

径-轴双向环轧工艺的研究进展

蒲思洪, 孙莉芳, 王龙祥

(贵州安大航空锻造有限责任公司, 贵州 安顺 561005)

摘要: 回顾了环件径-轴双向轧制锻造条件、咬入条件、刚度条件等相关理论研究进展, 分析了工艺参数对轧制过程的影响及其确定准则, 在此基础上引入轧制曲线的概念, 并给出了径-轴双向环轧轧制曲线的设计原则, 还探讨了在利用有限元方法模拟轧制过程、优化轧制工艺参数时存在的问题, 并给出了对数值模型进行控制和处理的有效方法。

关键词: 径-轴双向环轧; 理论研究; 工艺参数; 轧制曲线; 数值模拟

中图分类号: TG335.11 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2010)04-0043-05

Research Progress in Radial-axial Ring Rolling

PU Si-hong, SUN Li-fang, WANG Long-xiang

(Guizhou Anda Aviation Forging Limited Company, Anshun 561005, China)

Abstract: The recent theoretic research progress of Radial-axial ring rolling, such as condition of roll deformation across the section of ring, condition of roll bite and condition of ring rigidity, were reviewed in this paper. The effect which caused by process parameters and the design principles of process parameters were analysed. On that basis the concept of rolling curve was introduced, and the design principles of rolling curve of Radial-axial ring rolling was given. The problems which appeared in the process of using finite element method for simulating rolling process and optimizing ring rolling process parameters were discussed, and the effective method for controlling and handling numerical model was given, the researches provided references for choice of rolling process parameters and boundary condition of ring and roll in finite element simulation.

Key words: Radial-axial ring rolling; theoretic research; process parameters; rolling curve; numerical simulation

环件径-轴双向轧制是在径向轧制的基础上, 通过增加1对轴向端面锥辊(轴向孔型)同时对环件轴向壁厚和轴向高度2个方向进行轧制。它弥补了径向轧制环件端面常有的凹坑缺陷, 轴向端面轧制还可使环件获得更加复杂的截面轮廓形状, 因此它主要用于轧制大型、异形环件。

与传统大型、异形环件自由锻造生产工艺相比, 环件径-轴双向轧制具有设备吨位低, 节能节材, 生产率高, 精度高, 产品质量好等显著技术经济优点,

是燃汽轮机环、轴承环、火车车轮及轮箍等各类无缝环件的先进制造技术, 在航空航天、火车、船舶、石油化工等许多工业领域中的应用日益广泛^[1-2]。

1 径-轴双向环轧的理论研究

由于客观条件的限制, 迄今为止关于径-轴双向环轧工艺的理论研究仍然很匮乏。现有结论大多仍是基于近似或经典塑性成形理论, 采用初等解析法、

滑移线法、上限法或能量法等分析方法,根据轧制过程的静力学、动力学和运动学特点,主要集中于对轧制咬入条件、锻透条件、刚度条件、环件直径扩大运动等基础理论的研究。

环件在径-轴双向轧制过程中要实现转动并产生稳定轧制运动,除了要满足连续地咬入径向和轴向2个孔型的咬入条件(即径向和轴向孔型中的每转进给量不得超过环件咬入该孔型所允许的最大每转进给量)外,还应使环件壁厚和高度减小而直径扩大的塑性变形,即塑性区需穿透整个环件的壁厚和高度,也即满足环件锻透条件。要获得高质量的环件产品,在轧制过程中环件还必须满足刚度条件,不能产生塑性失稳。根据文献[3—4],咬入条件、锻透条件及刚度条件均与径向和轴向每转进给量有关,而每转进给量又与环坯尺寸及相应孔型中的轧制摩擦、轧辊尺寸等因素有关,即可通过调整相关参数来实现环件的稳定轧制。

若忽略环件在径-轴双向轧制过程中的质量和体积变化,则随着环件的截面形状和直径变化,环坯尺寸、径向及轴向进给速度与环件直径长大速度和长大加速度之间存在着一定的规律。当轧制进给速度相同时,环件初始壁厚和高度越大,则轧制过程中直径扩大速度和加速度越大;在初始壁厚和高度一定时,径向或轴向进给速度越大,则环件直径扩大速度和加速度也会比较大。在整个轧制过程中,随着环件的壁厚和高度逐渐减小,环件直径扩大速度和扩大加速度迅速增大,其最大扩大速度和扩大加速度都同时出现在环件轧制过程结束的瞬时,而其最小扩大速度和扩大加速度则同时出现于环件轧制过程开始的瞬间,且内径扩大速度及扩大加速度始终大于外径扩大速度及扩大加速度^[4—5]。

