

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.02.010

超塑性成型工艺优化策略

Optimization of the Superplastic Forming Process

杨 建 / YANG Jian

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘 要:

超塑性在较低应变速率下得到较大变形量,超塑性成型工艺在航空航天领域多用于制造铝合金零件,一般采用气压在高温下实现。为达到最佳成型效果,对其工艺的优化必不可少。对超塑性及其成型工艺做一简介,介绍了采用数值模拟和实验验证提出的超塑性成型工艺优化策略。提出对超塑性成型工艺的优化按单参数优化和多参数优化分类,并给出了相应分类的优化策略,着重给出了成型时间优化中的气压控制和控制空间搜索策略及零件厚度优化,指出了后续研究的方向。

关键词:超塑性成型;工艺优化;单参数优化;多参数优化

中图分类号:V250.2

文献标识码:A

[Abstract] Superplasticity is characterized by the very large elongations at break and the relatively low strain rates in the forming process. Superplastic forming is mostly used to produce the aluminum alloys parts in aeronautics and astronautics fields, and this process is usually carried out under an elevated temperature with a forming gas pressure. To reach the best forming effect, the optimization of superplastic forming is necessary. This paper introduces the superplasticity and its forming processes firstly. And then the paper presents the strategies for the optimization of superplastic forming which are proposed with the numerical simulation and verified by the experiments. These optimizations are divided into two types: mono-parameter optimization and multi-parameter optimization. The related optimization strategies are given in these two types, and the strategies of the pressure control, the control space search and the optimization of thickness are addressed. The research objectives in the future are given at the conclusion.

[Keywords] superplasticity; superplastic forming optimization; mono-parameter; multi-parameter

0 引言

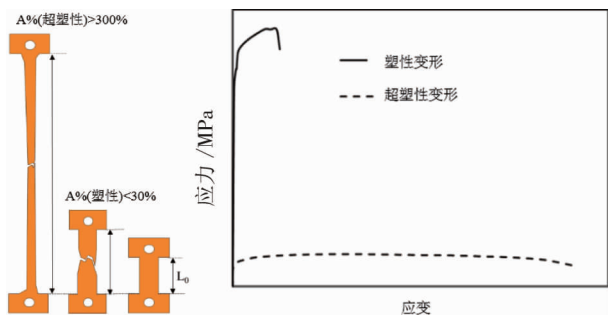
作为金属材料(特别是铝合金和钛合金)的一种特殊性能,超塑性能允许难成型材料在低应变速率及高温条件下达到较大变形,从而获得复杂形状的零件。随着超塑性合金在航空、航天、汽车、医疗等领域运用越来越多,对超塑性成型工艺的研究也逐渐增加^[1]。超塑性成型工艺一般在高温下采用惰性气体充压胀形,涉及到材料本构关系、温度、应变速率、成型气压等参数,为了获得较好的最终零件成型质量及较短的成型时间,有必要对成型工艺进行优化。

1 超塑性

超塑性是指一系列材料在高温下达到其在塑性成型工艺中不能达到的大变形(一般变形量大于 300%)的性能,如图 1 所示。它一般有以下特性:

- 1)在断裂前的大变形;
- 2)在低应力水平下的低应变速率。

塑性的出现与否很大程度上取决于材料本身。较小的晶粒尺寸允许获得较高的应变速率,从而缩短成型时间;如材料在成型过程中材料的晶粒结构基本保持稳定,则可由超塑性得到较大变形。

图 1 超塑性成型与常规塑性成型对比^[2]

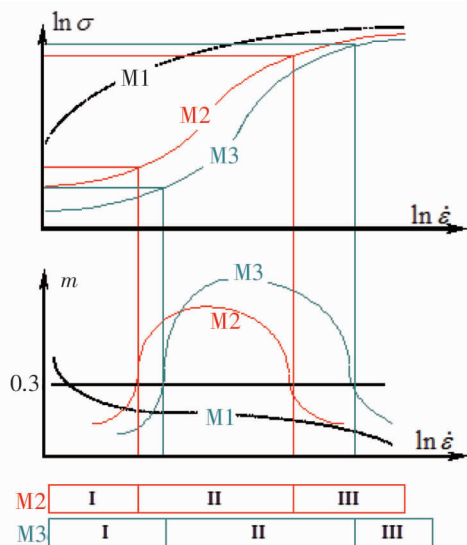
对某些材料,为了保证超塑性成型,以下条件必须保证^[3-5]:

