

DOI: 10.3901/JME.2014.16.070

轴承环轧制成形理论和技术*

华林^{1,2} 钱东升^{2,3}

(1. 武汉理工大学汽车工程学院 武汉 430070;

2. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室 武汉 430070;

3. 武汉理工大学材料科学与工程学院 武汉 430070)

摘要: 轴承是广泛应用的机械基础零件,其制造技术体现了国家机械制造能力和水平。轴承环轧制是一种连续局部塑性成形技术,也是国际高性能轴承先进成形制造技术。基于作者在轴承环轧制成形领域的研究基础,对我国轴承环轧制成形理论和技术现状和发展进行系统介绍:分析轴承环轧制成形特点;阐述轴承环轧制成形理论,包括轧环条件和力能计算方法,以及轴承环轧制成形技术设计方法,包括轧辊、毛坯、轧制变形量和进给规程;介绍我国轴承环冷轧和热轧成形技术与装备开发和应用成果;展望当前我国轴承环轧制成形理论和技术发展趋势。经过20多年的研究开发和生产应用发展,我国已经成为世界轴承环重要制造基地。

关键词: 轴承; 环件轧制; 塑性成形; 轧环理论; 轧环技术

中图分类号: TG331

Ring Rolling Forming Theory and Technology for Bearing

HUA Lin^{1,2} QIAN Dongsheng^{2,3}

(1. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070;

2. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology of Automotive Parts,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070;

3. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract: Bearing is a widely used basic mechanical parts, its manufacturing technology is an important symbol of the national mechanical manufacturing capacity. Bearing rolling is a continuously partial plastic forming technology, which is an advanced forming manufacturing technology of high quality bearing internationally. On basis of the research foundation of authors in bearing rolling, the status and development of bearing rolling theory and technology are systematically introduced, the forming characteristics of bearing rolling are analyzed; the bearing rolling forming theory are formulated which include the rolling condition and force and energy computational method, and the technology design methods are also represented which include the roller, ring blank, deformation amount and feeding procedure; the research and application of cold and hot bearing rolling forming technology and equipment in China are introduced; the development direction of bearing rolling forming theory and technology are described. Over twenty year's research and development and production, China has become an important country of bearing rolling.

Key words: bearing; ring rolling; plastic forming; ring rolling theory; ring rolling technology

0 前言

轴承是机械基础零件,广泛用于机械、汽车、火车、船舶、飞机等工业领域,轴承的制造技术水平在一定程度上反映了一个国家制造业的技术水平和竞争能力^[1-2]。轴承由轴承环、滚动体、保持架等

组件组成,轴承环是轴承中尺寸、重量和制造成本最大的组件,直接决定了轴承的性能和寿命。2012年我国滚动轴承产量180亿套^[3],轴承环360亿件,是世界第一大轴承生产国。我国轴承产量巨大,但主要生产中高端产品。关于高铁轴承、高速机床主轴承、航空主轴承等高端轴承的开发能力十分薄弱,甚至是空白。为了提升我国轴承自主开发和创新能力,迫切需要研究开发轴承组件先进制造技术。国家重点基础研究发展计划(973计划)、国家高技术研究发展计划(863计划)、国家自然科学基金计划分别

* 国家自然科学基金重点(51135007)、国家重点基础研究发展计划(973计划, 2011CB706605)和教育部创新团队发展计划(IRT13087)资助项目。20140415收到初稿,20140619收到修改稿

针对轴承制造基础理论和先进技术立项开展了探索。轴承品种规格众多, 微型轴承环直径为 2~3 mm, 超大型风电轴承环直径为 4 000~5 000 mm。轴承环传统的加工工艺主要为热锻制坯和切削加工, 不仅加工余量大、工时长、材料利用率低, 而且金属流线被切断, 严重损害了轴承产品的组织和性能, 以致不能生产高端轴承。轴承环轧制(简称轧环)成形是一种连续局部塑性成形技术, 是国际高性能轴承环制造技术发展方向。轴承环轧制成形分为径向轧制和径轴向轧制两种, 技术原理分别如图 1 和图 2 所示, 它利用轧辊的旋转驱动和直线进给作用使环件毛坯连续咬入轧制孔型, 产生壁厚减薄、直径增大、截面轮廓成形的连续局部塑性变形, 进而直接获得复杂截面轮廓形状轴承环产品的塑性成形新技术^[4-5]。它具有省力、节能、节材、效率高、成本低、产品性能好等显著特点, SKF、FAG、NSK、KOYO、TIMKEN 等国际著名轴承公司广泛使用轧环成形技术特别是室温冷轧环技术制造高性能轴承环组件。本文简要阐述轴承环轧制成形理论、工艺、装备等研究进展和生产应用。

