

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.04.001

紫铜材料齿条冷滚打金属变形行为研究

孔祥健, 张敬冲, 姚 远, 朱金婷, 李 言

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 分析了齿条高速冷滚打成形原理,在 ABAQUS 中建立齿条冷滚打有限元模型,由于塑性应变的大小代表着金属的流动情况,重点对成形过程的应力应变变化情况进行了仿真分析。在改造的冷滚打设备上对齿条冷滚打试验,对滚打后材料的金属纤维组织和硬度变化进行分析,以研究齿条冷滚打塑性成形过程中金属的流动规律和成形制件组织性能。研究表明,齿条冷滚打过程中,金属组织未被切断,晶粒得到破碎和细化,最终被滚压成纤维组织;冷滚打工艺有效地改善了金属表面的金相组织,使工件硬度和强度有较大提高,是一种非常有前景的精密塑性成形技术。

关键词: 齿条; 冷滚打; 纤维组织; 硬度; 金属流动

中图分类号: TG335.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)04-0379-09

Study of microstructure deformation of rack cold roll-beating

KONG Xiangjian, ZHANG Jingchong, YAO Yuan, ZHU Jinting, LI Yan

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In this paper, the principle of rack cold roll-beating is analyzed, the FEA model is built, and the stress and strain evolution are analyzed. The cold roll-beating experiments are carried out, the microstructure and hardness distribution are analyzed emphatically to study the law of metal flow and the product microstructure performance in the cold roll-beating process. The results show that the rack cold roll-beating technology not only can avoid the decrease of strength due to the cut off of metal fiber, but also can improve the surface strength due to the cold plastic deformation, and it is a very promising technology.

Key words: rack; cold roll-beating; microstructure; hardness distribution; metal flow

目前,齿条类零件的加工方法主要还是停留在有屑加工的层面上。大都是经过多次的热处理和高温锻造再加上切削加工,切断了金属毛坯本身的金属纤维流线,造成金属纤维丝的断裂,使得齿条抗疲劳强度降低、寿命缩短,承载能力受到限制,表面质量波动大,产品的质量差;同时材料的利用率和生产效率低,污染环境,消耗能源和资源较多。

塑性成形技术是利用金属材料的可塑性,使金属在力场或同时辅以温度场的作用下实现体积转移,可有效改善金属的微观组织和机械性能,从而获得形状、尺寸和性能都满足要求的少量或无切屑、绿色成形制造方法,因其具有高效、优质、低耗等优点,

已成为当今先进制造技术的重要组成部分^[1]。高速冷滚打成形技术作为一种新型的精密塑性成形技术,是利用金属坯料本身的塑性,通过高速旋转的滚打轮断续的对毛坯进行滚压和击打,使其发生塑性变形,形成所需要的齿廓形状^[2]。

对冷滚打成形的研究最早可追溯到 1955 年,瑞士的两位学者 Krapfenbauer 和 Grob 提出一种冷滚打花键技术^[3]。Kurz 等^[4]对冷滚打成形过程进行仿真建模分析,并通过仿真与实验中的击打力、工件坯料的应力值和应变值相对比,验证了仿真模拟的可靠性。Kahn-Jetter^[5]通过有限元仿真分析了花键在对称加载和非对称加载条件下应力和应变的变

收稿日期: 2015-09-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475366);陕西省教育厅重点实验室科学研究计划资助项目(12JS072);西安理工大学博士创新基金资助项目(207-002J1302)

作者简介: 孔祥健,男,硕士生,研究方向为先进制造技术。E-mail:xiangjiankong0224@163.com

通讯作者: 李言,男,教授,博导,研究方向为先进制造技术,精密加工方法,制造过程状态监控、机电系统测试与控制技术。E-mail:Jyxy-ly@xaut.edu.cn

化情况以及应力集中分布问题。目前有学者致力于冷滚打成形研究中,将其应用于花键、丝杠、板料等的加工中,在动力学、运动学、成形仿真、滚打轮设计等方面的研究取得了一定的成果^[6-10],但是尚未将其明确应用于齿条成形过程。

本文尝试将高速冷滚打成形技术应用于齿条的加工中,重点研究成形过程中金属组织的变形情况。

1 齿条冷滚打成形原理

齿条冷滚打成形与常见的基于切削的齿条加工有本质的区别,其工作原理如图1所示。主要是利用齿条毛坯本身所具有的塑性,用特定齿廓、高速旋转的滚打轮对齿坯进行逐点断续滚压和击打,使齿坯表层金属产生塑性流动,从而获得所需的廓形。三个滚打轮通过芯轴均匀地安装在支撑轴上,并可绕自身的轴线(芯轴)转动。当支撑轴在中心主轴的带动下高速旋转时,该运动实现滚打轮的公转。当滚打轮和工件不接触时,滚打轮只有公转运动;当滚打轮接触到工件的时候,由于滚打轮和齿坯之间摩擦力的存在,滚打轮进行自转,其自转速度由工件的进给速度和两者接触时的摩擦力确定,使得滚打轮和工件之间运动为纯滚动,从而可以延长滚打轮的寿命,并保证齿坯的表面质量。

