

铝合金轴对称法兰件热挤压成形极限的理论分析

Theory Analysis of Forming Limit for Hot Extrusion Process of Aluminum Alloy Axisymmetric Flange Parts

杜之明^{1,2}, 丛 森¹, 柳 君¹, 秦 晋¹, 谢水生²

(1 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001;

2 北京有色金属研究院 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 100088)

DU Zhi-ming^{1,2}, CONG Sen¹, LIU Jun¹, QIN Jin¹, XIE Shui-sheng²

(1 School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2 State Key Laboratory for Fabrication &

Processing of Non-ferrous Metal, Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

摘要: 对铝合金轴对称零件热挤压成形进行了理论分析, 总结出零件成形极限的影响因素及规律。通过建立法兰类轴对称零件在热挤压成形过程中变形区应力计算的力学模型, 得出应力变化和法兰区外径最大尺寸的表达式。并通过不同应力状态下临界尺寸表达式的对比, 分析径向压力 P 、材料与模具之间的摩擦力 τ 以及法兰区厚度 t 对法兰区外径最大尺寸 R_{\max} 的影响规律, 为实验过程中成形极限的预测提供一定理论依据。

关键词: 法兰件; 热挤压; 应力; 平衡微分方程; 成形极限

中图分类号: TG146.2⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2011)08-0001-04

Abstract: The influence factors and rules of the forming limit of aluminum alloy axisymmetric part in the hot extrusion process were theoretically analyzed. Through setting up the mechanical model of the stress state in the hot extrusion process of aluminum alloy axisymmetric flange parts, obtain the expression of the stress state and the maximum diameter in flange region. At the same time, through the comparison of different stress conditions. The regulation of the pressure P in the outer of flange, the friction τ between the material and tool and the thickness t of flange region for the maximum diameter in flange region was analyzed, in order to offer theoretical basis for predicting the forming limit.

Key words: flange part; hot extrusion; stress; equilibrium equation; forming limit

法兰类零件是一种典型的轴对称零件, 它作为密封和紧固连接零件在汽车、石油化工、连接管道等方面有着广泛的应用^[1,2]。以往生产法兰件的方法为铸造、锻造和冲压等方法, 但是都存在着一定的缺点。铸造方法成形的零件很难避免缩松、缩孔等缺陷, 并且材料的致密度比较低, 力学性能也比其他方法差; 对于锻造方法, 其材料的利用率比较低, 很难一次性成形出达到尺寸要求的零件; 冲压方法只适合生产薄壁零件。而利用半固态坯料热挤压成形^[3-6]方法制作法兰件, 可以克服传统成形方法的一些缺点, 在保证性能的基础上实现近净成形, 达到节省材料, 降低材料流动应力, 提高零件性能的目的。

但是根据法兰零件的成形特点, 在成形过程中法兰区在冲头挤压作用下向外流动, 此时法兰外缘受到的切向拉应力为最大主应力, 容易使坯料产生开裂。所以为了避免法兰类轴对称零件在挤压中开裂, 提高成形极限, 考虑改变传统热挤压成形工艺, 在挤压中提供径向局部加载^[7-9]的方式改变法兰区变形过程中的受力状态, 提高塑性变形能力。在实际成形中主要采用侧向滑块与坯料接触, 通过液压传动装置与侧向滑块连接提供径向加载。在冲头挤压坯料过程中, 坯料同时受到径向压力, 在侧向保压的条件下向外流动, 使法兰区的塑性变形程度提高。

本工作通过对法兰变形区的受力状态分析, 建立

不同条件下变形区的力学模型,得出变形时变形区径向压应力和切向拉应力的表达式。并通过一定的强度理论推导出法兰件的成形极限表达式,从而从理论上分析成形过程中相应的工艺参数对法兰件成形极限的影响规律。

1 力学模型基本假设

图 1 为法兰件结构示意图。其中圆柱形部分为挤压筒内的圆筒区域,平直部分为法兰区域。该零件由直筒形的坯料直接挤出法兰,法兰部分为热挤压过程的变形区,并且在模具中法兰区的外径不断地增大。图 2 为该法兰零件成形的模具结构图,其中侧向滑块可以提供径向加载。随着外径的增大和侧向载荷的加入,变形区的应力也会连续的随之变化,由于法兰部分成形过程中厚度大小不变,所以此类问题按轴对称平面应变问题^[7]来处理。