一旦环件径-轴双向轧制过程的静力学和动力学关系建立起来,当轧制过程中的力能参数位于特定范围内,且存在某种环轧扰动时(如环坯壁厚波动,环件材料内部组织缺陷及温度梯度引起的变形抗力波动,轧制模具制造和装配误差,环轧机动力源供给的波动等),则轧环时会发生自激振动^[6]。导致环轧的运动学参数变化较大,有时还很剧烈,以致环件和轧辊产生强烈振动,使轧制过程失稳或中断,并产生轧制废品,甚至还会损坏环轧机。因此要通过控制相关环轧扰动因素来抑制轧环时的自激振动,从而保证轧制过程一直处于稳定状态。

2 径-轴双向环轧工艺参数设计

轧制工艺参数对环件轧制过程的顺利进行和最终成形质量有着非常重要的影响,工艺参数的设计必须考虑环轧设备、环件材料、工艺规程、生产率等因素,径-轴双向环轧工艺参数主要包括以下几个方面^[7—10]。

2.1 轧辊转速

径-轴双向环轧轧辊转速包括驱动辊转速和锥辊转速。当驱动辊电机采用交流电机时轧制线速度恒定(一般为1.3 m/s),若驱动辊电机采用直流调速电机则轧制线速度可调(一般为0.4~1.6 m/s),但一般情况下轧制成形时驱动辊的转速均为恒定的。轴向锥辊的转速则是根据线速度相等的原则进行匹配: $v=r\omega=2\pi rn$ 。对于老式环轧机,因锥辊转速是恒定的,为了保证两孔型中的线速度相等,在环轧过程中锥辊必须随环件直径的增大而不断后移。新式环轧机锥辊转速大多能根据环件直径的实时反馈值自动进行匹配(采用直流调速电机),即只需改变锥辊的转速而不需移动锥辊的位置即可保证两者的线速度相等。

如果在轧制过程中驱动辊和锥辊的线速度不一致,轧制过程就会不稳定。若轴向锥辊的转速过大,环件就会向轴向孔型的输出侧偏移;若轴向锥辊转速过小,环件就会向径向孔型的输出侧偏移,当两孔型中的转速严重不一致时,环件两端面有可能产生波浪状起伏缺陷,甚至会由于受力不均导致环件变形成椭圆,从而影响轧制过程的顺利进行。

2.2 进给速度

进给速度对环件轧制的咬入条件和锻透条件均有重要影响,进给速度过小,则因塑性区不能穿透环件壁厚或高度而形成表面变形,环件转动但直径不扩大,且端面出现鱼尾、毛刺、折叠等缺陷;若进给量过大,环件又不转或振动很严重,径-轴双向环轧进给运动包括:

$$\text{径向进给速度: } v = nR_1 \Delta h / R \quad (1)$$

$$\text{轴向进给速度: } v_a = nR_1 \Delta h_a / R \quad (2)$$

式中: $\Delta h, \Delta h_a$ 分别为每转径向、轴向进给量; n, R_1 分别为驱动辊的转速和工作半径; R 为环件轧制中

的瞬时外半径。

根据式(1)和(2),在轧制设备一定的前提下,径向和轴向进给速度主要与相应孔型中的每转进给量有关,而为了满足轧制条件,每转进给量又与环件锻造条件和咬入条件有关。当驱动辊转速一定且每转径向或轴向进给量为常数时,芯辊或锥辊的直线进给速度并不是常数,它与环件的瞬时外径有关,随着环件瞬时外径的不断增大而减小。当驱动辊转速一定且芯辊或锥辊的进给速度为常数时,则环件每转径向或轴向进给量同样并不是常数,它随着环件瞬时外径的不断增大而增大。

