

齿轮轴齿形轧制成形的模具设计与实验

于 杰 王宝雨[✉] 胡正寰

北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

[✉] 通信作者, E-mail: bywang@ustb.edu.cn

摘 要 将齿轮的轧制成形与传统的楔横轧原理相结合, 在轧制成形轴类零件的同时实现齿形部分的轧制成形, 不仅可以实现齿轮轴零件的近净成形, 而且可以提高齿的承载能力及使用寿命. 在轧制齿形部分的过程中, 对轧件的进给采用分段阶梯式进给方式, 轧件在模具的带动下以自由分度方式进行轧制. 通过数学模型和实验, 给出了轧制各阶段模具齿距的计算方法和变化规律、模具的齿形设计方法、模具对轧件首次分度时最小进给量的计算方法以及轧制各阶段进给量的变化规律. 用 Deform-3D 数值模拟仿真软件模拟轧制过程, 在 H630 轧机上轧制出模数 $m=2$, 齿数 $z=20$, 压力角 $\alpha'=20^\circ$ 的齿轮轴上的齿形, 实验证明在楔横轧机上轧制齿轮轴上的齿形是可行的.

关键词 轴类件; 齿轮; 轧制; 模具设计; 使用寿命; 计算机模拟

分类号 TG335.19

Die design and experiment for forming the teeth of shafts by rolling

YU Jie, WANG Bao-yu[✉], HU Zheng-huan

School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

[✉] Corresponding author, E-mail: bywang@ustb.edu.cn

ABSTRACT Combining the theory of wedge cross rolling (WCR) with forming gears by rolling, a method was proposed to form teeth simultaneously when rolling gear shafts. The method can not only realize the near net forming of gear shafts, but also improve the mechanical properties and service life of teeth. In the process of forming teeth by rolling, the feed was not continuous but intermittent, and workpieces were compelled to roll in free graduation under the rotation of dies. The calculation method and change law of die tooth pitch, the design of die tooth forms, the calculation method of the minimum feed at the first half circle and the law of feed change in each stage of rolling were presented on the basis of mathematical models and experiments. The rolling process was simulated by numerical software Deform-3D, with which the dies can be correctly designed. A toothed shaft with the module of the gear $m=2$, the number of teeth $z=20$ and the pressure angle $\alpha'=20^\circ$ has been successfully formed with the H630 rolling tool. It is proved that forming teeth on gear shafts by wedge cross rolling is feasible.

KEY WORDS shafts; gears; rolling; die design; service life; computer simulation

齿轮轴是机械结构中常用的一个重要零件,它能够以简单、紧凑的结构形式传递较大的力和运动,因此在各个领域得到了广泛的应用.目前齿轮轴的加工方式均采用金属切削的方法加工成形.用楔横轧的方式轧制齿轮轴并且把轴上的齿形也轧制成形是一种新的成形工艺,这种成形工艺可以把成形轴的工艺和成形齿形的工艺合为一个工艺,大幅度地提高生产效率,降低成本,节省原材料.由于轧制过程中轧件发生的是挤压塑性变形,齿形的金属纤维

没有被切断只是被拉伸或挤压^[1-2],因此这种齿形的弯曲疲劳强度和齿面接触疲劳强度与通过金属切削加工方式加工出的齿形相比能提高 20% 左右^[3-4].在轧制成形齿轮轴上齿形部分的过程中模具的齿形参数是影响齿形成形质量的主要因素.

1 齿轮轧制成形原理

轧制齿轮轴上齿形的原理如图 1 所示. 1 和 2 为模具, 3 为轧件. 模具 1、2 以相同的转速做相对运

动并且保持中心距离不变, 轧件 3 在模具 1、2 的轧制力作用下自由转动^[5-8]. 这种轧制方式不同于加工齿轮的范成法, 因为模具与轧件之间的运动关系不是范成运动关系, 模具与轧件之间没有通过传动装置实现恒传动比运动关系^[9-10]. 轧制过程中轧件在两模具的作用下一边绕自身轴心转动, 一边不断地发生复杂的塑性变形, 轧制过程结束时即可以轧制出齿轮轴上的齿形.

