summarized and introduced，and the differences between the two models were briefly summarized. Based on the ductile fracture criterion，the development process of each model was summarized，including Kachanov-Rabotnov model，Bao-Wierzbicki model and GTN mode. The introduction of stress triaxiality and Lode angle parameters played a positive role in promoting the development of these models. Combined with microscopic observation and finite element simulation，the study of each model was more in-depth. The research results show that the continuum damage mechanics model has higher predicting accuracy and wider application range for micro-plastic damage，which has broad application prospects.

Key words：ductile damage；continuum damage mechanics；meso-damage mechanics；ductile fracture criterion

引言

在加工和使用过程中，零件由于载荷、加工路径和环境等的共同作用，容易在组织内部形成微观缺陷，微缺陷的发展不但会导致宏观裂纹的出现和断裂的产生，也会引起强度、韧性等力学性能的降低，从而严重影响零件的服役性能[1]。因此，利用损伤理论研究材料变形过程中损伤的产生和发展规律，建立损伤力学模型，得到材料的加工成形极限条件，保证金属材料在使用过程中的力学性能完好，提高金属材料的安全性和使用年限，对材料的加工和使用具有十分重要的意义[2]。

目前应用较为广泛的损伤模型有两种：连续介质损伤力学模型以及细观损伤力学模型[3]。两种模型分别从不同的角度确定材料的失效临界值，从而对不同类型的材料和损伤进行预测。本文综

基金项目：国家重点研发计划（2018YFB1307900）；上海市自然基金资助项目（20ZR1422100）；上海市人才发展资金资助项目（2019022）
通信作者：何　涛，1979 年生，男，博士，教授，主要从事金属塑性成形工艺研究，E-mail：hetao@ sues. edu. cn
第一作者：贾东昇，1998 年生，男，硕士研究生，主要从事金属性能调控机制研究，E-mail：jiadongshengyx@ 163. com
收稿日期：2021-07-03；**修订日期**：2021-10-20

述了这两种模型在韧性材料损伤预测中的应用，重点介绍了每种模型的特点及改进，并对金属塑性损伤力学模型的发展进行了总结与展望。

1 连续介质损伤力学模型

连续介质损伤力学又称宏观损伤力学，是在韧性断裂准则的基础上进一步发展的一种唯象学方法。它以连续介质力学与连续介质热力学为基础，认为塑性变形过程中微观组织的变化是一种不可逆的耗散过程[4]。KACHANOV L M[5]最先引入连续性因子的概念来表征损伤，研究表明材料有效面积的减小导致了材料发生劣化，并提出用有效承载面积与原表面积进行比较的方法来判断是否发生断裂。RABOTNOV Y N[6]在此基础上提出损伤因子，通过计算损伤因子的大小来判断材料的断裂情况：

$$D_{\mathrm{n}} = 1 - \varphi = 1 - \frac{\widetilde{A}}{A_0} \tag{1}$$

式中：φ 为连续性因子；$\widetilde{A}$ 为有效承载面积；A_0 为材料的表观面积；D_{n} 为损伤因子，$D_{\mathrm{n}}=0$ 时材料为无损状态，$D_{\mathrm{n}}=1$ 时材料完全丧失承载能力。

需要注意的是，D_{n} 依赖于 A_0 的法线方向，即材料中微孔洞、微裂纹的分布具有方向，进而证明表征材料缺陷的内变量 D_{n} 实际上是一个二阶或四阶张量，相对于韧性断裂准则采用的单独标量，二者便有了明显的区分。CHRISTOPHER J 等[7]采用 Kachanov-Rabotnov 连续损伤模型，研究了 316L 奥氏体不锈钢在 923 K、不同含氮量下的稳态和 3 次蠕变变形及损伤行为，并对不同含氮量和应力水平下的蠕变断裂延性和应变率和损伤率之比建立了直接相关关系。而 WANG X Y 等[8]使用诺顿蠕变准测和 Kachanov-Rabotnov 连续损伤模型，提出了一种适用于 UNS N10003 合金的蠕变损伤准则和数值模拟方法。可见 Kachanov-Rabotnov 模型常用于判断蠕变引起的断裂，对于其他类型的损伤很难做出准确预测。