- 1) 成型温度在 50% ~ 75% 的材料绝对融化温度;
- 2) 材料应变速率一般小于 10^{-3} s^{-1} ;
- 3) 微观结构稳定且为等晶轴结构。

以上三个参数对超塑性本构关系的影响可通过定性或定量的趋势线来确定^[6-7]。

超塑性可由材料的流变关系,尤其是应力对应变速率的敏感系数 m (以下简称为应变速率敏感系数) 来表征。该系数可由曲线 $\log(\sigma) = f(\log(\dot{\epsilon}))$ 的斜率计算得到,即 $m = \partial \log(\sigma) / \partial \log(\dot{\epsilon})$, 式中 σ 为应力, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率。超塑性成型最佳应变速率范围一般对应为最大的 m 。一般地,认为 $m > 0.3$ 的材料为超塑性材料^[3,8-13]。

超塑性材料与传统材料的对比如图 2 中所示。



注: M1 为传统材料; M2 为超塑性材料, 精细结构(晶粒尺寸 d_2); M3 为超塑性材料, 极精细结构(晶粒尺寸 $d_3 < d_2$)

图 2 超塑性材料与常规塑性材料对比^[2]

对于传统材料 M1, 其应变速率敏感系数 m 较小, 相应热成型工艺需要克服较大的应力。与此相反。超塑性材料 M2 和 M3 的应变速率敏感系数 m 较高, 一般情况下 $m > 0.3$, 且在图中所示的超塑性区域(区域 II)所需克服的成型应力较小。从图 2 中还可以看出, 超塑性材料精细结构的晶粒尺寸越小, 所需克服的应力越小, 对应的应变速率敏感系数 m 越大, 超塑性区域的应变速率越高, 同时其对应的超塑性应变速率也有相对宽的范围。

2 超塑性成型工艺

超塑性成型工艺可按以下几种工艺分类^[14]:

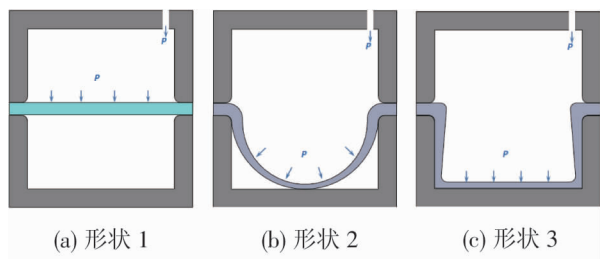
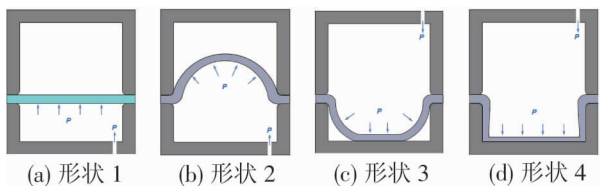
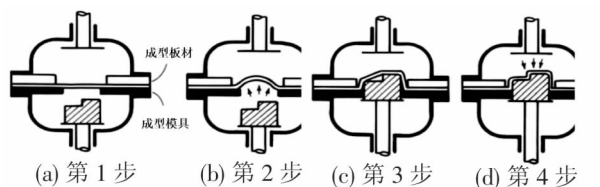
- 1) 超塑性充气压成型;
- 2) 等温模锻;
- 3) 管道胀形;
- 4) 液压挤压成型。