2 模具设计

2.1 模具构成

模具由上模具 1 和下模具 2 构成如图 1 所示. 模具 1 和模具 2 的中心距离在轧制过程中保持不变. 模具 1 与模具 2 由若干个阶段组成, 一般是 4 ~ 5 个阶段. 图 2 是下模具齿形参数为模数 $m = 2$, 齿数 $z = 20$, 压力角 $\alpha' = 20^\circ$ 的构成图, 它由五个阶段组成, 每个阶段之间模具对轧件的进给量 ΔS_i 是通过增大模具齿顶圆半径的方式实现的.

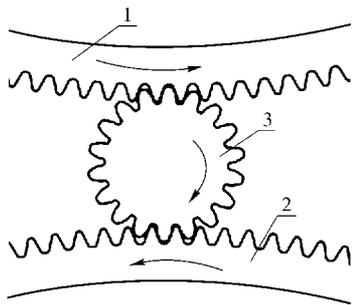


图 1 轧制原理图
Fig. 1 Rolling theory

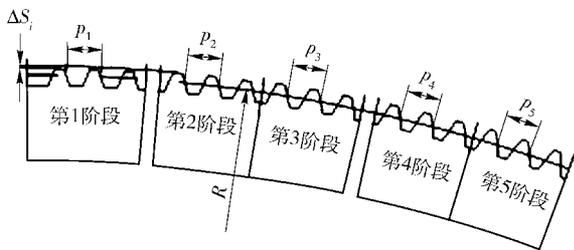


图 2 模具构成
Fig. 2 Configuration of the die

2.2 模具齿距计算

在轧制齿轮轴上齿形的过程中, 轧件的分度方式是自由分度方式, 而不是通过分度装置实现的强迫分度方式, 因此正确的自由分度是轧制成形的前提条件, 自由分度不准确会产生乱齿现象. 各阶段模具的齿距 p_k 是指在模具分度圆上相邻两齿同侧齿廓之间的弧长.

图 3 是齿轮啮合原理图, r_{a1} 和 R_a 分别是齿轮 1、

2 的齿顶圆半径, $N_1 N_2$ 是理论啮合线, 点 P 为齿轮 1、2 两节圆的切点. 当线段 $B_1 B_2 < p_b$ (p_b 是基圆上的齿距) 时, 也就是重合度 $\varepsilon_a < 1$ 时两齿轮的传动是不连续的, 但在实际啮合线段 $B_1 B_2$ 之间齿轮 1、2 可以进行连续传动, 重合度 ε_a 可按式 (1) 计算. 轧制过程中模具与轧件之间即存在齿轮啮合传动运动关系, 又存在相对之间的滚滑运动关系. 模具与轧件的齿轮啮合传动关系发生在它们进入实际啮合线 $B_1 B_2$ 段内, 模具与轧件的滚滑运动关系发生在它们没有进入实际啮合线 $B_1 B_2$ 段内的部分.

$$\varepsilon_a = \frac{B_1 B_2}{p_b},$$

或

$$\varepsilon_a = [z_1(\tan \alpha_{a1} - \tan \alpha') + z_2(\tan \alpha_{a2} - \tan \alpha')] / 2\pi \quad (1)$$

式中 z_1, z_2 为齿轮 1、2 齿数, α_{a1}, α_{a2} 为齿轮 1、2 齿顶圆压力角, α' 为齿轮 1、2 压力角.

