

DOI: 10.7652/xjtuxb201511018

花键轴振动挤压成形试验研究

张琦¹, 贲宁宇¹, 王聚存², 杨凯¹, 陈超¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 中航工业南方航空工业(集团)有限公司, 412002, 湖南株洲)

摘要: 针对花键轴挤压成形制造效率低、模具所受载荷大的问题,采用了一种新的振动辅助挤压成形工艺,并进行了花键轴成形试验、微观组织分析和硬度测试,揭示了成形载荷的主要影响因素及金属流动规律。试验设备为振动挤压机床,采用模数为 1.75、齿数为 10 的花键轴挤压模具对直径为 17.9 mm、材料为 AISI1045A 的棒料进行了振动挤压成形试验,模具每进给 1 mm 便回程 0.5 mm,振动频率分别取 10、15 和 20 Hz。结果表明:相比于直接挤压,振动挤压成形过程的成形力可降低将近 25%,原因是在模具回程过程中润滑油得以流入模具与坯料的接触面,重新生成油膜,从而减小了摩擦力;在试验频率范围内,成形载荷随振动频率的提高而增大;振动挤压成形花键轴具有表面质量高、成形速度快、材料流动均匀的优点,且沿轴向齿顶圆直径变化小,成形精度高;与传统的直接挤压成形相比,振动挤压成形花键轴齿型部位的硬度降低了近 10%,有利于成形。

关键词: 花键轴;振动挤压;材料流动

中图分类号: TG142;TG376.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)11-0110-06

Experimental Research on Oscillating Extrusion of Splined Shaft

ZHANG Qi¹, BEN Ningyu¹, WANG Jucun², YANG Kai¹, CHEN Chao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. AVIC South Aviation Industry Limited Corporation, Zhuzhou, Hunan 412002, China)

Abstract: In response to the problem that the conventional splined shaft extrusion method is short of efficiency and the forming force is large, this study adopted a new forming process, i. e. , oscillating cold extrusion. The forming experiments of splined shaft were performed and the microstructure and hardness were examined. An extrusion die whose module of gear is 1.75 and the number of teeth is 10 was used to form the workpiece. The workpiece is an AISI 1045A bar stock with a diameter of 17.9 mm. Each time when the die moves ahead 1 mm, it would moves back 0.5 mm. Different oscillating frequencies at 10, 15, and 20 Hz were compared. The results showed that the forming force of oscillating extrusion decreased by nearly 25% compared with conventional extrusion. The cause of friction reduction is that the lubricant film is rebuilt between the workpiece and the die during the back stroke. Comparison of the splined shafts made by oscillating extrusion and conventional extrusion shows that oscillating extrusion provides a better surface quality of the splined shaft and the material piling is reduced. The material flow in oscillating extrusion is better than that in conventional extrusion. So the change of the diameter of the addendum circle is little and the forming accuracy is high in oscillating extrusion. Hardness test showed that oscillating extrusion can decrease the hardness of splined shaft by 10%, which

收稿日期: 2015-04-20。 作者简介: 张琦(1978—),男,教授;贲宁宇(通信作者),男,硕士生。 基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2014ZX04001021);陕西省工业攻关资助项目(2014K08-34)。

网络出版时间: 2015-08-26

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150826.1117.006.html>

facilitates the formation of the spline.

Keywords: splined shaft; oscillating extrusion; material flow

传统的花键轴加工方式以切削加工为主,加工过程简单可靠,能够保证花键轴的尺寸精度,但是刀具寿命短,加工效率低,而且加工的花键轴外形具有很大的局限性^[1]。利用挤压成形工艺加工花键轴可以提高花键轴的力学性能和加工效率^[2]。在传统的花键轴挤压成形过程中,毛坯在模具中受三向压应力而使变形抗力显著增大,导致挤压模具所受的应力大,模具容易在加工过程中出现磨损,而且较大的挤压载荷也容易使花键轴产生屈曲变形,导致废品率高,因而有必要对直接挤压加工工艺进行改进,以减小成形载荷。

近年来,振动理论在机械加工领域内得到了长足的发展。振动辅助塑性加工能够大幅度降低加工过程中的变形抗力,改善加工产品的质量。随着振动利用研究的深入,振动方法已广泛应用于制造业,涉及振动摆动碾压、超声振动拉深、超声振动微成形等领域^[3-6]。将低频振动应用于花键轴的挤压成形过程,可以充分利用挤压成形效率高、成形件塑性好的优点,因此,有必要对花键轴振动挤压成形工艺进行深入研究。