本文在此详述超塑性充气压成型, 该工艺也是超塑性成型中最常采用的成型工艺。

超塑性充气压成型采用惰性气体压力, 可在一次成型过程中加工复杂形状的难成型材料, 它也是在超塑性的情况下获得拉深件的最佳替代方案。一般地, 针对航空工业, 该工艺在批量 50 ~ 1000 件的情况下是最经济的工艺^[8,15]。同时, 该工艺还可与扩散连接工艺配合使用, 极大地扩展了该工艺的适用性。

超塑性充气压成型工艺又可以分为自由充气压成型(Free Bulging, FB)、反向充气压成型(Reserved Bulging, RB)和组合式充气压成型(Combined Bulging, CB)。FB 工艺是超塑性成型中的传统工艺, 它采用气压来成型夹在上模和下模中的薄板件, 其最终成型形状由下模形状决定, 如图 3 所示。RB 工艺是由两步 FB 成型的过程组成: 首先将零件反向充气压成型至一定阶段, 然后按照正常的自由充气压成型工艺进行, 如图 4 所示。该工艺可以获得厚度分布较自由充气压更为均匀的零件。CB 工艺则是在 RB 成型的基础上, 采用活动的下模, 该种工艺相对于 RB 成型更为灵活, 可以较为方便的成型多种形状的复杂零件, 如图 5 所示。

超塑性充气压成型工艺还可与其他工艺相结合, 从而获得更复杂的零件。较常用的组合工艺是与扩散连接工艺结合(Superplastic Forming-Diffusion Bonding, SPF/DB)。SPF/DB 工艺可获得内

图 3 自由充气压成型工艺示意^[2]图 4 反向充气压成型工艺示意^[2]图 5 组合式充气压成型工艺示意^[7]

部含复杂腔体的组合零件,极大地减少组合件的加工时间。

超塑性成型工艺所采用的加载气压曲线,一般可通过经验或数值模拟得到。目前,数值模拟可按规定的气压控制策略生成对应的气压曲线,且可给出对应的零件厚度分布情况。数值模拟的结果可通过实验验证,以确认数值模拟的有效性。本文对相应的优化策略做一总结,通过对相应优化策略的分析,为后续超塑性成型工艺的优化提供参考。

3 超塑性成型工艺优化策略

目前,超塑性成型工艺优化一般先通过数值模拟,得到相应的成型特性(如局部减薄、断裂等),根据其特性建立成型参数(一般为气压成型曲线),以达到优化工艺过程的目的。在此过程中,对工艺性有影响的参数有:材料性能、工艺参数、零件几何参数、摩擦性能等。可将以上过程分为两部分:一为材料性能表征,即通过实验确定材料性能并确定其本构方程;二为模型验证,及通过相应的数值模拟实现优化策略,并通过实验验证模型有效性。具体可参考图 6。

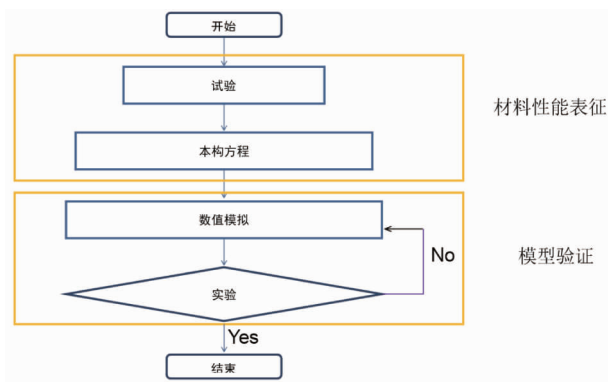


图 6 超塑性成型工艺优化流程

超塑性成型工艺可优化的参数多种多样,如成型时间、厚度分布、成型后机械性能^[16]、成型温度^[17]、消耗的能量^[18]等,如图 7 所示。成型时间和厚度分布为常用的优化参数;成型后机械性能常在超塑性研究中忽略,其对最终零件的机械性能有直接影响;成型温度在一定条件下可比超塑性温度低约 100 ℃;通过测算外部加载消耗的能量可对成型工艺是否达到最优化进行定量分析。