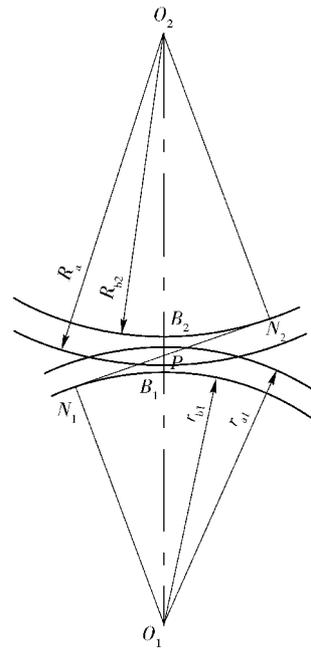


图 3 齿轮啮合原理图
Fig. 3 Theory of gear meshing

图 4 描述的是当 $\varepsilon_a < 1$ 时在轧件上分一个齿时模具与轧件之间的传动关系, r_0 为轧件外圆半径, R_a 为模具齿顶圆半径. 以轧件为研究对象, 理论上, 模具转过角度为 θ_2 时必须保证轧件转过的角度为 θ_1 完成一个分齿过程. 在一个分齿过程中, 模具与轧件之间是齿轮啮合传动关系时模具转过中心角 θ_{21} 时轧件按照定传动比关系转过中心角度 θ_{11} , 模具与轧件之间是滚滑传动关系时模具转过中心角 θ_{22} 时轧件转过的中心角度为 θ_{12} . 在一个分齿过程中, 模

具与轧件的滚滑传动关系发生两次,一次发生在模具不断楔入轧件 AC 阶,另一次发生在模具与轧件将要脱离 DB 阶段,在滚滑传动阶段认为 $\widehat{AC} = \widehat{AF}$, $\widehat{BD} = \widehat{BK}$ 各参数之间具有如下数学关系.

模具与轧件传动关系是齿轮啮合传动关系时,

$$\theta_{21} = \frac{\theta_{11}}{i}, \theta_{11} = \varepsilon_a \frac{360}{z_1}, i = \frac{z_2}{z_1}$$

模具与轧件传动关系是滚滑传动关系时

$$\theta_{12} = (1 - \varepsilon_a) \frac{360}{Z_1} \times \frac{1}{2} = (1 - \varepsilon_a) \frac{180}{Z_1}, \theta_{22} = \frac{\theta_{12} r_1}{R_a}$$

模具的各阶段齿距 p_k 可按下式计算

$$p_k = \frac{R\theta_2 \pi}{180}, \theta_2 = \theta_{21} + 2\theta_{22}$$

式中 i 为轧件与模具的传动比, z_1 为轧件齿数, z_2 为模具的齿数, R_a 为模具齿顶圆半径, r_1 为参考圆半径, R 为模具节圆半径, ε_a 为是模具与轧件的重合度.

随着模具对轧件不断地径向进给,模具与轧件的重合度也在不断增加,当 $\varepsilon_a \geq 1$ 时模具与轧件之间的运动关系为齿轮啮合传动关系,这时模具的齿距应该为齿轮正确啮合条件下的齿距 p ,并且齿距 p_k 不再随着模具对轧件的进给而减小而是保持恒值.

$$p = m\pi$$

式中, m 为齿轮模数.

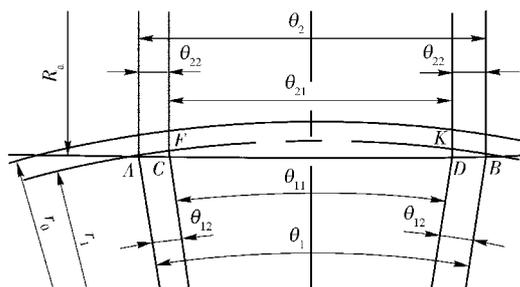


图 4 模具与轧件传动关系图

Fig. 4 Meshing relation between the die and the workpiece

图 5 是模具各阶段的齿距变化规律图. 第 1~3 阶段是模具与轧件之间重合度 $\varepsilon_a < 1$ 的阶段, P_1 、

P_2 、 P_3 依次变小. 模具与轧件之间的传动关系即存在齿轮啮合传动关系又存在滚滑运动关系; 第 4~5 阶段是模具与轧件之间重合度 $\varepsilon_a \geq 1$ 的阶段, P_4 、 P_5 保持恒值. 模具与轧件之间的传动关系只存在齿轮啮合传动关系.

