工程科学学报,第38卷,第8期:1168-1174,2016年8月

Chinese Journal of Engineering , Vol. 38 , No. 8: 1168–1174 , August 2016 DOI: 10.13374/j.issn2095–9389.2016.08.017; http://journals.ustb.edu.cn

楔横轧反楔堆轧改善空心零件过渡轴肩的壁厚减薄

杨翠苹[∞],张康生,胡正寰

北京科技大学机械工程学院,北京 100083 凶 通信作者,E-mail: yangep@me.ustb.edu.cn

摘 要 楔横轧随形轧制空心零件在过渡轴肩位置会产生壁厚减薄 降低零件的力学强度 改善轴肩的壁厚状况是必须解决 的问题.本文基于有限元模拟方法 揭示空心零件成形时壁厚减薄的产生原因 提出采用楔横轧反楔堆轧改善轴肩壁厚的成 形方法 分析反楔堆轧增加轴肩壁厚的主要影响因素 ,从而获得轴肩壁厚增厚的成形方法和最佳条件 ,实现了楔横轧随形轧 制空心零件轴肩位置的显著增厚.通过轧制试验 ,验证了有限元模拟分析模型的可靠性. 关键词 楔横轧;空心零件;壁厚;反楔;有限元法 分类号 TG335.19

Improving the wall thinning of the transition shoulder with anti-wedge upset rolling in cross wedge rolling hollow parts

YANG Cui-ping[™] , ZHANG Kang-sheng , HU Zheng-huan

School of Mechanical Engineering , University of Science and Technology Beijing , Beijing 100083 , China ⊠ Corresponding author , E-mail: yangcp@me.ustb.edu.cn

ABSTRACT Wall thinning occurs at transition shoulders in cross wedge rolling (CWR) hollow parts without a mandrel, which will reduce the mechanical strength of the parts, so improving the wall thickness of the shoulder must be resolved. Based on finite element simulations, the cause of wall thinning during the forming process is revealed. A forming method of the anti-wedge upset rolling is proposed to improve the wall thickness of the shoulder, main factors that affect the increase of wall thickness are analyzed, the method of increasing wall thickness and the optimum conditions are obtained, so that a significant increase in wall thickness of the shoulder is achieved for cross wedge rolling hollow parts. The finite element model is validated by a rolling experiment. **KEY WORDS** cross wedge rolling; hollow parts; wall thickness; anti-wedge; finite element method

楔横轧工艺是一种高效的轴类零件成形工艺,因 生产效率高、节约材料、零件成形精度高等诸多优点, 在生产实心轴类零件毛坯上具有明显的优势,因此在 轴类零件毛坯的生产中得到了大量的推广和应用^[1]. 楔橫轧空心轴的研究和应用比实心轴相对落后,但随 着汽车轻量化的发展,对空心零件的需求增加,采用楔 横轧成形空心轴类零件日益得到关注. 楔横轧空心轴 避免了实心轴容易出现的心部缺陷问题,但空心件在 轧制过程中由于径向抵抗变形能力较小,容易压扁,因 此其轧制过程的建立要更加困难,加工界限也比较窄. 张康生、梁继才等^[2→]对楔横轧空心零件的稳定轧制 条件进行了较早的研究. Neugebauer 等^[4→]介绍了楔 横轧空心轴的成形工艺,展示了工艺参数对轧制极限 和轧制力的影响. Bartnicki 和 Pater^[6→]分析了模具工 艺参数对成形稳定性的影响,认为三辊轧制空心零件 有更好的稳定性. Urankar 等^[8→]研究了空心零件的成 形界限,引入了量纲一的参数预测失效条件,并建立了 临界摩擦模型,研究了临界摩擦和工艺参数的关系. 燕山大学基于有限元模拟方法研究了三辊楔横轧空心 件的成形机理,并对带芯棒轧制和不带芯棒轧制进行

收稿日期: 2016-03-29

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

了比较分析^[10-11].近年来北京科技大学通过对楔横轧 空心零件进行研究,将楔横轧带芯棒轧制空心零件工 艺成功地应用于载重汽车空心轴头的生产^[12-13].对于 无芯棒空心轴轧制,空心轴的壁厚变化不稳定,金属流 动和壁厚变化规律也比较复杂,控制壁厚变化是空心 轴轧制的一个难题.尤其在轧制轧件由大直径向小直 径过渡的轴肩位置壁厚出现明显减薄,直接降低空心 轴的承载能力,甚至使空心轴不能达到使用要求,制约 了楔横轧空心轴的生产应用,因此解决楔横轧空心轴 轴肩壁厚减薄问题尤为必要.本文采用 DEFORM-3D 模拟软件,研究楔横轧空心轴轴肩壁厚减薄的原因,并 提出解决方案.