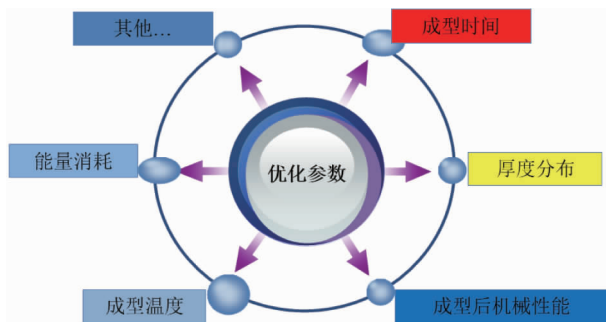


图 7 超塑性成型工艺优化参数

记优化参数为 x , 对应于此参数的优化目标定义为 f , 则有:

$$f = \text{optimize}(x) \quad (1)$$

令下标 $i(i=1,2,3,\dots)$ 为单独的一个优化, 对应该优化目标的权重系数取为 w_i , 对于多个参数同时优化的结果记为 F , 则有:

$$F(f_1, f_2, \dots) = w_1 f_1 + w_2 f_2 + \dots \quad (2)$$

基于单个优化参数的优化策略,称为单参数优化,基于多个优化参数的优化策略,称为多参数优化。由上面的分析,我们有单参数优化和多参数优化之间的关系如图 8 所示。当以整体优化结果的函数为优化目标时,多参数优化可转化为单参数优化进行,即:

$$f = \text{optimize}[F(f_1, f_2, \dots)] \quad (3)$$

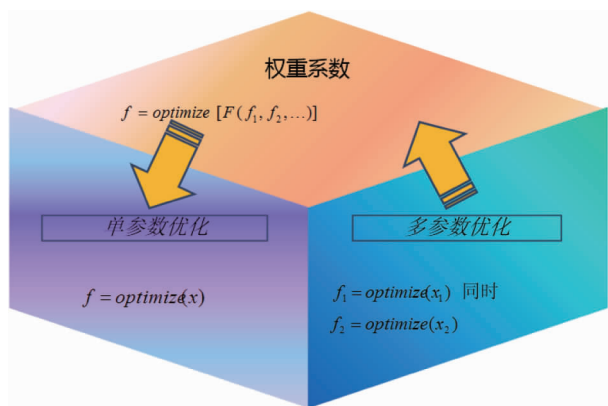


图8 单参数优化和多参数优化关系示意

3.1 单参数优化

单参数优化是超塑性成型工艺优化策略经常选取的优化方式,该种优化方式的优化目标明确,可通过对结果的分析得出优化的效率和效果。但是由于其仅针对某一种优化结果,最终的优化可能使得工艺不具有可实施性。以下主要对成型时间优化和厚度分布优化进行介绍。

3.1.1 成型时间优化

对成型时间的优化可通过气压控制和控制空间搜索策略进行。

1) 气压控制

在超塑性成型过程中主要有两种气压控制方式,即整个成型过程中压力保持不变的恒压胀形和成型过程中维持最大应变速率不变的恒应变速率胀形。恒压胀形时,选取初始成型压力使零件在超塑性应变速率范围内成型,整个过程中维持初始压力不变,直至成型结束,该工艺一般不用来直接加工零件,一般用于理论研究中作为对比成型的一种方式。恒应变速率胀形过程则是通过调整加载气压大小,维持变形过程中最大应变速率在最佳超塑性成型范围内。

超塑性材料本构关系与应变速率关系较大,由于最终零件的变形量已定,应变速率的大小直接决定了成型时间的长短。如何控制零件的应变速率在超塑性应变范围内达到最大,从而缩短成型时间,是气压控制策略的终极目标。

