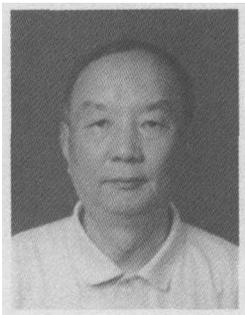


金属薄板成型工艺中的失稳和损伤分析¹⁾

沈 为 彭立华 邓泽贤

(华中科技大学, 武汉 430074) (香港理工大学, 香港)



沈为, 男, 1937 年出生, 江西南昌人。1954~1958 年在华中工学院机械工程系学习至毕业。1958 年至今在华中科技大学任教, 1986 年提升为教授。1980-1981 年在美国乔治华盛顿大学工程与应用科学学院做访问学者。1997~2001 年在香港理工大学作科学研究。科学研究上, 主要完成了 6 项国家自然科学基金项目, 现正承担第 7 项国家自然科学基金项目。正式发表学术论文 100 余篇, 其中 40 余篇发表于国际学术刊物上。获得过全国机械科学大会奖和国家教委科技进步奖。学术专著《损伤力学》获得第十届中国图书奖。曾任美国纽约科学院成员 (Active member)、中国复合材料学会理事和副秘书长、中国力学学会损伤力学与断裂力学组副组长、中国航空学会结构强度委员等。现(曾)任《复合材料学报》、《应用力学学报》和《力学与实践》三种学术刊物的编委。

摘要 简要地评述了金属薄板成型工艺中局部化颈缩引起的塑性失稳机制和成型极限分析的成果; 讨论了多种塑性失稳判据在成型极限分析的实验和有限元模拟两方面的应用及其局限性; 指出了塑性失稳破坏是延性材料的塑性加工硬化和损伤软化两者的相互作用过程, 并介绍了应用连续损伤力学方法研究这一课题的进展。

关键词 成型工艺, 局部颈缩, 成型极限, 内部损伤, 损伤力学

1 引 言

各种各样的工程零件和消费品是用金属成型工艺(例如深冲、滚轧、锻造和延压等)制造的, 因此, 金属成型是一种重要工艺技术, 特别对封装和汽车工业而言。这些工艺的成功取决于各种因素, 如材料性能、冲模几何形状、润滑和冲压速度等。一般认为: 金属薄板成型工艺有两种破坏形式: 局部化颈缩和皱折。

局部化颈缩 (localized necking) 是金属板成型的一个重要特征, 可以用来表征材料的流动性 (formability)。工艺因素和金属流动性可改进金属板零件的设计并影响成型工艺的成功与否。为此, 成型极限图 (FLD) 被广泛用于分析金属薄板成型工艺^[1]。FLD 就是用材料的局部化颈缩去度量薄金属产品的流动性。实际上, 金属薄板的流动性与其内部损伤的发生与扩展有很大关系。但是, 局部化颈缩的常规分析方法是经典塑性理论, 忽略了微缺陷引起的材料

性能退化。另外, 由于压缩失稳会发生相对较大面积的皱折, 因此可找到一个类似的极限来表示金属屈曲开始。Havranek 提出了皱折极限曲线 (WLC)^[2]。

破坏前的最大流动性被定义为具体成型过程中材料没有发生失稳的极限响应。金属薄板的流动性对金属成型工艺是非常重要的, 评价金属流动性的常规方法是经典塑性理论。Hill 运用经典塑性理论分析了金属在局部化颈缩过程中的流动性^[3]。

实验表明, 大多数金属材料都包含着不同形状、不同尺寸和不同数量的粒子(沉淀物和夹杂)。变形过程中, 这些夹杂和沉淀物可引发微裂纹和微空隙, 导致材料性能退化, 即所谓损伤软化。损伤软化在引发局部化颈缩上扮演了重要角色; 成型极限曲线对内部损伤(包括微空隙、微裂纹和其他微缺陷)的发展很敏感。

损伤力学已被广泛应用于研究工程问题, 例如延性断裂、蠕变、冲击和疲劳以及复合材料破坏等。因

2003-02-25 收到第 1 稿, 2003-09-01 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金项目 (10272050) 资助。