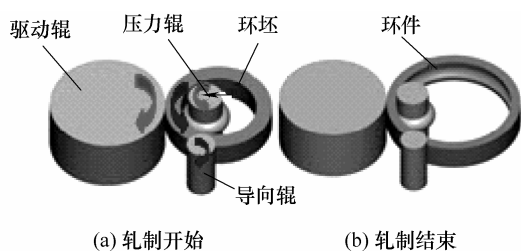


图 1 轴承环径向轧制原理

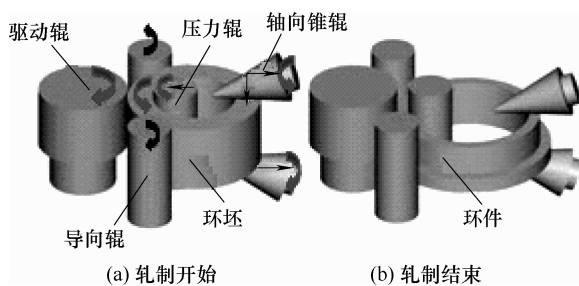


图 2 轴承环径轴向轧制原理

1 环件轧制成形理论

轧环始于 19 世纪火车轮箍的制造^[6], 当时采用轧制钢质轮箍取代铸铁轮箍, 以满足火车提速要求。轧环理论研究始于 20 世纪 60 年代, JOHNSON 等^[7-9]针对环件轧制理论进行了开创性研究, 通过轧制试验和解析计算, 研究了环件径向轧制中的塑性铰位置、压力分布以及轧制力计算方法, 从塑性力学的角度初步揭示了轧环变形的基本规律。20 世纪

80 年代以来, 有限元数值模拟的快速发展, 轧环过程塑性变形数值分析得到了许多学者的重视^[10-15]。但是, 轧环变形过程稳定实现、轧环技术参数设计控制等关键问题还需要解决。参见图 1 径向轧环, 驱动辊作旋转轧制运动, 压力辊作直线进给运动和旋转轧制运动, 导向辊作旋转与跟随导向运动, 环件毛坯(简称环坯)在驱动辊、压力辊和导向辊共同作用下反复通过驱动辊与压力辊构成的轧制孔型, 产生壁厚减小、直径扩大的轧环变形, 直至达到规定的径向尺寸和截面轮廓时轧环变形结束。轧环变形中, 驱动辊旋转轧制运动由电动机驱动; 压力辊直线进给运动由液压缸驱动, 压力辊的旋转轧制运动无动力驱动, 它由环坯与压力辊接触面之间的摩擦力驱动作旋转轧制运动, 因而压力辊又称为从动辊或芯辊; 导向辊无动力驱动, 它由环坯与其接触面的摩擦驱动作旋转导向运动。由此可知, 径向轧环是在多辊多运动作用下的复杂运动和变形。图 2 的径轴向轧环是在径向轧环基础上增加了一对轴向轧制锥辊, 轴向锥辊同时作旋转轧制运动、轴向直线进给运动和随环件直径扩大的径向跟随运动, 进而实现环件的轴向变形和端面成形。从图 1 和图 2 所示的轧环原理可知, 无论是径向轧环还是轴向轧环, 它们都具有如下共同特点: ① 驱动辊作主动旋转轧制运动, 压力辊作从动旋转轧制运动, 且两者的轧制转速是不同的, 具有异步轧制变形性质; ② 驱动辊直径大, 压力辊直径小, 具有非对称轧制变形性质; ③ 轧环过程中随着压力辊的直线进给运动, 驱动辊与压力辊构成的轧制孔型逐渐变化, 环件反复通过不断变化的轧制孔型进行多转轧环变形, 具有多道次轧制变形性质。因此轧环变形是多种轧制变形的复合, 成形规律十分复杂。轧环过程中经常出现如下异常现象: ① 环件不转动, 亦即环件不能咬入孔型; ② 环件转动但不产生直径扩大变形; ③ 环件被导向辊压扁, 亦即环件整体刚度失稳; ④ 环件和轧辊产生强烈自激振动, 压力辊跳离环件, 甚至导致轧环机主轴和压力辊折断。任一上述现象出现将会使轧环过程中断, 导致轧环废品。为了实现轧环成形, 环件必须连续咬入轧制孔型产生稳定的旋转轧制运动; 在环件旋转轧制运动的同时, 驱动辊与压力辊共同作用产生的塑性变形区应穿透环件的壁厚, 进而实现环件壁厚整体变薄、直径整体扩大, 亦即实现轧环成形; 在轧环过程中, 环件还要具有足够刚度, 保持整体圆环形状。针对轧环的性质特点和异常现象, 国内学者开展了深入的理论和试验研究, 提出了轧环的咬入孔型条件、塑性锻透条件、刚性稳定条件和运动稳定性条件, 揭示