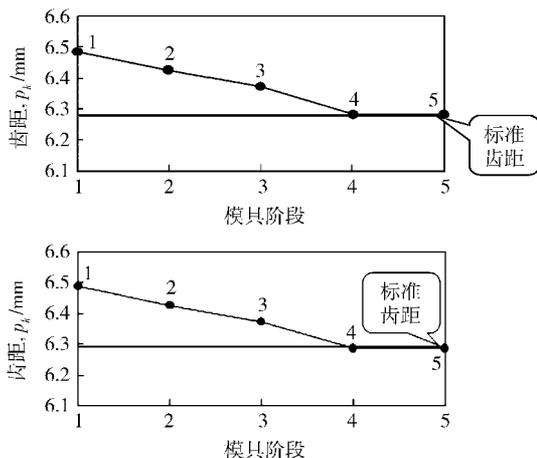


图 5 模具齿距的变化

Fig. 5 Change in die gear pitch

2.3 模具齿形设计

模具齿形主要影响轧件的齿廓形状. 模具的齿形设计主要考虑两方面: 一方面是易于楔入轧件, 另一方面是易于轧件齿形的成形. 按照这两方面的要求以及渐开线的性质可以设计出如图 6 所示各种形式的模具齿形. 图 6(a) 是一种齿轮模数 $m = 2$, 齿数 $z = 300$, 压力角 $a' = 40^\circ$ 渐开线齿形. 这种大压力角齿形的优点是齿形抗弯曲强度高, 在轧件上首次分度时能够在较少进给量的条件下获得较大的重合度; 缺点是不利于齿形的成形, 金属在径向方向的流动变得困难. 图 6(b) 模具齿形是在标准的齿廓上按照进给量从下向上依次截取的齿形. 这种模具齿形的优点是金属在径向方向流动性好; 缺点是齿形顶部与轧件接触面积大不利于楔入. 图 6(c) 模具齿形是在标准的齿廓上按照进给量从上向下依次截取的齿形. 这种齿形既具有图 6(a) 齿形的优点, 又具有齿形顶部面积小易于楔入轧件的优点, 因此采用这种齿形作为各阶段的模具齿形.

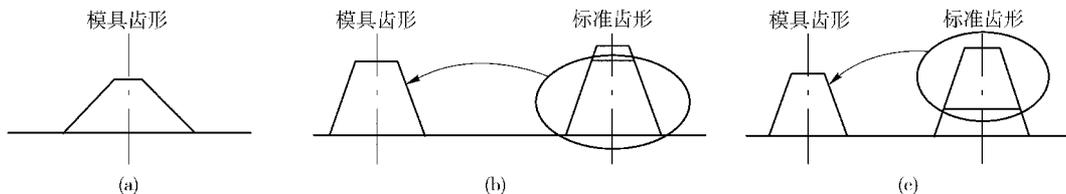


图 6 模具齿形

Fig. 6 Tooth forms of the die

2.4 进给量的分配与最小进给量的计算

模具对轧件的进给量 ΔS_i 是指各阶段模具对轧件的压入量。进给量 ΔS_i 在轧件每转动半周时调整一次, 整个轧制过程中需要几个进给阶段以及各个阶段进给量的多少是影响正确分度和成形质量的主要因素, 各阶段进给量可以按下式计算:

