

内凹和外凸轮廓切挤复合精整时的材料流动分析

王亚娜, 吕琳, 邓明

(重庆理工大学, 重庆 400054)

摘要: **目的** 为了探索零件精整面的成形规律, 研究2种轮廓的材料流动情况。**方法** 利用有限元模拟方法进行研究, 根据精整轮廓的不同特点, 首先对切挤复合精整中的变形区进行了分析, 接着对外凸和内凹轮廓零件切挤复合精整时的材料流动进行了研究, 得出了材料变形区的流动、剪切滑移等的规律。**结果** 变形区可以细分为主变形区、新面形成区、废料变形区和剪切滑移区等; 内凹轮廓精整处于稳定精整阶段时, 基体材料内部有涡流现象出现, 然而, 在外凸轮廓精整的整个过程中, 基体材料都没有形成涡流, 涡流可以提高静水压应力, 抑制裂纹的产生, 促使得得到光洁度较好的零件; 在整个精整过程中, 外凸轮廓零件材料相比于内凹轮廓在精整方向上滑移了较长的距离, 才能移动到新成形表面, 内凹轮廓变形区材料所受应力多为压应力。**结论** 内凹比外凸轮廓精整易得到较好的成形质量。

关键词: 切挤复合精整; 剪切滑移; 材料流动; 变形区; 速度场

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.06.006

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457 (2016)06-0032-06

Material Flow Analysis of Cutting-extruding Composite Finishing for Inner Concave Contours and Outer Convex Contours

WANG Ya-na, LYU Lin, DENG Ming

(Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

ABSTRACT: The work aims to research the flowing of materials of two kinds of contours, so as to explore the forming law of the finishing surface of the parts. Researches were conducted in the finite element simulation method. According to the different characteristics of finishing contour, firstly, the deformation zone of cutting-extruding composite finishing was analyzed. Secondly, the material flow of cutting-extruding composite finishing for parts of outer convex contours and inner concave contours was studied. In such case, the rules of the material flow in the deformation zone and shear sliding were obtained. The deformation zone could be divided into the main deformation zone, the new surface forming zone, the deformation zone of the waste material and the shear sliding zone, etc.; when the inner convex contours were at the stable finishing stage, there was vortex in the matrix material. However, in the whole process of finishing the outer convex contour, no vortex was formed in the matrix material. The vortex could increase the hydrostatic pressure, restrain the generation of the crack, and make the parts with better finish. In the whole finishing process, compared with the material of the parts of inner concave contour, the material of the parts of outer convex contour slipped a longer distance to be on the new forming surface in the finishing direction. The stress of the material in the deformation zone of the inner concave contour

收稿日期: 2016-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(51375521); 重庆市模具技术重点实验室开放课题基金(MT201502); 重庆理工大学研究生创新基金(YCX2015211)

作者简介: 王亚娜(1990—), 女, 河南周口人, 硕士生, 主要研究方向为塑性成形工艺及模具设计。

was mostly pressure stress. In conclusion, it is easier for the inner concave contour to get a better forming quality than the outer convex contour.

KEY WORDS: cutting-extruding finishing; shear sliding; material flow; deformation zone; velocity field

切挤复合精整工艺主要运用在具有局部精密轮廓要求的板状零件的加工中。先要对局部精密轮廓零件进行普通冲裁,然后再对这些预留一定余量的零件进行切挤复合精整,即进行“精密切削+塑性挤压”的复合加工^[1-3],使得零件新成形面光亮带比例达到80%以上。该工艺的特点是采用了主模具刃口倒圆角,刃口圆角的挤压作用可以很好地提高成形面质量。在切挤复合精整成形中,无论是内凹轮廓精整还是外凸轮廓精整,均有一个侧面与工件轮廓接触起成形主要作用的主模具,另有一个与工件端面接触起支撑作用的副模具。