应力三轴度和 Lode 角参数是研究塑性损伤的两个必要参数[9]。应力三轴度常用于表征因夹杂剥离而产生的微孔洞长大规律的数学模型；而对于低应力三轴度下剪切作用造成的损伤，用 Lode 角参数表征最能反映塑性损伤演变的物理机制。在发展初期，连续损伤模型只考虑了应力三轴度对材料断裂性能的影响，忽略了应力张量的影响，导致模型在预测受复杂应力状态影响的材料的破坏问题时出现预测不准确的情况。许多学者针对上述问题进行了大量研究工作，总结出连续介质损伤力学模型的特点，如表 1 所示。BAO Y 等[10]首次证明仅用应力三轴度预测具有不准确性。BARSOUM I 等[11]在 Bao 与 Wierzbicki 的基础上，进一步证明了 Lode 角参数对材料韧性的重要影响。ZHANG K 等[12]考虑了应力三轴度和 Lode 角参数的共同影响，建立了能够捕捉板料和块体金属在成形过程中宏观裂纹的萌生和扩展行为的韧性断裂模型，并通过不同加载路径下的数值模拟与试验结果对比，验证了所提模型的预测能力。WIERZBICKI T 等[13]引入 Lode 角参数，提出了一种三维对称断裂模型 Xue-Wierzbicki（X-W），能够辨别轴对称应力状态和纯剪切应力状态对材料韧性的不同影响。BAI Y 等[14]改进了文献［13］的模型，研究了有效断裂应变与应力三轴度间的关系，如图 1 所示[14]，在传统的 Mohr-Coulomb（M-C）破坏准则的基础上提出了一种能够在“应力三轴度-Lode 角参数-等效塑性应变”三维空间中对材料的韧性断裂问题进行预测的修正 M-C 断裂模型，并建立了考虑应力三轴度和归一化 Lode 角参数共同影响的 Bao-Wierzbicki（B-W）韧性断裂准则，研究人员利用 B-W 准则展开研究，揭示了等通道转角挤压过程中铝合金的损伤演变规律[15]。GRANUM H 等[16]基于局部化分析对 Mohr-Coulomb 模型提出进一步修正，并将其应用于 AA6016 铝合金的 3 种回火，实验证明新模型的建立更加方便有效。PEIHUA H 等[17]针对管线钢局部韧性断裂问题，基于 GTN 模型、修正的 Mohr-Coulomb 准则和扩展 Rice-Tracey 准则提出了一种新的韧性断裂准则，并通过实验和有限元模拟的方式证明了模型的可靠性。上述模型的主要区别在于所考虑的应力状态函数不同。

表 1 连续介质损伤力学模型的特点

Tab. 1 Characteristics of continuum damage mechanics model

模型	特点
B-W[10]	适用于低应力三轴度；未考虑不同应力的影响
Barsoum[11]	证明了 Lode 角参数的重要影响
X-W[13]	提出断裂包线；受材料类型影响大
M-C[14]	提出改进的 Mohr-Coulomb 模型；建模复杂
Lemaitre[18]	多损伤变量耦合；忽略了内部微结构的变化

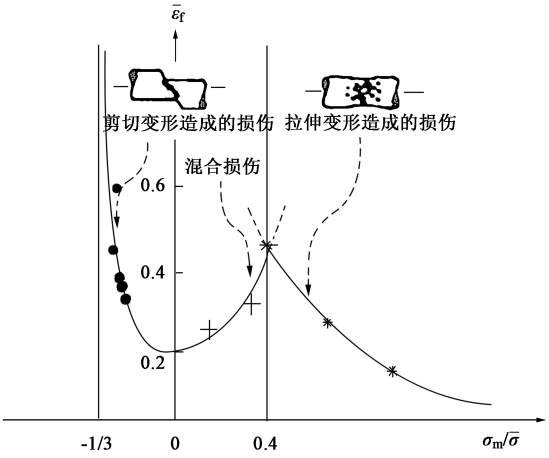

图 1　应力三轴度-有效断裂应变的关系曲线图[14]