2.3 轧制比

轧制比 λ 是轧制前环坯截面积 A_0 与轧制后环件截面积 A_e 之比,即 $\lambda=A_0/A_e$ 。

轧制比是衡量轧制变形程度的一个重要参数,它对轧制模具和毛坯设计,轧制过程的顺利进行及轧制质量均有重要影响,如果一火轧制比过大,材料在轧制过程中可能会由于应变过大而产生折叠、裂纹等缺陷;如果一火轧制比过小,则变形量又不足以锻透环坯或处于材料的临界变形区,不但会增加轧制次数,而且会影响最终零件的组织 and 性能。

2.4 轧制力及力矩

由于径-轴双向轧制孔型中的变形非常复杂,环件在径向和轴向孔型中都有力能的驱动,两孔型力能间的相互影响导致轧制力及力矩的变化更加复杂,要精确计算非常困难,因此现有结论大都是基于刚塑性材料模型和大量假设的简化模型,没有考虑轧辊的弹塑性变形、温度、加工硬化及残余应力等对轧制力和力矩的影响。实际生产中,可采用相似的模型并分别代入径向和轴向孔型参数来进行轧制力及力矩的估算和校核。

影响环件轧制力和力矩的因素主要有:环件材料及尺寸、进给速度、芯(锥)辊尺寸和轧制摩擦等。对于给定的进给速度,轧制力随着环件平均半径的增大而减小,但轧制力矩却随着环件平均半径的增大而增大。而在环件平均半径一定的情况下,轧制力矩则随着进给速度的增大或芯(锥)辊半径的减小而增大。若进给速度和环件平均半径均一定,则轧制力矩随着驱动辊转速的增大而减小。

3 径-轴双向环轧轧制曲线

在径-轴双向环轧过程中,若忽略环件的质量和体积变化及与温度有关的收缩和氧化,且当径向进给速度和轴向进给速度之比为恒定时,可将环件截面轮廓在轧制过程中的实时变化情况简化成如图1

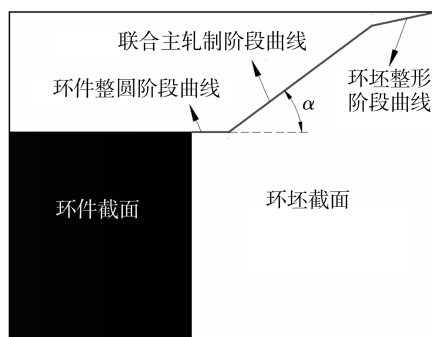


图1 线性环件轧制曲线

Fig. 1 The linear rolling curve of ring

所示的“S”形曲线,即轧制曲线。该曲线表示了轧制过程中径向变形量和轴向变形量的瞬时分配关系,它包括以下3个主要轧制阶段^[11-12]。

1) 环坯整形阶段曲线。因不同的预制坯成形方法制成的环坯存在着不同程度的高度差、壁厚差、椭圆度和偏心等缺陷,所以在初始轧制阶段需对环坯进行整圆,消除预制坯带来的缺陷,并为后续稳定轧制的顺利进行打下基础。该阶段主要为径向轧制,轴向压下量较小,且在轧制过程中,环件存在不同程度的振动现象,这与环坯质量的好坏有关,一般整形阶段占整个轧制曲线的比例国外为10%~15%;国内受制坯设备和能力的限制,为20%~50%。

2) 联合主轧制阶段曲线。环件此时进入稳定的径向和轴向联合轧制阶段,该阶段关键在于径向孔型和轴向孔型的速度及力能要匹配。如果两孔型的速度和力能不匹配,则环件轧制过程中可能会出现毛刺、端面波纹起伏、折叠等缺陷,甚至还会导致环件椭圆引起轧制振动,从而影响轧制过程的顺利进行。根据实际生产经验,联合主轧制阶段曲线的倾角 α 一般在 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间。

3) 环件整圆阶段曲线。由于环件在联合主轧制阶段中径向孔型和轴向孔型的速度和力能不可能

完全匹配,因此环件圆度不是很好,需要抬起锥辊使环件在仅有径向轧制的过程中进行整圆,同时消除因回弹引起的尺寸误差。而环件整圆阶段曲线占整个轧制曲线的比例根据环件的形状、材质而定,环件的高度和壁厚越小,材料越难变形,整圆阶段所占比例就越多,一般环件整圆阶段的比例为5%~15%。

