

薄板拉延过程中变压边力加载曲线的研究

曾金龙¹,管爱枝²,施于庆²,俞狄锋²

(1. 皮尔集团公司 常山皮尔轴承有限公司,浙江 常山 324200;2. 浙江科技学院 机械与汽车工程学院,杭州 310023)

摘 要: 压边力是薄板拉延成形过程中的重要工艺参数之一,变压边力可避免拉延起皱或破裂等缺陷。通过分析薄板拉延变压边力的力学机理,计算了指定圆筒形件采用多点压边变压边力加载装置时各压边点不起皱和不拉裂的临界压边力 Q_{zi} 和 Q_{li} ,分析了各压边点的变压边力加载曲线,证实了多点变压边力控制的可行性,认为变压边力技术在拉延成形中有较佳实践意义。

关键词: 拉延;变压边力;力学机理;加载曲线

中图分类号: TG386

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2009)03-0301-04

Study on loading curve of variable blank holding force in sheet metal drawing process

ZENG Jin-long¹, GUAN Ai-zhi², SHI Yu-qing², YU Di-feng²

(1. Changshan Peer Bearing Co., Ltd., Peer Group of Companies, Changshan 324200, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The Blank holding force (BHF) is one of the important parameters in sheet metal drawing process. Application of variable blank holding force (VBHF) can avoid such defects as wrinkling and fracture. After analyzing the theoretical principle of VBHF, we calculated the holding forces Q_{zi} (the critical wrinkling BHF) and Q_{li} (the critical fracture BHF) at three blank holding points for a cylinder drawing workpiece, analyzed the loading curves of the VBHF, and proved the feasibility of VBHF. The VBHF control technology is of good practical significance in the drawing process.

Key words: drawing process; VBHF; mechanical principle; loading curve

起皱和破裂是薄板拉延的主要失效形式,压边力大小和加载方式是影响起皱和破裂的重要因素之一。对于简单形状如圆筒形件,利用已有公式可计算出压边力随拉延过程的变化规律,且采用恒压边力(constant blank holder force, CBHF)时,可获得比较理想的拉延效果。恒压边力是指双动压力机外滑

块产生压边力,且拉深时压边力始终保持不变。但 Hishida 等^[1]进行汽车挡泥板拉延试验时发现,变压边力下汽车挡泥板的成形质量是最好的,即拉延初始阶段加载定常压边力,后续阶段增加压边力到较高值。

复杂件拉延成形时所需要的压边力不是恒定

收稿日期: 2009-07-01

基金项目: 浙江省科技计划项目(2006C21052)

作者简介: 曾金龙(1977—),男,浙江常山人,工程师,主要从事汽车零部件产品研发与技术管理工作。

的,而是应根据拉延工艺、按照一定规律对其进行变化加载控制,即采用变压边力(Variable Blank Holder Force, VBHF)。VBHF 控制技术的力学根据在于:

1) 如果毛坯相对厚度较小,拉延毛坯的法兰变形区在切向压应力大于径向拉应力的作用下会增厚而起皱。为了消除或抑制起皱,需要增加压边力来增加板材中的拉应力,减小毛坯切向压应力的影响^[2]。但增加压边力极易使毛坯与模具接触面之间的摩擦阻力增大至超过材料的极限承载能力,材料又会产生拉裂。

2) 在板料拉延中,特别是复杂不对称拉延件如汽车覆盖件在拉延过程中,毛坯法兰收缩的不同阶段其径向方向不同部位受到的切向压应力及径向拉应力各不相同,而且毛坯法兰周向各处形状不同会导致周向不同部位流入模腔的阻力及流速各不相同,因此周向各部分的拉应力和压应力并不相同,所以径向及周向各处所需压边力各不相同。

VBHF 技术是目前国内外冲压学科的研究热点之一^[1-8],其实质是:在板材拉延成形过程中,在冲压件法兰不同位置上施加大小不同的压边力,通过调节各点正向压力大小而改变毛坯与模具接触面的摩擦阻力,增加板材中的拉应力,从而减小毛坯的切向压应力,达到控制金属流动,避免或有效抑制板材成形中的起皱和断裂,提高冲压件尺寸精度和冲压过程稳定性及板材的成形极限能力。

1 变压边力加载的力学机理

起皱是由于板料拉延中毛坯凸缘上的切向压应力大于径向拉应力而引起的,而拉裂是拉应力超过了材料的极限强度。因此,要消除起皱和拉裂,就要使板料拉延中的每个阶段的拉应力大于切向压应力并且小于拉裂的极限强度^[9]。