1 振动挤压工艺原理

振动挤压工艺是使模具在挤压过程中以一定频率和振幅进行振动进给的一种工艺。花键轴振动挤压成形过程如图 1 所示,由模具往复运动对工件进行冷挤压轴向成形。图 1a 所示为工件的装夹过程,由夹紧装置对工件进行轴向与径向的固定。径向固定可使工件与模具对心,防止挤压过程的屈曲;轴向固定则确保工件在振动挤压过程中不会由于摩擦力的作用而随模具轴向移动。图 1b 所示为顶杆顶紧过程。振动挤压过程会导致材料沿与模具进给方向相反方向的轴向流动,而顶杆可起到控制材料轴向流动的作用,从而使材料向花键轴齿顶方向流动,保证成形精度。图 1c 所示为模具以振动的方式进行挤压成形。挤压过程中模具的时间-位移曲线示意图如图 1f 所示:模具首先向下做进给运动,进给量为 Δs_1 ,同时加入润滑油,使其自模具向工件流入,随后模具做回程运动,回程量为 Δs_2 ($\Delta s_2 < \Delta s_1$),如图 1d 所示。在模具回程过程中,润滑油得以流入模具与坯料的接触面。模具不断重复图 1c 与图 1d 两个过程,通过往复运动完成振动挤压过程。图 1e 所

示为模具与顶杆的回程过程。模具首先回程,然后顶杆再回程,这样可确保工件顺利拆卸。

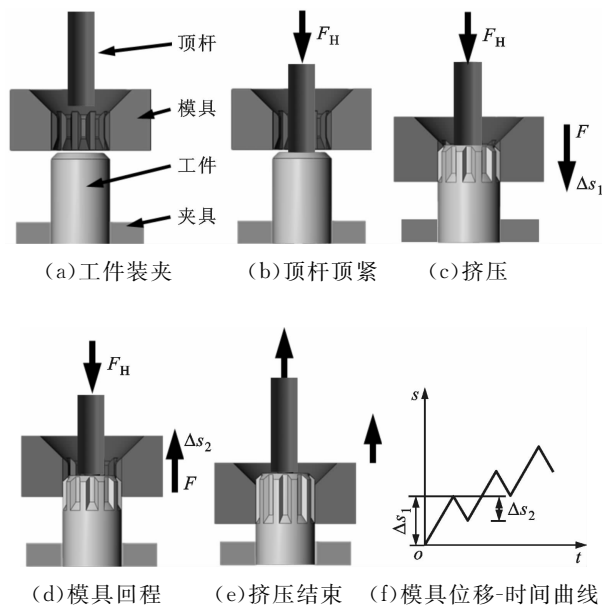


图 1 花键轴振动挤压工艺过程示意图

2 振动挤压工艺试验研究

试验所用成形设备为西安创新精密仪器研究所研制的振动挤压机床,如图 2 所示。设备由液压动力源、进给机构、夹持机构、控制系统、测量系统和成形模具构成。液压动力源配合液压缸所能提供的最大轴向作用力为 150 kN。成形工件是齿数为 10、模数为 1.75 的花键轴。试验所用坯料是直径为 17.9 mm 的 1045A 低碳钢棒料,其化学成分的质量分数为: C 0.34% ~ 0.52%; Mn 0.51% ~ 0.81%; Si 0.28% ~ 0.48%; S 0.01% ~ 0.069%; P 0.017% ~ 0.044%。模具尺寸如图 3 所示。挤压模具每进给 1 mm 后便回程 0.5 mm,进给行程与回程位移之比为 2 : 1。通过控制系统调节成形振幅与频率进行试验,并获得相应的位移-成形载荷曲线。

为了对花键轴的振动成形挤压工艺和传统直接挤压成形工艺进行比较,分别进行了这 2 种工艺的挤压成形试验。设定振动挤压过程中模具的振动频率为 10 Hz。通过测量系统采集的模具位移-成形载荷曲线如图 4 所示。从图中可知,相比于直接挤压成形,振动挤压成形过程的载荷降低了将近 25%。振动挤压成形载荷减小的原因是在模具回程过程中,润滑油得以流入模具与坯料的接触面重新