轧制曲线的设计与环件的截面形状、材质及制坯方式有关,它是径-轴双向环轧技术的关键程序,间接体现了轧制工艺参数的设计,而联合主轧制阶段曲线的设计又是整个轧制曲线设计的核心。当该阶段径向进给速度和轴向进给速度之比非恒定时,比较典型的轧制曲线形式如图2所示。

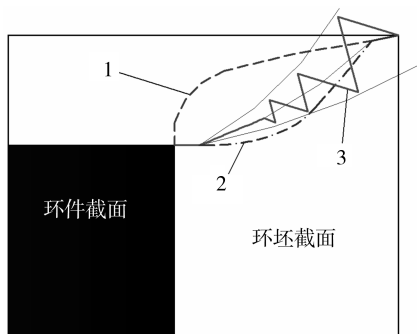


图2 非线性环件轧制曲线

Fig. 2 The nolinear rolling curve of ring

由图2可知,轧制曲线1初期以径向轧制为主,后期以轴向轧制为主,且在轧制过程结束前只有轴向轧制。它主要用于壁厚大、高度矮的环形件或盘形件成形,因为这类零件的圆度在轧制过程中较易得到保证,不易产生椭圆,所以一般不需要整圆阶段。对于壁厚薄、高度高的环形件成形,因其易产生椭圆,所以其轧制曲线多选择初期以轴向轧制为主,后期以径向轧制为主并有整圆阶段的轧制曲线2。因轧制曲线1和轧制曲线2主轧制阶段或以轴向轧制为主,或以径向轧制为主,且一次轧制变形量很大,这就容易造成在环件尖角或截面复杂处变形剧烈,导致局部温升过高,进而影响零件的微观组织和机械性能等,特别是钛合金、高温合金这类难变形且对成形温度非常敏感的材料。为了控制轧制变形造成的温升影响其组织和机械性能,需要制定特殊的轧制曲线,如轧制曲线3将普通轧制曲线的主轧制阶段分成以径向或轴向轧制为主的若干个阶段。通过每个阶段相对较小的径向或轴向变形避免环件剧

烈变形引起温升过高而影响零件微观组织和机械性能,Wagner Banning公司采用轧制曲线3成功轧制出轧比很大的钛合金环件。

4 径-轴双向环轧的有限元模拟

径-轴双向环轧过程既存在高度非线性的运动学和动力学关系,又存在三维变形引起的复杂径向和轴向金属流动及热力参数分布,使得环轧过程同时具有材料非线性、几何非线性和接触非线性,因此求解过程非常复杂。虽然采用有限元方法可以模拟金属的流动过程,预测成形缺陷并优化工艺参数,但是由于径-轴双向环轧工艺的数值模拟要同时考虑径向和轴向孔型中诸多工艺参数的协调(有些参数还是未知的反馈值),并缺乏必要的理论支撑,所以在对该工艺进行简化模拟时需注意以下问题。

4.1 芯辊的径向进给运动

实际生产中,芯辊的径向进给运动是靠液压系统提供。通过调整液压力的大小来控制进给速度的大小,而该液压力在成形过程中变化很复杂,受环坯质量、设备情况等因素影响,所以模拟时,在满足锻透条件和咬入条件的情况下,往往将芯辊径向运动简化为进给速度,或每转进给量,或环件外半径增长速度为常数的恒值进给,也可将芯辊进给运动分成许多个恒值进给的阶段,以更接近于实际情况^[8,13-14]。

4.2 锥辊的运动

锥辊的运动包括锥辊的角速度、轴向进给速度和轴向机架的径向后退速度。其中轴向进给速度与芯辊的径向进给速度类似,实际中靠液压力控制,模拟时主要还是将其简化为许多个恒值进给的阶段。锥辊的角速度和轴向机架的径向后退速度这2个参量在实际生产中是根据环件直径的变化,通过相应的力和位移传感器的反馈值不断被修正,但一般有限元软件不能求解含未知量的问题,所以模拟时这些参量的实现方法将直接影响仿真结果的准确性,主要包括3种情况^[4,6]。

1) 轴向机架固定时,即其后退速度为0,随着轧制过程的进行,环件直径不断增大,根据线速度相等原则分别计算出不同直径条件下对应的锥辊角速度,并将其输入有限元软件中进而控制锥辊的运动。