了轧环力能作用规律,初步建立了轧环成形理论框架^[16-22]。

1.1 轧环条件

(1) 咬入孔型条件。径向咬入孔型条件

$$\Delta h \leq \Delta h_{\max} = \frac{2\beta^2 R_1}{(1 + R_1/R_2)^2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R} - \frac{R_1}{r} \right) \quad (1)$$

轴向咬入孔型条件

$$\Delta h_a \leq \Delta h_{\max,a} = 2\beta_a^2 S \sin \gamma \quad (2)$$

式中 Δh ——轧环过程中每转壁厚减小量即每转径向进给量;

Δh_a ——轧环过程中每转高度减小量即每转轴向进给量;

$\Delta h_{\max}$ ——环件咬入径向孔型所允许的最大每转进给量或环件最大每转壁厚减小量;

$\Delta h_{\max,a}$ ——环件咬入轴向孔型所允许的最大每转进给量或环件最大每转高度减小量;

R_1, R_2 ——驱动辊和压力辊的工作面半径;

R, r ——轧制中环件的外半径和内半径;

β ——环件与径向轧辊之间的摩擦角;

μ ——径向孔型摩擦因数, $\mu = \tan \beta$;

β_a ——环件与轴向轧辊之间的摩擦角;

μ_a ——轴向孔型摩擦因数, $\mu_a = \tan \beta_a$;

S ——轴向锥辊顶点至轴向锥辊与环件接触区中心的距离;

γ ——轴向锥辊锥顶角。

(2) 塑性锻透条件。径向塑性锻透条件

$$\Delta h \geq \Delta h_{\min} = 6.55 \times 10^{-3} R_1 \left(\frac{R}{R_1} - \frac{r}{R_1} \right)^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R} - \frac{R_1}{r} \right) \quad (3)$$

轴向塑性锻透条件

$$\Delta h_a \geq \Delta h_{\min,a} = \frac{0.013 b^2}{S \tan \frac{\gamma}{2}} \quad (4)$$

式中 $\Delta h_{\min}$ ——环件径向塑性锻透所要求的环件最小的每转壁厚减小量即最小径向每转进给量;

$\Delta h_{\min,a}$ ——环件轴向塑性锻透所要求的环件最小的每转高度减小量即最小轴向每转进给量;

b ——环件轴向宽度。

(3) 刚性稳定条件

$$H \geq H_{\min} = 0.183 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{r_{a0} H_0}{R_1} \quad (5)$$

式中 H ——轧制中环件的径向壁厚;