假设拉延板料为理想塑性体,根据塑性体中金属单元的微分平衡方程,可得凸缘任意单元体受到的切向压应力 σ_3 和径向拉应力 σ_1 分别为:

$$\sigma_3 = 1.1\sigma_s \ln \left(1 - \frac{R_t}{R} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_1 = 1.1\sigma_s \ln \frac{R_t}{R} \quad (2)$$

式中: σ_s 为材料屈服极限,MPa; R_t 为拉深中某时刻凸缘半径,mm; R 为凸缘区任意单元体的半径,mm。

在拉深过程中,下列因素会增加拉应力^[10]: 增加的压边力引起的摩擦力,材料流过凹模圆角半径

产生弯曲变形的阻力及材料流进凹模圆角后又被拉直成筒壁的反向弯曲力,拉延初期凸模圆角处的弯曲应力及材料流过凹模圆角时的摩擦阻力,材料流过凹模圆角的包角等因素。因此传递到法兰上的总拉应力 σ_p 应为:

$$\sigma_p = (\sigma_1 + \sigma_m + 2\sigma_w + \sigma_w'') e^{\mu\alpha} \quad (3)$$

式(3)中: σ_m 为压边力引起的摩擦力,MPa,

$$\sigma_m = \frac{2\mu Q}{\pi dt} \quad (4)$$

σ_w 为材料流过凹模圆角半径产生弯曲变形的阻力及材料流过凹模圆角后又被拉直成筒壁的反向弯曲力,MPa,

$$\sigma_w = \sigma_b \frac{t}{2r_d + t} \quad (5)$$

σ_w'' 为材料流过凹模圆角时的摩擦阻力,MPa,

$$\sigma_w'' = \sigma_b \frac{t}{4r_p + 2t} \quad (6)$$

μ 为材料摩擦系数; Q 为压边力,N; t 为材料厚度,mm; d 为工件直径,mm; σ_b 为材料强度极限,MPa; r_d 为凹模圆角半径,mm; r_p 为凸模圆角半径,mm; α 为包角(材料与凹模圆角处相接触的角度,°)。

将式(4)、(5)、(6)代入式(3)可得:

$$\sigma_p = \left(1.1\sigma_s \ln \frac{R_t}{R} + \frac{2\mu Q}{\pi dt} + \sigma_b \frac{t}{2r_d + t} + \sigma_b \frac{t}{4r_p + 2t} \right) e^{\mu\alpha} \quad (7)$$

板料拉延中不起皱和不拉裂的条件为^[9]:

$$\sigma_3 < \sigma_p < \sigma_b \quad (8)$$

将式(1)和式(7)代入式(8)可得:

$$1.1\sigma_s \left(1 - \ln \frac{R_t}{R} \right) < \left[1.1\sigma_s \ln \frac{R_t}{R} + \frac{2\mu Q}{\pi dt} + \sigma_b \left(\frac{t}{2r_d + t} + \frac{t}{4r_p + 2t} \right) \right] e^{\mu\alpha} < \sigma_b \quad (9)$$

将式(9)变换整理可得:

$$\left[\frac{1.1\sigma_s \left(1 - \ln \frac{R_t}{R} \right)}{e^{\mu\alpha}} - 1.1\sigma_s \ln \frac{R_t}{R} - \sigma_b \left(\frac{t}{2r_d + t} + \frac{t}{4r_p + 2t} \right) \right] \frac{\pi dt}{2\mu} < Q < \left[\frac{\sigma_b}{e^{\mu\alpha}} - 1.1\sigma_s \ln \frac{R_t}{R} - \sigma_b \left(\frac{t}{2r_d + t} + \frac{t}{4r_p + 2t} \right) \right] \frac{\pi dt}{2\mu} \quad (10)$$

将式(10)左边可看成是不起皱所需之压边力,

令其为 Q_z ,

$$Q_z = \left[\frac{1.1\sigma_s \left(1 - \ln \frac{R_t}{R} \right)}{e^{\mu\alpha}} - 1.1\sigma_s \ln \frac{R_t}{R} - \sigma_b \left(\frac{t}{2r_d + t} + \frac{t}{4r_p + 2t} \right) \right] \frac{\pi dt}{2\mu} \quad (11)$$

将式(10) 右边可看成不拉裂的所需压边力,令其为 Q_l ,

$$Q_l = \left[\frac{\sigma_b}{e^{\mu\alpha}} - 1.1\sigma_s \ln \frac{R_t}{R} - \sigma_b \left(\frac{t}{2r_d + t} + \frac{t}{4r_p + 2d} \right) \right] \frac{\pi dt}{2\mu} \quad (12)$$

则拉延时凸缘区内各点的变压边力控制准则为:

$$Q_z < Q < Q_l \quad (13)$$

2 变压边力加载曲线的研究

因为材料拉延过程中,法兰收缩后径向各点所需之压边力大小不同,故可由一系列规则排列的压边缸组成的多点压边的变压边力加载装置,代替传统的刚性压边装置^[4],如图1所示。