Fig. 1　Stress triaxiality-effective fracture strain curve[14]

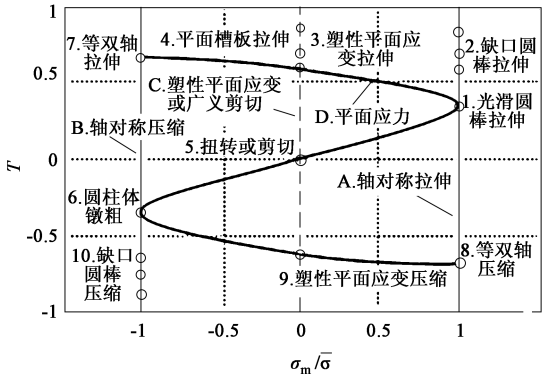

图 2　金属塑性成形时不同应力状态与 Lode 角参数和应力三轴度的关系[14]

Fig. 2　Relationship between different stress states and stress triaxiality and Lode angle parameters during metal plastic forming[14]

随着研究的进一步深入，逐渐发展出了耦合连续损伤模型，在本构方程中引入损伤参数，能够对材料在加载过程中发生的损伤演变和裂纹扩展历程进行实时反映。LEMAITRE J[18]在 1971 年提出经典的连续损伤力学模型，并被广泛应用于工程领域中构件的断裂预测分析。王治磊等[19]利用有限元软件研究了 SUS304 不锈钢的损伤和韧性断裂行为，证明 Lemaitre 模型比 Johnson-Cook 模型具有更高的精度。

在偏应力张量的影响下，一些学者将 Lode 角参数引入 Lemaitre 模型中，从而使复杂应力状态下材料的断裂问题得到更加准确地模拟。LI R 等[20]考虑了应力三轴度、Lode 角参数以及剪切应力对损伤累积的影响，提出了修正的 Lemaitre 模型，并通过有限元模拟与实验验证的方式证明了修正模型对宽应力三轴度下复杂成形过程损伤预测的准确性。CAO T S 等[21]认识到偏应力张量第三不变量在损伤演化过程中的重要作用，建立了基于 Lode 角参数的修正 Lemaitre 模型，证明了其在不同加载环境中对损伤预测的准确性，并提出了该模型适用于高应力三轴度和低应力三轴度的可能性。MATTIELLO A 等[22]通过研究塑性损伤过程中发生的各向异性现象，证明了由于各向异性损伤与 Lode 角的依赖关系。金属塑性成形时不同应力状态与应力三轴度和 Lode 角参数的关系如图 2 所示[14]。

耦合连续损伤力学模型将多种变量结合，通过建立多尺度统一粘塑性本构方程，对材料内部的损伤演变规律进行准确的描述，即使是在复杂路径和大塑性变形条件下，也能给出较为准确的预测结果。然而，耦合连续损伤力学模型也有其难点和不足之处：一是如何将多种内部状态变量正确耦合到一起；二是建立好的耦合模型如何进行校准；三是不能从几何的、直观的角度描述损伤在材料内部的演化过程。这些缺点严重阻碍了该理论在实际工程中的推广和应用。

2　细观损伤力学模型

细观损伤力学认为，损伤是材料内部微缺陷产生和发展的结果，这些微缺陷包括晶粒的位错、滑移、微孔洞和微裂纹等，其中微孔洞和微裂纹是主要的缺陷形式。由于传统非匀质微观材料的损伤演化过程较为复杂，演化方程十分抽象，细观损伤力学便将其简化过渡为匀质的宏观材料，从而使损伤演化过程具有清晰的物理内涵。材料在高应力三轴度下发生塑性变形的过程中，微孔洞的演变机制为：孔洞形核—长大—贯通[23-24]。细观损伤力学模型的建立过程如下：首先通过实验获得材料塑性变形过程中微孔洞的形貌图，再探究微孔洞在塑性变形过程中的演变规律，进而建立反应损伤物理本质的细观模型，其能够合理、有效并且直观地反映损伤的演化过程。