$H_{\min}$ ——轧制中所允许的最小环件壁厚;

r_{a0}, H_0 ——轧制前环件的平均半径和壁厚。

(4) 运动稳定性条件

$$\begin{cases} c - \frac{bK_s B_0}{f} = 0 \\ f^2 - \frac{k + bK_s A_0}{m} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 f ——环件轧制振动频率;

k, c ——压力辊在进给方向的刚度和进给运动阻尼;

m ——包含压力辊质量的进给运动系统质量;

b ——环件轴向宽度;

K_s ——轧制过程特性参数;

A_0, B_0 ——压力辊振幅的函数。

1.2 轧环力能计算

闭式轧环亦即轧制中环件两个端面封闭于轧制孔型内部,环件轴向宽展变形受到孔型侧壁限制。记 f_σ 为摩擦因子, σ_c 为环件材料剪切屈服强度, $b, L, h_0, \Delta h, L_a, \Delta h_a$ 分别为环件轴向宽度、径向接触弧长、径向壁厚、径向每转进给量、轴向接触弧长、轴向每转进给量, b_a 为环件平均轴向宽度,可用环件毛坯与环件锻件轴向宽度平均值近似计算, R_1 为驱动辊工作面半径,应用塑性力学分析求解得到闭式轧环力能计算公式如下。

(1) 轧环力。

径向轧环力

$$F = 2\sigma_c b L \left(1 + \frac{1}{4} \frac{h_0}{L} + \frac{3}{8} f_\sigma \frac{L}{h_0} + \frac{3}{4} f_\sigma \frac{L}{b} \right) \quad (7)$$

轴向轧环力

$$F_a = 2\sigma_c h_0 L_a \left(1.2 \ln \frac{b_a}{L_a} + 1.2 \frac{L_a}{b_a} - 0.2 \right) \quad (8)$$

(2) 轧环力矩。

径向轧环力矩

$$M = 2\sigma_c b R_1 \Delta h \left(1 + \frac{1}{4} \frac{h_0}{L} + \frac{3}{8} f_\sigma \frac{L}{h_0} + \frac{3}{4} f_\sigma \frac{L}{b} \right) \quad (9)$$

轴向轧环力矩

$$M_a = \frac{P_a S b_a (R + r) \sin(\lambda/2)}{4 R L_a} \ln \left(1 + \frac{\Delta h_a}{b_a} \right) \quad (10)$$

(3) 驱动电动机功率。

径向驱动电动机功率

$$P_e = \frac{\pi n_e M}{30 i \eta \lambda} \quad (11)$$

轴向驱动电动机功率

$$P_a = \frac{\pi n_a M_a}{30 i_a \eta_a \lambda_a} \quad (12)$$

式中 F, F_a ——径向和轴向轧环力;

M, M_a ——径向和轴向轧环力矩;

P_e, P_a ——径向和轴向驱动电动机功率;

n, n_a ——径向和轴向电动机转速;

λ, λ_a ——径向和轴向电动机过载系数;

i, η ——径向电动机到驱动辊的传动比和传动效率;

i_a, η_a ——轴向电动机到轴向锥辊传动比和传动效率。

2 环件轧制成形技术设计

环件轧制成形技术设计的依据是环件轧制成形理论, 也就是说在满足轧环条件和力能参数的前提下, 合理设计与选择的轧环工艺参数、环坯和轧环孔型。其关键技术设计^[23-27]如下所述。

2.1 轧辊直径

轧辊不仅要具有足够的强度和刚度, 便于轧制轴承环放入孔型和从孔型中取出, 还要使环件能连续咬入轧制孔型和塑性锻透。据此分析计算得到轴承环轧制轧辊工作面尺寸如下

$$\begin{cases} R_1 \geq R_{1\min} = \frac{R_2(R-r)}{17.5\beta R_2 - (R-r)} \\ R_2 \geq R_{2\min} = \frac{R_1(R-r)}{17.5\beta R_1 - (R-r)} \end{cases} \quad (13)$$

式中 $R_{1\min}, R_{2\min}$ ——驱动辊和压力辊工作面的最小半径。

驱动辊和压力辊的最大半径也有限制。对于压力辊, 其工作面最大半径不得大于环坯内孔半径, 否则毛坯不能放入孔型。对于驱动辊, 其工作面最大半径要符合轧环机所允许的驱动辊与压力辊中心距尺寸要求。