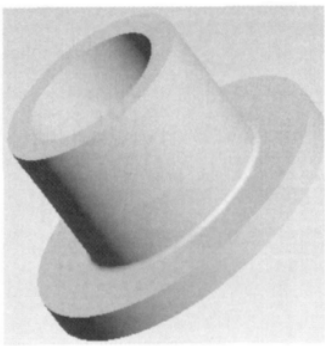


图 1 法兰件结构示意图

Fig. 1 Schematic representation of flange parts

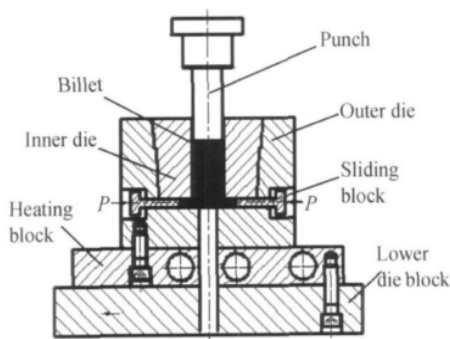


图 2 法兰零件热挤压成形模具

Fig. 2 Schematic representation of the hot extrusion die for flange parts

为研究各种因素对应力状态和成形极限的影响规律,建立 4 种力学模型:(1)法兰区无摩擦,无径向载荷;(2)法兰区无摩擦,有径向载荷 P ;(3)法兰区有摩

擦($\tau = -2\mu\sigma_s$),无径向载荷;(4)法兰区有摩擦($\tau = -2\mu\sigma_s$),有径向载荷。其中 τ 为法兰区上下表面所受摩擦条件, μ 为材料与模具间的摩擦因数, σ_s 为材料流动应力。

2 法兰区受力状态分析

针对法兰区无摩擦无径向加载和有加载两种应力条件,在挤压变形过程中,法兰部分任意半径 R 处的微元体的受力情况如图 3 所示。

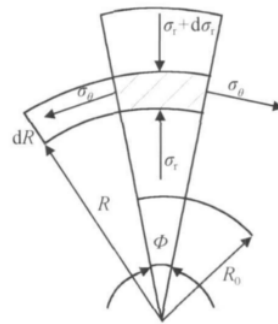


图 3 法兰区受力分析图

Fig. 3 Schematic representation of the stress condition of flange area

图 3 中 R_0 为法兰初始半径,即挤压初期坯料直筒半径, ϕ 为所选微元体的圆心角角度, σ_θ 为环向应力, σ_r 为径向应力,随着 R 的变化而变化,根据平面应变的平衡微分方程,可得此时微元体的平衡微分方程^[10]为:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

又根据 Mises 屈服准则,有 $\sigma_\theta - \sigma_r = \beta\sigma_s$,其中 β 是中间主应力影响系数,且 $\beta = \frac{2}{\sqrt{3 + \mu_\sigma^2}}$, μ_σ 是罗德系数, σ_s 为材料流动应力。整理得:

$$d\sigma_r = \beta\sigma_s \cdot \frac{dR}{R} \quad (2)$$

积分得:

$$\sigma_r = \beta\sigma_s \ln R + C \quad (3)$$

代入法兰区无摩擦无径向加载应力条件下的边界条件。挤压初始阶段法兰外缘处径向应力为零,即当 $R = R_0$ 时, $\sigma_r = 0$,则得出 $C = -\beta\sigma_s \ln R_0$ 。所以得到环向应力和径向应力的表达式:

$$\begin{cases} \sigma_r = \beta\sigma_s \cdot \ln \frac{R}{R_0} \\ \sigma_\theta = \beta\sigma_s \cdot (\ln \frac{R}{R_0} + 1) \end{cases} \quad (4)$$

代入无摩擦有径向加载应力条件下的边界条件,如图 4 所示,法兰外缘受到径向加载,即当 $R = R_0$ 时,

$\sigma_r = -P$, 则得出 $C = -P - \beta\sigma_s \ln R_0$ 。所以有,

$$\begin{cases} \sigma_r = \beta\sigma_s \ln \frac{R}{R_0} - P \\ \sigma_\theta = \beta\sigma_s \cdot (\ln \frac{R}{R_0} + 1) - P \end{cases} \quad (5)$$

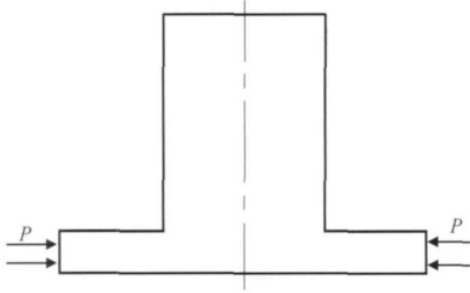


图4 径向加载示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the radial loading P of the flange

法兰区有摩擦无径向加载和有加载的应力条件下,其受力状态如图5所示, τ 为模具对变形区作用的摩擦力, $\tau = -2\mu\sigma_s$, t 为法兰区的厚度,此时的平衡微分方程^[11]为:

$$\frac{d\sigma_r}{dR} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{R} + \frac{\tau}{t} = 0 \quad (6)$$