1 楔横轧空心零件有限元模型

1.1 轧件和模具的几何模型

图 1 显示的空心零件, 轧件的最大外径为 ϕ 45 mm, 壁厚为6 mm. 轧件的内壁随外壁的形状变 化, 呈现"随形"的效果. 通常采用的楔横轧成形方法 是正楔轧制,简称正轧,其成形的示意图如图 2 所示: 模具展宽方向与轧件金属的轴向流动方向相同,模具 楔由中间向两侧逐渐展开,将空心棒料轧制成空心轴 类零件. 在没有特别说明的情况下,通常的楔横轧成 形都是正楔轧制. 正轧模具展开图如图 3 所示, 成形 角为 α = 25°, 展宽角为 β = 5°. 随着模具楔向两侧逐 渐展宽, 轧件外壁在模具孔型的作用下被径向压缩,内 壁随着外壁的形状向收缩, 同时轴向两侧延伸,将轧件 轧制成壁厚近似相等的空心阶梯轴.



图 1 轧件的几何模型 Fig. 1 Geometric model of workpieces

1.2 有限元模型

模拟实验均为热轧条件,楔横轧模具产生的弹性 变形很小 将模具和导板视为刚性体,也就是认为其在 实验中不产生变形. 轧件视为理想刚塑性体,轧件材 料是45 号钢,轧制温度为1000 ℃,轧制过程中轧件在 高温状态所发生的变形几乎全部为塑性变形,故只考



图 2 正轧成形的示意图 Fig. 2 Sketch of rolling with the normal wedge

虑轧件的塑性变形而忽略其弹性变形 视为刚塑性体. 忽略轧件与环境的热交换以及轧件与模具的热传导作 用,认为在整个轧制过程中模具和轧件的温度是恒定 的.定义摩擦为剪切摩擦,根据轧辊的转速10r•min⁻¹ 和单元的大小,设定模拟的时间步长.成形件是对称 的模拟仿真采用对称面施加约束的方法对轧件的一 半进行研究,这样既不影响成形效果,又可以节省大量 时间.网格重划分启动条件是当网格畸变量达到最小 边长的0.7倍时,软件将自动启动重划分功能.建立 的有限元模型如图4所示.



图 3 楔横轧模具图 Fig. 3 Drawing of the normal cross wedge rolling tool

2 空心轧件过渡轴肩的壁厚减薄

2.1 有限元模拟结果

图 5 显示了楔横轧正轧空心零件的模拟仿真结 果,矩形框内的部分是轧件的料头,与轧件形状和尺寸 无关.本文因为采用了对称轧制,轧件只显示了右边 的一半,左端是轧件的对称中心,楔左侧是轧件内侧, 楔右侧是轧件外侧.如图 5 所示,轧制过程中内壁随 外壁向内收缩,呈现"随形"的特征.壁厚随压下量增 加稍有增加,使得轧件小直径位置的壁厚增加,这种壁 厚变化趋势对于减轻空心零件的重量,提高其承载能 力是有利的.但是,在最大直径向小直径过渡的轴肩 位置出现了显著的壁厚减薄.轧件原始壁厚为6 mm, 轧后轴肩最薄位置壁厚为4.7 mm 左右,减薄率为



图 4 楔横轧空心零件有限元模型 Fig. 4 Finite element model of CWR hollow workpieces

21.67%. 空心轴通常工作在复杂重载的工作条件下, 这种局部的壁厚减薄显著降低了轧件的抗弯和抗扭 能力.





図3 快換れ主心令計候が結末 Fig.5 Simulation result of CWR hollow workpieces

2.2 试验验证

在实验室的 H630 楔横轧机上,进行了正轧空心 零件的轧制试验,试验采用与有限元模拟一致的轧制 条件,得到的轧件如图 6 所示. 轧件剖面图显示的壁 厚变化与有限元模拟是一致的 随着压下量的增加 ,壁 厚有所增加,但是在轧件的轴肩位置 P 处出现了显著 的壁厚减薄,最薄的壁厚为 4.62 mm ,与有限元模拟结 果接近. 轧制试验证实本文建立的有限元模型是可 靠的.