此, 本文将简要地评述处理金属薄板成型工艺中塑性失稳与破坏机制的常规方法和损伤力学方法。

2 塑性失稳和常规方法

2.1 流动性与局部化颈缩

通常, 金属薄板成型的失稳 - 破坏过程可大致分为三个阶段: 分散颈缩、集中颈缩和最后断裂。材料承受复杂成型工艺的能力很大程度上取决于塑性失稳条件。Hill 的预测是: 双轴拉伸下的均质板不会发生颈缩。但实验研究^[4]证明: 双轴拉伸下的板会发生局部颈缩而导致破坏。严格说, 局部化颈缩的塑性失稳机制还不很清楚。可是, 表征金属板塑性失稳的成型极限分析仍引起许多研究人员和工程师的兴趣。

2.2 成型极限图

为理解金属成型过程和预估金属板的成型极限, 已经进行了许多研究工作, 从实验和理论上研究了如何确定成型极限。金属薄板的流动性极限用最大 - 最小主表面应变坐标系的成型极限图 (FLD) 的主应变来表示。FLD 给出在各种应变路径 (从等双轴拉伸到单轴拉伸) 下金属板的极限应变, 普遍用于评估金属板成型工艺的成型极限, 通常由实验得到, 是一个有价值的金属板成型分析工具。Keeler 和 Backofen^[5] 提出网络法测量应变历史和应变分布, 用半球形冲头冲压圆形板的试验得到双轴拉伸区 ($\epsilon_1, \epsilon_2 > 0$) 的 FLD。用试验得到的通用形式的成型极限图, 包含了双轴拉伸区 ($\epsilon_1, \epsilon_2 > 0$) 和压延区 ($\epsilon_1, -\epsilon_2 > 0$)。

Swift 和 Hill 分别预估了分散颈缩和局部化颈缩的起始点^[3,6]。但是, 分散颈缩并非成型极限, 而且双轴拉伸区的极限应变也不能用 Hill 的局部化颈缩判据预估。用 Hill 理论得到的 FLD 预估结果与文献 [7,8] 的实验研究结果符合不好。Marciniak 和 Kuczynsky^[8] 在 Hill 的 1948 判据的基础上, 引入了材料的初始异质计算拉伸区局部化颈缩的发展 (所谓 M-K 模型)。对于双轴拉伸下的局部化颈缩预测, M-K 方法得到研究人员 Bassani^[9], Needleman 和 Triantafyllidis^[10] 的支持。但用 M-K 模型预估的 FLD 的右边部分与实验结果有很大误差。Azrin 等和 Vente 等用 M-K 模型预估的近等双轴拉伸的极限应变大于实验结果^[11]。

Storem 和 Rice^[12] 用一种简化本构模型 (S-R 模型) 给出在不同的线性应变路径 (从等双轴拉伸到单

轴拉伸) 下金属板的极限应变, 但也与许多实验结果符合不好。对 M-K 模型, 可引入不同类型的初始异质, 例如表面粗糙度、孔隙等^[13], 以探索它们对极限应变的影响。此外, 用 M-K 模型连同一种非二次各向异性屈服判据计算了 FLD 的右边部分, 研究了应变硬化指数、应变率、异质因子和屈服判据中应力指数的影响^[14]。Marciniak 等用试验 (在比例应变条件下) 研究板的平面正交异性对流动性的影响^[15]。

2.3 屈服判据

确定相应于成型极限的“局部化颈缩起始”有多种判据, 例如 Hill 的 1979 屈服判据和 1993 屈服判据、Hosford 的高次指数屈服判据、Budiansky 屈服判据和修正的 Budiansky 屈服判据等^[16,17]。研究成型极限图 (FLD) 还有塑性的 J_2 流动理论以及局部化颈缩的分岔理论^[18]。然而, 在预估局部化颈缩上, 这些判据和理论忽略了微缺陷引起的材料性能退化, 有某种不确定性, 因而在分析非比例成型历史条件下颈缩问题时不是很可靠。有的学者指出, 这些唯象的屈服判据的应用要结合各向同性硬化假设或反映不同应力方向应变硬化差别的更复杂假设^[19]。