2.2 轧制环件壁厚

环件轧制可以生产直径数十毫米至数千毫米的各种环件, 根据轧环条件, 环件壁厚要满足如下要求

$$\begin{cases} H \leq H_{\max} = \frac{17.5\beta R_1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \\ H \geq H_{\min} = 0.183 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{r_{a0} H_0}{R_1} \end{cases} \quad (14)$$

式中 $H_{\max}$ ——环件毛坯的最大壁厚。

2.3 轧制变形量

轧制变形量通常用轧比 K 表示, 它定义为轧制前的环件毛坯截面积与轧制后的环件锻件截面积的比值。轧制变形量越大, 则轧制成形的环件直径越大壁厚越小。轧制变形量过大将会导致整体刚度失稳和坍塌, 造成轧制废品。基于轧制环件刚度要求分析计算得到轧比为

$$K \leq K_{\max} = \frac{5.5}{\frac{r_{a0}}{R_1} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)} \quad (15)$$

式中 $K_{\max}$ ——最大轧比。

2.4 轧制进给速度

压力辊直线进给速度(简称轧制进给速度)直接决定了每转进给量的大小, 对轧环过程稳定性和轧环产品质量有重要影响。轧环过程中通常驱动辊旋转轧制速度是恒定的, 压力辊直线进给速度需要根据环件几何尺寸和轧制过程调节控制, 也就是说轧制进给速度是在一定范围变化的。根据轧环条件要求, 通过轧制进给速度与每转进给量关系计算得到轧制进给速度为

$$\begin{cases} v \geq v_{\min} = 6.55 \times 10^{-3} n_1 \frac{R_1^2}{R} \left(\frac{R}{R_1} - \frac{r}{R_1} \right)^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R} - \frac{R_1}{r} \right) \\ v \leq v_{\max} = \frac{2\beta^2 n_1 R_1^2}{R \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)^2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R} - \frac{R_1}{r} \right) \end{cases} \quad (16)$$

式中 v ——轧制进给速度;

n_1 ——驱动辊转速;

$v_{\min}$ ——最小轧制进给速度;

$v_{\max}$ ——最大轧制进给速度。

2.5 轧制进给规程

环件轧制过程从环件咬入孔型开始, 经过稳定轧制变形, 再到定径整形结束轧制, 整个过程中几何形状尺寸和轧制过程参数都是不断变化的, 是一个多运动耦合的复杂动态过程。要获得合格的轧制环件产品, 除了合理设计轧辊孔型、环件毛坯和轧环各工艺参数外, 还要合理规划轧制进给规程, 才能实现环件顺利咬入孔型、稳定轧制变形和精确成形。

3 轴承环轧制成形技术应用

20 世纪 80 年代以来, 武汉理工大学联合浙江

天马轴承股份有限公司、华中科技大学、西安交通大学、西北工业大学等, 经过深入系统的环件轧制理论和应用研究, 开发了包括轴承环在内的各种环类零件室温冷轧成形技术和高温热轧成形技术。此外, 与浙江五洲新春集团有限公司、张家港海陆环形锻件有限公司等合作, 研究开发了数控精密冷轧环机、数控精密热轧环机和轧环过程在线测控系统, 实现了中小型轴承环精密冷轧成形批量生产和超大型轴承环精密热轧成形批量生产。相关环件轧制理论和技术研究成果获得了 2011 年国家科学技术进步二等奖。