$$\begin{cases} \Delta S_i = R_i - R_{i-1}, i = 2, 3, 4, \dots \\ \Delta S_1 = R_1 + d/2 - L_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 R_i 为模具各阶段齿顶圆半径, R_1 为模具第 1 阶段齿顶圆半径, d 为轧件初始直径, L_0 为轧件与模具中心距离。实验表明模具对轧件的进给量应按照先多后少的变化趋势进行分配, 如图 7 所示。模具对轧件首次分度的过程是一个非常重要的过程, 它必须保证在轧件上均匀地轧制出设计的齿数以确保不发生乱齿。模具第一个阶段的进给量 ΔS_1 也是影响正确分度和齿坯成形质量的关键因素。如果 ΔS_1 过大, 金属流动方向更倾向轴向而不是径向; ΔS_1 过小, 就有可能导致首次分度不正确的发生。图 8 就是由于 ΔS_1 过小导致不能正确分度的情况, 在分度过程中模具上前一个齿 1 已经与轧件脱离接触时, 后一个齿 2 还没有与轧件接触, 即使模具再转过一个角度也不会带动轧件转动直到齿 2 与轧件接触时才会带动轧件转动。

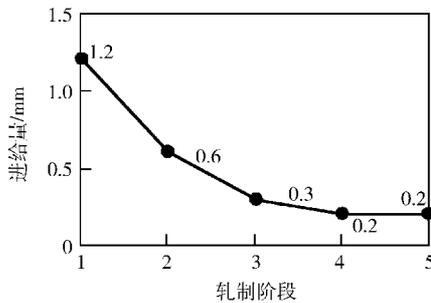


图 7 进给量变化趋势

Fig. 7 Trend of feed change

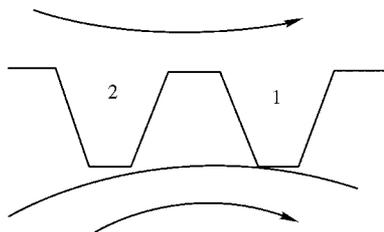


图 8 进给量 ΔS_1 小不能正确分度图

Fig. 8 Feed ΔS_1 to make workpieces not to be correctly graduated

为了保证模具对轧件首次分度能够准确进行, ΔS_1 就必须有最小值 ΔS_{1min} 的约束。图 9 是 ΔS_{1min} 求解图, r_0 是轧件的初始外圆半径, r_a 是模具的齿顶圆半径, L_0 是模具与轧件的中心距。

数 R_a 是模具的齿顶圆半径, L_0 是模具与轧件的中心距。

$$\begin{cases} \Delta S_{1min} > r_0 + R_a - L_0 \\ R_a = \sqrt{r_0^2 + L_0^2 - 2r_0L_0 \cos \frac{\varphi}{2}} \\ \varphi = \frac{360}{Z_1} \end{cases}$$

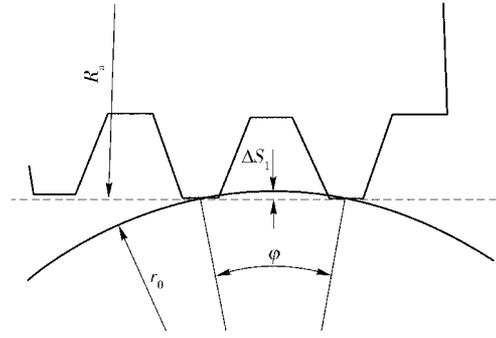


图 9 ΔS_{1min} 求解图

Fig. 9 Chart of solving ΔS_{1min}

3 数值仿真与实验

利用数值仿真软件 Deform-3D 软件模拟齿轮轴上齿形部分的轧制过程, 能够在模型中获取大量的数据信息供研究分析。图 10 是通过 Solidworks 软件创建模型并导入到 Deform-3D 软件中的模型。齿轮坯参数是 $m = 2, z = 20, a' = 20^\circ$, 为了使轧件的中心在轧制过程中保持在上、下模具中心线位置, 可以在轧件的两边设置导板约束轧件的窜动。轧件划分的网格数是 10 万个, 能够准确地模拟轧制过程中金属的塑性变形过程及流动。