可见, 上述屈服判据预估金属板成型工艺的成型极限不能充分给出整个应变路径区域相符合的 FLD; 而且, 这些屈服判据都没有考虑内部损伤的各向异性和损伤演变。不过, 由于应变测量的方便和缺乏更好的判据, 这些应变基成型极限图在判别金属成型的精确性上继续发挥重要作用。

2.4 非线性应变历史

材料的性能是变形历史相关的, 会显著影响到局部化颈缩、失稳以及所谓成型极限。最初, 成型极限图 FLD 用以表示金属板一般成型极限, FLD 的估算和确定是假设应变路径为线性的, 仅适合于成型工艺为比例加载 (或近比例加载) 情况。Lee 和 Zaverl^[20] 给出了一个描述金属板颈缩扩展模型, 计算出 FLD, 但没有考虑到应变历史的作用。1971 年, Hsu 曾证实轴对称杯压延的应变路径是非线性的^[21]。

较早的非线性应变路径实验研究 (Matsuoka 和 Sudo) 是在第 1 次加载 (等双轴拉伸, 单轴拉伸或压延) 后作第 2 次加载^[22]。在工业上, 大多数冲压零件都是在非比例加载路径下成型的; 多次成型工艺, 例如二次拉伸 (redrawing)、擰边冲压 (flanging dies)

等，它们的应变路径远不是比例加载情况。对这些情况，现在通行的 FLD 方法的精确性和可靠性是值得怀疑的。

用网络-应变的实验分析使非线性应变路径对金属成型过程的研究成为现实。Graf 和 Hosford 实验研究了改变应变路径对合金 Al2008-T4 和 Al 6111-T4 成型极限的影响^[23,24]。实验方法是：沿平行和垂直于轧制方向，分别在单轴拉伸，平面应变或等双轴拉伸下，将试片预应变到一定程度；再按常规实验确定 FLD，即做半球形冲头冲压 FLD 试验。试验表明，无论什么样的预应变，FLD 的最低点都在平面应变状态。试验还表明，双轴拉伸预应变会降低 FLD；而单轴拉伸或平面应变下的预应变会提高成型极限曲线的位置。

2.5 有限元模拟

研究成型极限有限元模拟的常规方法是基于拉伸失稳分岔理论，即以“局部化颈缩起始”表征成型极限。Tourki 等^[19]基于正交异性判据，即在应力空间用极坐标表示的屈服表面，描述正交异性塑性，计算有限元所需的切线弹塑性刚度张量，用有限差分模型表征屈服判据，采用大型商用 ABAQUS 有限元软件及其用户子程序 UMAT，计算圆柱膜片液压胀形和圆柱杯件深冲，得到了应变分布和试片的花边等的模拟，并与实验结果以及 Hill 的二次屈服判据所预估的结果作了比较。他们的工作还包括屈服面形状对应变分布的影响，材料参数对金属板成型模拟的影响。

另外一种探索是用有限元模拟结合延性断裂判据，预估双轴拉伸下金属板的极限应变。Takuda 等的做法是：有限元模拟时，假定材料为刚塑性，忽略可压缩性和各向异性；计算所需材料常数由双轴拉伸试验测量的断裂应变确定；针对几种金属薄板成型工艺（包括深冲、延压和胀形等），将计算得到的应力和应变代入延性断裂判据，确定从等双轴拉伸到单轴拉伸下极限应变，并与实验结果作了比较^[25]。

Lee 等^[26]提出在平面应力条件下弹塑性本构方程的稳态应力积分算法，采用 Hill 的二次屈服函数，用一种名为 FORMSYS-DE 的有限元软件，对两类工艺（液压胀形和圆柱杯件深冲）的金属薄板成型过程（能表示屈服表面的各种应力状态）进行计算，与实验结果作了比较，误差在 5% 以内。