针对形状较为简单的零件,如图9所示半圆形零件,可利用几何关系和平面应力状态,得到加载气压 P 和成型高度 h 的解析关系^[8]:

$$P = \frac{4\sigma_{eq}e(h)h}{h^2 + R_0^2} \quad (4)$$

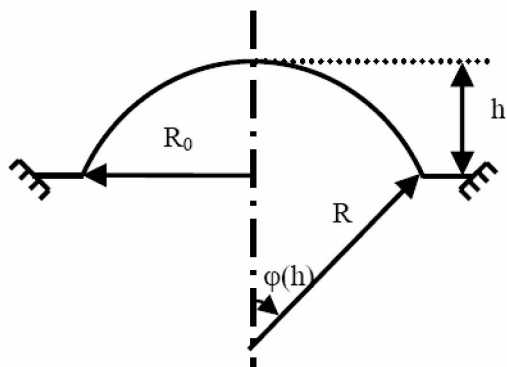


图9 半圆形零件几何关系

式(4)和图9中, σ_{eq} 为平面等效应力,且有 $\sigma_{eq} = \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{PR}{2e(h)}$; $e(h)$ 为零件顶部在成型高度为 h 的厚度; R_0 为零件初始半径; R 为成型后零件半径,且有 $R = \frac{h^2 + R_0^2}{2h}$; $\varphi(h)$ 为零件成型高度为 h 时的夹角。

针对形状复杂的零件,一般采用数值模拟的方式得到相应的气压控制曲线。这是超塑性成型工艺优化策略中研究最多的领域,相关研究成果也最多。常用的数值模拟中实现气压控制的方式有两种,其一为在模拟中更新气压,其二为对参考模拟得到的气压进行后处理。

2) 控制空间搜索策略

控制空间搜索策略由 Bate 提出^[19-20]。控制空间为成型零件所包围而形成的空间,其为时间的函数。成型过程可定义为由成型零件所围一定体积 V 时的对应时刻 $t(V)$,它由正交多项式加权后求和得到:

$$t(V) = V_{\max} \left(\frac{1+v}{2} \right) \sum_{i=0}^N c_i p_i(v) \quad (5)$$

式(5)中, V_{\max} 为最终成型零件所围成的体积; v 为取值范围为 $(-1, 1)$ 的变量,且为 V 的线性函数; $c_i (i=1, 2, 3, \dots)$ 为系数,定义了成型次序,且该系数定义了控制空间中的一点; p_i 为 Legendre 多项式。

采用以上控制策略,则每次有限元模拟的迭代结果即为控制空间中的一点,且该结果可用零件的最小厚度来表征,从而将优化转换为控制空间中搜

索零件最小厚度的最大值。该控制策略结果稳定,算法稳健,对材料性能的变化相对不敏感。

3.1.2 厚度分布优化

成型零件的厚度分布优化可通过解析分析或数值模拟的方式实现。为了得到厚度分布较为均匀的零件,一般考虑给定毛料初始厚度。

Cheng 给出了简单半圆形零件的初始毛料厚度解析计算方法^[21]。如图 10 所示,一个由 Ti-6Al-4V 材料制作成形的半球状零件,厚度 s_d 为 0.5 mm,初始毛料厚度 $s_0(r)$ 可由体积不变公式得到,成型零件高度 $h=R$ (R 为半球半径)。

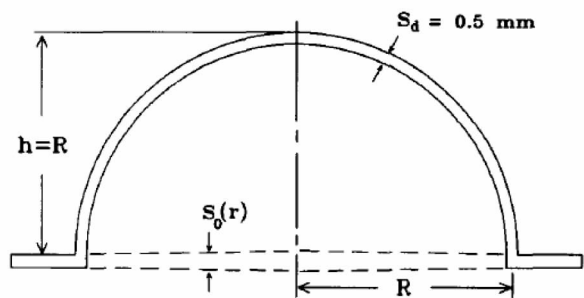


图 10 均匀厚度初始毛料厚度设计^[21]

