

螺杆压缩机阴转子定轴横轧成形可行性研究

杨光, 张康生, 胡正寰

(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

摘 要: 螺杆转子是螺杆压缩机的核心部件, 具有螺距大、齿高半径大和螺旋升角大的特点, 现有工艺为切削加工。提出一种将带有非对称螺旋齿形的螺杆阴转子直接轧制成形的新工艺, 旨在实现螺杆转子的近净成形, 大幅度提高其生产效率。采用有限元数值模拟和轧制试验相结合的方法对螺杆阴转子的定轴横轧成形进行了研究, 得到的螺杆阴转子的非对称螺旋齿形分度均匀良好、齿形填充饱满、成形尺寸基本满足设计要求。研究表明, 定轴横轧螺杆阴转子的工艺是可行的, 具有一定的工业应用价值。

关 键 词: 非对称螺旋齿形; 定轴横轧; 螺杆阴转子; 近净成形; 有限元分析

中图分类号: TG 335.19

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)12-1785-05

Feasibility Study on Screw Compressor Driven Rotor with Fixed Cross Rolling

YANG Guang, ZHANG Kang-sheng, HU Zheng-huan

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China.
Corresponding author: ZHANG Kang-sheng, E-mail: zhang.ks@me.ustb.edu.cn)

Abstract: As the core component of the screw compressor, driven rotor which has obvious advantages of big pitch, high tooth depth and large helical angle is manufactured by machining. A fixed cross rolling process aimed at the near-netshape forming of driven rotor with asymmetric spiral teeth at higher productivity is presented. By means of the finite element simulation and rolling experiment, the forming process of driven rotor by fixed cross rolling was carried out. That the formed asymmetric spiral teeth had a satisfied shape and uniform graduation, and elementally met the design requirements. It verifies the feasibility of the fixed cross rolling driven rotor and its application value for engineering.

Key words: asymmetric spiral teeth; fixed cross rolling; driven rotor; net-shape forming; finite element analysis

螺杆压缩机凭借着动力平稳、工作可靠和操作方便等一系列独特的优点,已在空气动力、制冷空调及各种工艺流程中获得了广泛的应用。近几年来,其市场需求年均增长速度保持在20%以上,预计到2015年,国内螺杆压缩机的市场需求将超过50万台,有着十分广阔的应用前景^[1]。作

为核心部件的螺杆转子,其螺旋齿形具有螺距大、齿高半径大、螺旋升角大的特点;其转子型线(端面齿形)是由多段二次曲线首尾相接组成,齿形复杂并呈现出非对称的特点,某型号的螺杆阴转子成品的基本参数列于表1。

表1 螺杆阴转子参数
Table 1 Parameters of driven rotor

齿高/mm	节圆直径/mm	齿顶圆直径/mm	齿根圆直径/mm	螺距/mm	齿数	节圆螺旋升角
21.975	87.273	92.9	48.95	270.864	6	45°20'

收稿日期: 2014-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075030);“现代交通金属材料与加工技术北京实验室”资助项目。

作者简介: 杨光(1986-),男,山西运城人,北京科技大学博士研究生;张康生(1952-),男,河北邢台人,北京科技大学研究员,博士生导师;胡正寰(1934-),男,湖北孝感人,北京科技大学教授,博士生导师,中国工程院院士。

目前螺杆转子的加工生产主要是通过铸造、切削工艺联合完成的^[2],即:将铸造得到的阶梯圆柱体毛坯经过粗车外表面、铣削或滚削加工后得到含少量加工余量的半成品,再经过铣削或磨削精加工最终成形。现有工艺虽然比较成熟,但在粗加工阶段,加工时间较长,仅粗铣削一个螺旋槽就大概需要 1 h,限制了螺杆转子生产效率的提高;同时在粗加工螺旋齿形时,60% 以上的金属材料被切削去除,材料损耗比较大。随着螺杆压缩机需求量及市场占有率的逐年增加,采用相对高效低耗的少切削或无切削的加工工艺来进行螺杆转子的生产是未来的发展方向。