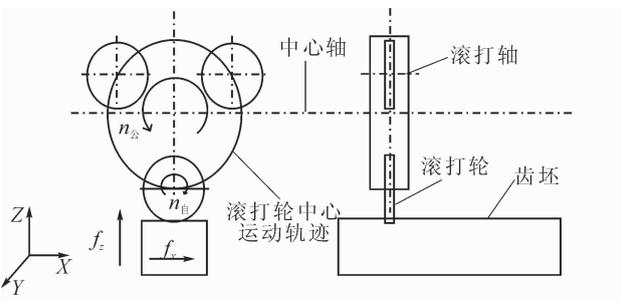


图1 齿条冷滚打原理图

Fig.1 Principle of rack cold roll-beating

2 有限元分析

2.1 有限元模型的建立

在此重点研究滚打轮击打工件的过程中金属材料的流动情况。为了提高有限元模拟的精度,减少运行时间,并且考虑到滚打轮的支撑轴对仿真结果的影响很小,所以在该模型中只建立滚打轮和工件,滚打轮的数量是3个,均匀分布在支撑轴的外圆圆周上,每两个滚打轮之间的角度为 120° ,支撑轴的外圆直径为112 mm,滚打轮的直径为48 mm,模数为2,滚打轮的外缘为圆弧,圆弧的倒角半径为0.7 mm,齿坯的尺寸为长30 mm×宽30 mm×高20 mm。

本构方程采用 Johnson-Cook 材料模型。工件材料选用紫铜,密度为 $8\ 900\ \text{kg/m}^3$,弹性模量为124 GPa,泊松比为0.34。模型采用 J-C 本构方程,其中参数 $A=90\ \text{MPa}$, $B=292\ \text{MPa}$, $n=0.31$, $m=1.09$,工件熔点 $1\ 058\ ^\circ\text{C}$,参考温度 $25\ ^\circ\text{C}$ 。滚打轮为均匀实体模型,滚打轮材料为40Cr。

网格划分过程中,滚打轮与齿坯的接触区域是仿真观察的重点区域,所以齿坯的这部分选择细化网格,提高网格密度,网格的边长为0.09 mm,对于齿坯上离滚打轮相对较远的距离,可适当降低网格的密度来提高 ABAQUS 运行的时间。滚打轮的网格密度可以相对划小一些。齿坯的网格单元类型为C3D8R,三维六面体八节点单元。在 ABAQUS 中建立的模型如图2所示。

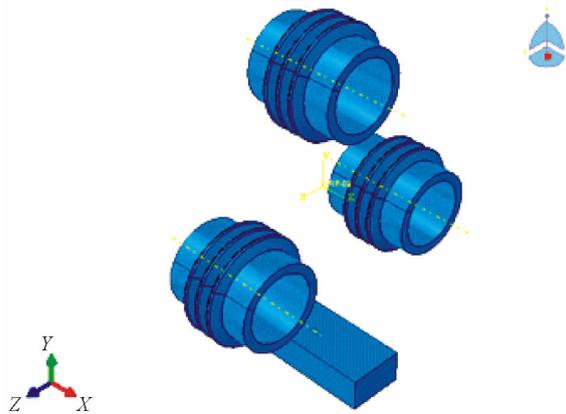


图2 齿条冷滚打几何模型

Fig.2 Geometric of model rack cold roll-beating

2.2 齿条成形过程分析

图3所示为不同滚打时刻齿槽的轮廓形态。仿真参数取为:滚打轮转速750 r/min,打入深度1 mm,工件进给量60 mm/min。从图中看出,随着滚打轮的打入,齿槽的深度增加,两边的凸起增高,齿槽逐渐形成。

齿条冷滚打是塑性成形,实质上是金属在外力的作用下发生塑性流动的过程。滚打轮与工件接触的部位不同,金属材料的流动情况和塑性应变大不相同。图4所示为滚打过程中金属流动的示意图。当滚轮击打工件时,滚打轮头部直接击打工件的部位由于受到连续的径向滚压力,该接触区域受到的力最大,形成齿槽的底部。而滚打轮两侧的金属,受到滚打轮的挤压作用,一部分沿着滚打轮侧壁的法线方向流动,形成齿槽侧壁;另一部分沿着滚打轮侧壁向上流动,形成了齿槽两侧的凸起,凸起部分又向外侧阻力较小的区域流动,从而形成了齿槽的轮廓形状。