Gotoh^[27]改进了变形理论，并应用于大塑性变形的有限元分析。Nakamachi^[28]，Yoshida 等^[29]在有

限元模拟中采用了 S-R 模型确定局部化颈缩起始，预估了部分的 FLD。Stoughton^[30]研究了应用应力判据于非比例加载的可能性，但由于应力不便直接测量而受到限制。

3 内部损伤与损伤力学方法

3.1 内部损伤

应该说，金属板流动性是变形和损伤的局部化过程。延性金属失稳和断裂的发生常起因于内部损伤的缓慢扩展。McClintock^[31]提出一种基于已存在微空隙的扩展和聚合概念的断裂模型。Rice 和 Tracey^[32]提出一种理论上的空隙扩展模型，能用于计算在远场应力作用下具有一个球洞的理想塑性材料的位移场。Gurson^[33]提出了另一种空隙扩展模型。微力学损伤模型，依据材料损伤机制，考虑微缺陷产生与扩展对材料宏观性能的影响。Tvergaard 和 Yamamoto 分别对 Gurson 模型进行了修改，以考虑微空隙之间的相互影响^[34]和材料硬化的影响^[35]。

依据金属板的延性断裂发生在 45° 平面的事实，Ghosh^[36]提出一种基于空隙切变连结的统计模型的延性断裂判据。Needleman 和 Triantafyllidis^[10]的研究指出，空隙扩展在引发局部颈缩上扮演了重要角色，成型极限曲线对异质内外初始空隙密度的差别很敏感。对超塑性合金材料，微空隙的形状和尺寸是不同的，其中一些是相互连结的^[37]。实验证实：微空隙扩展主要受基体的塑性流动所控制；在小应变时，空隙一般是分离的；当应变增大时，空隙尺寸加大且晶界拉长并可能形成晶界裂纹^[38]。大变形时微缺陷体积密度随应变增大，可达 10% 以上^[39]。

实际上，材料的塑性加工硬化和损伤软化的相互作用，构成了后屈服过程，并导致塑性失稳。

3.2 损伤力学方法

为了透彻地认识薄金属板成型过程，金属的成型极限和断裂极限的研究已从经典理论发展到应用损伤力学概念和方法。损伤力学在金属板成型上的早期应用有 Schmitt 和 Jalinier^[40]。他们发现，假如颗粒-基体界面脱粘而引发损伤，在单轴拉伸下仅有少量损伤发生，而在等双轴拉伸下会有大量损伤发生。相反，颗粒破裂造成的损伤，则在单轴和等双轴拉伸下会产生近似相同数量的损伤。¹ Lemaître^[41]，Lee^[42]等发现，在双轴拉伸下金属板的塑性失稳经历了材料的退化，并认为需要用损伤力学理论表示

成型极限图 (FLD)。他们注意到, 金属板成型包含三个阶段, 因而理论上的成型极限图 (FLD) 也应当包括这三阶段。他们工作的不足是假设损伤为各向同性。

Chow 等^[42]应用与损伤耦合的弹塑性本构关系, 预估薄板成型的局部化颈缩和破坏极限。他们把损伤模型用于大型有限元软件包 (LS-DYNA), 连同自编的损伤基材料子程序, 用于非比例加载 (即矩形薄板先被预应变以形成 U 形槽, 再单轴拉伸或双轴拉伸) 下的成型极限和断裂极限分析。同时, 我们^[43~47]通过微观和宏观的材料试验以及薄板成型试验研究, 认识了宏观局部化颈缩机制与断裂机制以及对材料宏观性能的影响; 研究了延性材料的塑性加工硬化和损伤软化两者的相互作用, 这个相互作用导致塑性失稳, 最终发生断裂破坏; 提出了各向异性损伤变量定义 (二阶连续性张量), 给出了损伤变量与弹性模量的关系; 导出了各向异性损伤扩展力和损伤等价应力表达式; 在此基础上, 建立损伤演变方程, 提出基于损伤的失稳判据和断裂判据。这些判据有可能适用于金属板成型工艺设计和质量控制。