作者提出塑性成形螺杆转子的工艺,在轧制过程中将带有非对称螺旋齿形的螺杆转子直接轧制成形,替代非对称螺旋齿形的粗加工成形,提升螺杆转子的生产效率和材料利用率。国内外对滚压螺纹和蜗杆进行了大量研究^[3-8],但这些螺纹件整体尺寸偏小,外径介于 3 ~ 25 mm 之间,齿高不超过 6.5 mm,最大螺距不超过 12.7 mm,而且齿形都比较简单,如表 1 所示的大尺寸非对称螺旋齿形的轧制成形未见报道。螺杆转子螺旋齿形的螺距大、螺旋升角大和截面齿形复杂非对称的特点,使得塑性成形时金属向着预期的径向齿高方向流动的难度变大;大的齿高半径造成轧制时轧件的速比变化较大,使得螺旋齿形的均匀分度成形难以很好地得到控制。

本文基于零件轧制理论,针对提出的螺杆转子近净成形的新工艺,运用 DEFORM-3D 软件建立了螺杆阴转子定轴横轧的有限元模型,通过有限元模拟和轧制试验相结合的方法对定轴横轧螺杆转子工艺的可行性进行了研究探讨。

1 螺杆阴转子定轴横轧工艺

定轴横轧螺杆阴转子的工艺原理如图 1 所示,两个轴线平行固定的轧辊等速同向旋转,在模

具螺旋辊型的作用下,坯料绕自身轴线作反向的回转运动并进行连续局部的塑性变形,逐渐成形出带非对称螺旋齿形的螺杆阴转子。轧制工艺中,模具与轧件之间不属于典型的范成运动,而是一种变传动比下的自由啮合运动。

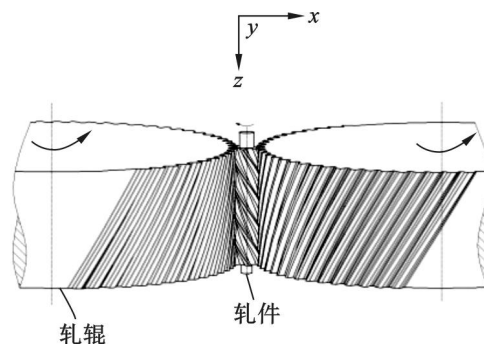


图 1 定轴横轧螺杆阴转子的工艺原理

Fig. 1 Principle of the driven rotor with fixed cross rolling

楔横轧在轧制阶梯轴类件方面的技术已比较成熟,在汽车和发动机等领域取得了广泛的应用,故在此不探讨螺杆阴转子两侧台阶的成形,仅对中间部分非对称螺旋齿形的成形进行研究。为了使有限元模拟与实际的轧制试验条件相匹配,并考虑到实轧试验中所用轧机 H630 的轧制功率,将螺旋齿形周向增加 2 mm 的加工余量后的螺杆阴转子的轴向和径向尺寸等比例缩小 1.765 倍后作为本文的研究对象,如图 2 所示,节圆螺旋升角及齿数等参数未改变,其尺寸参数列于表 2 中。

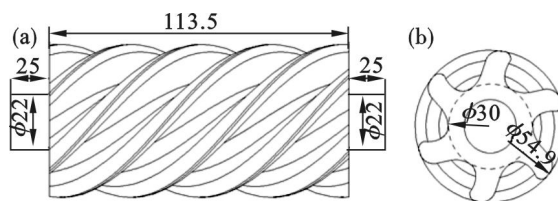


图 2 调整后的螺杆阴转子

Fig. 2 The modified driven rotor

(a)—主视图; (b)—侧视图。

表 2 调整后的螺杆阴转子尺寸参数
Table 2 Parameters of the modified driven rotor

齿高/mm	节圆直径/mm	齿顶圆直径/mm	齿根圆直径/mm	螺距/mm	齿数	节圆螺旋升角
12.45	49.447	54.9	30	153.465 7	6	45°20'