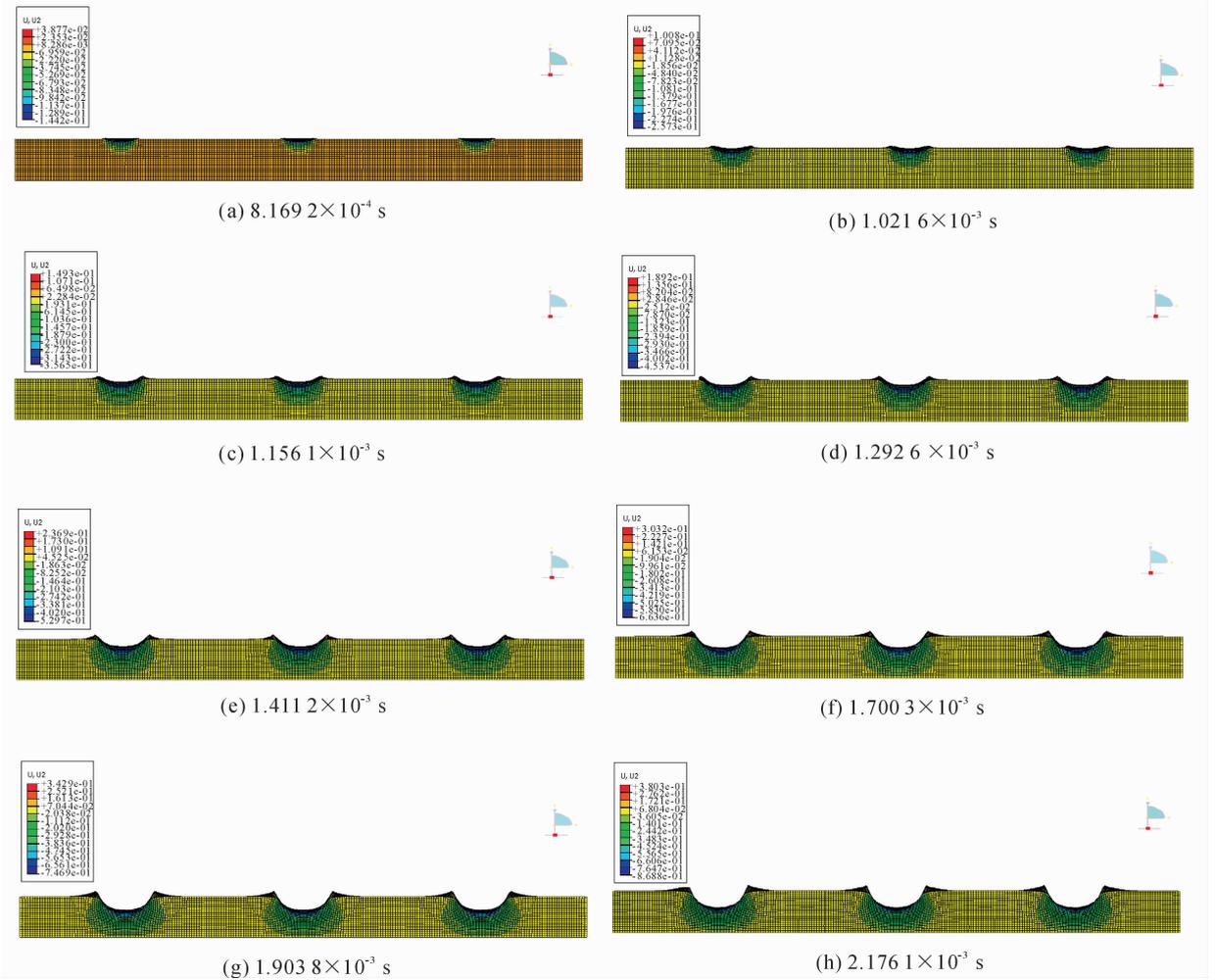


图3 不同时刻齿槽的轮廓形态

Fig. 3 Contour shape of tooth different time

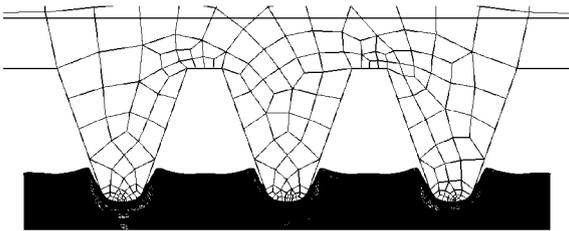


图4 金属流动示意图

Fig. 4 Diagram of metal flowing

2.3 应变分析

齿条成形过程中,塑性应变的大小代表着金属的流动情况,其值越大,表示该区域金属变形的程度越大;反之,则表示该区域金属变形的程度越小。为了分析齿槽不同部位的应变情况,取已形成齿条截面上的6个单元格进行应变分析,各个单元格在齿槽的位置分布如图5所示,1到6分别对应单元269472、274032、276312、278592、280872、283152。

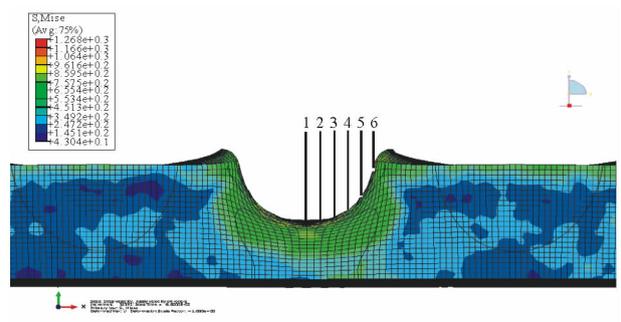


图5 选取的单元位置

Fig. 5 The unit location

图6为已形成齿槽截面上的6个单元格在X方向的等效塑性应变随时间的变化曲线。在X方向,齿槽上的6个单元格中,单元格1、2、3、4、5受到的是拉应力,而单元格6受到的是压应力,侧壁上的单元格3和4的等效塑性应变最大,齿槽顶部的单元格5和6的等效塑性应变最小。这是由于当滚打轮重复击打齿坯的时候,金属会沿着阻力较小的方

向发生流动,即向滚打轮的两侧流动,从而形成齿槽,所以齿槽侧壁上3和4单元格在X方向发生的塑性应变最大,而滚打轮直接击打的齿槽底部1和2单元格,由于连续受到滚打轮Y方向上的滚打力,所以其在X方向的塑性应变要小于侧壁上的3和4单元格。齿槽顶部由于金属流动堆积作用,是单元格最密集的区域。对于齿槽顶部的5和6单元格,5单元格受到的是拉应力,而6单元格受到的是压应力,这是由于金属沿X方向流动,使其在齿槽的顶部产生压应力的结果。可以看出,6个单元格在X方向上都是先变化而后保持不变的趋势,且塑性应变都是发生在滚打轮和工件接触的时间内。