Lee 建议在毛料上增加一个控制环^[22],该控制环可以在零件进入较大变形时补充所需材料,从而达到厚度分布较均匀的目的,如图 11 所示。

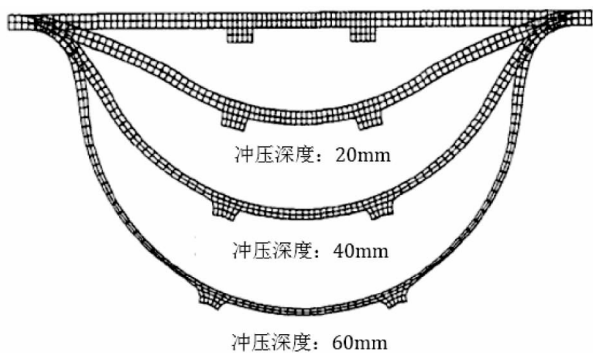


图 11 半球成型控制环示意^[22]

Kim 给出一个较为简便的预测初始零件厚度的方法^[23],即增减,首先给定一个初始毛料厚度,通过数值模拟得到该厚度与最终零件设计厚度之间的差异,然后通过增加或减少初始毛料厚度来补偿该差异,如图 12 所示。Xing 也提出了类似的思路^[24]。

Huang 更进一步,提出了梯度搜索和比例控制的方法来确定初始毛料厚度^[25]。

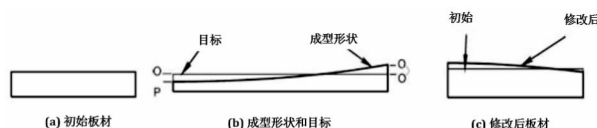


图 12 增减补偿初始毛料厚度示意^[23]

梯度搜索方法如式(6):

$$\mathbf{T}^{(k+1)} = \mathbf{T}^{(k)} - \lambda^k \mathbf{s}^k \quad (6)$$

式(6)中, \mathbf{T} 为毛料厚度, k 为迭代次数, λ 是迭代步长, \mathbf{s} 是下降方向。当 λ 为正值时,式(6)给出最速下降厚度,这也是该算法的使用范围;当 λ 为负值时则给出最速上升厚度,本文不适用。

比例控制方法采用有限元模型每个节点的比例误差来校正毛料厚度。设一有限元模型有 n 个节点,对第 i 个节点,其比例控制如下:

$$T_i^{k+1} = T_i^k - p e_i \quad (7)$$

式(7)中, T_i 是第 i 个节点的零件厚度, k 为迭代次数, p 是比例控制系数, e_i 为第 i 个节点的零件厚度 t_i 与目标零件厚度 t^* 的差异,即 $e_i = t_i - t^*$ 。

Valente 总结了采用有限元模型对厚度分布进行优化的方法^[26],并给出了其采用的优化流程,如图 13 所示。

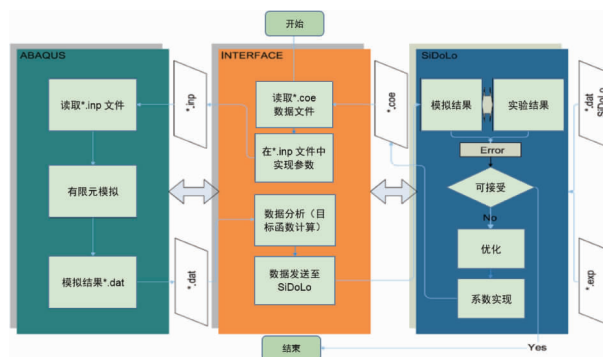


图 13 厚度分布优化流程^[26]

De-Varvalho 采用非均匀比例 B 样条表面(Non-uniform rational B-spline, NURBS)模拟初始材料^[27],并用表面的网格控制点作为优化参数耦合有限元模拟得到了较优的初始零件厚度分布。

3.2 多参数优化

多参数优化策略与单参数优化策略基本思路一致,其优化目标需考虑多个因素,优化结果更具工艺实施性。由于其优化对象多,对优化策略的选择难度较大,相关成果较单参数优化为少。