与 Mises 条件 $\sigma_\theta - \sigma_r = \beta\sigma_s$ 联立,可得:

$$d\sigma_r = \beta\sigma_s \cdot \frac{dR}{R} + 2\mu\sigma_s \frac{dR}{t} \quad (7)$$

所以, $\sigma_r = \beta\sigma_s \ln R + 2\mu\sigma_s \frac{R}{t} + C$ 。

代入式(3)应力条件下的边界条件,在摩擦的作用下,当 $R=R_0$ 时, $\sigma_r=0$, 则得出 $C = -\beta\sigma_s \ln R_0 - 2\mu\sigma_s \cdot \frac{R_0}{t}$, 所以有:

$$\begin{cases} \sigma_r = \beta\sigma_s \ln \frac{R}{R_0} + 2\mu\sigma_s \frac{R - R_0}{t} \\ \sigma_\theta = \beta\sigma_s \cdot (\ln \frac{R}{R_0} + 1) + 2\mu\sigma_s \frac{R - R_0}{t} \end{cases} \quad (8)$$

代入式(4)应力条件下的边界条件,在径向加载和摩擦的作用下,当 $R=R_0$ 时, $\sigma_r = -P$, 可得 $C = -P - \beta\sigma_s \ln R_0 - 2\mu\sigma_s \frac{R_0}{t}$ 。所以有:

$$\begin{cases} \sigma_r = \beta\sigma_s \ln \frac{R}{R_0} + 2\mu\sigma_s \frac{R - R_0}{t} - P \\ \sigma_\theta = \beta\sigma_s \cdot (\ln \frac{R}{R_0} + 1) + 2\mu\sigma_s \frac{R - R_0}{t} - P \end{cases} \quad (9)$$

3 法兰区成形极限分析及其影响因素

法兰部分材料在挤压的作用下连续的向外流动,

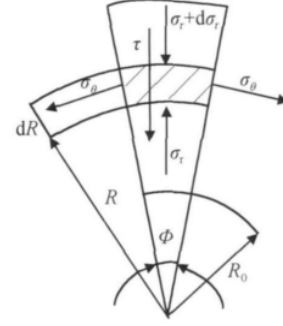


图5 法兰上下表面的摩擦

Fig. 5 The friction in the upper and lower surfaces of flange

法兰的外径也在不断地增大,此时法兰区受力为径向压应力,切向拉应力,并且法兰部分上下表面受到模具的摩擦力作用。在挤压过程中,法兰区所受最大的切向拉应力位于法兰的外缘处,且此切向拉应力随法兰外径的增大而不断增大,当切向拉应力 σ_θ 达到材料此时的抗拉强度 σ_b 时,则材料就会发生破裂,所以当法兰区所受临界切向应力为 σ_b ,此时法兰外径临界尺寸为 R_{\max} 。

由以上可知,在挤压成形过程中可以通过改变相应的参数来提高成形极限,并且确保切向拉应力 σ_θ 小于 σ_b ,以使法兰外缘不发生破裂。通过以上计算以及进一步的比较可以得出影响法兰区成形极限的3个主要因素。

3.1 径向压力(P)

在无摩擦且无加载和有加载两种应力条件下,分别令方程(4)和方程(5)中的 σ_θ 小于 σ_b ,则可以分别得到法兰外径临界尺寸:

$$R \leq R_0 \cdot e^{(\frac{\sigma_b}{\beta\sigma_s} - 1)} \quad (10)$$

$$R \leq R_0 \cdot e^{(\frac{\sigma_b + P}{\beta\sigma_s} - 1)} \quad (11)$$

从式(10)和式(11)可以得出:无摩擦无加载的应力条件下法兰外径所能达到的临界尺寸小于无摩擦有加载应力条件,即随着背压 P 的增大,法兰外径临界尺寸随之增大。同样道理,在有摩擦且无加载和有加载应力条件下,当令方程(8)和方程(9)中的 σ_θ 小于 σ_b ,得到的结论是一样的。由此可以知道,在法兰件挤压过程中,法兰外端的径向加载可以大幅度地提高材料的成形极限,使材料的变形能力增强。

3.2 摩擦力(τ)

充分考虑到单一变量的原则,分析无摩擦无加载的应力条件和有摩擦无加载的应力条件下的受力状态,令方程(4)和方程(8)中的 σ_θ 小于 σ_b ,可以分别得到如下两个化简结果:

$$R \leq R_0 \cdot e^{(\frac{\sigma_b}{\beta \sigma_s} - 1)} \quad (12)$$

$$\ln R \leq \frac{\sigma_b}{\beta \sigma_s} + \ln R_0 - 1 + 2\mu \frac{R_0}{\beta t} - 2\mu \frac{R}{\beta t} \quad (13)$$