轧制成形的螺杆阴转子的表面预先留有少量的加工余量,并且轧制工艺中轧辊直径是远远大于轧件直径的,这些都使得轧辊和轧件之间的啮合运动关系是不同于一对螺杆转子工作时的啮合

状态的,因此与螺杆阴转子配对啮合的螺杆阳转子的端面型线不能作为轧制时的精整段齿形。模具精整段的辊型曲线是在先确定增加余量的螺杆阴转子的端面型线后,再通过矩阵和包络理论反

推求解得到的,图 3 所示为精整阶段模具和轧件啮合曲线的几何关系图,相对应的组成曲线列于表 3 中。

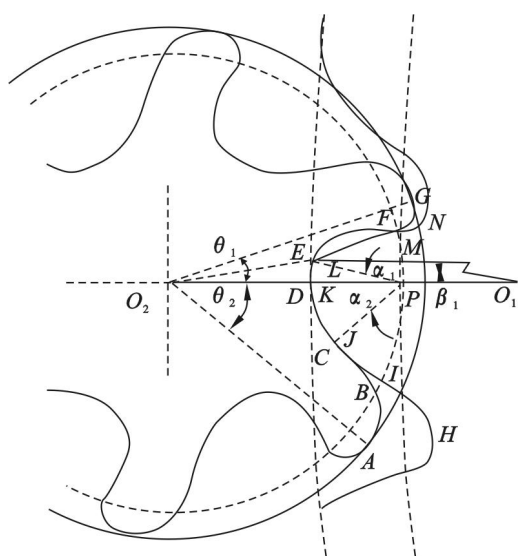


图 3 精整段模具辊型曲线与轧件型线

Fig. 3 Profile of the roller and workpiece at the finish phase

表 3 模具辊型曲线和轧件型线的组成曲线

Table 3 Composition curves of the profile

轧件型线		模具辊型曲线	
齿曲线	曲线性质	齿曲线	曲线性质
AB	圆弧	HI	圆弧包络线
BC	直线	IJ	摆线
CD	圆弧	JK	圆弧
DE	圆弧	KL	圆弧
EF	摆线	L	点
F	点	LM	摆线
FG	圆弧	MN	圆弧

定轴横轧工艺中,两轧辊的中心距固定不变,轧制过程中主要依靠沿模具周向布置的一组齿高逐渐升高的螺旋凸棱来实现对轧件的咬入和连续的径向压入。随着模具螺旋凸棱逐渐压入到坯料中及螺旋齿形的逐渐成形,轧辊和轧件之间的传动比实时发生变化。为了保证轧件在进行下一时刻轧制时模具螺旋凸棱能够准确压入到已经成形的轧件的螺旋齿槽中,必须对模具上螺旋凸棱间进行变齿距设计。同时为了使不同阶段挤压出的金属能持续地向着预期的径向齿高方向流动,相应的模具螺旋凸棱的端面齿形也要进行改变,不同时刻的模具螺旋凸棱的端面齿形根据轧辊和轧件实时的螺旋共轭运动关系而确定。

2 有限元模拟及结果分析

2.1 有限元模型建立

采用 DEFORM-3D 有限元软件进行定轴横轧螺杆阴转子的数值模拟,建立的三维塑性有限元模型如图 4 所示。①螺杆阴转子轧制成形时的变形量比较大,忽略其塑性变形前的弹性变形阶段,建立刚塑性的有限元模型。②轧制过程中,模具和导板的塑性变形程度很小,将二者作为刚性体处理。③实轧过程中,模具与轧件之间的摩擦系数是受诸多因素影响而瞬时变化的量,由于本工艺的轧制时间仅有 4~6 s,所以在有限元的模拟仿真中,对上述的边界条件进行了简化。其余主要轧制工艺参数为:模具螺旋凸棱的最大外径为 606 mm,轧辊和坯料的中心距 $A = 318$ mm,轧辊转速 $n = 6 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,坯料材料为 AISI-1045(对应中国 45 号钢),轧制温度 $t = 1150$ °C。