Abu-Farha 提出了基于不同应变速率下的应力-

应变曲线极值得到加载路径的方法^[16],该方法可优化成型时间、厚度分布和成型后机械性能,如图 14 所示。

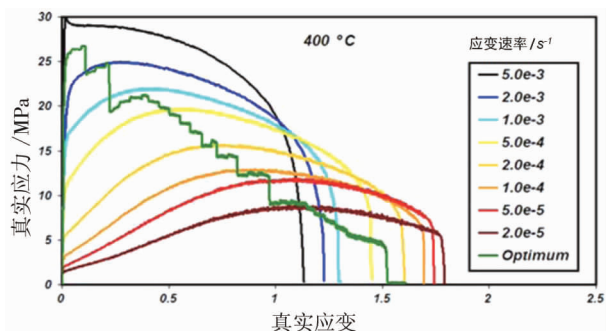


图 14 最佳加载路径与等应变速率应力-应变曲线对比^[16]

基于 Abu-Farha 的研究, Yang 提出了超塑性成型工艺气压曲线优化策略^[2],该优化策略在考虑最佳应变速率的情况下,增加了对应许用应变下最佳应变速率的控制,实现了成型时间和厚度分布的优化,如图 15 所示。在成型过程开始时,零件在较高的应变速率成型;随着成型过程的进行,应变速率相应降低,保证其最大应变不超过对应许用应变,从而预防材料的断裂和破坏。

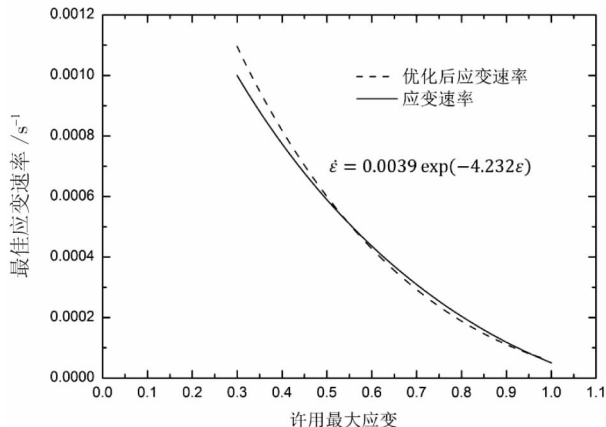


图 15 最佳应变速率控制^[2]

徐雪峰等人提出了基于最大值的优化应变速率超塑性胀形的新方法^[28],该方法较恒应变速率胀形能大幅缩减成型时间,降低减薄率,提高胀形效率,改善了成型零件的壁厚均匀性。

4 结论

本文简介了超塑性及超塑性成型工艺,讨论了超塑性成型工艺的优化策略,提出将优化策略分为两类:单目标优化和多目标优化。对两类优化策略

分别进行了介绍,给出了相关的研究成果,着重给出了成型时间优化中的气压控制和控制空间搜索策略及零件厚度优化。本文的主要结论有:

1) 超塑性成型工艺可在成型时间、零件厚度分布、成型后机械性能、成型温度和成型过程消耗能源等方面进行优化;

2) 提出了超塑性成型工艺优化策略分为单目标优化和多目标优化两类的分类法,给出了多目标优化策略可转换为单目标优化策略的条件;

3) 目前超塑性成型工艺优化研究集中于成型时间和厚度分布优化,对成型后机械性能及消耗能源等方面考虑较少,建议开展对以上领域的进一步研究。

参考文献:

- [1] BARNES A. Superplastic forming 40 years and still growing [J]. JMEPEG, 2007, 16: 440-454.
- [2] YANG J. Etude expérimentale et modélisation du formage superplastique d'un alliage d'aluminium Al7475 [D]. Angers : Arts et Métiers Paris Tech, 2014.
- [3] BONET J, GIL A, WOOD R D, SAID R, CURTIS R V. Simulating superplastic forming [J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2006, 195: 6580-6603.
- [4] CHANDRA N. Constitutive behavior of superplastic materials [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2002, 37: 461-484.
- [5] XING H, WANG C, ZHANG K, WANG Z. Recent development in the mechanics of superplasticity and its applications [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151: 196-202.
- [6] SNIPPE Q, MEINDERS T. Mechanical experiments on the superplastic material ALNOVI-1, including leak information [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 950-960.
- [7] GHOSH A K, HAMILTON C H. Superplastic sheet forming, metalworking: sheet forming [M]. ASM Handbook, 2006, 14B: 345-366.
- [8] AOURA Y. Contribution à la modélisation du comportement superplastique des alliages métalliques pour les procédés de mise en forme [D]. Angers: Arts et Métiers ParisTech, 2004.
- [9] ROBERT C. Contribution à la simulation numérique des procédés de mise en forme-Application au formage incrémental et au formage superplastique [D]. Angers: Arts et Métiers ParisTech, 2009.