2) 锥辊的角速度恒定时,随着环件直径的增大,为了保证轴向和径向孔型中的线速度相等,轴向机架需后退,即保证环件与锥辊的相对位置不变,则其后退速度应与环件直径的增大速度一致,计算出环件的直径增大速度代入软件即可控制锥辊的运动。

3) 对于有些大型复杂环件,其轧制过程中既存在锥辊的角速度变化,又存在轴向机架后退引起的锥辊位置变化。此时可先根据环件的瞬时直径并固定其中一个参数(如轴线机架后退速度),根据线速度相等的原则确定出该时刻的锥辊角速度,从而将轧制过程中这2个参数的变化曲线简化成有限个数据点代入有限元软件中分别对其进行控制。

4.3 抱辊的运动

径-轴双向环轧抱辊的位置对环件的圆度和轧制过程的顺利进行均有重要影响,且其运动设置是模拟的关键和难点,实际中其运动机理如图3所示。

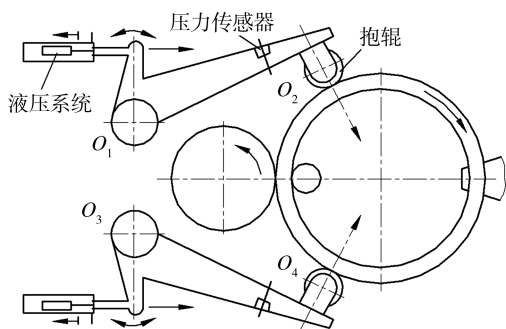


图3 抱辊运动控制示意

Fig. 3 The motion graph of guide roll

包括随环件转动绕轴心 O_2 (或 O_4)的从动及绕固定轴心 O_1 (或 O_3)的圆周平动,液压系统根据压力传感器的反馈值不断修正液压力,从而在保证环件刚度和圆度的同时使轧制过程顺利进行。实际生产中,由于环坯质量等因素的影响,抱辊绕固定轴心 O_1 (或 O_3)的圆周平动可能存在振动不稳定现象,因而其运动轨迹很复杂,存在很多未知量,在有限元软件中实现起来非常困难。

现在对抱辊模拟的研究大多基于简化模型,即假设轧制过程一直处于平稳状态,不存在振动,则抱辊只存在随环件直径增大绕轴心 O_2 (或 O_4)的从动转动及绕固定轴心 O_1 (或 O_3)的圆周外扩平动,而

其圆周外扩平动或处理为直线运动或处理为简单的圆周平移^[15-17]。比较符合实际的实现方式是根据设备的实际尺寸(点 O_1 或 O_3 的坐标及直线 O_1O_2 或 O_3O_4 的距离),求出轧制过程中抱辊绕固定轴心 O_1 (或 O_3)旋转时,与环件瞬时直径相匹配的每一时刻的位置关系,再将这些数据代入有限元模型中,通过位移控制来对其进行约束从而实现抱辊的运动。

5 结语

径-轴双向环轧成形由于具有两向轧制变形特点,在大型、异形截面环件轧制成形中应用日益广泛,但因两孔型中相关参数的匹配很复杂,且影响参数很多,所以现有研究结果都存在一定的局限性,指导实际生产的作用有限。怎样从理论上对径-轴双向环轧工艺进行深入和系统的分析,特别是大型、异形环件轧制成形的理论研究,并结合有限元模拟技术来模拟轧制过程,预测成形缺陷和材料流动情况,确定出更合理的轧制工艺参数和轧制曲线将是该领域的重要发展方向。

参考文献:

- [1] 许思广,曹起骧,连家创. 环件轧制技术的研究[J]. 钢铁,1994,29(7):78-81.
- [2] 李春天,黄欣. 环件轧制技术及其在国内的应用[J]. 锻压装备与制造技术,2004(5):8-13.
- [3] 华林. 环件轧制成形原理和技术设计方法[D]. 西安:西安交通大学,2000:14-23.
- [4] 潘利波. 环件径轴向轧制变形规律与CAPP系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2007:19-69.
- [5] 蒋日东,黄树槐,王运赣. 环件轧制的几何学、运动学与动力学分析[J]. 华中理工大学学报,1997,25(增刊):4-7.
- [6] 华林,黄兴高,朱春东. 环件轧制理论和技术[M]. 北京:机械工业出版社,2001:54-63,226-227.
- [7] 胡正寰,夏巨谌. 中国材料工程大典(第21卷)[M]. 北京:化学工业出版社,2005:96-97.
- [8] HUA L, ZHAO Z Z. The Extremum Parameters in Ring Rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology,1997,69(1-3):273-276.

