

金属薄板成型工艺中的失稳和损伤分析

孙志芳¹ 傅晓伟²

(海宁红狮宝盛科技有限公司 浙江海宁 314400)

摘要: 对金属薄板成型过程中由于局部化而导致的塑性失稳机制和成型极限分析进行了综述; 对各种塑性失稳准则在成型极限的试验、有限元法、仿真中的应用以及它们的局限性进行了讨论, 认为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交互作用的结果, 同时对该领域的研究也进行了展望。

关键词: 金属薄板; 成型工艺; 失稳; 损伤分析

一、引言

通过深拉、轧制、锻造、冲压等成型方法, 实现了多种工程零部件和消费品的高效成型, 在包装、汽车等领域有着广泛的应用。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。人们普遍认为, 金属薄板成型过程中存在着两种破坏模式: 一种是局局部化颈缩, 另一种是皱折。

局部化颈缩是金属薄板成型过程中的一项重要特性, 也是衡量其流动性能的重要指标。工艺因素及金属流动性可以改善金属板零件的设计, 并对成型过程的成败产生影响。因此, 成型极限图(FLD)被广泛应用于板材成型过程的分析。FLD 是利用材料的局部化颈缩率来测量薄金属制品的流动性能。而在实际中, 板材的流动状态与其内部破坏的发生和扩展密切相关。然而, 传统的局部化颈缩计算采用的是经典的塑性理论, 忽视了微观缺陷对材料力学性能的影响。此外, 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。已有学者提出了褶皱极限曲线(WLC)。

金属板材在失效之前的最大流度是指在特定成型过程中, 材料在特定成型条件下不会出现失稳现象, 其流动性能对成型过程具有重要影响, 评价金属流动性的常规方法是经典塑性理论。Hill 利用经典的塑性理论, 金属在局部化颈缩过程中进行了研究。

试验结果显示, 大部分金属材料中含有不同形状、大小和含量的颗粒(沉淀物和夹杂)。在变形中, 沉淀物和夹杂会诱发微观裂纹、孔洞等缺陷, 造成材料的力学性能劣化, 被称为损伤软化。损伤软化是诱发颈缩的关键因素; 成型极限曲线是影响成型性能的重要因素, 如微孔洞、微裂纹等。

在延性断裂、蠕变、冲击与疲劳、复合材料失效等工程问题中, 损伤力学已经得到了广泛的应用。本文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

二、塑性失稳和常规方法

1. 流动性与局部化颈缩

金属薄板成型的失稳-破坏过程可大致分为三个阶段: 分散式颈缩、集中型颈缩-终断型。材料在复杂成型过程中的承载能力与其塑性失稳状态密切相关。Hill 的预测是: 双轴拉伸下的均质板不会发生颈缩。但试验研究表明: 双轴拉伸下板材将出现明显的颈缩现象, 最终导致失效。从理论上讲, 局部化颈缩塑性失稳机理尚不明确。然而, 用来描述金属板塑性失稳的成型极限分析仍然是众多学者和工程技术人员关注的问题。

2. 成型极限图

为了更好地了解金属成型过程和预估金属板的成型极限, 国内外学者开展了大量的研究工作。采用最大-最小主面应变坐标系下的成型极限图(FLD)中的主应变, 计算出板材的流动极限。有限差分法给出了不同应变路径(从双轴拉伸至单轴拉伸)条件下的最大变形, 是评价金属薄板成型过程中成型极限的重要手段, 但目前主要采用试验方法。已有学者提出了基网络法测量应变历史和应变分布方法, 并利用半球冲压机对圆板进行冲击实验, 获得了双轴拉伸区($\epsilon_1, \epsilon_2 > 0$)的FLD。通过实验获得的成型极限曲线, 包括双轴拉伸区($\epsilon_1, \epsilon_2 > 0$)和压延区($\epsilon_1, -\epsilon_2 > 0$)。

Swift 和 Hill 预测出了分散颈缩和局部化颈缩的起始点。然而, 分散颈缩并非成型极限, 且 Hill 提出的局部化颈缩率准则无法预测双轴拉伸区的临界应变。用 Hill 理论得到的 FLD 预估结果与相关文献的实验研究结果符合不好。基于 Hill 的 1948 准则, 引入了材料的初始异质计算拉伸区局部化颈缩的发展(M-K 模型)。但是, 利用 M-K 模型对 FLD 的右边部分进行了预测, 结果与试验值相差较大。