图 6 正轧试验轧件 Fig.6 Experiment workpiece of normal rolling

2.3 空心轧件轴肩壁厚减薄原因

追踪空心零件的成形过程,发现这种壁厚减薄现 象的出现,始于成形过程的楔入阶段.

图7显示轧件正轧楔入时刻的应力场情况.此 时 在模具楔尖的作用下 轧件上下变形区——"V"形 区域附近发生变形."V"形区中部径向应力主要是压 应力,由接触表面向内壁逐渐减小,"V"形区两侧的轴 肩有较小的拉应力.周向应力随"V"形区形状压应力 由外壁表面向内壁逐渐减小.轴向应力内外差别显 著,由外壁表面显著的压应力过渡到内表面显著的拉 应力.因此轧件"V"形变形区域的应力特征是:由于 被模具压缩,轧件与模具接触的外壁附近是压应力. 被压缩金属的轴向流动,带动内壁变形,从而内壁附近 产生拉应力.

图8显示轧件正轧楔入时刻的应变场情况. 在楔 尖的压缩作用下,径向应变在楔尖位置的"V"形区底 部由外到内都是压缩变形,带动两侧轴肩位置被向内 拉伸. 轧件周向被压缩、直径减小,使得周向斜楔作用 区域都是压缩应变. 而轴向则由于径向和周向压缩变 形产生拉伸变形 轴肩顶部位置因金属的轴向流动受 阻而被压缩. 综上所述 根据体积不变原理,轧件在楔 尖位置由于径向和周向被压缩,轴向被拉伸而发生壁 厚减薄.

图 9 是轧件两个不同阶段的轴向位移分布. 图 9(a) 是楔入阶段的情况,以楔入位置为界,金属向楔 两侧流动,尤其在轧件内壁附近趋势更明显.楔入位置 内侧 A 处,由于没有邻近的金属对其进行补充,壁厚减 薄明显.楔入位置外侧 B 处,轧件展宽方向与金属轴向 流动方向一致,且内壁附近的金属轴向位移显著的大于 外壁,使楔入过程减薄的壁厚有金属补充,所以该位置 的壁厚减薄不明显.图 9(b)是轧件展宽过程轧件的轴 向位移分布,随着轧件的轴向展宽,轧件外侧由于内壁 金属的轴向流动显著大于外壁,使内壁附近金属不断地 对 C 处进行补充,壁厚出现增加的趋势.



图 7 楔入时刻的应力场. (a) 径向应力; (b) 周向应力; (c) 轴向应力 Fig. 7 Stress fields in the knifing stage: (a) radial stress; (b) circumferential stress; (c) axial stress



图 8 楔入时刻的应变场. (a) 径向应变; (b) 周向应变; (c) 轴向应变 Fig. 8 Strain fields in the knifing stage: (a) radial strain; (b) circumferential strain; (c) axial strain



 ${\bf Fig.\,9}$ $% ({\bf Signa})$ Axial displacement distribution: (a) knifing stage; (b) stretching stage

通过上述分析可知: 楔横轧成形空心零件时 在楔

入过程中由于楔尖位置被轴向拉伸而发生壁厚减薄,

楔内侧轴肩位置因为没有邻近的金属能补充到这个位 置而发生壁厚减薄现象,而外侧轴肩则因为轧件展宽 方向与金属轴向流动方向一致,内壁的金属补充到轴 肩位置使壁厚减薄改善.

3 反楔成形增加过渡轴肩壁厚

3.1 采用反楔工艺改善轴肩壁厚

空心零件轴肩位置壁厚减薄,会显著降低空心零件的力学强度,导致零件不能满足使用要求.避免轴 肩壁厚减薄,甚至实现一定程度的增厚对提高零件的 强度是十分必要的.改变楔横轧成形的工艺参数能减 少减薄量,但是轴肩壁厚减薄的机理决定了这种工艺 条件下,减薄是无法避免的,要有效地解决轴肩壁厚减 薄问题必须改善成形工艺.

根据空心零件金属轴向流动规律,在减薄的轴肩 位置设计反楔堆轧的轧制工艺,简称反轧.希望由此 改变轧件金属的轴向流动,改善轴肩壁厚.图10是反 楔堆轧示意图,模具楔由轧件外侧向内侧展宽.通常 情况下,反楔堆轧对轧件成形是不利的,它会阻碍金属 的轴向流动而增加横向流动趋势,使轧件旋转条件变 差,所以在楔横轧实心零件中很少采用.