3.1 高性能轴承环精密冷轧成形技术

GCr15 轴承钢含碳量为 1.0%, 属于高碳钢, 塑性差, 变形抗力大, 难以冷轧环成形。GCr15 轴承钢室温冷轧成形是国际高性能轴承环先进制造技术发展方向, 我国经过深入研究开发, 发明了球轴承环精密冷轧成形方法和滚子轴承环冷轧成形方法, 攻克了 GCr15 轴承钢室温冷轧高塑性预处理、长寿命轧辊孔型设计制造、精密冷轧环过程控制等关键技术, 突破了高碳轴承钢冷轧成形的技术禁区。精密冷轧直接成形轴承滚道, 精度为 6~7 级, 高出国际先进水平 1~2 级。精密冷轧轴承环, 节省了大量切削加工, 节材 15%~20%, 滚道内部组织细密, 金属流线分布合理, 显著提高轴承寿命。此外, 自主研发了新型数控精密冷轧环机, 创新性地研究设计了伺服电动机-减速器-强力滚珠丝杠机构, 取代液压伺服系统作为冷轧环机主传力进给系统, 解决了爬行和零飘问题, 保持了机电伺服进给系统精密进给优点, 实现了 50 t 重载塑性变形条件下的轴承环冷轧精密进给, 进给精度达到 0.005 mm, 加工精度达到 $\phi 100 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$, 高于德国和日本同类型精密冷轧环机加工精度 $\phi 100 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 。应用精密冷轧技术和装备批量生产的轴承环不仅替代进口, 还大量出口瑞典 SKF、德国 FAG、日本 NSK、美国 TIMKEN 等国际著名轴承公司, 实现了轴承环制造从热锻低性能粗坯到冷轧高性能精坯的重大技术突破。精密冷轧成形的典型轴承环如图 3 所示。

3.2 超大型环件精密热轧成形技术

超大型环件是指直径 5 m 以上的风电轴承环件、石油化工容器环件、核电反应堆环件、武器装备环件等超大型无缝环件, 是关系到国家重大装备和国防安全的关键零件。我国经过深入研究开发, 发明了超大型复杂无缝环件精密热轧成形方法, 攻克了径轴向轧环工艺规划、轧环运动协调与变形匹配技术, 研制了超大型复杂环件精密热轧生产线。精密热轧成形了直径 9 m 的无缝环件(图 4), 圆度



图 3 典型精密冷轧轴承环

为 8 mm, 圆度误差小于国际 0.1% 的先进水平。该技术打破了国际封锁, 实现了超大型复杂无缝环件热轧成形批量生产, 解决了我国重大装备和国防建设急需的超大型复杂无缝环件的制造难题。热轧超大型环件还出口美国 GE、丹麦 VESTAS 等国际著名公司, 使我国成为具有先进水平的国际大型复杂无缝环件重要生产基地。

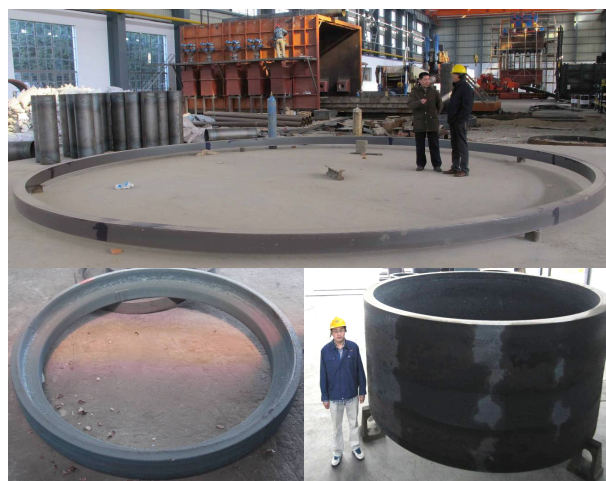


图 4 典型精密热轧环件

4 轴承环轧制理论和技术发展趋势

轴承作为关键基础零件, 直接影响到装备的工作性能和寿命。高性能长寿命轴承是装备发展的必然要求, 也是轴承技术的发展方向。轴承环作为轴承的本体组件, 其轧制成形理论和技术发展趋势有如下特点。

4.1 轴承环轧制成形理论

轴承环轧制成形理论研究将从轧制变形条件等宏观层面延伸至组织演化等微观层面, 针对轴承

环轧制控形控性科学和技术问题,开展基体组织和表面状态轧制过程演化机理和控制方法基础研究,为轴承环轧制成形一体化提供理论支撑。

4.2 轴承环轧制成形技术

4.2.1 大规格轴承环冷轧成形技术

国内外生产实践充分表明,轴承环冷轧成形可以获得细密的晶粒组织和合理分布的金属流线,是高性能轴承环不可替代的成形制造技术。然而,由于高碳铬轴承钢 GCr15 塑性差、变形抗力大,目前冷轧成形的轴承环尺寸规格限于直径 220 mm 以下,还不能冷轧成形更大规格的轴承环。鉴此,近期需要研究开发直径 300~500 mm 的大规格轴承环冷轧成形技术与装备,以扩大轴承环冷轧成形技术应用范围,实现大规格轴承环冷轧成形技术生产。