参 考 文 献

- Keeler SP, Backofen WA. Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches. *Trans Am Soc Met*, 1963, 56: 25~48
- Havranek J. Wrinkling limit of tapered pressing. *J Aust Inst Met*, 1975, 20(2): 114~119
- Hill R. On discontinuous plastic states with special reference to localized necking in thin sheets. *J Mech Phys Solids*, 1952, 1: 19~30
- Ghosh AK, Hecker SS. Stretching limits in sheet metals: In-plane versus out-plane deformation. *Metall Trans*, 1974, 5: 2161~2164
- Hecker SS. Simple technique for determining forming limit curves. *Sheet Met Ind*, 1975, 52: 671~676
- Swift HW. Plastic instability under plane stress. *J Mech Phys Solids*, 1952, 1: 1~18
- Azrin M, Backofen WA. The deformation and failure of a biaxially stretched sheet. *Mat Trans*, 1970, 1: 2857~2865
- Marciniak Z, Kuczynski K. Limit strains in the process of stretch-forming sheet metal. *Int J Mech Sci*, 1967, 9: 609~620
- Bassani JL. Yield characterization of metals with transversely isotropic plastic properties. *Int J Mech Sci*, 1977, 19: 651~658
- Needleman A, Triantafyllidis N. Void growth and local necking in biaxially stretched sheets. *J Eng Mat Tech*, 1978, 100: 164~169
- Obermeyer EJ, Majlessi SA. A review of recent advances in the application of blank-holder force towards improving the forming limits of sheet metal parts. *J Mat Processing Tech*, 1998, 75: 222~234
- Støren S, Rice JR. Localized necking in thin sheets. *J Mech Phys Solids*, 1975, 23: 421~441
- Date PP, Padmanabhan KA. On the prediction of the forming limit diagrams of sheet metals. *Int J of Mech Sci*, 1992, 34: 363~374
- Graf A, Hosford WF. Calculations of forming limit diagrams. *Metall Trans A*, 1990, 21A: 87~94
- Marciniak Z, Kuczynski K, Pokora T. Influence of the plastic properties of a material on the forming limit diagram for sheet metal in tension. *Int J of Mech Sci*, 1973, 15: 789~795
- Hill R. A user-friendly theory of orthotropic plasticity in sheet metals. *Int J of Mech Sci*, 1993, 35: 19~25
- Xu S, Weinmann KJ. Effect of deformation-dependent material parameters on forming limits of thin sheets. *Int J of Mech Sci*, 2000, 42: 677~692
- Hutchinson JW, Neale KW. Sheet Necking II, Time-Independent Behavior. In: *Mechanics of Sheet Metal Forming*. New York: Plenum Press, 1978: 127~132
- Tourki Z, Zeghloul A, Ferron G. Sheet metal forming simulations using a new model for orthotropic plasticity. *Comput Mat Sci*, 1996, 5: 255~262
- Lee D, Zaverl Jr F. Neck growth and forming limits in sheet metals. *Int J of Mech Sci*, 1982, 24: 157~164
- Hsu TC, Dowle WR, Choi CY, et al. Strain histories and strain distributions in a cup drawing operation. *ASME J Eng Ind*, 1971, 93: 461~466
- Matsuoka T, Sudo C. The effect of stain path on the fracture strain of steel sheets. *Sumitomo Search*, 1969, 1: 71~80
- Graf A, Hosford W. Effect of strain paths on forming limit diagrams of Al 2008-T4. *Metall Trans A*, 1993, 24A: 2503~2512
- Graf A, Hosford W. The influence of strain-path on forming limit diagrams of Al 6111 T4. *Int J of Mech Sci*, 1994, 36(10): 897~910
- Takuda H, Mori K, Takakura N, et al. Finite element analysis of limit strains in bi-axial stretching of sheet metals allowing for ductile fracture. *Int J Mech Sci*, 2000, 42: 785~798
- Lee SW, Yoon JW, Yang DY. A stress integration algorithm for plane stress elasto-plasticity and its application to explicit finite element analysis of sheet metal forming processes. *Comput And struct*, 1998, 66: 301~311
- Gotoh M. Improvements of J2-deformation theory and their application to FEM analysis of large elastic-plastic deformation. *JSME Int J, Series I*, 1990, 3: 209~219
- Hakamachi E. Sheet forming process characterization by static-explicit anisotropic elastic-plastic finite element simulation. *J Mat Processing Tech*, 1995, 50: 116~132