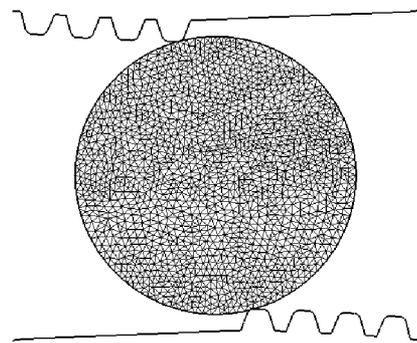


图 10 数值仿真模型

Fig. 10 Numerical simulation model

图 11 是模具构成和各阶段模具齿形图。模具齿形参数是 $m = 2, z = 300, a' = 20^\circ$, 模具分为五个阶段, 各个阶段的模具齿形如图 11 所示。轧件为 45# 钢加热到 1150°C 时在自由分度的方式下进行轧制,

轧制过程结束后齿轮轴上的齿形就被成形出来,如图 12(c) 所示. 图 12(a) 和图 12(b) 是轧制过程中的中间状态,图 13 是加工出来的上、下模具,图 14 是在阶梯轴上轧制出齿形的齿轮轴零件. 实验过程中发现齿形质量还跟轧制温度相关,虽然轧制温度越高轧制过程越容易进行,但是温度越高不但加剧了齿轮表面的氧化程度而且更容易产生齿形弯曲现象,在可顺利进行轧制的条件下,轧制温度应尽可能的低. 轧制各阶段的进给量 ΔS_i 分配应按照先多后少的顺序依次进给,第一个阶段的进给量 ΔS_1 在大于 ΔS_{1min} 的条件下最好选定在 0.8 ~ 1.5 mm. 轧件处于高温状态下易发生塑性变形,如果第一个阶段的进给量 ΔS_1 太小,模具齿形压入轧件并带动轧件转动时易发生模具齿形与轧件之间较大的滑移,影

响自由分度的准确进行;如果第一个阶段的进给量太多,齿坯金属的流动方向更倾向于轴向而不是期望的径向并且轧制出的齿轮毛坯椭圆化现象加重.