1968 年，MCCLINTOCK F A 最先提出微孔洞损伤模型[25]，对无限大理想刚塑性基体中的圆柱形孔洞进行研究，对孔洞在远场拉应力和轴向拉应力作用下的演变过程进行讨论，求得了孔径变化与应力三轴度关系的解析解，为后续的研究奠定了理论基础。RICE J R 等[26]研究了理想塑性材料中孤立球形孔洞的长大问题，对孔洞在高

应力三轴度下的近似扩展规律进行了描述。基于文献［26］的研究，GURSON A L[27]提出了经典的体胞模型，首次建立了孔洞演化与塑性势间的内部关系，他将孔洞体积分数这一反映细观损伤程度的变量引入塑性屈服准则中，认为塑性变形的加剧导致了孔洞体积分数的不断增加，描述了含孔洞材料的变形、孔洞演变和材料破坏过程，得到广泛的应用。BRESSAN C Z 等[28]利用 Gurson 本构模型进行建模，通过拉伸和弯曲实验获得了相关参数，对无间隙钢的机械退化和损伤失效进行了预测。王江超等[29]针对船用金属试件的单向拉伸断裂现象，利用 Gurson 模型分别研究了初始缺陷比例、外部载荷、材料弹性模量和抗断裂性能对金属试件断裂现象的影响，并通过对比实验证明了模型的可靠性。

原始的 Gurson 模型仅对单一孔洞在刚塑性材料基体中的扩展过程进行研究，没有考虑相邻孔洞之间产生的相互作用。TVERGAARD V 等[30]将材料的损伤参数 q_1、q_2 和 q_3 加入到 Gurson 模型中，使塑性变形过程中发生的损伤行为由孤立的孔洞生长聚聚过程扩展为多孔洞相互影响的生长聚集过程，进而建立了 GTN 模型。GTN 模型对微孔洞的完整扩展过程（包括萌生、长大和贯通）进行了充分地考虑，可以较好地预测中到高应力三轴度下的韧性断裂，是一种极具影响力的细观损伤力学模型。卓子超等[31]针对常用的船板钢材料，基于 GTN 损伤模型，通过程序代码的调试和一系列的数值模拟分析，提出了母材本构关系的表达函数及最优 GTN 模型参数，并通过实验验证了模型的可靠性。张宇等[32]对板料进行预加载，探究了拉伸预应变对 GTN 损伤模型参数的影响，结果表明：拉伸预应变会影响 GTN 模型对孔洞演变过程的预测，孔洞发生形核时的孔洞体积分数 f_n、等效塑性应变 ε_n、孔洞聚合时的孔洞体积分数 f_c 和材料发生断裂时的孔洞体积分数 f_F 这 4 个参数的取值依赖于拉伸预应变的大小。

然而，GTN 模型仍存在缺陷：低应力三轴度下材料损伤的主要原因是变形过程中第二相粒子与基体的不协调性，如图 3 所示[33-36]，其中箭头表示为力的作用方向，该过程致使材料内部产生诸多剪切带，这与 GTN 模型的建立基础有较大差异，并且该模型不包含 Lode 角系数，所以在预测低应力三轴度下的损伤变形过程时具有很大的局限性。另外，该模型用孔洞体积分数作为损伤的量度，并没有考虑无体积分数等缺陷同样能导致材料失效。因此，许多研究人员对原始 GTN 模型进行了修正，期望解决上述存在的问题。WU H 等[37]意识到传统 GTN 模型对低应力三轴度下的损伤行为预测不准确，于是将孔洞体积分数和剪切损伤演变结合到一起，提出了修正的 GTN 模型，并利用该模型准确预测了管材旋压成形过程中的损伤演变行为，验证结果如图 4 所示。LI L 等[38]将 GTN 模型进行了剪切修正，修正后的模型能够适用于多种应力状态，并且实验发现采用修正模