- 29 Yoshida T, Katayama T, Usuda M. Forming limit analysis of hemispherical-punch stretching using the three-dimensional finite element method. *J Mat Processing Tech*, 1995, 50: 226~237
- 30 Stoughton TB. A general forming limit criterion for sheet metal forming. *Int J Mech Sci*, 2000, 42: 1~27
- 31 McClintock FA. A criterion for ductile fracture by the growth of holes. *J Appl Mech*, 1968, 35: 363~368
- 32 Rice JR, Tracey DM. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *J Mech Phys Solids*, 1969, 17: 201~217
- 33 Gurson AL. Continuum theory of ductile rupture by the void nucleation and growth. *J Eng Mater Tech*, 1977, 99: 2~11
- 34 Tverggard V. On localization in ductile materials containing spherical voids. *Int J Fracture*, 1982, 18: 237~252
- 35 Yamamoto H. Conditions for shear localization in the ductile fracture of void-containing materials. *Int J Fracture*, 1978, 14: 347~365
- 36 Ghosh AK. A criterion for ductile fracture in sheet under biaxial loading. *Metall Trans A*, 1976, 74: 523~533
- 37 Xing HL, Wang ZR. Prediction and control of cavity growth during super-plastic sheet forming with finite-element modeling. *J of Mat Processing Tech*, 1998, 75: 87~93
- 38 Pilling J, Ridley N. Effect of hydrostatic pressure of cavitations in super-plastic aluminum alloy. *Acta Metall*, 1986, 34: 669~679
- 39 Stowell MJ. Failure of super-plastic alloy. *Met Sci*, 1983, 17: 1~11
- 40 Schmitt JH, Jalinier JM. Damage in sheet metal forming-I: Physical behavior and -II: Plastic instability. *Acta Metall*, 1982, 30: 1789~1808
- 41 Lemaitre J. How to use damage mechanics. *Nucl Eng Des*, 1984, 80: 233~246
- 42 Lee H, Peng K, Wang J. An anisotropic damage criterion for deformation instability and its application to forming limit analysis of metal plates. *Eng Fracture Mech*, 1985, 21: 1031~1054
- 43 Chow CL, Tai WH. Damage based formability analysis of sheet metal with LS-DYNA. *Int J Damage Mechanics*, 2000, 9: 241~254
- 44 Tang CY, Shen W, Lee TC. A damage-based criterion for fracture prediction in metal forming process: A case study in Al 2024 T3 sheet. *J of Mat Processing Tech*, 1999, 89-90: 79~83
- 45 Tang CY, Chow CL, Shen W, et al. Development of a damage-based criterion for ductile fracture prediction in sheet metal forming. *J of Mat Processing Tech*, 1999, 91: 270~277
- 46 Tang CY, Shen W, Fung LC, et al. Second order continuity tensor and stiffness degradation of aluminum alloy 2024 T3 under large strain at room temperature. *Int J Mech Sci*, 2000, 42: 87~105
- 47 Tang CY, Shen W, Lee TC. A damage model for fracture prediction of super-plastic aluminum composite sheet. *J Mat Processing Tech*, 2002, 121: 301~307

UNSTABILITY AND DAMAGE ANALYSIS ON SHEET METAL FORMING PROCESS

SHEN Wei PENG Lihua

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Tang C. Y.

(Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract Plastic instability induced by localized necking in sheet metal forming process and forming limit analysis are reviewed. Some applications of plastic instability criteria on forming limit analysis and related computer simulations are discussed. Plastic instability-failure, as an interaction between plastic work-hardening and damage-softening is presented and the advances of Continuum Damage Mechanics related to this project are also reviewed in this paper.

Key words forming process, localized necking, forming limit, inner damage, damage mechanics