

应用技术

输出轴楔横轧成形空心缺陷的研究

郭永强, 任伟伟, 徐春国, 周鹤, 丁俊

(北京机电研究所, 北京 100083)

摘要: 针对输出轴轧件出现的空心缺陷现象, 采用有限元与实际轧制相结合的方式, 对楔横轧轧件成形过程中应力应变场进行了分析, 发现轧制过程中轴向金属运动阻力太大, 是引起工件出现空心缺陷的原因。通过将二次轧制模的基圆高度整体降低, 减小了金属轴向流动的阻力, 从而避免了轧件空心缺陷的产生。

关键词: 楔横轧; 内部空心缺陷; 输出轴; 数值模拟

中图分类号: TG335 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2012)04-0044-05

Study on Interior Hollow Defect in Cross Wedge Rolling Process of Output Shaft

GUO Yong-qiang, REN Wei-wei, XU Chun-guo, ZHOU He, DING Jun

(Beijing Research Institute of Mechanical and Electrical Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at interior hollow defect in the output shaft forging process, using the finite element method combining with the actual rolling, the cause of workpiece interior hollow defect that the axial metal movement resistance is too large in the process of rolling was obtained by the analysis of internal stress and strain fields. Through overall decreasing base circle height of the second forming die, the resistance of the metal axial flow was reduced to avoid the generation of rolling hollow defect.

Key words: cross-wedge rolling; interior hollow defect; output shaft; numerical simulation

近年来在“绿色节能”、“近净成形”、“高效自动化”锻造理念的影响下, 耗能、耗材的锻造方式逐渐被节能节材的新成形工艺代替。输出轴是变速箱中一个重要部件, 材料和力学性能有着严格的要求。随着需求量的增长和对质量要求的提高, 对输出轴毛坯工艺要求也越来越高。

文中介绍的输出轴成形新工艺(楔横轧制坯、顶镦和切飞边)如图1所示, 采用楔横轧制坯生产效率为12件/min, 实现了锻件生产高效化, 终锻件材料利用率达95%, 锻件成形精度高。在便捷高效的输

出轴成形工艺的应用过程中, 楔横轧制坯出现了轧件中心内部空洞缺陷, 这也是影响楔横轧成形工艺推广的一个重要原因。目前, 楔横轧技术的研究也主要集中在精确成形和缺陷预防两个方面, 特别是轧件内部空心缺陷的产生机理和预防。近年来, 数值模拟技术是研究楔横轧塑性变形过程的有效手段, 模拟研究与实验研究相结合成为塑性成形技术研究的可靠方法。

文中在已有理论研究基础上, 结合在楔横轧对称轧制实际应用中出现的心空缺陷问题, 采用现场

收稿日期: 2012-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075024; 50675014)

作者简介: 郭永强(1984—), 男, 山东临朐人, 硕士, 主要研究方向为精密塑性成形, 曾获中国机械工业科学技术奖二等奖。



图1 输出轴成形工艺

Fig. 1 The forming process of output shaft

调试与有限元分析相结合的方法分析了空心缺陷产生的原因,提出了合理的解决方案,获得了模具设计经验。

1 理论概述

楔横轧工艺应用中的一个重要问题就是轧件的曼乃斯曼效应。它使轧件内部金属在变形过程中产生疏松进而发展形成孔洞,一般在轧件的中心部位出现,产生中心开裂,即空心缺陷。前苏联学者斯米尔诺夫(Sminov)研究了横轧轧件中这些缺陷的产生原因,他认为轴心处于三向拉伸应力状态而发生破坏,采里柯夫等认为内部缺陷是由于轧件变形过程中过大的拉应力累积造成的,他们发现随着工件的旋转,变形工件中心区的拉应力增加,这可能引起中心孔腔的形成和进一步扩展^[1]。团野敦、田中利秋、栗野泰吉等进一步发现孔腔的大小随着工件旋转而增加,并认为孔腔是由轧件中心区的交变拉应力和剪应变所导致的^[2]。齐藤好弘等用软钢和蜡泥塑料模拟了楔横轧轧制过程,得到的结论是随着材料的回转,轧件外周部分和轴心部分产生较大的应变,压缩率越大,应变向轴心部分的累积越显著^[3]。Qiang Li等采用实际轧制实验和有限元方法,对楔横轧中心材料空洞的产生进行了分析,指出空洞是在楔入段材料内部最大拉应力和剪切应力的联合作用下生成。成形角越大,展宽角越小,断面收缩率越小,就越有利于避免空洞的生成。空洞的扩展主要在展宽和精整阶段,展宽角大、断面缩减率大可加速空洞的扩展^[4]。任广升等建立了楔横轧中心开裂的上限法模型,指出楔横轧变形可分为正常流动状态和开裂流动状态,确定了流动状态与工艺参数的关