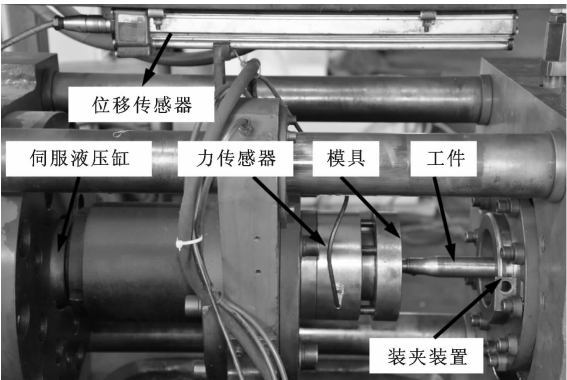


图 2 卧式振动挤压机床

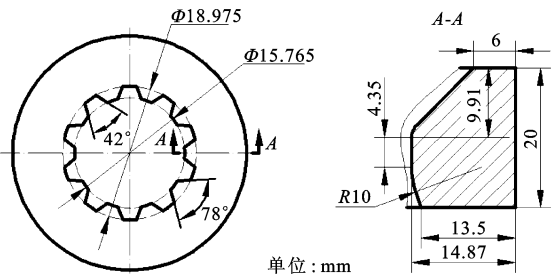


图 3 挤压模具尺寸

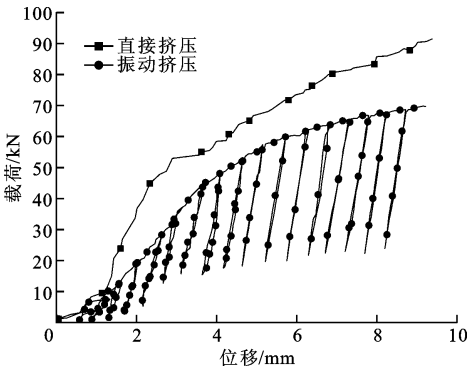


图 4 花键轴直接挤压成形与振动挤压成形的位移-载荷曲线对比

生成油膜，从而减小了摩擦力。此外，模具的往复进给使得材料得以不断回弹，而回弹的不均匀也为润滑油膜的再生成提供了条件。

对比两种不同工艺所成形的花键轴可以发现：直接挤压成形的花键轴（见图 5）表面损伤较多，粗糙度高，由于载荷较大，金属流动不均匀，导致花键轴沿轴向直径变化较大，花键轴底部金属堆积严重，存在局部墩粗现象；振动挤压成形的花键轴（见图 6）表面光顺，压痕均匀，金属流动均匀且径向直径变化较小。

花键轴沿轴向的齿顶圆直径分布如图 7 所示。纵坐标 D 为花键轴齿顶圆的直径，横坐标 l 为到花键轴顶端的距离。由图 7 可知，振动挤压成形花键

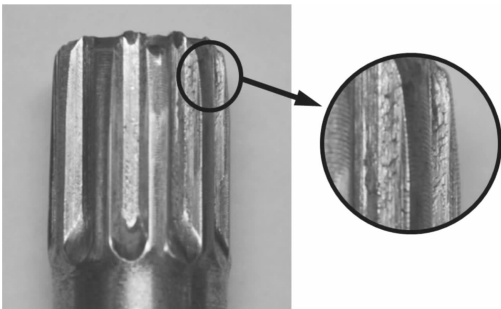


图 5 直接挤压成形的花键轴



图 6 振动挤压成形的花键轴

轴各位置的直径相差较小，表明成形均匀，而直接挤压成形的花键轴沿轴向齿顶圆直径相差较大，表明金属堆积现象严重。直接挤压成形花键轴的最大直径差为 0.45 mm，是花键轴齿顶圆直径的 2.4%，相比振动挤压成形增大了 1 倍。