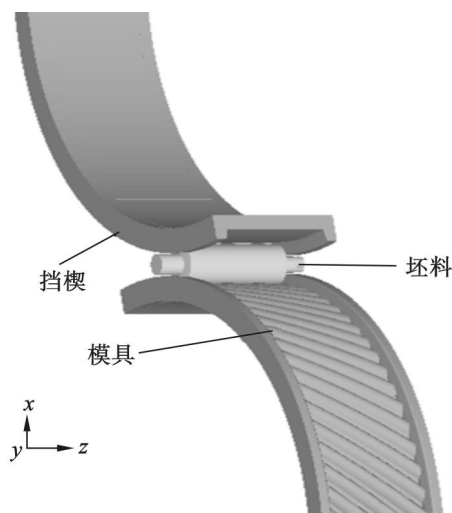


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

2.2 轧制成形过程

图 5 所示为定轴横轧螺杆阴转子的成形过程图。轧制分齿阶段,模具螺旋凸棱咬入坯料,在螺旋凸棱前侧的带动下,坯料作反方向的旋转运动,周向被碾压出 6 个均匀分布的非对称螺旋齿槽。轧制一圈过后,实现了轧件螺旋齿形准确良好的分齿。在成形阶段,随着模具螺旋凸棱连续逐渐地压入轧件,被挤压出的金属向两侧的型槽中流动,沿径向逐渐堆积并经过螺旋凸棱齿面的包络形成完整的螺旋齿形。此阶段中,没有出现已成形的螺旋齿形遭到再次碾压和叠皮、乱齿等缺陷。精整阶段,螺旋齿形已基本成形,模具螺旋凸棱的齿形及齿高不再发生变化。此阶段中,模具和轧件作定传

动比的啮合运动,模具螺旋凸棱对轧件的齿面进行光整,最终轧制得到精度较高的螺杆阴转子。

3 轧制试验

为了验证定轴横轧螺杆阴转子工艺的可行性,在实验室 H630 轧机上进行螺杆阴转子定轴横轧的轧制试验,轧机及模具如图 7 所示。试验中轧辊转速恒定, $n = 6 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。轧件试验材料选用 45 号钢,轧制温度 $t = 1150^\circ\text{C}$,材料的热膨胀系数为 1.01,冷态下坯料直径选取为 $d_0 = 41 \text{ mm}$,轧制得到的热态下的试验样件如图 8 所示。为了便于观察实轧轧件端面齿形的成形情况,对轧件进行线切割处理,切割后的轧件横截面齿形如图 9 所示,截面中的“横纹”为线切割所造成的。从图 8 中可以看出,成形轧件的周向均匀地分布着 6 个非对称的螺旋齿形,无错齿、乱齿的现象产生,非对称齿廓形状清晰,基本与设计要求相符。