系,指出断面缩减率大于15%,有利于提高锻件内在质量^[5]。曹芳等采用试验和数值模拟的方法,研究了交变次数对楔横轧件中心疏松的影响,指出交变次数是轧件中心发生破坏的重要影响条件^[6]。刘桂华等提出轧件心部平均应力 $\sigma_m > 0$,其应变状态为两向拉伸,一向压缩变形。和轧件其它部位相比,心部的受力和变形状态降低了轧件的塑性,限制了材料成形能力的发挥,在应变基本相同的情况下,轧件心部更容易产生破坏^[7]。娄依志等针对楔横轧二次楔轧比单次楔轧更容易产生内部缺陷的事实,并利用有限元法比较二次轧制与一次轧制的轧件的应力特点,分析了楔横轧轧件的内部应力应变场及其历史演变过程^[8]。任伟伟等对模具磨损规律和磨损对轧件质量影响规律的研究,揭示了模具磨损后各参数的改变对中心材料疏松的影响^[9]。陶新刚等利用DEFORM-3D有限元模拟软件模拟分析正常模具、出现心部宏观缺陷的模具、横轧模具下轧件的应力应变变化规律,认为平均应力为正是导致楔横轧出现心部宏观缺陷的主导因素^[10]。

2 轧制成形过程分析

楔横轧轧件在实际生产中产生的内部空心缺陷如图2所示,实际生产中楔横轧模具及设计如图3

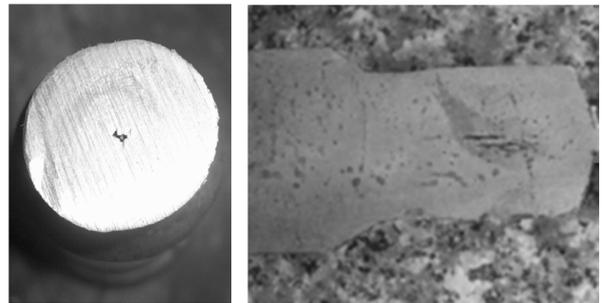


图2 楔横轧工件中的空心缺陷

Fig. 2 Interior hollow defect in cross wedge rolling workpiece

所示。输出轴楔横轧成形设计采用对称二次轧制成形,成形完成后左右轧件均出现空心现象,同时伴有横截面圆度大于1.5,轧件微弯的现象。楔横轧轧件空心缺陷产生的原因是在复杂应力作用下,轧件在塑性变形的同时产生疏松,这是一个微孔的形核、长大、聚合、形成裂纹的过程。当裂纹达到临界尺寸时,失去稳定,然后“爆破”般的发展,在轧件的中心