4.2.2 轴承环热轧成形控制技术

目前直径 200 mm 以上的轴承环普遍采用热轧成形生产,毛坯加热温度波动大,始轧温度与终轧温度波动大,轴承环热轧成形一致性差,轴承环热轧成形后自然随机冷却,以致热轧成形的轴承环组织状态和性能离散度大,难以满足高性能轴承环组织质量要求。这种轴承环热轧成形状况,也是我国许多轴承企业不能制造高性能轴承的重要原因。因此迫切需要研究开发轴承环热轧成形控制技术,通过加热、轧制变形和轧后冷却过程控制,实现轴承环热轧成形组织状态和力学性能控制,保证热轧轴承环组织性能一致性。

5 结论

在国家自然科学基金重点项目、国家高技术研究发展计划(863 计划)项目、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目以及企业科技攻关项目等支持下,我国经过 20 多年的产学研合作研究,建立了环件轧制理论和技术设计方法,发明了高性能轴承环精密冷轧成形技术和超大型复杂环件精密热轧成形技术,开发了数控精密冷、热轧环装备,实现了高碳铬轴承钢冷轧环成形批量生产和超大型复杂环件热轧成形批量生产。冷轧成形的高性能轴承环不仅在我国得到广泛应用,还大量出口瑞典 SKF、德国 FAG、日本 NSK、美国 TIMKEN 等国际著名轴承公司。热轧成形的超大型无缝环件直径达到 9 m,打破了国际技术封锁,有力促进了我国重大装备和国防建设。通过环类零件轧制成形理论和技术研究及应用,有力促进了我国环类零件精密轧制成形技术与装备自主创新和发展。

参 考 文 献

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学学科发展战略报告(2011-2020)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Engineering and Materials Science Division of the National Natural Science Foundation Committee. Mechanical engineering disciplines development strategy report (2011-2020)[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [2] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020 年)[EB/OL]. [2006-02-09]. http://www.gov.cn/jrzq/2006-02/09/content_183787.htm.
State Council of the People's Republic of China. National medium-and-long-term scientific and technological development plan (2006-2020 year)[EB/OL]. [2006-02-09]. http://www.gov.cn/jrzq/2006-02/09/content_183787.htm.
- [3] 2012 年 1-12 月中国滚动轴承产量数据统计[EB/OL]. [2013-02-20]. <http://www.cnbearing.biz/gb/news/13251.htm>.
The Chinese rolling bearing production statistics from January to December in year 2012[EB/OL]. [2013-02-20]. <http://www.cnbearing.biz/gb/news/13251.htm>.
- [4] 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.
HUA Lin, HUANG Xinggao, ZHU Chundong. Theory and technology of ring rolling[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [5] 胡正寰, 华林. 零件轧制成形技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
HU Zhenghuan, HUA Lin. Technology of rotary metal forming[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [6] M IO 席夫林. 车轮和轮箍轧制[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965.
M IO XI F L. Rolling of wheel and tyre[M]. Beijing: Chinese Industry Press, 1965.
- [7] JOHNSON W, NEEDHAM G. Experiments on ring rolling[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1968, 10(2): 95-113.
- [8] HAWKYARD J B, JOHNSON W, KIRHLAND J, et al. Analyses for roll force and torque in ring rolling, with some supporting experiments[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1973, 15(11): 873-893.
- [9] MAMALIS A G, HAWKYARD J B, JOHNSON W. On the pressure distribution between stock and rolls in ring rolling[J]. International Journal of Mechanical Sciences,