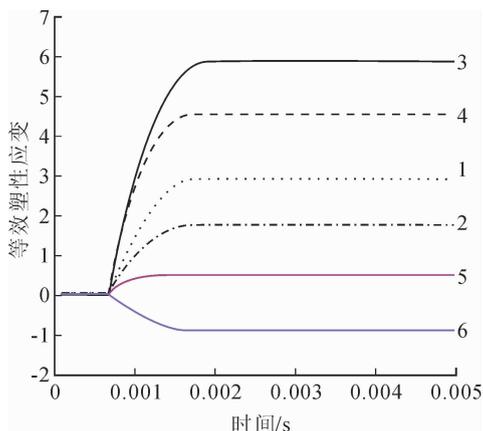


图6 X方向单元等效塑性应变随时间的变化曲线
Fig. 6 Unit equivalent plastic strain curves in X direction

图7为已成形齿槽截面上的6个单元格在Y方向的等效塑性应变随时间的变化曲线。在Y方向,齿槽上的6个单元格中,单元格1、2、3、4、5受到的是压应力,而单元格6受到的是拉应力。Y方向是齿槽的深度方向,齿槽底部受到滚打轮不断地滚压、击打,所以齿槽底部的单元格1塑性应变值最大,且单元格1受到的是压应力,沿着齿槽截面向上的单元格2、3、4、5受到的也是压应力,且塑性应变值是逐渐减小的。齿槽底部的Y方向上的位移最大,沿着齿槽截面逐步向上,Y方向的位移逐渐减小,而到了齿槽顶部的单元格6时,由于其受到齿槽底部和侧壁的金属流动挤压作用,其受到的是拉应力。可以看出,6个单元格在Y方向上都是先变化而后保持不变的趋势,且塑性应变都是发生在滚打轮和工件接触的时间内。

图8为已成形齿槽截面上的6个单元格在Z方向的等效塑性应变随时间的变化曲线。在Z方向,齿槽截面上的6个单元格受到的都是压应力,因为滚打过程中,滚打轮的切向力作用会使得金属沿作用力方向发生流动,从而使网格在切向力的方向被

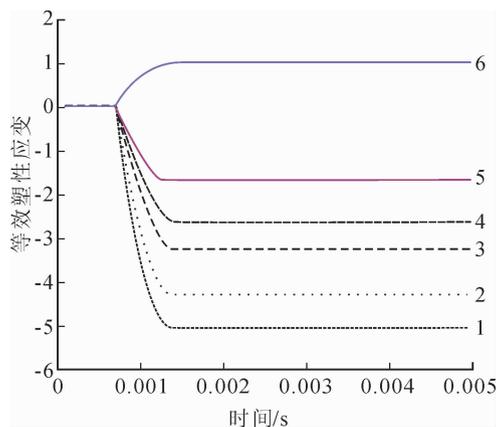


图7 Y方向单元等效塑性应变随时间的变化曲线
Fig. 7 Unit equivalent plastic strain curves in Y direction

压缩产生压应力。齿槽截面上6个单元格的变化趋势都是先急剧增大,后减小,最后保持不变。当滚打轮旋转的同时,工件还要沿着Z方向进给,由于本模型中设置的是逆滚打,即工件的进给方向和滚打轮切向力的方向相反,两者同时作用,在一定程度上使单元格在Z方向的等效塑性应变减小,所以会出现减小的趋势。当滚打完成后,单元格的塑性应变保持在一定的数值。齿槽底部的单元格1因受到滚打轮直接击打,所以其受到的压应力最大,且变化的速率也最大,沿着齿槽截面向上,单元格2、3、4、5、6受到的压应力逐渐减小。

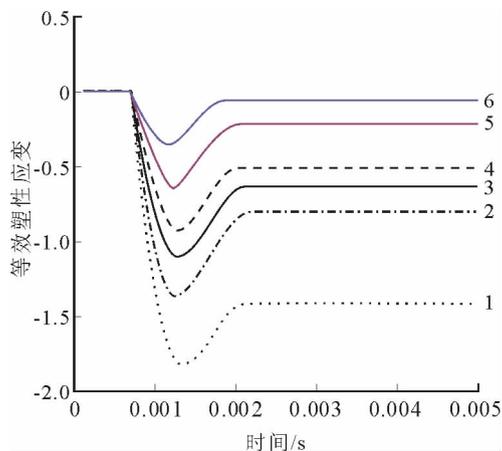


图8 Z方向单元等效塑性应变随时间的变化曲线
Fig. 8 Unit equivalent plastic strain curves in Z direction

图9是已成形齿槽截面上的6个单元格整体的等效塑性应变随时间的变化曲线。综合来看,齿槽底部的单元格1由于是滚打轮直接击打的部分,所以该部分的等效塑性应变值最大达到了17.57,单元格2、3、4、5、6的等效塑性应变分别达到了15.13、12.53、9.29、5.33和3.56,沿着齿槽截面向上,等效塑性应变值逐渐减小。

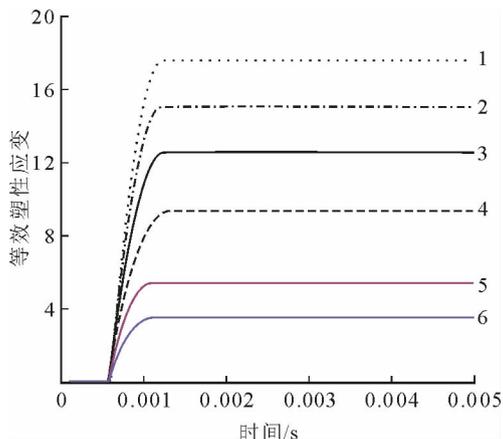


图9 单元整体等效塑性应变随时间的变化曲线
Fig. 9 Unit equivalent plastic strain curves

2.4 应力分析

齿条冷滚打过程中,工件不同部位不同时刻所受到的应力是不同的。刚开始冷滚打的时候,工件上的应力分布范围很小,随着滚打过程的进行,应变和应力的累积效应以及应力波的传递作用,使工件上的应力分布范围迅速扩散开,且应力最大的范围集中在滚打轮直接击打工件的区域。为了分析齿槽不同部位所受到的应力,同研究等效塑性应变时所取的单元格一样(见图5),取已形成齿条截面上的6个单元格进行应力分析。