3.2 反楔成形空心零件的模拟结果

通过有限元模拟,得到反楔堆轧成形轴肩的应变 场分布,如图11所示.径向应变除表层有较小的压应



图 10 反楔堆轧示意图 Fig. 10 Sketch of upset rolling with an anti-wedge

变以外,以拉应变为主,越向内壁拉应变的数值越大. 周向应变主要是压应变,内壁的压应变较大. 轴向应 变大部分是拉应变,只有反楔成形的轴肩位置出现轴 向压应变,显示反楔堆轧使金属向该轴肩位置流动,从 而在该处金属堆积压缩. 应变分布显示:反楔堆轧空 心零件的变形特征与通常正轧的径向压缩、轴向延伸 的变形不同,由于反楔向轧件内侧(对称中心侧)展 宽,金属向内侧轴向流动受到阻碍,轧件的主要变形是 周向收缩时金属向内壁流动,产生径向和轴向拉伸 变形.



图 11 反楔堆轧成形轴肩的应变场. (a) 径向应变; (b) 周向应变; (c) 轴向应变 Fig. 11 Strain fields of the shaft shoulder in upset rolling: (a) radial strain; (b) circumferential strain; (c) axial strain

图 12 显示反楔成形轴肩的轴向位移分布. 在反 楔的作用下,金属向轴肩位置流动,内壁的流动趋势显 著大于外壁. 轴向位移分布的结果证实反楔堆轧成形 工艺成功地改变空心零件金属的轴向流动方向,使轴 肩位置的金属得到了补充,从而实现轧件轴肩的壁厚 增加.



图 12 反楔堆轧轴向位移分布

Fig. 12 Axial displacement distribution in upset rolling

3.3 反楔成形轴肩壁厚的主要影响因素

确定反楔成形轴肩壁厚的主要影响因素,选择合适的参数范围有利于获得更好的成形效果.通过一系列的参数试验,得到影响轴肩壁厚的主要因素.

图 13(a) 展示轧制压下量对壁厚增加率的影响.



随着压下量的增加,壁厚增加率先增加后减小. 壁厚 增加程度取决于两个方面的效果:一方面随着压下量 的增加,釉肩壁厚起楔时减薄量增加;另一方面,压下 量越大,向轴肩部位补充的金属越多. 首先,随着压下 量的增加,补充的金属增加,壁厚增厚程度是增加的趋 势,但当压下量较大时,起楔过程壁厚减薄显著,轴肩 区域增加,补充的金属不能对整体区域进行有效的补 充,导致增厚程度下降.

图 13(b) 展示反楔轧制长度对壁厚增加率的影响. 随着轧制长度的增加 ,起初壁厚增加率显著上升, 在轧制长度在 35~55 mm 之间增加较小,当轧制长度 大于 55 mm 后,壁厚增加率开始下降. 这是因为在反 楔迫使金属向轴肩位置堆料的过程中,随着轧制长度 的增加,堆料阻力越来越大,当堆料阻力大于金属轴向 反向流动的阻力后,金属向轧件端部流动,导致壁厚增 加率减小.





压下量和反楔轧制长度是影响轴肩壁厚的主要因 素 其余工艺参数的影响较小. 在模具设计时,主要考 虑压下量的大小,确定合适的轧制长度,取得最大的轴 肩增厚效果.

3.4 楔横轧反楔成形空心零件实例

针对空心零件实例,设计反楔和正楔的组合模 具,实现该零件的楔横轧成形.模具展开图如图 14 所示.成形过程分为两个步骤:首先采用反楔堆轧将 轴肩容易发生减薄的部分成形,为保证轴肩壁厚增 加率又节省模具辊面长度,确定轧制长度为 40 mm, $\alpha_1 = 35° \beta_1 = 4°;$ 之后采用正楔轧制,将轧件两侧其 余部位成形, $\alpha_2 = 25° \beta_2 = 5°$.由于轧件最小直径位 置壁厚增加显著且厚度不均匀,在轧制过程中采用 带芯棒轧制,芯棒直径为 ϕ 15 mm,从而实现对轧件 最小直径位置的壁厚控制,改善成形质量.图 15 是 该成形方案得到的轧件.与图 5 通常采用的正轧成 形方法比较,采用反楔和正楔的组合模具,带芯棒轧 制的成形方法,轧件的轴肩壁厚增加 2.38 mm,壁厚 增加近40%. 与本身的原始壁厚比较,壁厚增加 18%,可见采用反楔堆轧改善壁厚效果显著. 另外, 采用芯棒较好地控制轧件最小直径的尺寸,保证轧 件在该位置壁厚均匀.