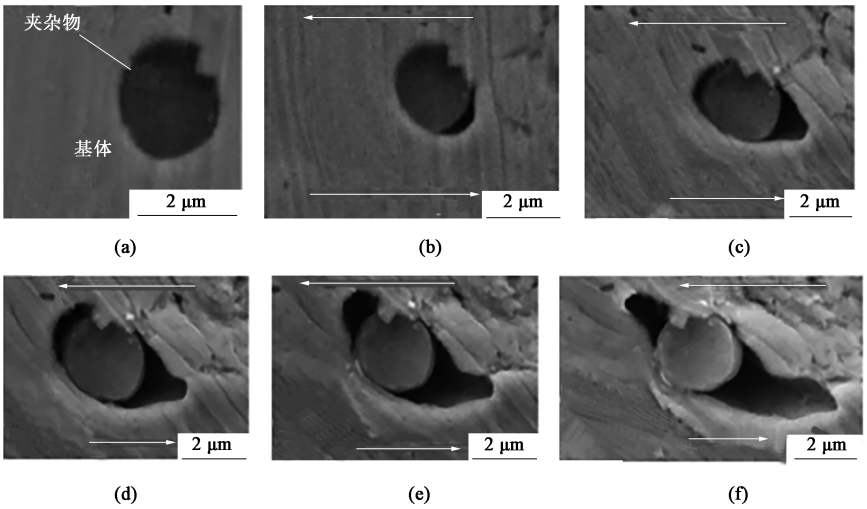

图 3 微孔洞在低应力三轴度下的演变机制[33-36]

（a）变形前 （b）第 1 阶段 （c）第 2 阶段 （d）第 3 阶段 （e）第 4 阶段 （f）第 5 阶段

Fig. 3 Evolution mechanism of microvoid under low stress triaxiality[33-36]

（a）Before deformation （b）The first stage （c）The second stage （d）The third stage （e）The fourth stage （f）The fifth stage

型优化的塑性结构具有更优异的塑性和承载能力。GATEA S 等[39]同样引入剪切损伤效应，提出了修正的 GTN 模型并成功预测了单点渐进成形过程中的损伤行为，同时也证明了修正的 GTN 模型比传统 GTN 模型具有更高的预测精度。2 种损伤力学模型的特点及应用范围见表 2。

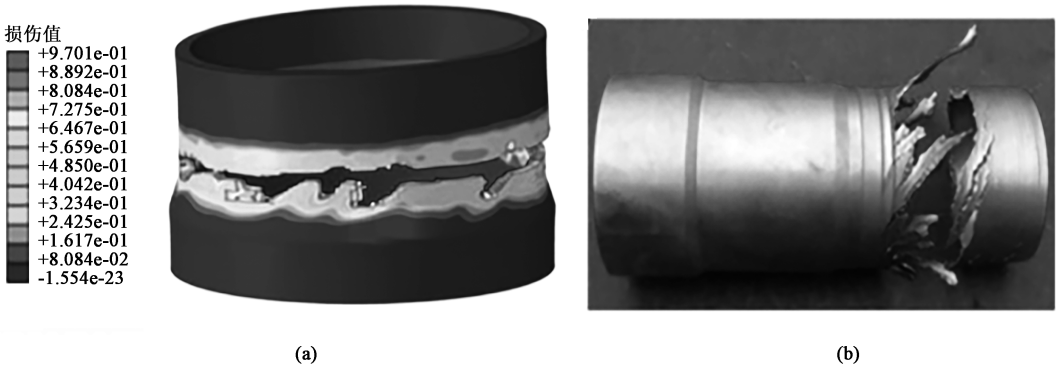

图 4　修正 GTN 模型仿真（a）与实验（b）结果对比[37]

Fig. 4　Comparison of simulation (a) and experiment (b) results for modified GTN model[37]