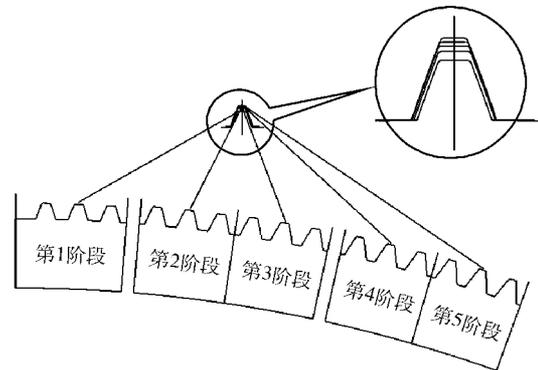


图 11 模具构成及齿形

Fig. 11 Configuration and tooth forms of the die

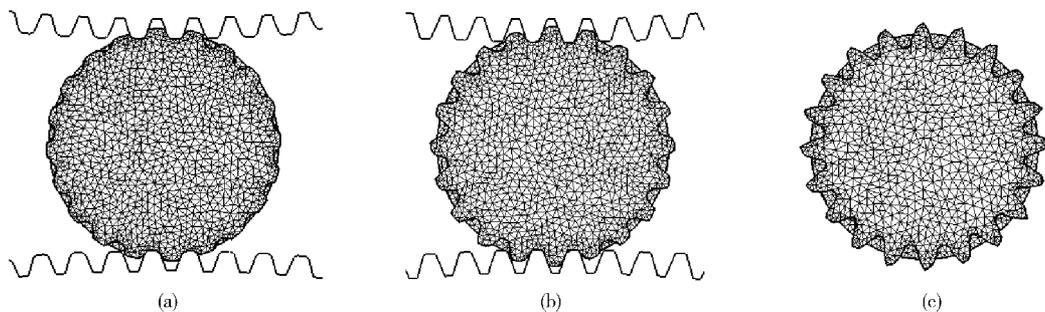


图 12 轧制过程的数值仿真

Fig. 12 Numerical simulation of rolling process

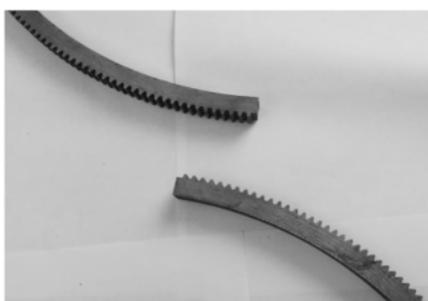


图 13 模具

Fig. 13 Manufactured dies



图 14 轧制出的齿坯

Fig. 14 Rolled gear shafts

4 结论

(1) 在楔横轧机上轧制齿轮轴上齿形,模具对轧件的进给采用分段进给的方式,轧件采用自由分度的方式进行轧制是可行的.

(2) 模具对轧件进行自由分度时模具齿距 p_k 在模具各阶段的变化规律是前几个阶段逐渐变小,后几个阶段保持恒定值,通过数学建模分析给出了 p_k 的计算方法.

(3) 比较了不同形式的模具齿形,实验表明在标准的齿廓上按照进给量从上向下依次截取齿廓作为模具齿形的设计方法是可行的.

(4) 轧制各阶段对轧件的进给量 ΔS_i 应先多后少的规律进行分配,首次对轧件进行自由分度时进给量 ΔS_1 必须大于 ΔS_{1min} ,通过数学建模给出了 ΔS_{1min} 的计算方法.

参 考 文 献

[1] Yu J W. Application of cold-excluded technology of spur gears. *Tractor & Transporter*, 2009, 36(6): 135

(于金伟. 冷挤压技术在圆柱齿轮成形中的应用. 拖拉机与农

- 用运输车, 2009, 36(6): 135)
- [2] Tang S B. Application of cold-excluded technology on automotive steering gear. *New Technol New Process*, 2009(7): 70
(唐少波. 冷挤压技术在汽车转向器上的应用. 新技术新工艺, 2009(7): 70)
- [3] Zhu Z W. *Gear Chipless Forming*. Beijing: China Machine Press, 1975: 10
(朱震午. 齿轮的少无切屑加工. 北京: 机械工业出版社, 1975: 10)
- [4] Zhang C, Tian P. Research on net forming gear parts. *Mod Manuf Eng*, 2005(3): 24
(张弛, 田平. 齿形零件(近)净成形技术. 现代制造工程 2005(3): 24)
- [5] Hu Z H, Zhang K S, Wang B Y, et al. *Theory and Application of Cross Wedge Rolling*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996
(胡正寰, 张康生, 王宝雨, 等. 楔横轧理论与应用. 北京: 冶金工业出版社, 1996)
- [6] Pater Z. A study of cross wedge rolling process. *J Mater Process Technol*, 1998, 80/81: 370
- [7] Liu J P, Wang B Y, Zhang K S, et al. Geometry analysis of contact surface of in roller type cross wedge rolling during wedge in. *J Plast Eng*, 2001, 8(1): 55
(刘晋平, 王宝雨, 张康生, 等. 辊式楔横轧楔入轧制几何分析. 塑性工程学报 2001 8(1): 55)
- [8] Dong Y, Tagavi K A, Lovell M R. Analysis of interfacial slip in cross-wedge rolling: a numerical and phenomenological investigation. *J Mater Process Technol*, 2000, 97(1-3): 44
- [9] Sun H, Chen Z M. *Theory of Machines and Mechanisms*. Beijing: Higher Education Press, 1996
(孙桓, 陈作模. 机械原理. 北京: 高等教育出版社, 1996)
- [10] Yu C J. Research on parameter of gear and spline formed by cold-excluded technology // *Bibliography of Academic Thesis by China Heavy Truck Association (2002—2003)*, 2004: 31
(于长健. 花键和齿轮冷轧方法及工艺参数的确定 // 中国重汽科协获奖学术论文选编(2002—2003), 2004: 31)