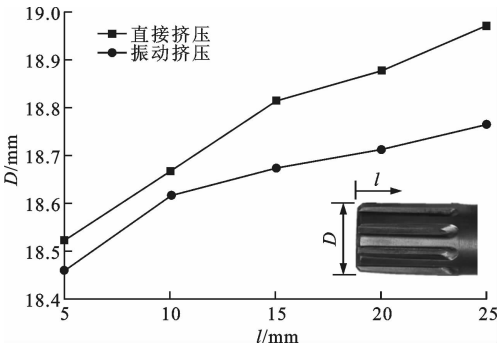


图 7 花键轴不同位置的直径分布

直接挤压成形过程中，材料随着模具的进给向后堆积，使成形载荷不断增大，极易产生如图 8 所示的工件屈曲现象。振动挤压的成形载荷显著减小，且始终维持在一定范围内，所加工的工件不但不会发生屈曲，而且成形速度快，表面质量高（见图 9）。

取 3 种常用的低频振动挤压成形频率 10、15 和 20 Hz 进行试验，获得了相应的位移-载荷曲线，如图 10 所示。由图中可以看出：在试验的频率范围内，载荷随着频率的提高而增大。产生这种现象的原因与模具回程时润滑油膜的再生成程度有关。在

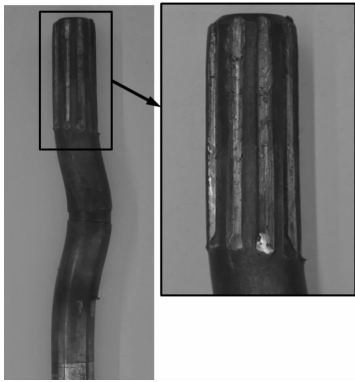


图 8 直接挤压成形花键轴的常见废品

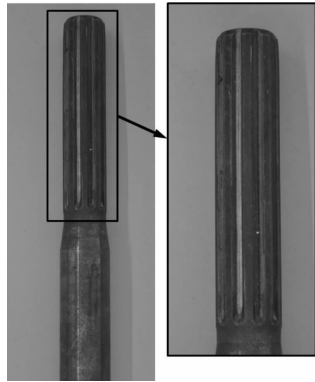


图 9 振动挤压成形花键轴

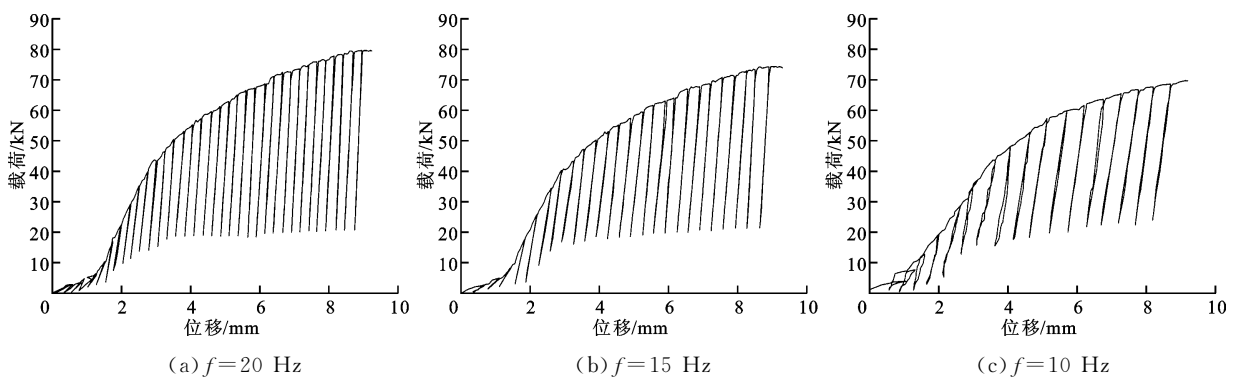


图 10 不同频率下振动挤压成形的位移-载荷曲线对比

振动频率较高时,润滑油膜没有充足的时间流入模具与坯料的接触面来重新生成油膜,所以摩擦力增加,导致载荷增大。

3 微观组织研究

花键轴在挤压过程中,材料的流动可大致分为 3 个部分:一是材料向花键轴齿顶方向流动;二是材料随模具进给沿轴向在花键轴后部产生堆积,这部分是所有挤压过程中不可避免的流动方式,材料向后堆积阻碍了模具的轴向进给,导致成形力增大,同时也使得用于成形齿型的材料减少;三是材料向模具进给相反的方向沿轴向流动,为了限制这部分材料流动,需要在花键轴顶部加装顶杆来辅助成形。可见,成形过程中材料流动的 3 个部分中只有第一部分是用于成形花键的。为了研究花键轴挤压过程中材料组织与性能的变化情况,将直接挤压成形与振动挤压成形得到的花键轴进行切片,制得如图 11 所示的金相观察试样。利用光学显微镜观察试样上所标示的 A、B、C 三个区域的微观组织,分别如图 12~图 14 所示。