表 2　2 种损伤力学模型特点及应用范围

Tab. 2　Characteristics and application of two kinds of damage mechanics models

模型	特点
连续损伤力学模型	多尺度建模，预测准确；参数较多，建模及校准难
细观损伤力学模型	反映物理本质，具有直观性；低应力三轴度下预测不准确

3　总结与展望

连续介质损伤力学模型将材料的内部状态变量（包括塑性损伤、位错密度、晶粒尺寸、再结晶分数、晶粒取向与有效应力等）的演变方程有效地耦合在一起，能够准确描述塑性损伤与材料的变形行为及微观组织演变之间的相互作用关系。然而预测准确的代价便是参数多，建模十分困难，尤其是对于耦合型连续介质损伤力学模型，其将损伤演变性能与断裂性能耦和到一起，试图通过一个方程来表达尽可能全面的损伤演变行为，很难应用到实际工作中。细观损伤力学从微观角度进行建模，直观地展示了损伤演化的物理本质，能准确预测高应力三轴度下的塑性损伤与材料变形行为，但对于低应力三轴度下纯剪切载荷主导的损伤演变行为的预测具有较大的限制。再者，研究细观孔洞的演变机制需要对材料不同变形阶段的样件进行观察分析，整个过程包括样件的制备以及细观组织的观察分析等，不仅流程繁琐，对观测样件的要求也很高，尤其对于铝合金等塑性较好的材料，很难进行观测。

上述种种难点虽然限制了损伤力学模型的发展，但也表明损伤力学模型有较大的发展空间。

（1）金属材料的个性化应用导致损伤的演变机制趋于复杂化和多样化。对于结构复杂的金属，在使用过程中容易产生多裂纹交叉的现象，不同裂纹之间相互影响，不仅使得损伤的类型难以准确判定，还会导致损伤的演变速度和演变路径等出现很大差异。因此建立一种新的适用于复杂裂纹损伤预测的模型具有十分重要的意义。Lode 角参数和应力三轴度作为衡量应力状态的重要参数，对材料塑性损伤的预测具有十分重要的作用，能够对损伤演变的路径以及孔洞聚合的方式等进行较为准确的判断。因此，如何建立关于应力三轴度和 Lode 角参数的塑性损伤演变模型，确定不同应力状态下金属材料塑性损伤、位错密度与应力状态等各物理变量间的相互作用关系，耦合塑性损伤、位错密度与应力状态等各物理变量的演变方程，建立统一的粘塑性损伤本构模型，从而提高模型的预测精度，是塑性损伤模型发展的一大热点。另外，多尺度、高精度连续介质损伤力学模型的建立过程十分繁琐，有时一个模型会包含十几个乃至几十个参数，除此之外，对已经建成的模型进行校准和改进也十分困难。所以如何在深入考虑 Lode 角参数和应力三轴度的基础上对这类模型进行简化，并且不损害其预测精度，也是损伤力学模型发展的热点和难点。

（2）材料的成形需要经历复杂的应力状态变化

及微观组织演变过程，不同工序的交互耦合作用会对材料的塑性损伤产生严重的影响。目前低应力三轴度下的塑性损伤机制、超细晶组织及第二相颗粒对塑性损伤的影响规律，不同工序间因应力状态改变引起的性能组织遗传等问题尚不明确，因此，探明组织特征参数和应力状态对材料成形过程中塑性损伤的遗传作用机制是将来塑性损伤发展的一大方向。

（3）随着有限元软件的盛行，利用仿真系统模拟金属材料塑性损伤的演变过程是当前研究的热点。但是目前的仿真只针对单一成形过程进行，如何开发金属材料复合成形的仿真预测系统是重点，可以通过成形实验与仿真预测相结合的方法，研究金属材料在复杂应力状态下不同变形量与变形速率对塑性损伤演变的影响规律。同时，优化工艺参数实现对金属材料复合成形与成性的一体化控制研究，也是未来将大力投入的课题。此外现有软件的模型库大小十分有限，仿真十分困难，因此需要将新损伤力学模型导入有限元软件的模型库中，不断更新模型库，大幅降低仿真的难度，也是未来发展的热点方向。

参考文献：

[1] 姜雪琦，樊晓光，詹梅，等．金属材料热变形中的塑性流动失稳研究进展［J］．塑性工程学报，2020，27（7）：33-51.
JIANG Xueqi，FAN Xiaoguang，ZHAN Mei，et al. Research progress on plastic flow instability during hot deformation of metal materials［J］. Journal of Plasticity Engineering，2020，27（7）：33-51.