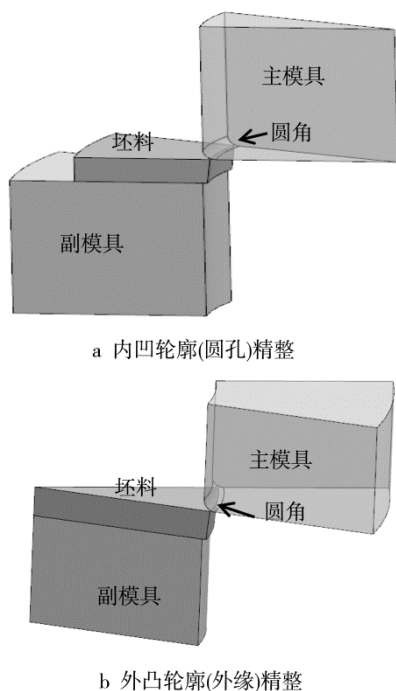


图1 内凹和外凸轮廓的精整模型

Fig.1 Finishing model of outer convex contour and inner concave contour

文中仅研究内凹切挤复合精整和外凸切挤复合精整时材料的流动特性。内凹形曲率零件的精整统称为内凹轮廓精整,外凸形零件的精整统称为外凸轮廓精整^[4],内凹和外凸轮廓的精整模型见图1。由于在精整过程中,内凹轮廓精整的切屑流动向着径向集聚,而外凸则是径向发散,两者成形特点不同,所以以简单的圆形零件为对象,通过数值模拟,来研究内凹和外凸零件成形过程中材料变形区的流动、剪切滑移等的规律,为切挤复合精整工艺的

实际应用提供理论参考。

1 精整过程中变形区的分析

主模具进入到材料一定深度时材料的变形情况见图2。从图2可以看出,切挤复合精整工艺的变形集中在主模具圆角和精整间隙区域内,变形区可以细分为主变形区、新面形成区、废料变形区、剪切滑移区。主变形区的应力应变状态可以直接影响成形质量的好坏^[5]。

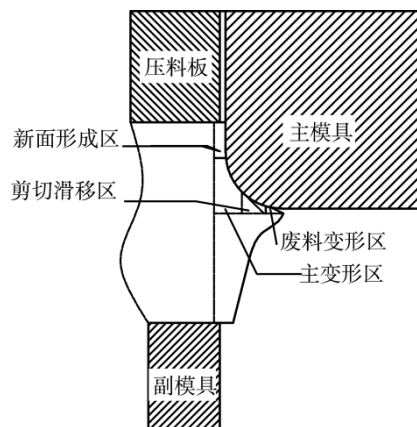


图2 切挤复合精整变形区划分

Fig.2 Dividing diagram of finishing deformation zone of cutting-extruding trimming

主变形区在主模具圆角附近。这个变形区是切挤复合精整工艺的核心变形区,由于主模具圆角的挤压作用,变形区的材料在此区域产生了大塑性变形,变形程度较大导致该区域材料流动较为剧烈。新形成表面的形成、切屑与工件基体的分离都需要经过这个区域。该区域的核心部位为剪切滑移区,这个区域的材料受到了主模具圆角的挤压以及摩擦作用,使切应力达到了材料屈服强度,引起了剪切滑移,进而使材料沿着滑移线方向产生剪切变形,精整前预留的余量大部分都要在这个区域发生大塑性变形而成为切屑^[6]。此区域的应力应变状态可以直接影响成形表面质量的好坏。

新面形成区类似于切削的第三变形区。在已加工表面层内,受到模具的挤压和摩擦作用,使该层内的晶格伸长、呈纤维化、扭曲、甚至碎裂,进而导致已加工表面产生塑性变形及硬化。

废料变形区位于精整主模具下端面,推挤切屑金属的区域。废料的流动阻力客观上对主变形区的压应力状态及应力大小起着重要作用。在精整过程中剪切滑移区切屑的积累不断增多,这时由于未变形材料对余量的支撑作用,切屑纵向流动受阻,切屑沿着径向流动,流入到主模具下端面。由于主模具下端面的摩擦和挤压作用,再加上润滑条件有限,该区域内切屑部分和主模具下端面会出现滑动摩擦和粘结摩擦。

2 精整过程中的金属流动分析

2.1 基础数据的选取

材料选用厚度为 4 mm 的 20 钢板材,加工圆的轮廓半径为 15 mm,主模具圆角半径取 1.0 mm,余量为 0.5 mm。文中采用数值模拟和物理实验相结合的方法。在 Deform 软件模拟中,选择 Normalized C&L 断裂准则,阈值(临界破坏值)为 1.54^[7-9],即当它的最大拉应力和应变能达到了材料断裂的临界破坏值 1.54 时,金属就会发生断裂。