3) 两侧斜楔同时接触滑块,滑块移动距离相等,保证两侧同时冲孔。

4) 为保证模具正常工作,必须保证滑块与下模座的配合间隙应小于模具冲裁间隙,否则,模具将无法正常工作。

3.2 模具结构工作过程

工作时,将去过毛刺的方管套在凹模座上,靠紧定位面,当压力机滑块下行时,压料板在弹簧的作用下,将方管压紧,同时两侧斜楔也一同下行,并与滑块接触;斜楔继续下行,斜楔推动滑块向凹模座移动,当移动到一定位置,固定在滑块上的凸模与固定在凹模座上的凹模共同作用,实现对方管的冲裁加工。当冲裁加工完成后,斜楔上行,固定在滑块上的凸模在卸料橡胶的作用下,完成卸料,这时,滑块依靠弹簧拉力,使滑块回复原位,同时,压料板也解除

了对方管的压紧,完成了整个冲裁过程。

4 结语

该模具试模一次成功,不但保证了2组孔的同轴度,减少了冲裁时间,降低了生产成本,提高了生产效率,而且产品质量稳定,效果较好。

参考文献:

- [1] 崔令江. 汽车覆盖件冲压成形技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 湖南省机械工程学会锻压分会. 冲压工艺[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,1984.
- [3] 陈华丽. 方管两侧同时冲孔模设计[J]. 模具制造,2006,7(11):20-22.
- [4] HAWKYARD J B, MOUSSA G. Studies of Profile Development and Roll Force in Profile Ring Rolling [C]. In: proc 3rd Int Conf On ROMP, Kyoto, Japan, 1984:267-278.
- [5] 华林,刘志平,杜平,等. 环件轧制力能计算[J]. 锻压机械,1994(5):26-27.
- [6] 杨勇,张华,魏志坚,等. CARWIN 软件在 3 m 环轧机上的应用[J]. 现代机械,2008(增刊):101-103.
- [7] LUGORA C F, BRAMLEY A N. Analysis of Spread in Ring Rolling[J]. Int J Mech Sci,1987,29:149-59.
- [8] 张吉光. 数控辗环机最佳辗轧工艺路线的确定[J]. 锻压机械,1995(5):20-21.
- [9] 阮维. 环件轧制进给控制模型与仿真研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2008:4-11.
- [10] FOROUZAN M R, SALIMI M, GADALA M S, et al. Guide Roll Simulation in FE Analysis of Ring Rolling [J]. Journal of Materials processing Technology, 2003,142(1):213-223.
- [11] 解春雷,李尚健,黄树槐. 辗环过程动力有限元分析中的抱辊约束[J]. 锻压机械,1997(3):13-14.
- [12] GUO L G, YANG H, ZHAN M. Simulation for Guide Roll in 3D-FE Analysis of Cold Ring Rolling[J]. Materials Science Forum, 2004,471-472:760-764.

(上接第 47 页)

(上接第 63 页)

- [4] 陈文亮. 板料成型 CAE 分析教程[M]. 北京:机械工业出版社,2005:1-7.
- [5] 韦东来. 轿车覆盖件拉伸动态仿真及成形性分析[J]. 汽车工程,2004,26(4):500-503.
- [6] 杨玉英. 大型薄板成形技术[M]. 北京:国防工业出版社,1996:23-80.
- [7] 叶又,彭颖红. 板料成形数值模拟的关键技术及难点[J]. 塑性工程学报,1997,4(2):19-22.
- [8] 印雄飞,叶又. 板料成形数值模拟中计算时间的控制[J]. 模具工业,1999(7):11-13.
- [9] 林忠钦. 车身覆盖件冲压成形仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2005:8-16.
- [10] LUDOVIC C, MARION M, GÉRARD F. Analytical Modeling of Drawbeads in Sheet Metal Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003,133(3):359-370.
- [11] 彭必友. 板料形状压料筋的设置对汽车覆盖件成形中起皱和未充分拉深的影响[J]. 塑性工程学报,2006,13(6):39-43.