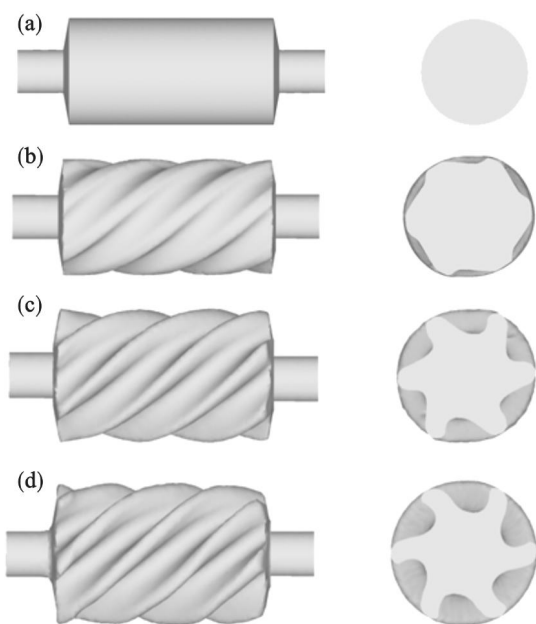


图 5 定轴横轧螺杆阴转子成形过程

Fig. 5 Rolling process of the driven rotor with fixed cross rolling

(a) — 初始阶段; (b) — 分齿阶段;
(c) — 成形阶段; (d) — 精整阶段。

从上述轧制过程可以看出,螺杆转子螺旋齿形的轧制成形是不同于楔横轧成形阶梯轴类件的。楔横轧成形阶梯轴类件时,模具楔形的凸起使得轧件上对应处的金属被径向压缩,同时模具的楔形会始终挤压轧件的成形面,使轧件产生轴向的延伸。从螺旋齿形成形的纵截面(图 6)中可以看出,模具螺旋凸棱的前侧并未与成形的螺旋齿形相接触。定轴横轧螺杆阴转子属于变传动比啮合下的自由分度轧制,轧件主要发生径向压缩和压出金属沿径向向齿高方向的堆积。

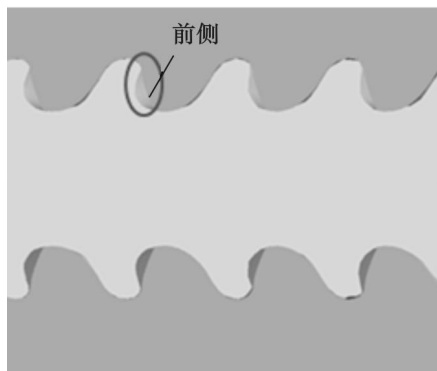


图 6 轧件纵截面

Fig. 6 Longitudinal section of workpiece teeth

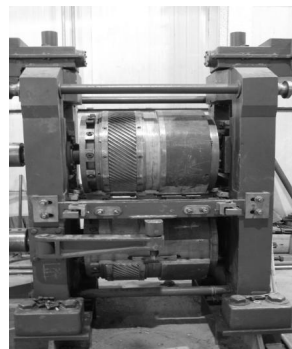


图 7 轧制模具

Fig. 7 Rolling tool



图 8 热态的试验轧件

Fig. 8 Thermal workpiece

轧制工艺中,模具螺旋凸棱最大外径的齿顶处成形出轧件螺旋齿形的齿根部分,理论上轧件螺旋齿形的齿根圆尺寸可以得到较好的保证。通过测量得轧件的齿根圆外径为 30 mm,与设计尺寸相符,也证实了这一点,因此螺旋齿形齿高的堆积情况,通过测量齿顶圆外径就可以得到。

在成形的螺旋齿形部分,选取 5 个平行于横截面、相互间隔 20 mm 均匀分布的测量面 a, b, c, d, e ,每个测量面上,对周向均匀分布的三对齿形的测量分别记作测量点 1, 2, 3。每个测量点处进

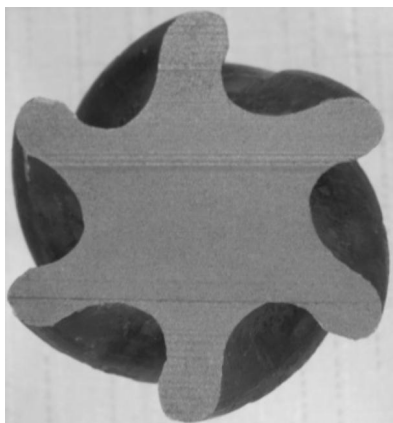


图 9 轧件横截面齿形
Fig. 9 Cross section of workpiece teeth

行多次齿顶圆外径的测量,取平均值后作为该点的测定值,得到的非对称螺旋齿形齿高的变化曲线如图 10 所示. 螺旋齿形的理论齿高为 12.45 mm,从图中可以看出,沿轴向方向,成形的轧件螺旋齿形的齿高比较均匀,基本达到了所需的尺寸要求. 两侧的螺旋齿形填充也较饱满,齿高堆起效果良好. 总体来说,轧件螺旋齿形的齿高相对误差不超过 0.32%,表明本工艺基本实现了螺旋升角为 $45^{\circ}20'$,齿高比例达 45.5% 的非对称螺旋齿形的良好成形.