由图 12 和图 13 可知,花键轴的齿底部位受到压缩,晶粒在成形过程中受到挤压并向齿顶部位流

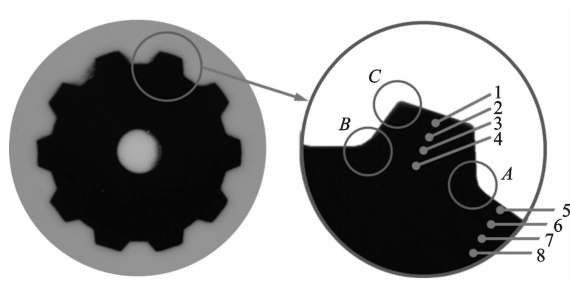
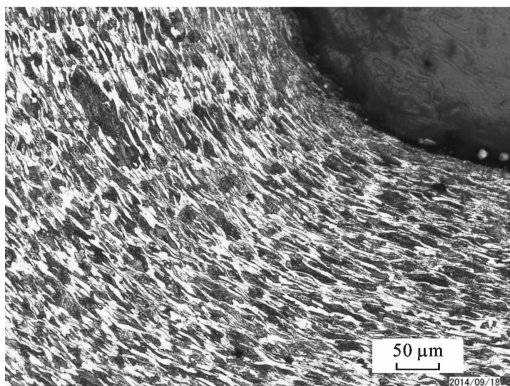


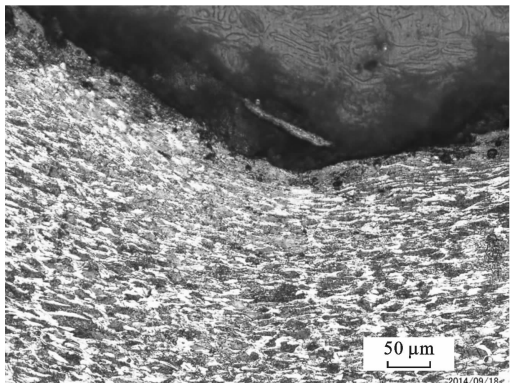
图 11 花键轴金相试样

动,从而充填齿型。对比图 12a 与图 12b 可知:直接挤压成形花键轴齿型的表层受挤压严重,金属变形剧烈,其外侧晶粒细小,晶粒细化带宽约为 50 μm ;振动挤压成形时模具和花键轴金属的接触情况得到了改善,因此局部变形不剧烈,金属容易流动,振动挤压成形过程对材料晶粒的影响范围更大,花键轴在振动挤压成形过程中硬度降低,易于成形^[7-8]。

图 12 和图 13 都表明,直接挤压过程中对花键轴表面的金属挤压严重,工件在成形过程中金属并没有均匀流动。这种现象的产生不仅表明直接挤压成形的摩擦力相比振动挤压成形更大,而且表明金属并没有向有利于花键轴成形的方向流动,由此产生了堆积。图 5 和图 7 都直接或间接地表明了这种