图1为多点压边时的拉延示意:将拉延毛坯凸缘区沿径向三等分,每个等分的中点设为压边力作用点,即 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 的作用点,图中 R_0 为毛坯直径, R_t 为拉深过程中的凸缘半径, R 为凸缘区3个压边力作用点的半径, r 为拉延件半径($r = d/2$), r_d 是凹模圆角半径, r_p 为凸模圆角半径, h 为拉延行程。

因此将式(13) 写成一般通式:

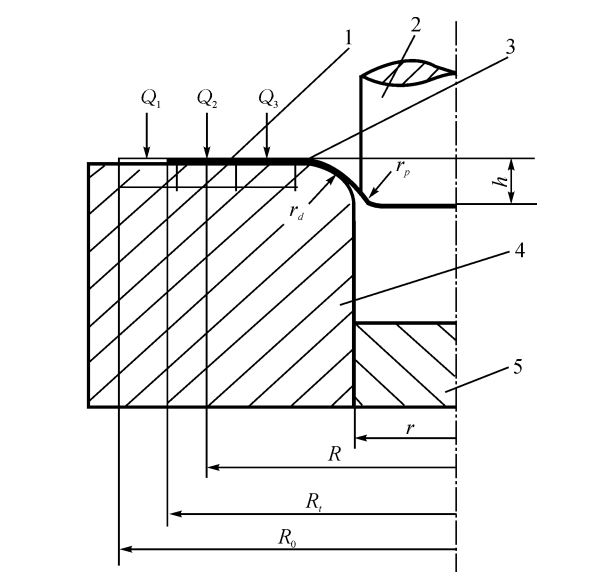
$$Q_{zi} < Q_i < Q_{li} \quad (14)$$

式(14) 中: Q_{zi} 为不起皱所需压边力数值,N; Q_i 为压边力数值,N; Q_{li} 为不拉裂所需压边力数值,N; i 为下标表示压力点位置。

Table 1 The Q_z (the critical wrinkling BHF) and Q_l (the critical fracture BHF) at three blank holding points

拉延行程 h/mm	Q_{z1}	Q_{l1}	Q_{z2}	Q_{l2}	Q_{z3}	Q_{l3}
拉延初始时 0	142 876.7	320 880	76 174.5	287 528.8	- 2 872.1	248 113.9
4	158 123.20	310 160.6	93 675.7	276 809.5	17 509.9	237 394.5
8	—	—	113 828.3	272 227.9	39 802.4	232 813
12	—	—	133 506.5	267 009.2	61 821.2	227 594.2
16	—	—	—	—	85 170.5	225 349.1
20	—	—	—	—	11 1887.8	224 112.9

从表1 可看到,圆筒形件拉延过程中采取图1 所示三个压边点时,越靠近毛坯外边缘压边点不起皱不拉裂的临界压边力越大,即 $Q_{z1} < Q_{z2} < Q_{z3}$ 和 $Q_{l1} < Q_{l2} < Q_{l3}$,且在拉深过程中不拉裂所需压边力



1 - 压边缸;2 - 凸模;3 - 板料;4 - 凹模;5 - 推板
图1 圆筒形件的多点压边 VBHF 加载装置

Fig.1 The multi-point loading VBHF mechanism of a drawing cylinder

假设有一个圆筒形拉延件成形时采用图1 所示多点压边的变压边力加载装置,其材料为08 钢,材料摩擦系数 $\mu = 0.2$,坯料厚度 $t = 1 \text{ mm}$,毛坯直径 $D_0 = 120 \text{ mm}$,工件直径 $d = 60 \text{ mm}$,材料屈服极限 $\sigma_s = 209 \text{ N/mm}^2$,材料强度极限 $\sigma_b = 403 \text{ N/mm}^2$, $r_d = r_p = 6 \text{ mm}$,拉延过程中包角 α 从 0° 线性增大到 90° ,该圆筒形件拉延行程视作法兰径向收缩的距离。

表1 是法兰半径从拉延初始阶段 $R_t = R_0 = 60 \text{ mm}$ 收缩至 $R_t = 36 \text{ mm}$ 过程中,利用式(11) 和式(12) 计算出的图1 所示的3 个压边点坯料不起皱和不拉裂各自所需的压边力数值。

表1 3 个压边点坯料不起皱和不拉裂所需压边力数值

Q_{li} 各自基本保持不变,而各点不起皱所需压边力 Q_{zi} 都随拉延行程增加而不断增加。将表1 数据以曲线的形式给出,则得到压边力——拉延行程曲线。如图2 所示。