2.2 内凹轮廓精整变形区材料流动规律

2.2.1 内凹轮廓精整速度场分析

在切屑形成阶段(见图 3a),变形区材料在主模具圆角的径向分力作用下主要向着基体流动。在稳

定精整阶段(见图 3b),主模具圆角完全切入材料内部,对基体材料有向+x方向(基体部分方向)的侧向推力,使得其内部出现涡流。由于主模具下端面的摩擦作用,切屑沿着-x方向(切屑方向)的流动逐渐减弱至消失,而从剪切面到切屑顶端材料的流动速度却逐渐增大,这是因为基体下方未变形的余量对切屑的支撑作用阻止了切屑的流动,所以切屑距离成形面越远,流动速度越大^[10-11]。在切屑分离阶段的初始(见图 3c),仍伴有涡流,涡流可以提高静水压应力,抑制裂纹的产生,促使得到粗糙度较好的零件;随着精整过程的继续,切屑与材料基体部分的连接作用越来越小,而基体金属受到切屑材料的拉力作用越来越强,导致涡流逐渐消失,并且基体材料都有向切屑方向流动的趋势。

2.2.2 内凹轮廓精整剪切滑移规律

为了探究材料的剪切滑移特点,将模拟坯料余量选为 0.5 mm,在研究过程中,采用从已成形成面上的点来反向去找其相应的未加工时的点的方法,因此,在精整到 108 步时,在新面 z 轴上选取了分别位于切屑形成阶段、稳定精整阶段和切屑分离阶段下的 3 个点: $P_1(15, 0, -0.4)$, $P_2(15, 0, -2.5)$ 和 $P_3(15, 0, -3.2)$ 。由于零件切向的几何和应力具有对称性,所以没有 y 轴方向的位移追踪,得到了精整前(-1 步)时 3 点的坐标: $P_1(14.856, 0, -0.101)$, $P_2(15.017, 0, -1.667)$ 和 $P_3(15.065, 0, -2.855)$ 。内凹轮廓精整中成形面上 3 点的相对位置见图 4。

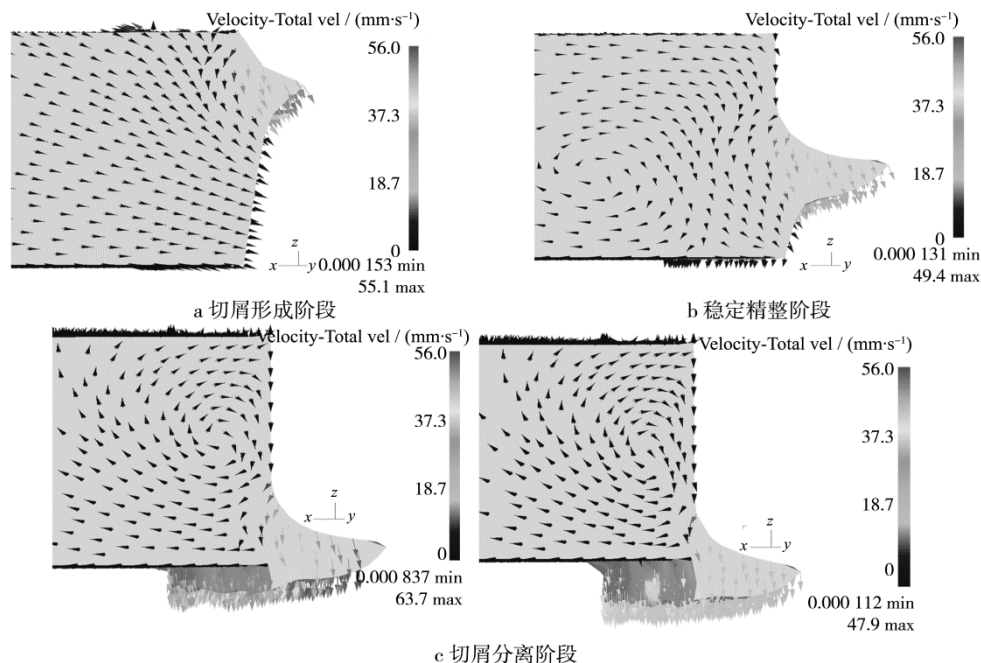


图3 内凹轮廓精整过程中金属流动速度场分布

Fig.3 Flow velocity field distribution of metal materials in the finishing process of inner concave contour