[2] 张丁非，戴庆伟，胡耀波，等．塑性损伤的发展与应用［J］．材料工程，2011，（1）：92-98.
ZHANG Dingfei，DAI Qingwei，HU Yaobo，et al. Development and application of ductile damage［J］. Journal of Materials Engineering，2011，（1）：92-98.

[3] 姜薇．基于细观损伤机理的韧性断裂研究［D］．西安：西北工业大学，2016.
JIANG Wei. Study of ductile fracture based on meso-damage mechanisms［D］. Xi′an:Northwestern Polytechnical University，2016.

[4] 张昉，金伟良，张军，等．基于连续介质损伤力学的坑蚀钢筋高周疲劳寿命与损伤分析［J］．建筑材料学报，2021，24（2）：405-411.
ZHANG Fang，JIN Weiliang，ZHANG Jun，et al. Numerical analysis of high cycle fatigue life and damage of pitted corroded steel bar based on continuum damage mechanics［J］. Journal of Building Materials，2021，24（2）：405-411.

[5] KACHANOV L M. Rupture time under creep conditions［J］. International Journal of Fracture，1999，97（1）：11-18.

[6] RABOTNOV Y N. On the equation of state for creep［J］. Progress in Applied Mechanics，1963，31（2）：117-122.

[7] CHRISTOPHER J，PRAVEEN C，GANESAN V，et al. Influence of varying nitrogen on creep deformation and damage behaviour of type 316L in the framework of continuum damage mechanics approach［J］. International Journal of Damage Mechanics，2020，30（1）：119-224.

[8] WANG X Y，WANG X，ZHANG X C，et al. Creep damage characterization of UNS N10003 alloy based on a numerical simulation using the Norton creep law and Kachanov-Rabotnov creep damage model［J］. Nuclear Science and Techniques，2019，30（4）：82-90.

[9] CAO T S，MAZIÈRE M，DANAS K，et al. A model for ductile damage prediction at low stress triaxialities incorporating void shape change and void rotation［J］. International Journal of Solids & Structures. 2015，63（2）：240-263.

[10] BAO Y，WIERZBICKI T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space［J］. International Journal of Mechanical Sciences，2004，46（1）：81-98.

[11] BARSOUM I，FALESKOG J. Rupture mechanisms in combined tension and shear—Micromechanics［J］. International Journal of Solids and Structures，2007，44（17）：5481-5498.

[12] ZHANG K，BADREDDINE H，HFAIEDH N，et al. Enhanced CDM model accounting of stress triaxiality and Lode angle for ductile damage prediction in metal forming［J］. International Journal of Damage Mechanics，2021，30（2）：260-282.

[13] WIERZBICKI T，BAO Y，LEE Y W，et al. Calibration and evaluation of seven fracture models［J］. International Journal of Mechanical Sciences，2005，47（4）：719-743.

[14] BAI Y，WIERZBICKI T. Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture［J］. International Journal of Fracture，2010，161（1）：1-20.

[15] 高建烨，何涛，霍元明，等．基于 Bai－Wierzbicki 准则的 ECAP 塑性损伤研究［J］．塑性工程学报，2021，28（2）：52-62.
GAO Jianye，HE Tao，HUO Yuanming，et al. Study on plastic damage of ECAP based on Bai-Wierzbicki criterion［J］. Journal of Plasticity Engineering，2021，28（2）：52-62.

[16] GRANUM H，MORIN D，BØRVIK T，et al. Calibration of the modified Mohr-Coulomb fracture model by use of localization analyses for three tempers of an AA6016 aluminium alloy［J］. International Journal of Mechanical Sciences，2021，192（1）：106－122.

[17] PEIHUA H，PENG C，SHUAI Y，et al. Characterization of ductile fracture criterion for API X80 pipeline steel based on a phenomenological approach［J］. Thin-Walled Structures，2021，164（1）：107-115

[18] LEMAITRE J. Evalution of dissipation and damage in metals submitted to dynamic loading［C］//International Conference of Mechanical Behavior of Materials. Kyoto，1971：71-99.