图10是已形成齿槽截面上6个单元格的应力随时间的变化曲线。可以看出,工件上应力最大的部位是齿槽的底部,同时也是等效塑性应变最大的部分即单元格1,其应力值达到了1 050 MPa,沿着齿槽截面向上的2、3、4、5、6单元格,其应变值依次减小。

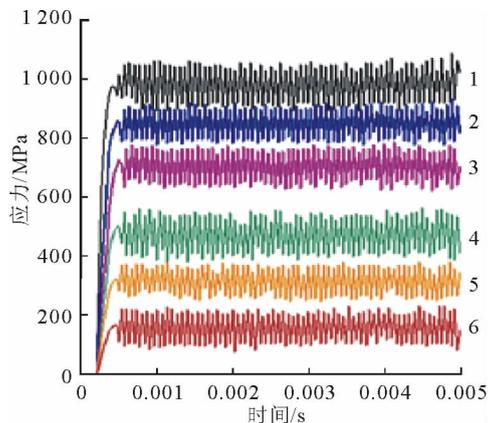


图10 单元应力随时间的变化曲线
Fig. 10 Unit stress curves

综上所述,在冷滚打过程中,齿槽的底部的等效塑性应变和所受到的应力最大,这是因为滚打轮的头部不断击打工件,从而形成齿槽的底部,且冷滚打

过程是一个高频动态的冲击过程,应变的累积叠加使得底部的等效塑性应变值最大,同时齿槽底部受到的应力也是最大的。

为了更进一步研究滚打过程中应力的变化情况,选取图11所示的节点路径,该路径是从齿槽底部出发沿着齿槽的截面向上到达齿槽顶部,分析在该路径上应力的变化情况。图12是路径上的应力变化曲线。沿着所建立的路径,应力呈现减小的趋势,这与图10的结果一致,说明在滚打过程中,齿槽底部受到的应力最大,沿着齿槽侧壁逐渐向上,应力逐渐减小。

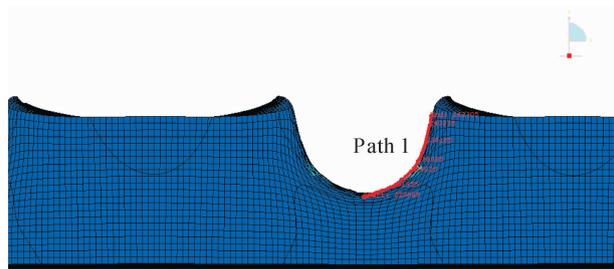


图11 选取的路径
Fig. 11 The path

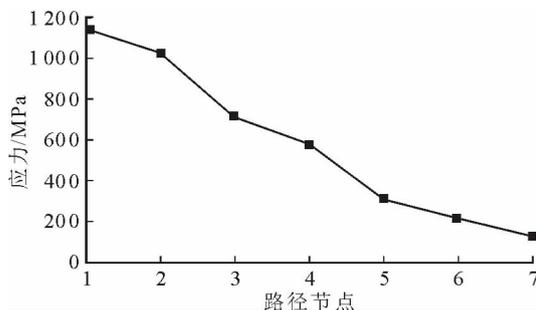


图12 应力沿路径的变化曲线
Fig. 12 Stress curve along with path

3 冷滚打实验

本次试验在卧式铣床上完成。如图13所示,将铣刀替换为设计的专用齿条冷滚打装置。本文重点分析冷滚打加工对齿条的硬度、微观组织、结构状态、晶粒形态影响。主要对紫铜进行齿条冷滚打试验研究,实验过程中选用模数为2的滚打轮,其公转半径为49.5 mm,自转半径为24 mm。

图14所示为紫铜的冷滚打结果。滚打轮转速 $n=1\ 180\ \text{r/min}$,工件进给速度 $f=60\ \text{mm/min}$,滚打轮两次打入深度都为 $h=3.5\ \text{mm}$,分四次滚打,前三次每次进给1 mm,第四次进给0.5 mm。从图中可以清晰地看到齿槽的轮廓形态和齿顶部分的卷起现象,这是滚打轮击打挤压造成齿槽底部金属塑性流动的结果。同时在相邻的三个齿槽中,中间齿槽两侧的凸



(a) 冷滚打机床



(b) 主轴和滚打轮



(c) 滚打瞬间

图 13 齿条冷滚打设备

Fig. 13 Equipment of cold roll-beating

起高度大致相等,且轮廓均匀对称,而左右两边齿槽两侧的凸起高度则有明显差别,轮廓明显不对称,靠近未滚打区域一侧齿槽的凸起高度要明显低于靠近中间齿槽一侧齿槽的凸起高度,这是由于靠近未滚打区域的齿槽受到的约束少,金属流动的范围相对比较广,而靠近中间齿槽一侧的金属由于受到两个滚轮之间的挤压作用,一定程度上限制了金属的流动,所以造成两侧的凸起有很明显的差别。