式(13)不能通过常规解法得出精确解,但是可以大致确定解的范围以及变化规律。令 $Y_1 = \ln R$, $Y_2 = \frac{\sigma_b}{\beta \sigma_s} + \ln R_0 - 1 + 2\mu \frac{R_0}{\beta t} - 2\mu \frac{R}{\beta t}$, 其中两条曲线的交点横坐标即为精确解,对直线 Y_2 ,当摩擦因数 μ 变化,直线的大致变化如图 6 中 a, b, c 所示。由此可以得出结论:在挤压变形过程中,随着摩擦力的增大,法兰外径临界尺寸在逐渐变小。在摩擦的影响下,材料流动变得困难,与模具接触的部分不容易变形,所以在挤压成形之前,要做好充分的润滑,减小模具与材料接触的摩擦系数,从而减弱摩擦对挤压成形的阻碍作用。

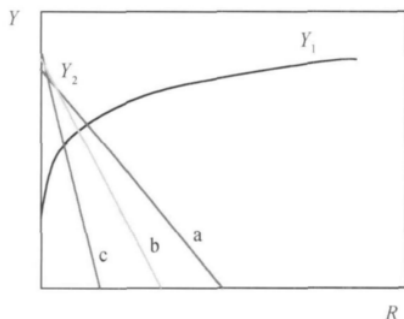


图 6 法兰外径最大尺寸变化情况

Fig. 6 The changes of the maximum diameter of flange

3.3 法兰区的厚度(t)

随着法兰区厚度的变化,成形过程中法兰部分的温度分布情况也会发生变化,如果厚度越小则材料与模具接触时温度降低的就越快,因此屈服极限也会提高。在实际成形时,由于法兰部分受到摩擦的作用,在有摩擦无径向加载应力条件下,得到 $\ln R \leq \frac{\sigma_b}{\beta \sigma_s} + \ln R_0 - 1 + 2\mu \frac{R_0}{\beta t} - 2\mu \frac{R}{\beta t}$, 即式(13),且求解方法也是一致的。也就是说 t 的增大和 μ 的减小对方程解的变化趋势影响是一样。即随着 t 的增大,厚度方向温度场变化梯度变小,中心部分温度降低较小,可以带动上下表面金属流动,法兰外径临界尺寸变大。

4 结论

(1) 切向拉应力是法兰区所受的最大主应力,且

在法兰边缘的时候,该切向拉应力的数值最大。当该最大切应力大于材料抗拉强度 σ_b 时,材料发生破裂。

(2) 随着法兰径向压力 P 的增大,法兰外径临界尺寸随之增大;随着法兰与模具直接摩擦力的减小,法兰外径临界尺寸在逐渐增大;一定范围内,随着法兰区厚度的增大,法兰外径临界尺寸随之增大。

参考文献

- [1] ABID M, NASH D H. A parametric study of metal-to-metal contact flanges with optimized geometry for safe stress and no-leak conditions[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2004, 81(1): 67-74.
- [2] WANG S I, SEO M K, CHO J R, et al. A study on the development of large aluminum flange using the casting/forging process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130-131: 294-298.
- [3] KAPRANOS P, WARD P J, ATKINSON H V, et al. Near net shaping by semi-solid metal processing[J]. Materials and Design, 2000, 21(4): 387-394.
- [4] 赵祖德, 罗守靖. 半固态成形应用现状与未来[J]. 锻压技术, 2006, (6): 1-3.
- [5] JUNG H K. The induction heating process of semi-solid aluminum alloys for thixoforming and their microstructure evaluation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105(1-2): 176-190.
- [6] LUO Shou-jing, KEUNG W C, KANG Yong-lin. Theory and application research development of semi-solid forming in China[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(9): 1805-1814.
- [7] 郝南海, 刘岩. 局部加载方法在模锻工艺中的应用[J]. 太原重型机械学院学报, 1997, 18(3): 223-225.
- [8] 司长号, 单德彬, 吕炎. 铝合金口盖近净成形关键技术研究[J]. 材料科学与工艺, 2006, 14(3): 238-239.
- [9] 秦晋. 铝合金 T 型件半固态填充-塑性流动一体化模锻研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2010. 1-27.
- [10] 李双义, 周立华. 轴对称与平面应变状态锻造与模锻变形力间的关系[J]. 天津大学学报, 1997, 30(1): 30-36.
- [11] 王仲仁, 苑世剑, 胡连喜. 弹性与塑性力学基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50774026, 50875059); 中国博士后科学基金资助项目(20070420023); 国家 863 高新科技资助项目(2008AA03A239)

收稿日期: 2010-12-14; 修订日期: 2011-04-18

作者简介: 杜之明(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为轻合金半固态加工技术及挤压铸造技术, 联系地址: 哈尔滨工业大学材料学院 435 信箱(150001), E-mail: duzm@263.net