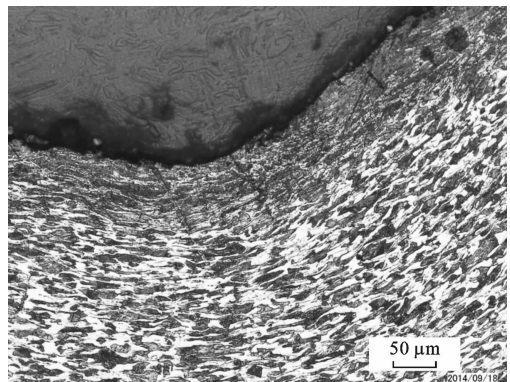


(a)直接挤压成形花键轴的 A 区域

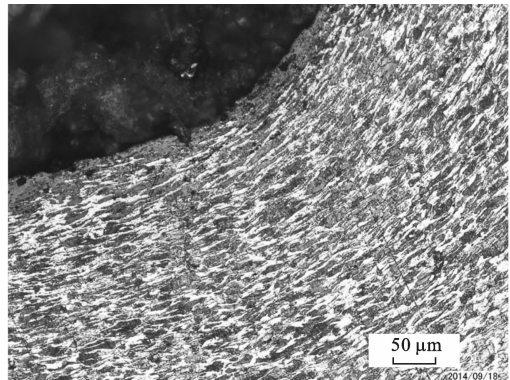


(b)振动挤压成形花键轴的 A 区域

图 12 花键轴 A 区域的微观组织



(a)直接挤压成形花键轴的 B 区域

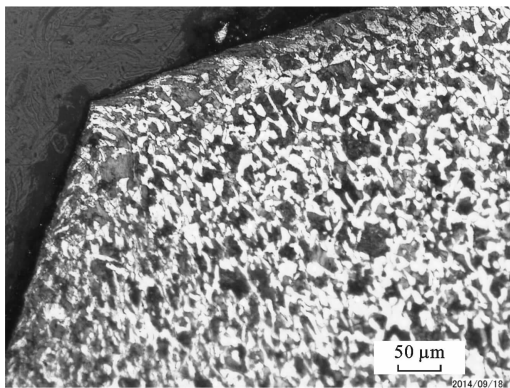


(b)振动挤压成形花键轴的 B 区域

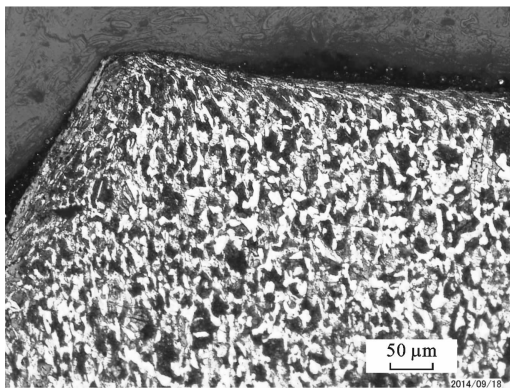
图 13 花键轴 B 区域的微观组织

材料堆积现象。

图 14 为花键轴齿顶部位的微观组织。将图 14a 与图 14b 所示的花键轴截面尖角处进行对比可知,振动挤压成形花键轴齿顶部位的外围晶粒受到了较大的压缩,尖角处有明显的材料流动特征,而直接挤压成形花键轴齿顶部位的晶粒分布没有明显区别,材料流动较少,这说明直接挤压成形时材料更多地向其他部位流动,不利于花键轴的成形。



(a)直接挤压成形花键轴的 C 区域



(b)振动挤压成形花键轴的 C 区域

图 14 花键轴 C 区域的微观组织

测量花键轴齿顶(图 11 中的点 1~4)与齿底(图 11 中的点 5~8)的硬度值。对挤压成形花键轴和拉伸试样断口的相应位置进行测量,取各齿相同位置的平均值,得到的数据如图 15 所示。从图中可以看出:挤压成形后花键轴齿底的硬度均高于齿顶的硬度,这是由于齿底部位的变形量大于齿顶部位,因而加工硬化程度高;振动挤压成形后花键轴齿底的硬度低于直接挤压花键轴齿底的硬度,说明经过振动挤压后的工件材料由于在成形过程中不断进行应力释放,花键轴各部位变形均匀,所以加工硬化不显著,而且振动挤压成形花键轴齿顶与齿底的硬度相差较小,说明材料向 3 个方向的流动更加均匀。

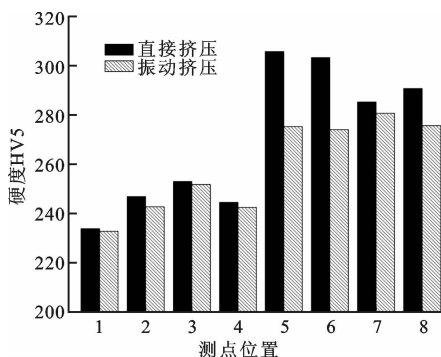


图 15 直接挤压与振动挤压成形花键轴不同位置的硬度对比

4 结 论

花键轴振动挤压成形工艺相比于传统的直接挤压成形工艺具有诸多优势。本文通过花键轴振动挤压成形试验对振动挤压工艺进行了分析,获得的结论如下。

(1)振动挤压成形相比于直接挤压成形的载荷可降低近 25%,具有加工效率高、成形精度高、表面质量好等诸多优点,且材料堆积现象不明显。

(2)振动挤压降低成形载荷的原因与成形过程中的润滑油膜变化有关,在模具回程时,润滑油得以流入模具与坯料的接触面,重新生成油膜,从而减小了摩擦力。回程频率越高,成形载荷也越高。