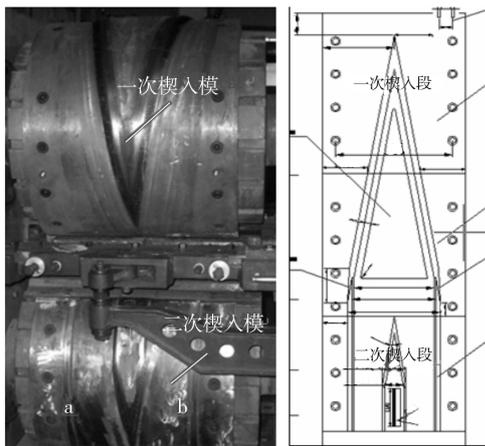


图3 楔横轧模具及设计

Fig. 3 Die and design drawings

沿着轴向宏观破坏。

在理论分析中有关曼乃斯曼效应的解释都是在简化条件下,即径向压缩量比较小,当作平面应变、小变形情况下得出的结论。关于楔横轧内部缺陷产生的机理可以利用有限元方法从内部材料在变形过程中应变应力场的分布和变形规律着手,进行深入的研究。

根据设计模具原始状态完成工件模拟,模拟结果如图4所示,轧件出现弯曲、直线度较差的现象,



图4 工件成形数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results

这与实际轧制后的工件特征基本吻合。在加装切刀模具后,有切刀螺钉孔端轧制后的轧件出现螺钉槽凸起如图5所示,这与有限元模拟的结果是一致的。通过对模具轧制中金属轴向延伸接触情况进行分析,当降低图3中a和b两处模具的基圆高度时,稍微降低a处可使其轧制后的轧件空洞消失,但b处缺陷依然存在;再次降低b处基圆高度。由于现场条件所限,造成b处基圆高度部分低于a端,结果在轧制过程最后虽然b端空洞消失,但a端出现空洞。在这2种情况下,出现空洞的一端截面呈现椭圆状,轧件微弯。上述2种情况下出现单侧缺陷的轧件剖面如图6所示。

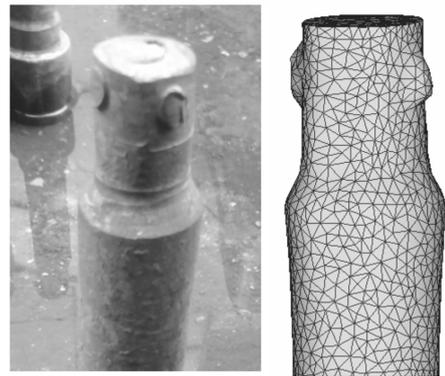


图5 模拟后端部与实际工件对比

Fig. 5 A comparison of simulation results with the actual at the end of the workpiece

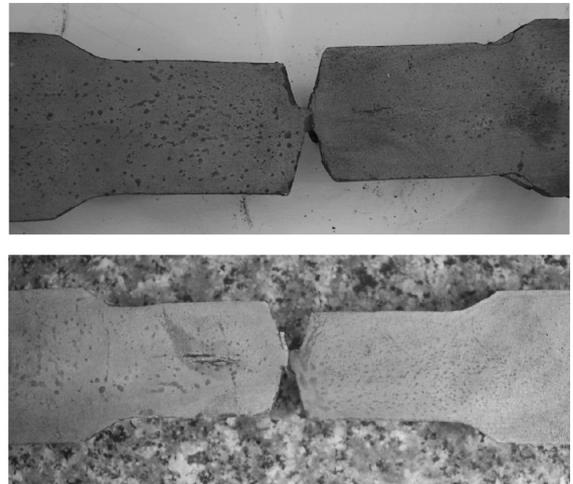


图6 单侧缺陷的轧件

Fig. 6 Unilateral defect in rolling

上述分析为解决轧件中空缺陷提供了依据,同时建立修改前轧制状态与第2次轧制模具基圆面降低0.2 mm的轧制状态的数值模拟模型,从轧件轧制受力状态对缺陷产生原因继续进行分析。

3 楔横轧件的空心缺陷产生原因及防治

楔横轧件内部空心缺陷的产生与心部金属的应力应变状态及分布密切相关,为了深入了解心部材料的受力及变形情况,通过对比及设置追踪点的方式进行分析,将修改前后轧件中心(0,0,0)设置为追踪点。