- [10] BELLET M. Modélisation numérique du formage superplastique de tôles [D]. Paris: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1988.
- [11] BLANDIN J J, SUERY M. Superplasticité [M]. Paris: Techniques de l'Ingénieur, 1996
- [12] MOHAMED F A. The role of boundaries during superplastic deformation [J]. Surface & Interface Analysis, 2001, 31: 532-546.
- [13] LANGDON T G. Grain boundary sliding revisited: developments in sliding over four decades [J]. Journal of Materials Science, 2006, 41: 597-609.
- [14] BOULOS Z. Interactions matériaux-procédé dans la mise en forme superplastique d'alliages réfractaires [D]. Angers: ENSAM, 1999.
- [15] BOUDE S. Maîtrise du procédé de formage superplastique et réalisation d'une installation pilote [D]. Nantes: Université de Nantes, Ecole centrale de Nantes, 1994.
- [16] ABU-FARHA F K, KHRAISHEH M K. Post-Superplastic forming analysis under different loading paths. part one: uniaxial loading case [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2008, 17: 153-162.
- [17] CHUMACHENKO E N, LOGASHINA I V, Malyi V I, Portnoi V K, Ishutin P G. Design and optimization of deformation modes in Titanium shells under superplastic conditions [J]. Metallurgist, 2007, 51(1-2): 75-81.
- [18] THEODORE N D, PADMANABHAN K A. Numerical optimisation of superplastic deformation [J]. Journal of Materials Science, 1990, 25: 2133-2143.
- [19] BATE P S, PRICE D C, BARRETT D J, ROBERTS W T. The simulation, control and optimisation of the gas-pressure forming of aluminium alloy sheet at elevated temperature [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1993, 38: 589-612.
- [20] BATE P S, RIDLEY N, ZHANG B DOVER S. Optimisation of the superplastic forming of aluminium alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177: 91-94.
- [21] CHENG J H. A procedure for designing initial thickness variation for superplastic free inflation [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1994, 36(11): 981-1000.
- [22] LEE K S, HUH H, CHOY Y J. Finite element simulation of superplastic punch forming with a thickness control ring [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63: 684-689.
- [23] KIM Y H, LEE J M, HONG S S. Optimal design of superplastic forming process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 112: 166-173.
- [24] XING H L, ZHANG K F, WANG Z R. A preform design method for sheet superplastic bulging with finite element modeling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151: 284-288.
- [25] HUANG A, LOWE A, CARDEW-HALL M J. Experimental validation of sheet thickness optimisation for superplastic forming of engineering structures [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 112: 136-143.
- [26] VALENTE R A F, ANDRAGE-CAMPO A, CARVALHO J F, CRUZ P S. Parameter identification and shape optimization-an integrated methodology in metal forming and structural applications [J]. Optimization & Engineering, 2011, 12: 129-152.
- [27] DE-CARVALHO R, SILVA S, VALENTE R A F, et al. Blank optimization in a stamping process - influence of the geometry definition [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2012, 61: 75-84.
- [28] 徐雪峰,李轩颖,陈清根,等. 基于最大 m 值法的超塑性胀形最佳压力加载方式[J]. 塑性工程学报, 2016, 23(5): 70-76.

作者简介

杨建男, 博士, 工程师。主要研究方向: 结构强度校核;
E-mail: yangjian1@comac.cc