一些学者用 M-K 模型预测近等双轴拉伸的极限应变,其极限应变值比试验值要大。

有学者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,但与大量的试验数据并不吻合。可以在 M-K 模型中加入各种初始非均匀性,如表面粗糙度、孔隙等,来研究其对材料极限应变的影响。利用 M-K 模型计算 FLD 右侧区域的应变硬化指数、应变率、不均匀系数以及屈服准则中的应力指标。有学者通过实验 (在尺度-应变状态下) 研究了平板的流态化行为。

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,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 屈服判据等等。此外,还将研究塑性 J_2 流理论和局部颈缩分支理论。但现有准则及理论均未考虑微观缺陷对材料力学性能的影响,存在一定的不确定性,导致其在研究异型成型过程中存在较大的局限性。一些学者认为,在实际应用中必须与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。

由此可以看出,以上屈服准则所预测的金属薄板成型极限,不足以满足全应变路径区的成型极限;此外,现有的屈服准则均未反映材料的各向异性及损伤演化过程。然而,因为应变测定比较简便,而且缺少较好的标准,这些基于应变量的成型极限图仍然是鉴别成型精度的关键。

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。初始时,成型极限图 FLD 被用来描述板料的总体成型极限,而在变形路径为线性条件下,仅适合于成型工艺为比例加载 (或近比例加载) 情况。一些学者提出了一种金属板颈缩扩展模型,并在此基础上进行了有限元分析。一些学者已经证明,轴对称杯压延的应变路径是非线性的。

以往的试验主要集中在初始载荷 (等双轴拉伸,单轴拉伸或压延) 后进行,而实际生产中,大多数冲压零件都是在非比例加载路径下成型的。二次拉伸、摺边冲压等多道成型方法,其变形轨迹与成正比关系较小。对于这种情形,目前使用的 FLD 法的精度与可靠性存在疑问。

通过对网络-应变关系的试验研究,实现了基于非线性应变路径的金属成型工艺研究。已有研究人员通过实验方法,对 Al2008-T4、

Al6111-T4 等合金的成型极限进行了实验研究。试验采用了单轴拉伸,平面应变或等双轴拉伸的方式,对试样进行了不同的预应变试验。然后按照常规的试验方法测定极限值,也就是进行半球形冲头冲压 FLD 试验。实验结果显示,不论采用何种预应变,其底部均为平面应变区。实验结果也显示,双轴拉伸预应变将使材料的疲劳极限值减小;而单轴拉伸或平面应变均可使成型极限曲线升高。

5.有限元模拟

传统的成型极限分析方法是根据塑性变形失稳分叉理论,采用“局部化颈缩起始”来表征成型极限。一些学者根据正交各向异性准则,在应力空间中以极坐标形式表达的屈服面来刻画正交各向异性的塑性变形。求出了有限元法需要的正切弹性刚度张量;采用有限差分模型来刻画屈服判据,利用大型商用 ABAQUS 有限元分析软件 UMAT,编制了相应的计算程序,通过对圆柱膜片液压胀形和圆柱杯件深冲进行数值仿真,获得了试件的变形等参数,并与试验数据、Hill 的第二屈服准则进行对比分析。他们的工作还包括屈服面形状对应变分布的影响,以及板材之材质参数对于金属薄板成型之模拟。

二是利用有限元方法,结合韧性破坏准则,预测板材在双轴拉伸下的极限应变。有些学者的作法是:在有限元法中,假设材料为刚塑而不考虑可压缩及各向异性;通过双轴拉伸实验测定了材料的断裂应变,得到了所需要的材料常数;拟以金属薄板成型 (深冲、延压、胀形等) 为研究对象,利用所获得的应力、应变值,建立塑性断裂准则,并与试验结果进行对比。

已有学者提出了一种求解平面应力状态下的稳定应力积分方法,利用 FORMSYS-DE 程序,利用 Hill 第二屈服准则,开展两种不同成型方式 (液压胀形、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,并与试验结果进行对比,其误差小于 5%。

一些学者对其进行了完善,并将其用于大塑性变形的有限元法中。一些学者利用 S-R 模型来计算局部化的缩颈起点,并对局部的极限承载力进行了预测。也有学者提出将应力准则用于非成比例荷载的可行性,但因其不方便直接测定而存在局限性。

三、内部损伤与损伤力学方法

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往往是由其内部损伤的慢速发展引起的。已有学者根据微观孔洞的膨胀与聚合原理,提出了一种新的破裂模型。学者们建

立了一种可应用于远场应力条件下含球形孔洞的理想塑性材料位移场的理论模型。也有学者提出了另一种空隙扩展模型。微力学损伤模型,从材料的损伤机理出发,综合考虑微观缺陷的萌生和扩展对材料宏观性质的影响。一些学者对 Gurson 模型做了修正,使其能够反映微观空隙的相互作用以及材料强化效应。