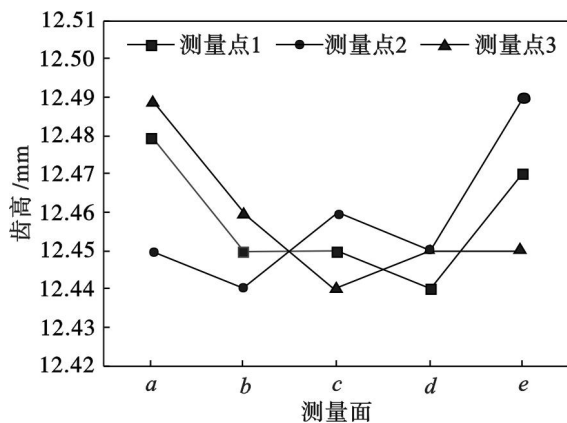


图 10 齿高曲线
Fig. 10 Curves of tooth height

定轴横轧螺杆转子工艺主要用于螺杆转子的制坯,成形的轧件外表面本身就预留有少量的加工余量,只要合理安排加工余量,就可以在后续的精加工中,在尽量少切除材料的情况下剔除本工艺的成形误差,因此本文提出的近净成形螺杆转子的工艺是可行的. 定轴横轧螺杆转子的塑性成形工艺,每分钟可生产 3~6 个螺杆转子毛坯,这使得螺杆转子的生产效率相较现有的切削工艺大幅度提高,材料利用率可以提高 25% 甚至更多,具有一定的工业应用价值,对提升我国螺杆压缩

机的市场竞争力有着重要意义.

4 结 论

1) 定轴横轧工艺将带有非对称螺旋齿形的螺杆转子直接成形,显著提高了螺杆转子的生产效率,材料利用率可以提升 25% 甚至更多,实现了螺杆转子的少、无切削加工.

2) 定轴横轧螺杆阴转子是一种端面齿形传动比啮合下的自由分度轧制,成形机理不同于轧制阶梯轴类件,轧件的变形主要是径向的压缩及碾压出的金属沿径向齿高方向的堆积.

3) 通过有限元模拟与实轧试验相结合的方法证实了定轴横轧螺杆阴转子的工艺是可行的. 轧制得到的试验样件的非对称螺旋齿形实现了良好的分度成形,无错齿、乱齿现象发生;轧件的齿形饱满,非对称齿廓清晰. 对齿高的测量表明轧件的成形尺寸基本满足了设计要求.

参考文献:

- [1] 钱家祥. 2012 年压缩机行业经济运行及 2013 年形势预测 [J]. 通用机械, 2013(1): 20-21.
(Qian Jia-xiang. Performance on compressor industry in 2012 and prediction of situation in 2013 [J]. *General Machinery*, 2013(1): 20-21.)
- [2] Stosic N, Smith I K, Kovacevic A. Geometry of screw compressor rotors and their tools [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering*, 2011, 12(4): 310-326.
- [3] Gontarz A, Pater Z, Weronki W. Head forging aspects of new forming process of screw spike [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153/154: 736-740.
- [4] Pater Z, Gontarz A, Weronki W. New method of thread rolling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153/154: 722-728.
- [5] Domblesky J P, Feng F. A parametric study of process parameters in external thread rolling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 121(2/3): 341-349.
- [6] Pater Z, Gontarz A, Tofil A. Analysis of the cross-wedge rolling process of toothed shafts made from 2618 aluminium alloy [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Science*, 2011, 16(2): 162-166.
- [7] 闫华军, 刘晋平, 胡正寰, 等. 楔横轧梯形螺纹轴成形机理 [J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(6): 701-706.
(Yan Hua-jun, Liu Jin-ping, Hu Zheng-huan, et al. Forming mechanism of trapezoidal thread shafts in cross wedge rolling [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2012, 34(6): 701-706.)
- [8] Kao Y, Cheng H, She C. Development of an integrated CAD/CAE/CAM system on taper-tipped thread-rolling die-plates [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177(1/2/3): 98-103.