(a) 滚打工件正面图



(b) 滚打工件侧面图

图 14 紫铜冷滚打试验结果

Fig. 14 Cold roll-beating part of copper

4 金相分析

4.1 金相制样的制备

金相制样样品应满足以下几个要求:显示出被检材料的真实组织,被检磨面没有热损伤和塑性变形产生,母体材料中夹杂物没有被污染,试样表面平整、不倒圆角。

1) 选取样品。选择试验滚打出来的铜齿条外形齿廓清晰、表面质量相对较好的部分,将其用线切割机切开,取其中两个齿进行金相分析。

2) 研磨抛光。为了得到在光学显微镜下能观察的高光洁度表面,需要用金相砂纸来对经线切割的试件进行研磨,再将研磨后的制样进行抛光,以便更清楚地看到材料地结构组织和晶粒状态。

3) 腐蚀。制样经过抛光后,用盐酸氯化铁水溶液(盐酸 15 mL+氯化铁 5 g+水 100 mL)进行腐蚀处理,去除抛光留下的损伤层,更关键的是由于紫铜中各种组织之间或者同一种相的各个晶粒、晶界之间的抵抗腐蚀的能力各不相同,使得抛光面上的各种显微组织腐蚀的程度不同,这种高低不平的微观组织对光线会有不同的吸收和反射情况,所以在显微镜下能够清楚地分辨出各种组织及晶粒状态。

4) 制备好金相制样后,在 OLYMPUS SZ61 及 GX71 金相显微镜下对制样进行观察并拍摄金相组织。

制备好的金相制样如图 15 所示。



图 15 金相制样

Fig. 15 Metallography sample

4.2 金相试验结果分析

图 16 为紫铜冷滚打的组织分布图,图(a)为齿顶组织,铜的齿顶有很明显的裂纹产生,从铜冷滚打后的金相结果更加明显地看到了纤维组织的分布情况,尤其是图(c)的齿根位置,可以很清晰地看到一条条整齐排列分布的纤维组织,细致而紧密,已经看不到完整的单个晶粒,晶粒被细化并被重新排列,得到图示的纤维流向。图(b)节圆部分的晶粒细化也

比较明显,可以看到纤维流向是斜着向下分布的,正是滚打轮从上到下的击打方向,晶粒沿着滚打轮的击打方向被拉伸、细化,同时齿顶部分也可以看到纤维流向,但是没有齿根和节圆部分明显。图(d)为基体组织,通过对比发现,没有经过冷滚打加工的部分晶粒粗大而且完整,仍然可以看到一个个完整的晶粒,从而更加证明了冷滚打加工的优越性:使材料的组织细密,机械强度得到了提高。

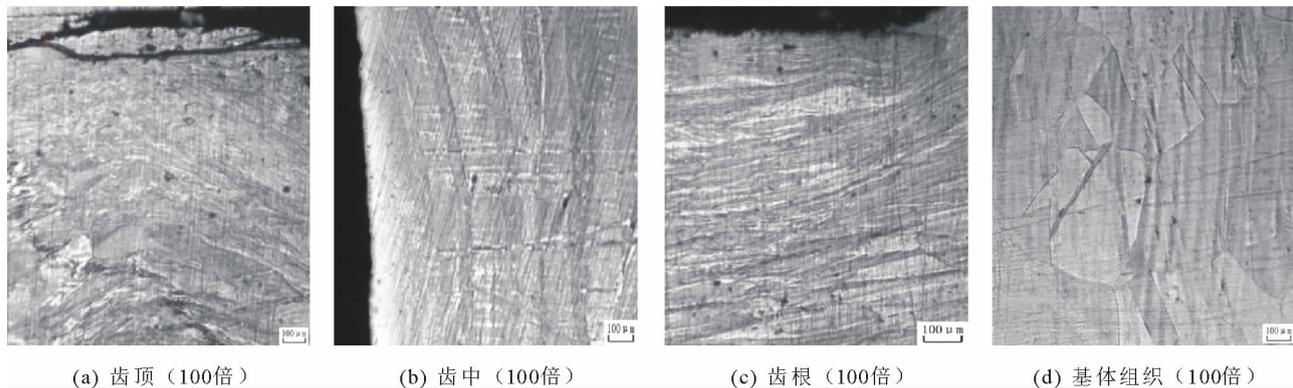


图 16 紫铜冷滚打的组织分布

Fig. 16 Part metallographic structure of copper

对铜材料进行冷滚打后,两个齿的齿顶部位均有裂纹出现,如图 17 所示。

疲劳裂纹的形成主要在应力集中的部位和构件表面。一般情况下,工件的最大应力在金属的表层,所以疲劳裂纹也多在工件表层产生,冷滚打加工时,工件承受的是周期性变化的交变应力,在交变应力

作用下,虽然工件所受的应力低于它的屈服极限,但是长期反复加载卸载,也会使工件产生疲劳失效。同时,在齿槽顶端的位置,有应力集中效应。冷滚打过程中,当工件在受到外力的时候,在与滚打轮的轴线 45° 的斜截面上,齿坯所受的切应力最大,所以在此处会产生裂纹。