依据金属板的延性断裂发生在 45° 平面的事实,有学者提出一种基于空隙切变连结的统计模型的延性断裂判据。已有研究表明,空隙扩展是诱发局部收缩的关键因素,且成型极限曲线对异质内部和外部初始空隙密度差异非常敏感。在超塑性合金中,微观空隙的形状、大小各不相同,部分空隙之间存在着连接。试验结果表明,基质的塑性流动是影响空隙生长的主要因素;当变形较小时,空隙通常为离散状态;随着应变的增加,空隙变大,晶界会被拉伸,甚至出现裂纹。在大变形过程中,随着应变的增加,材料中微观缺陷的体积密度增加,大于 10%。

在实际应用中,材料的塑性加工强化与损伤软化交互作用共同组成了“后屈服”过程,进而引发了材料的失稳。

2. 损伤力学方法

为深入理解金属薄板成型工艺,对其成型极限与断裂极限的研究,从传统的理论向采用损伤力学的理念与方法转变。最早用于钣金成型的是 Schmitt 和 Jalimier。他们发现,如果粒子与基体间的界面脱离,那么在单轴拉伸条件下,只会出现很小的损伤,而在等双轴条件下,则会出现很多的损伤。而由粒子破碎所引起的损伤,无论在单轴或双轴拉伸状态下,都会出现大致相等的损伤数目。已有学者研究表明,双轴拉应力作用下,金属板材的塑性失稳伴随着材料劣化,因此,有必要将成型极限图 (FLD) 应用到损伤力学中。他们指出,金属薄板成型有三个阶段,因此,成型极限图也应包含这三个阶段。他们工作的不足是假设损伤为各向同性。

有学者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),并结合自行编制的损伤基体材料计算程序,研究其在不成比例加载条件下的成型极限及断裂极限。同时,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;讨论塑性加工强化与损伤软化之间的交互作用,这种交互作用会引起塑性失稳,并最终导致断裂失效;提出了各向异性损伤变量定义(二阶连续性张量),并对其进行了分析。推导出各向异性的损伤扩展力及等效损伤应力的

表达式;进而,构建损伤演化方程,提出失稳准则与断裂准则。该准则对金属板成型过程的设计与质量控制具有一定的参考价值。

四、未来的研究方向

未来的研究将利用先进的试验手段与数值计算手段,对其失稳与断裂机制进行深入研究。此外,为了更加精确地对加工过程进行预测与评价,还需要建立更加准确的材料模型与计算方法。同时,为了更好的解决这一难题,还必须引进新的理论与方法。进一步的研究也可能涉及到新的制程方法与科技,以改善生产力与品质。其中包括智能制造、数字制造、3D 打印等。在此基础上,本项目拟对其进行深入的研究,并对其结构进行优化设计,并对其制备工艺进行改进,从而提升其性能及可靠性。

结论:

金属板材成型过程中的失稳与断裂问题一直是该领域面临的重大难题,亟待研究解决的新理论与新方法。进一步的研究要求对其失稳与断裂机制有更深刻的认识,利用先进的试验手段与数值计算手段,发展新的加工工,提升加工效率与品质。通过本项目的研究,可以加深对板材成型工艺的认识与调控,促进该学科的发展。

参考文献

- [1]徐铁伟,蒋一征,张丰收,冯勇,李金山. $\alpha + \beta$ 型钛合金变形过程中裂纹萌生及其损伤机理[J].材料热处理学报,2015,36(1): 56-61.
- [2]段波,赵兴中,李星国,张同俊,肖建中,胡镇华,崔昆.超微粉制备技术的现状与展望[J].材料工程,1994,22(6): 5-8.
- [3]郭强,严红革,陈振华,张辉.多向锻造工艺对 AZ80 镁合金显微组织和力学性能的影响[J].金属学报,2006,42(7): 739-744.
- [4]汪程鹏,李付国,陆红亚,王磊,乔慧娟.剧烈塑性变形制备微纳米材料的变形细化机理[J].金属热处理,2012,37(2): 14-19.
- [5]郭双喜,李雪芹.记及压应力的内聚力单元及其厚度对复合材料分层损伤预测的影响[J].玻璃钢/复合材料,2019(2): 20-25.
- [6]宓利鹏,李全安,陈晓亚.剧烈塑性变形工艺加工镁合金的研究进展[J].材料热处理学报,2018,39(11): 1-9.
- [7]刘畅,王康康,赵洁.含分层损伤碳纤维复合材料剩余强度等效评估原则[J].飞机设计,2019,39(3): 27-32.

作者简介:姓名:孙志芳;男;1984年10月;籍贯:海宁;最高学历:本科;职称:高级工程师;职务:技术部长;研究方向:机电设计制造