在楔横轧成形过程中,轧件心部材料的应力状态为两向拉应力,一向压应力。其中,压应力与轧件

的压缩方向相接近,2个拉伸主应力的方向接近于轧件的轴向和切向。空心缺陷产生主要发生在二次楔入段及展宽段。图7-10为二次楔入展宽段中的应力应变数据。在此次轧制过程中最大主应力是轴向应力,修改前后轴向应力变化曲线如图7所示。从图7可以看出,修改前轧件中心轴向应力大于修

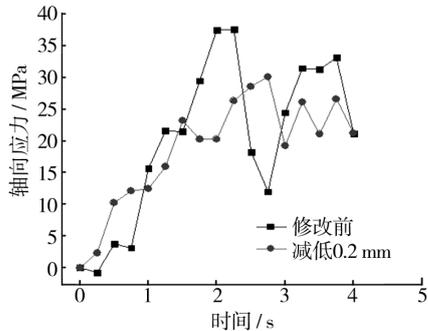


图7 修改前后轴向应力变化曲线

Fig. 7 The axial stress curve before and after modification

改后轧件的轴向应力,同时修改前轴向应力大小波动大。出现这种现象的原因是在二次楔入开始后,轧件除与楔入段接触外还与模具基圆面接触,这就增加了轴向金属流动阻力,使轴向应力变大。修改前轴向应力波动大,说明在轧制过程中轧件旋转不理想,摆动比较厉害。

修改前后应变速率的变化曲线如图8所示,应

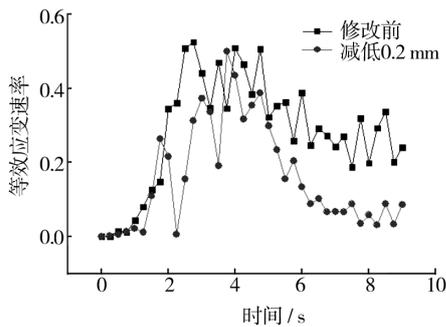


图8 修改前后应变速率

Fig. 8 Strain rate curve before and after modification

变速率是表征金属材料在塑性成形过程中变形剧烈程度的物理量,通常当金属以较低的应变速率进行塑性变形时,材料的成形能力能够得到充分发挥,表现为较好的塑性。从应变速率变化曲线上可以看出当二次楔入模基圆厚度降低0.2mm后坯料中心应

变速率随之变小,利于材料成形能力的发挥。文献[7]中介绍轧件心部平均应力 $\sigma_m > 0$,其应变状态为两向拉伸变形,一向压缩变形,和轧件其它部位相比,心部的受力和变形状态降低了轧件的塑性,限制了材料成形能力的发挥。修改前后平均应力曲线如图9所示,可以看出修改前后轧件心部平均应力

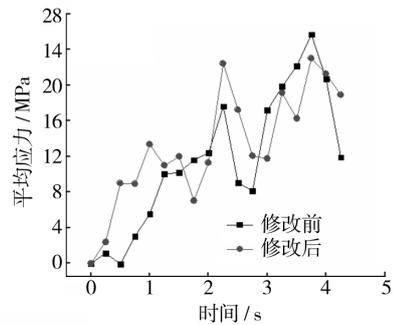


图9 修改前后平均应力曲线

Fig. 9 The mean stress curve before and after modification

$\sigma_m > 0$ 。这说明在二次轧制时轧件心部受力状态对轧制成形不利,但不是空心缺陷出现的直接原因。

修改前后应变曲线如图10所示,应变是用来描

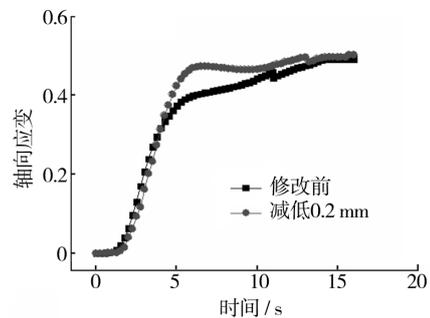


图10 修改前后应变曲线

Fig. 10 Strain curve before and after modification

述塑性变形过程中材料变形状态的重要参量。修改后的应变曲线在楔入段期间完成了总的变形压缩量,短时间内达到应变的最大值约为0.5;修改前出现心部缺陷的轧件需要很长变形时间才达到这一值,说明修改前的轧件从楔入段到展宽段一直处在不断变形状态,在交变的拉压应力下造成心部破坏,也是造成横截面圆度差出现空心缺陷的重要因素。