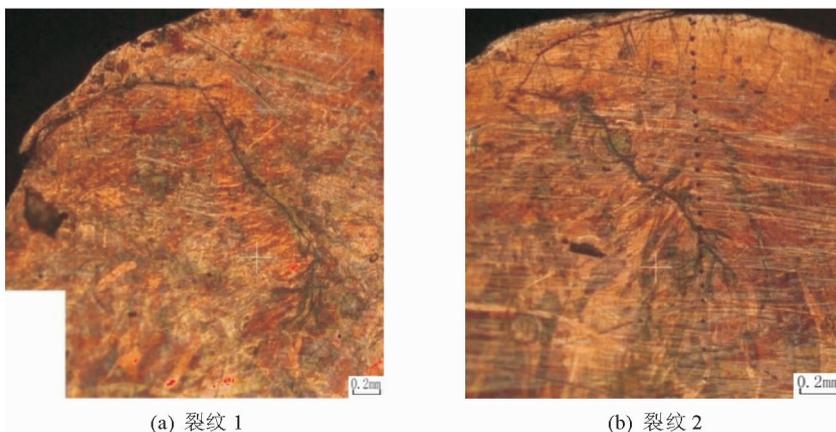


图 17 紫铜制样齿顶裂纹

Fig. 17 Tooth space crack of copper

5 硬度分析

材料的硬度测量可以直观地反映出金属材料经过冷滚打成形后的强度、弹性、韧性、塑性等机械力学性能。金属材料距离被滚打表面不同的距离,发生变形的程度是各不相同的,所测得的硬度也是不

相同的,可以反映被滚打区域的金属材料组织的变化情况。金相试件制备完成后,在金相显微镜下观察紫铜制件的微观组织,然后用 Wilson Instruments TUKON2100B 显微/维氏硬度计沿滚道底部表面的法线方向由表及里测试 20 个点的维氏硬度值。试验力为 20 g,测 25 个点,其中第一个点距

离表面 0.015 mm,其它点间隔 0.03 mm,分别测量了紫铜制样的齿顶、齿中和齿根部分的硬度。图 18

为紫铜制样的测量点的分布图。

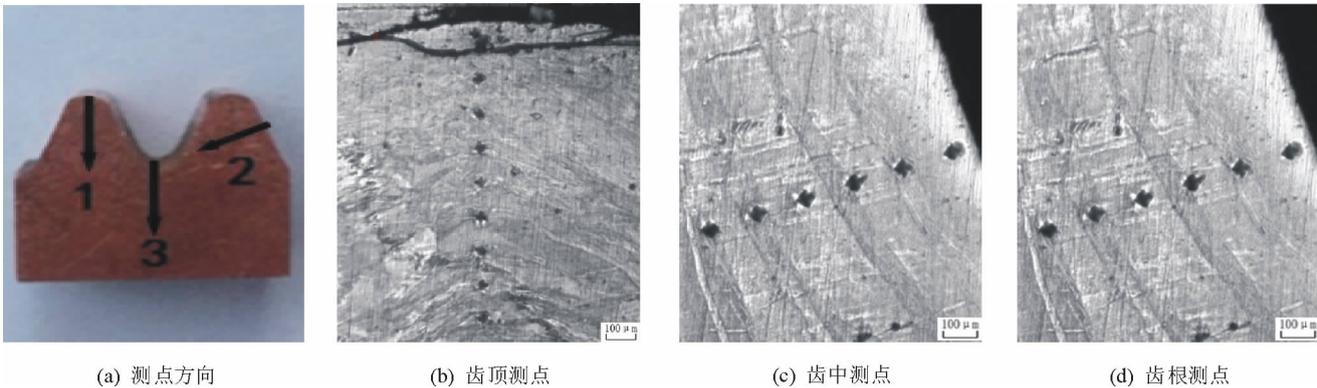


图 18 紫铜的硬度测量点

Fig. 18 Hardness measuring points of copper sample

图 18(a)为紫铜制样硬度测量方向的示意图,1 为紫铜齿顶硬度的测量方向,即沿着齿顶平面的法线方向竖直向下,从距离齿顶表面 $20 \mu\text{m}$ 开始第一个硬度测量点,每隔 $50 \mu\text{m}$ 一个测量点,具体测点如图(b)所示。图(a)中 2 为紫铜的齿中硬度测量方向,即在分度线的位置沿着齿槽侧壁的法线方向一直向下,从距离齿槽侧壁的表面 $30 \mu\text{m}$ 为第一个硬

度测量点,每隔 $50 \mu\text{m}$ 一个测量点,具体测点如图(c)所示。图(a)中 3 为紫铜的齿根硬度测量方向,即沿着齿槽底面的法线方向,竖直向下,从距离齿槽底面 $23 \mu\text{m}$ 开始第一个硬度测量点,每隔 $50 \mu\text{m}$ 一个测量点,具体测点如图(d)所示。测量点数均为 25 个。所测得的硬度数据通过 MATLAB 绘制成图 19 所示的硬度曲线。