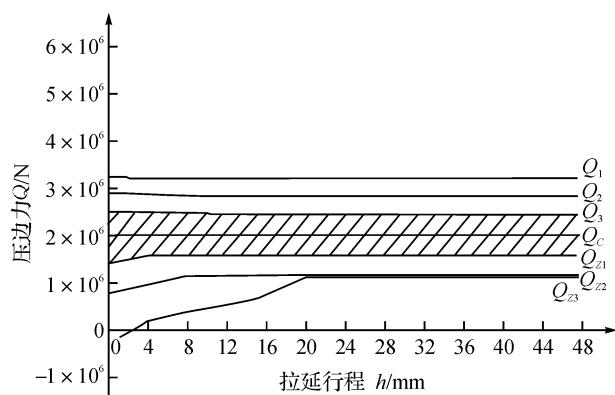


图 2 各压边点的 VBHF 加载曲线

Fig. 2 The loading curves of critical wrinkling and fracture VBHF at three blank holding points

从图 2 可看出,3 个压力点上所需不起皱不拉裂的压边力各不相同,拉伸过程中保证各压边点满足 $Q_{si} < Q_i < Q_{li}$,即可达到较好的拉伸效果。随拉伸行程而逐步增加的变压边力加载符合压边力变化规律,与定常加载模式相比,能更好地控制拉伸金属的流动,减少生产能耗。

如采用恒压边力,则在图 2 中的 Q_{s1} 与 Q_{l3} 变化曲线之间的区域(即图中的剖面线区域)是不起皱不拉裂所需压边力的最佳区域, Q_c 在这一区域则能较好地避免起皱和拉裂,对本圆筒形拉伸件,可取 $Q_c = 2 \times 10^6$ N,如图 2 所示。

3 结 语

压边力是影响拉伸质量的重要因素之一,其大小和加载方式会直接影响拉伸件的起皱和破裂。传统的恒压边力加载模式不能有效控制拉伸时的金属流动,特别是复杂拉伸件的金属流动。因此本文首先

分析了拉伸变压边力的力学机理,计算了多点压边的变压边力加载模式下控制各压边点不起皱所需压边力 Q_{si} 和不拉裂压边力 Q_{li} ,分析了各压边点的变压边力加载曲线,证明变压边力技术对拉伸件成形质量具有较佳的工程意义。

参考文献:

- [1] HISHIDA Y, WAGONER R H. Experimental analysis of blank holding force control in sheet forming[J]. SAE Special Publications,1993(944):93-99.
- [2] 余海燕,金隼,孙成智,等. 多点变压的压边力控制系统开发[J]. 中国机械工程,2004,15(8):659-661.
- [3] AHMETOGLU M A, BROEK T, KINZEL G. Control of blank holder force to eliminate wrinkling and fracture in deep-drawing rectangular parts[J]. CIRP Annals,1995,44(1):247-250.
- [4] 李东平,隋振,蔡中义,等. 板材多点成形技术的研究[J]. 塑性工程学报,2001,8(6):46-48.
- [5] 孙成智,陈关龙,李淑惠. 变压边力对矩形件成形性能的影响[J]. 塑性工程学报,2003,10(4):6-9.
- [6] 孙成智,陈关龙,林忠钦,等. 基于数值模拟的变压边力优化设计[J]. 上海交通大学学报,2004,38(7):1086-1090.
- [7] 吕盾,陈炜,姜银方,等. 变压边力控制技术的研究现状和发展趋势[J]. 模具工业,2006,32(4):37-41.
- [8] 秦泗吉. 压边力控制技术研究现状及伺服数控压边方法可行性探讨[J]. 中国机械工程,2007,18(1):120-125.
- [9] 姜奎华. 冲压工艺与模具设计[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [10] 梁炳文,胡世光. 板料成形塑性理论[M]. 北京:机械工业出版社,1997.

(上接第 254 页)

4 结 语

经过对圆盖注射模出现问题的研究,提出了改进措施,并在重新试模时得到了验证。在原模具基础上进行部分结构的改进,对节约成本,缩短生产周期,满足生产需要有着重要的意义。

参考文献:

- [1] 罗晓晔. 塑料成型工艺与模具设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006.

- [2] 唐志玉. 塑料模具设计师指南[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [3] 杨占尧. 塑料模具标准件及设计应用手册[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [4] 温松明. 互换性与测量技术基础[M]. 长沙:湖南大学出版社,1997.
- [5] 滕文建,卢洪德,王洪家. 光盘驱动器碟盘成型工艺与模具设计[J]. 模具工业,2009(5):53-56.
- [6] 何忠保,陈晓华,王秀英. 典型零件模具图册[M]. 北京:机械工业出版社,2000.