(3)通过观察成形后花键轴的微观组织可知,振动挤压成形促进了材料流动,降低了材料变形量,有明显的材料流动特征。材料的均匀流动可使成形花键轴的硬度降低。与直接挤压成形相比,振动挤压成形花键轴齿型部位的硬度下降了近 10%。

参考文献:

- [1] 姚文席,屈梁生. 剃齿加工中齿面“中凹”现象的机理分析[J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(8): 50-58.
YAO Wenxi, QU Liangsheng. Analysis about the mechanism of “Mid-Concave” phenomenon on the surface of the gear during shaving process [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995, 29(8): 50-58.
- [2] 贾俐俐,高锦张. 长轴类花键挤压成形极限研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(22): 1974-1976.
JIA Lili, GAO Jinzhang. Study on extrusion forming limits of long splines [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(22): 1974-1976.
- [3] 杨庆华,陈鑫,孟彬,等. 汽车活塞销振动挤压数值模拟分析[J]. 浙江工业大学学报, 2013, 41(3): 317-320.

YANG Qinghua, CHEN Xin, MENG Bin, et al. Numerical simulation for vibration extrusion of automotive car piston pins [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2013, 41(3): 317-320.

- [4] 蔡改贫. 振动摆动碾压成形机理研究及三维粘弹塑性有限元分析[D]. 北京: 北京科技大学, 2006.
- [5] 黄仁佑. 超音波振动对 U 型微弯曲成形之影响[D]. 台湾: 台湾科技大学, 2010.
- [6] 何勃. 振动塑性加工过程中的非线性动力学研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2000.
- [7] OSAKADA K, WANG X, HANAMI S. Precision forging process with axially driven container [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71(1): 105-112.
- [8] CHRISTODOULOU N, WOO O T, MACEWEN S R. Effect of stress reversals on the work hardening behaviour of polycrystalline cooper [J]. Acta Metall, 1986, 34(8): 1553-1562.

[本刊相关文献链接]

- 王振,王亚宁,陈冬,等. 软组织支架 3D 打印/压印成形工艺研究. 2015, 49(8): 141-146. [doi: 10. 7652/xjtuxb201508023]
- 池金春,张安峰,谢士兴,等. 电弧喷涂快速模具内应力检测和喷涂工艺优化. 2014, 48(12): 126-130. [doi: 10. 7652/xjtuxb201412020]
- 李永丰,付文智,李明哲. 柔性压辊拉形中压辊下压位移量的数值解析. 2014, 48(1): 84-89. [doi: 10. 7652/xjtuxb201401014]
- 牛卫中. 拉应力内翻管成形中管件的应力及其成形条件. 2013, 47(5): 93-98. [doi: 10. 7652/xjtuxb201305017]
- 王烨,贺健康,刘亚雄,等. 三维微流道支架直接压印成形方法. 2012, 46(10): 116-120. [doi: 10. 7652/xjtuxb201210020]
- 李泳峰,赵升吨,范淑琴,等. 花键轴增量式滚轧成形工艺的分流方式及温度效应研究. 2012, 46(9): 60-65. [doi: 10. 7652/xjtuxb201209012]
- 彭赫力,刘纯国,李明哲. 马鞍面件柔性夹钳多点拉形实验与数值模拟. 2012, 46(5): 109-113. [doi: 10. 7652/xjtuxb201205019]
- 朱海波,余增硕,唐成磊,等. 膨胀管膨胀参数优化和膨胀模拟. 2012, 46(1): 103-107. [doi: 10. 7652/xjtuxb201201019]
- 范淑琴,赵升吨,张琦,等. 直角法兰双辊夹持扩旋成形有限元模型的确定. 2010, 44(5): 66-70. [doi: 10. 7652/xjtuxb201005014]
- 王伊卿,何仲云,方勇,等. 气压熔融挤压快速成形材料及成形工艺研究. 2010, 44(1): 100-104. [doi: 10. 7652/xjtuxb201001022]

(编辑 葛赵青)