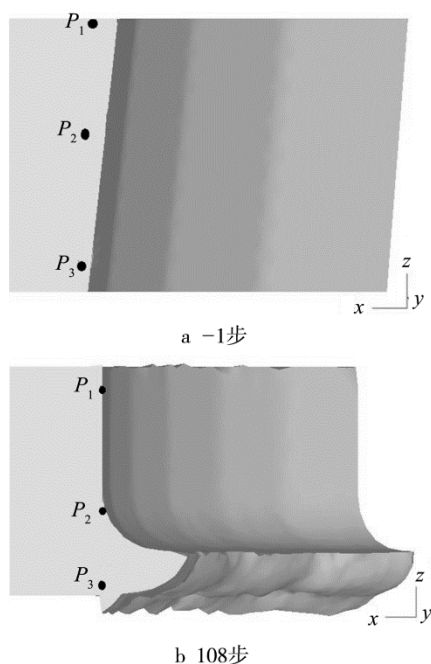


图4 内凹轮廓精整成形面3点处的相对位置
Fig.4 The relative position of the three points in the finishing plane of the inner concave contour

P_1 点沿 $+x$ (基体部分)方向滑移了0.135 mm,沿 $-z$ (精整)方向滑移了0.315 mm,滑移距离较短。由于成形开始没多久, P_1 点的变形就已经结束,这个阶段的余量最初受到主模具圆角的径向分力作用而向基体材料流动,在 z 方向近似直线滑移,很快移动形成新表面。

P_2 点分别移动了0.08 mm和0.107 mm,在 x 轴方向滑移距离最长,这是由于 P_2 处于稳定阶段,

切屑不断增多,在未变形材料对余量的支撑作用以及主模具下压的综合作用下,材料沿着剪切角滑移,使得 P_2 点向 $-x$ 方向运动,接着主模具下移接近 P_2 点, P_2 点受到圆角的挤压作用又向着 $+x$ (基体)方向流动。在 $-z$ 方向, P_2 点最终滑移了1.44 mm,在 z 轴的滑移速度最快、滑移距离最长,因为切屑随着主模具的下移,受到的支撑作用逐渐变小,速度下移得较快,说明稳定精整阶段金属在精整方向剪切滑移最剧烈。

P_3 点处材料向 $-x$ (切屑)方向和 $-z$ 方向分别滑移了0.0742 mm和0.338 mm后,变成切屑,这说明在精整切屑分离阶段,材料向凹模圆角即切屑方向的流动现象更为明显。 P_3 点位于切屑分离阶段,在这一阶段切屑与基体材料连接面逐渐减小,这时的精整力主要是使切屑与基体材料分离,使它沿 $-x$ (切屑)移动;凸模端面对接触切屑有摩擦和挤压作用,凹模型腔对接触切屑也有摩擦作用,使得切屑区的质点流速很低,根据最小阻力定理可知, P_3 点这一位置的材料沿剪切角方向慢慢滑移到切屑里面,所以在 z 轴的滑移速度较小。