- 1976, 18(4): 184-195.
- [10] YANG D Y, KIM K H. Rigid-plastic finite element analysis of plane strain ring rolling[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1988, 30(8): 571-580.
- [11] XU S G, LIAN J C, HAWKYARD J B. Simulation of ring rolling using a rigid-plastic finite element model[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1991, 33(5): 393-401.
- [12] HU Z M, PILLINGER I, HARTLEY P, et al. Three-dimensional finite-element modeling of ring rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 45(1-4): 143-148.
- [13] DAVEY K, WARD M J. The practicalities of ring rolling simulation for profiled rings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125-126: 619-625.
- [14] SONG J L, DOWSON A L, JACOBS M H, et al. Coupled thermo-mechanical finite-element modeling of hot ring rolling process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121: 332-340.
- [15] 李宏伟, 杨合, 郭玲, 等. 混合硬化弹塑性本构关系及其在环件冷辗扩模拟中的应用[J]. 机械工程学报, 2005, 41(7): 119-125.
- LI Hongwei, YANG He, GUO Ling, et al. Elastic-plastic constitutive relation with hybrid hardening and application in cold ring rolling simulation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(7): 119-125.
- [16] HUA Lin, ZHAO Zhongzhi. The extremum parameters in ring rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 69(1-3): 273-276.
- [17] HUA Lin, MEI Xuesong, WU Xutang. Vibration and control in ring rolling process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1999, 9(2): 213-217.
- [18] 华林. 环件闭式轧制力和力矩上限计算[J]. 力学与实践, 1994, 16(3): 39-43.
- HUA Lin. The rolling force and torque of closed ring rolling based on the upper bound solution[J]. Mechanics and Practice, 1994, 16(3): 39-43.
- [19] 华林, 赵仲治, 王华昌. 环件轧制原理和设计方法[J]. 机械工程学报, 1996, 32(6): 66-70.
- HUA Lin, ZHAO Zhongzhi, WANG Huachang. Principle and design method forring rolling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1996, 32(6): 66-70.
- [20] 华林, 梅雪松, 吴序堂. 基于空间啮合理论的环件轧制孔型设计[J]. 机械科学与技术, 1999, 18(6): 966-968.
- HUA Lin, MEI Xuesong, WU Xutang. Design of rolled groove of ring parts based on spatial engaging theory[J]. Mechanical Science and Technology, 1999, 18(6): 966-968.
- [21] 华林, 梅雪松, 吴序堂. 环件轧制孔型共轭设计[J]. 汽车工程, 2000, 22(1): 59-61.
- HUA Lin, MEI Xuesong, WU Xutang. A conjugate design of ring rolling groove[J]. Automotive Engineering, 2000, 22(1): 59-61.
- [22] HUA Lin, PAN Libo, LAN Jian. Researches on the ring stiffness condition in radial-axial ring rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 2570-2575.
- [23] YAN Fenglin, HUA Lin, WU Yongqiao. Planning feed speed in cold ring rolling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(11): 1695-1701.
- [24] 华林, 左治江, 兰箭, 等. 沟球断面环件冷辗扩三维有限元模拟与工艺设计[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 201-205.
- HUA Lin, ZUO Zhijiang, LAN Jian, et al. 3D finite element method simulation and process design for cold rolling ball groove section ring[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10): 201-205.
- [25] WU Min, HUA Lin, SHAO Yichuan, et al. Influence of the annealing cooling rate on the microstructure evolution and deformation behaviours in the cold ring rolling of medium steel[J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 2292-2300.
- [26] ZHOU Guang, HUA Lin, QIAN Dongsheng. 3D coupled thermo-mechanical FE analysis of roll size effects on the radial-axial ring rolling process[J]. Computational Materials Science, 2011, 50(3): 911-924.
- [27] QIAN Dongsheng, PAN Yan. 3D coupled macro-microscopic finite element modelling and simulation for combined blank-forging and rolling process of alloy steel large ring[J]. Computational Materials Science, 2013, 70: 24-36.
-
- 作者简介: 华林(通信作者), 男, 1962年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为精密塑性加工技术与装备。
E-mail: hualin@whut.edu.cn
- 钱东升, 男, 1982年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为环类零件精密轧制技术。
E-mail: qiands@whut.edu.cn