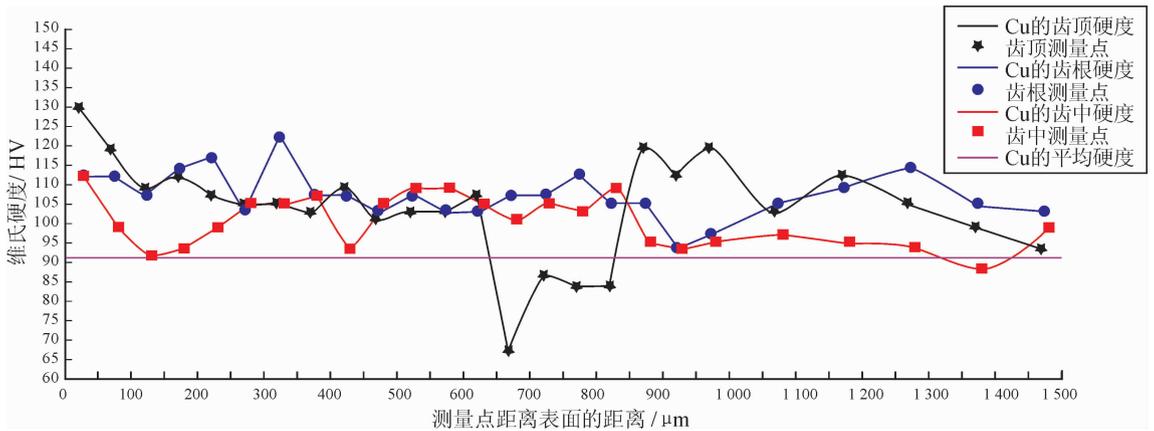


图 19 紫铜制样的硬度曲线

Fig. 19 Hardness curves of copper sample

从图 19 可以看出,齿顶部位由于有裂纹产生,导致裂纹处的硬度明显降低很多,低于铜材料本身的平均硬度。齿中和齿根部分的硬度变化趋势基本一致,从表面到工件的内部,都是从大到小变化的趋势,这就证明了经过冷滚打后,材料的组织性能发生了很大的变化,材料的硬度得到了很大程度的提高。冷滚打加工对金属材料有冷作硬化的作用,致使材料的表层金属硬化,产生一层很厚的硬化层,这样就使得材料的硬度提高,抗冲击、抗疲劳、抗磨损等机械性能和寿命都有提高。同时,在距离表层金属比较近的位置,齿根的硬度最大,达到了 HV122。这

是因为在成形过程中,滚打轮直接击打工件形成齿槽,所以齿根部分是滚打轮直接重复击打的区域,滚打力在垂直于齿槽底面的分力最大,在该区域金属的塑性变形最大,所以齿根的硬化层最厚,硬度也最大。

6 结论

1) 在分析齿条冷滚打成形原理的基础上,采用 ABAQUS 有限元分析软件,建立了齿条冷滚打分析模型,对齿条冷滚打成形过程进行分析;选取已成形成齿槽截面上的不同单元格,分析单元格在 X、Y、Z

方向的等效塑性应变及应力情况;同时在齿槽截面上建立不同路径,分析应力在路径上的变化趋势。仿真结果表明,齿槽底部受到的应变、应力最大,沿着齿槽截面向上,工件受到的应变、应力逐渐减小。

2) 在卧式铣床改造的冷滚打设备上进行齿条冷滚打试验,对冷滚打的紫铜试件进行了金相和硬度测试,得到紫铜材料的金相组织变化和硬度变化情况。结果表明,冷滚打过程中,金属组织未被切断,晶粒得到破碎和细化,最终被滚压成纤维组织,纤维组织变得细致而紧密。因此,改善了金属表面的金相组织,从而使工件硬度和强度有较大的提高。从而验证冷滚打加工的可行性和优越性。同时,根据金相试验结果,对冷滚打紫铜时齿顶出现的裂纹进行分析,从而为进一步改进加工条件及工艺参数,避免缺陷的产生提供了依据。

参考文献:

- [1] 单德彬,袁林,郭斌. 精密微塑性成形技术的现状和发展趋势[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(2): 46-53.
SHAN Debin, YUAN Lin, GUO Bin. Research situation and development trends in micro forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(2): 46-53.
- [2] 崔凤奎,朱文娟,王晓强,等. 高速冷滚打成形技术研究现状与发展趋势[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2012, 31(2): 191-195.
CUI Fengkui, ZHU Wenjuan, WANG Xiaoqiang, et al. Current research and development trends of high-speed cold rolling technology[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2012, 31(2): 191-195.
- [3] KRAPFENBAURE H. New aspects for the mass production of spur gears by cold rolling [J]. IPE International Industrial & Production Engineering, 1984, 8(3): 39-41.
- [4] KURZ N. Theoretical and experimental investigations of the "Grob" cold shape-rolling process[C]// Tobias S A,

Proceedings of the Twenty-Fifth International Machine Tool Design and Research Conference. UK: Macmillan Education UK, 1985: 551-559.

- [5] KAHN-JETTER Z L, WRIGHT S. Finite element analysis of an involute spline[J]. Journal of Mechanical Design, 2002, 122(2): 239-244.
- [6] 李言,杨明顺,李玢,等. 丝杠冷滚打成形动力学仿真及分析[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(4): 10-14.
LI Yan, YANG Mingshun, LI Bin, et al. Dynamics simulation and analysis of lead screw cold roll-beating [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(4): 10-14.
- [7] CUI Fengkui, WANG Xiaoqiang, ZHANG Fengshou, et al. Metal flowing of involute spline cold roll-beating forming[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(5): 1056-1062.
- [8] 张璐,李言,杨明顺,等. 丝杠冷滚打成形过程金属流动规律研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(13): 1623-1628.
ZHANG Lu, LI Yan, YANG Mingshun, et al. Study on metal flowing of lead screw cold roll-beating forming [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(13): 1623-1628.
- [9] 杨帆,白冰如,龚小涛,等. 齿轮高速冷滚打温度及应力分布研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(15): 105-107.
YANG Fan, BAI Bingru, GONG Xiaotao, et al. Study on temperature and stress distribution of gear in high speed cold rolling[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(15): 105-107.
- [10] 韩志仁,张丰收,崔凤奎. 冷滚打渐开线花键滚轮磨削建模研究[J]. 航空科学技术, 2012, (5): 83-85.
HAN Zhiren, ZHANG Fengshou, CUI Fengkui. Grinding modeling study of involute spline roller manufactured by cold rolling [J]. Aeronautical Science & Technology, 2012, (5): 83-85.

(责任编辑 王绪迪,王卫勋)