[19] 王治磊，周杰，杨波，等．SUS304 不锈钢 Lemaitre 损伤模型参数研究［J］．塑性工程学报，2020，27（11）：173-179.
WANG Zhilei，ZHOU Jie，YANG Bo，et al. Study on Lemaitre damage model parameters of SUS304 stainless steel［J］. Journal

of Plasticity Engineering, 2020, 27 (11): 173-179.

[20] LI R, ZHAN M, ZHENG Z, et al. A constitutive model coupling damage and material anisotropy for wide stress triaxiality [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33 (12): 3509-3525.

[21] CAO T S, GACHET J M, MONTMITONNET P, et al. A Lode-dependent enhanced Lemaitre model for ductile fracture prediction at low stress triaxiality [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 124-125 (1): 80-96.

[22] MATTIELLO A, DESMORAT R, ASTER R C, et al. Lode angle dependency due to anisotropic damage [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2021, 30 (2): 214-259.

[23] BENZERGA A A. Micromechanics of coalescence in ductile fracture [J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2002, 50 (6): 1331-1362.

[24] BENZERGA A A, LEBLOND J B. Ductile fracture by void growth to coalescence [J]. Advances in Applied Mechanics, 2010, 44 (10): 169-305.

[25] MCCLINTOCK F A. A criterion for ductile fracture by the growth of holes [J]. Journal of Applied Mechanics, 1968, 35 (2): 363-371.

[26] RICE J R, TRACEY D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields [J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1969, 17 (3): 201-217.

[27] 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): 297-300.

[28] BRESSAN C Z, VIAMONTE M. Aspects of ductile failure prediction of interstitial-free steel based on a Gurson-type damage model [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2020, 51 (5): 558-568.

[29] 王江超, 卓子超, 熊家炜. 基于 Gurson 模型的船用金属单向拉伸断裂分析 [J]. 船舶与海洋工程, 2020, (4): 44-49, 70.
WANG Jiangchao, ZHUO Zichao, XIONG Jiawei. Fracture analysis of marine metal under axial tension based on Gurson model [J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2020, (4): 44-49, 70.

[30] TVERGAARD V, DLEMAN A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar [J]. Acta Metallurgica, 1984, 32 (1): 157-169.

[31] 卓子超, 张庆亚, 王江超. 船板钢焊接接头的断裂失效行为及 GTN 模型的数值分析 [J]. 工程力学, 2020, 37 (11): 247-256.
ZHUO Zichao, ZHANG Qingya, WANG Jiangchao. Fracture behavior of welded joints of ship steel platesand numerical analysis with GTN model [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37 (11): 247-256.

[32] 张宇, 张稳, 庄新村. 拉伸预应变条件下基于孔洞演变分析的 GTN 损伤模型参数研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (5): 239-248.
ZHANG Yu, ZHANG Wen, ZHUANG Xincun. Parametric study of GTN model under tensile pre-straining condition based on void evolution analysis [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (5): 239-248.

[33] ACHOURI M, GERMAIN G, SANTO P D, et al. Experimental characterization and numerical modeling of micromechanical damage under different stress states [J]. Materials & Design, 2013, 50 (1): 207-222.

[34] THOMAS T D, CHRISTIAN C R, THILO F M, et al. Ductile damage of AA2024-T3 under shear loading: Mechanism analysis through in-situ laminography [J]. Acta Materialia, 2020, 205 (1): 116-132.

[35] CAO T S. Models for ductile damage and fracture prediction in cold bulk metal forming processes: A review [J]. International Journal of Material Forming. 2015, 10 (2): 1-33.

[36] SUN Q, ZAN D, CHEN J, et al. Analysis of edge crack behavior of steel sheet in multi-pass cold rolling based on a shear modified GTN damage model [J]. Theoretical & Applied Fracture Mechanics. 2015, 80: 259-266.

[37] WU H, XU W, SHAN D, et al. An extended GTN model for low stress triaxiality and application in spinning forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 263: 112-128.

[38] LI L, KHADELWAL K. Topology optimization of energy dissipating plastic structures with shear modified Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) model [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146 (11): 297-328.

[39] GATEA S, OU H G, LU B, et al. Modelling of ductile fracture in single point incremental forming using a modified GTN model [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 186: 59-79.