图 14 反楔和正楔组合模具图



4 结论

(1) 楔横轧空心零件过渡轴肩壁厚减薄的产生原因是: 楔入阶段在楔尖位置由于径向和周向被压缩, 轴向被拉伸而发生壁厚减薄, 内侧轴肩由于没有邻近的金属对其进行补充, 壁厚减薄明显.



图 15 采用反正楔组合模具的模拟结果 Fig. 15 Simulation result with the combined tool

(2) 采用反楔堆轧工艺,金属在反楔的作用下向 轴肩位置流动,内壁的轴向流动趋势显著大于外壁,使 轴肩位置的金属得到补充,从而实现轧件轴肩的壁厚 增加.

(3) 压下量和轧制长度对反楔轧制轴肩壁厚增厚 影响较大,为保证轴肩壁厚增加率又节省模具辊面长 度,确定反楔轧制长度为40mm,壁厚增加18%.

(4) 经轧制试验验证,本文的有限元模型是可 靠的.

参考文献

- [1] Hu Z H, Zhang K S, Wang B Y, et al. The Forming Technology and Simulation of Parts with Cross Wedge Rolling. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004
 (胡正寰,张康生,王宝雨,等. 楔横轧零件成形技术与模拟 仿真. 北京: 冶金工业出版社, 2004)
- [2] Zhang K S, Liu J P, Wang B Y, et al. Analysis on stable rolling condition of hollow workpiece rolled by cross wedge rolling. J Univ Sci Technol Beijing, 2001, 23(2): 155
 (张康生,刘晋平,王宝雨,等. 楔横轧空心件稳定轧制条件分析. 北京科技大学学报,2001,23(2):155)
- [3] Liang J C , Ren G S , Bai Z B , et al. Experimental study of flat press and non-stability about rolling of hollow parts. J Jilin Univ Technol , 1994 , 24(4): 78

(梁继才,任广生,白志斌,等. 空心件楔横轧压扁失稳的试 验研究. 吉林工业大学学报,1994,24(4):78)

- [4] Neugebauer R , Kolbe M , Glass R. New warm forming processes to produce hollow shafts. J Mater Process Technol , 2001 , 119 (1 -3): 277
- [5] Neugebauer R , Glass R , Kolbe M , et al. Optimisation of processing routes for cross rolling and spin extrusion. J Mater Process Technol , 2002 ,125 – 126: 856
- [6] Bartnicki J , Pater Z. The aspects of stability in cross-wedge rolling processes of hollowed shafts. J Mater Process Technol , 2004 ,155 – 156: 1867
- [7] Bartnicki J , Pater Z. Numerical simulation of three-rolls crosswedge rolling of hollowed shaft. J Mater Process Technol , 2005 , 164–165: 1154
- [8] Urankar S , Lovell M , Morrow C , et al. Establishment of failure conditions for the cross-wedge rolling of hollow shafts. J Mater Process Technol , 2006 , 177(1): 545
- [9] Urankar S , Lovell M , Morrow C , et al. Development of a critical friction model for cross wedge rolling hollow shafts. J Mater Process Technol , 2006 , 177(1): 539
- [10] Chen E P , Yang Y M , Wang M T , et al. Compare and analysis of the forming process of hollow part with mandrel and without mandrel by 3-roll cross wedge rolling. *J Plast Eng* , 2008 , 15 (4): 81

(陈恩平,杨永明,王敏婷,等.空心件带芯棒轧制与空心轧 制成形过程的比较分析.塑性工程学报,2008,15(4):81)

- [11] Du F S, Wang F X, Yang Y, et al. Study on compacting mechanism of hollow workpiece by 3-roll cross wedge rolling. *China Mech Eng*, 2005, 16(24): 2242 (杜凤山,汪飞雪,杨勇,等. 三辊楔横轧空心件成形机理的研究. 中国机械工程, 2005, 16(24): 2242)
- [12] Ding W, Yang C P, Zhang K S, et al. Thermomechanical coupled numerical simulation on cross wedge rolling of hollow shaft parts with equal inner diameter. J Univ Sci Technol Beijing, 2010, 32(4): 525

(丁韡,杨翠苹,张康生,等. 楔横轧等内径空心轴的热力耦 合数值模拟. 北京科技大学学报,2010,32(4):525)

[13] Yang C P , Hu Z H. Research on the ovality of hollow shafts in cross wedge rolling with mandrel. Int J Adv Manuf Technol , 2016 , 83(1-4): 67