通过对于空心缺陷产生原因的分析发现,降低第2次轧制的基圆高度可以有效避免空心缺陷的产生。在实际轧制状态下采用如图11的方式,将二次



图 11 轧制模具垫高

Fig. 11 Elevating the mold

轧制前的模具高度垫高 0.2 mm(相当于减低二次轧制模具基圆厚度),最终解决了轧件空心缺陷的问题,获得了合格的锻件,如图 12 所示。



图 12 合格工件横截面

Fig. 12 The cross-section of the qualified workpiece

4 结语

1) 从应力应变场看,出现空心缺陷的输出轴楔横轧毛坯在轧制过程中楔入段和展宽段表现为:金属轴向应力大,波动幅度大,应变速率大,心部变形延续时间长。分析认为轧制过程中,金属轴向运动阻力太大是引起工件出现空心缺陷的原因。

2) 采用垫高二次轧制前的模具高度,相对降低二次轧制模的基圆厚度,可有效地降低金属轴向阻力,避免了轧件空心缺陷的产生。

3) 采用二次轧制模具时,轧件心部平均应力 $\sigma_m > 0$,不利于轧制成形,因此采用二次轧制模具设计时,在两次变形量、成形角、展宽角等条件不变的情况下,降低二次轧制模具基圆高度约 0.2~0.5 mm,能够提高成形性能,避免产生空心缺陷。

参考文献:

- [1] (苏)采里克夫,斯米尔诺夫. 机器制造中的横轧[M]. 天津大学机械制造系压力教研室,译. 北京:中国工业出版社,1964.
- [2] 团野敦,田中利秋,栗野泰吉. 段付き轴 3ロール式ワロスロール加工における材料流れと转造条件[J]. 塑性と加工,1976,17(182):194-201.
- [3] 齊藤好弘,東野豊之,加藤健三. 丸棒の平面ひずみ回轉壓縮におするひずみ解析[J]. 塑性と加工,1977,18(193):120-127.
- [4] LI Qiang, LOVELL M R. The Establishment of a Failure Criterion in Cross Wedge Rolling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 24(3/4): 180-189.
- [5] 任广升,张庆勇,白志斌,等. 楔横轧中心开裂研究[J]. 塑性工程学报,1999,6(4):49-53.
- [6] 曹芳,杨翠苹,张康生,等. 交变次数对楔横轧心部疏松的影响[J]. 锻压技术,2005,30(4):39-41.
- [7] 刘桂华. 楔横轧三维变形的数值模拟研究及内部缺陷预防[D]. 北京:机械科学研究院,2008.
- [8] 姜依志,张康生,胡正寰,等. 楔横轧二次轧制内部孔隙产生原因分析[J]. 塑性工程学报,2008,15(3):160-163.
- [9] 任伟伟. 模具磨损对楔横轧中心疏松的影响[D]. 北京:中国机械科学研究院,2009.
- [10] 陶新刚. 基于损伤力学的楔横轧件内部损伤开裂的研究[D]. 北京:中国机械科学研究院,2011.

(上接第 30 页)

参考文献:

- [1] 李志广. 1340 大型刮煤板铸锻复合塑性成形工艺研究[J]. 大型铸锻件,2010(2):1-4.
- [2] 高锦张. 塑性成形工艺与模具设计[M]. 北京:机械工业出版社,2007:1-294.
- [3] 中国锻压协会. 锻造工艺模拟[M]. 北京:国防工业出版社,2009:66-80.
- [4] 郝滨海. 锻造模具简明设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2007:1-387.
- [5] 汪泽波. 汽车转向节成形工艺有限元模拟[D]. 合肥:合肥工业大学,2007.