2.3 外凸轮廓精整变形区材料流动规律

2.3.1 外凸轮廓精整速度场分析

在切屑形成阶段(见图5a),余量在主模具圆角的作用下,主要沿着剪切角方向运动形成切屑。在稳定精整阶段(见图5b),形成的切屑流入到主模具

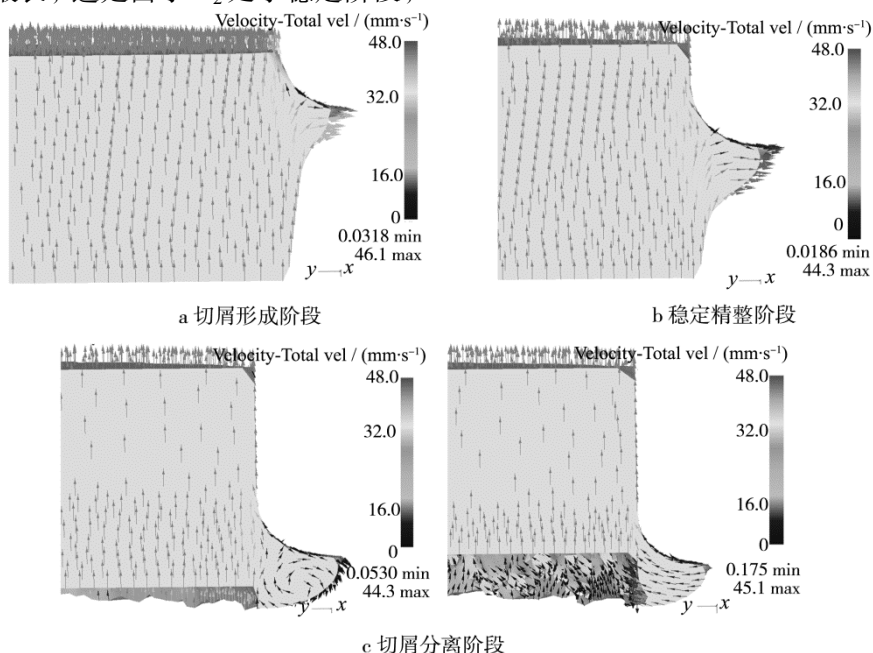


图5 外凸轮廓精整过程中金属流动速度场分布

Fig.5 Flow velocity field distribution of metal materials in the finishing process of outer convex contour

圆角上端面,由于上端面的摩擦作用,切屑的径向流动速度逐渐减小,这2个阶段成形面附近材料的流动和基体材料一致。在切屑分离阶段(见图5c),切屑与基体材料的连接作用越来越小,又由于主模具上端面的摩擦作用,切屑在径向的流动逐渐减弱至消失,然后向精整方向移动,形成涡流。在外凸轮廓精整过程中可以发现,基体材料在副模具的作用下始终沿着精整方向流动,并且基体材料内部没有涡流产生。

2.3.2 外凸轮廓精整剪切滑移规律

同样,将模拟坯料余量选为0.5 mm,采用从已成形面上的点来反向去找其相应的未加工时的点的方法进行研究。在外凸轮廓试件精整到102步时,选取了3个点: $P_1(0, -15, -6)$, $P_2(0, -15, -4.3)$ 和 $P_3(0, -15, -3.5)$ 。精整前3点的坐标分别为: $P_1(0, -15.115, -3.829)$, $P_2(0, -14.922, -1.937)$, $P_3(0, -14.939, -0.702)$ 。外凸轮廓精整的零件表面上3点的相对位置见图6。

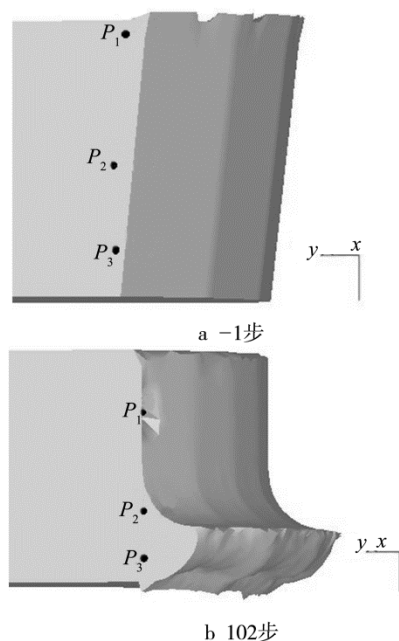


图6 外凸轮廓精整成形面3点处的相对位置

Fig.6 The relative position of the three points in the finishing plane of the outer convex contour

新成形表面上的点的滑移特点与内凹轮廓精整类似,也共3种。 P_1 沿着+y(基体)方向滑移了0.127 mm,向z(精整)方向滑移了0.764 mm; P_2 点先向着-y(切屑)方向移动了0.088 mm,然后向着+y(基体)方向滑移了0.147 mm,z(精整)方向最终滑移了2.314 mm,滑移距离最长; P_3 点一直向着-y(切屑)方向移动了0.115 mm,在精整方向滑移了0.697

mm成为切屑。与内凹轮廓精整的区别就是3点在精整方向滑移距离较长,因为外凸轮廓零件的切屑流动向着径向发散,对剪切面基体材料的压应力减小,而内凹轮廓零件的切屑流动向着径向正好相反,内部材料由于切屑的阻碍不易向外流动,因此外凸轮廓零件各点需要滑移较长距离成形在新成形表面上。

3 结论

1) 切挤复合精整工艺的变形主要集中在主模具圆角和精整间隙区域内,变形区可以细分为主变形区、新面形成区、废料变形区、剪切滑移区。主变形区的应力应变状态可以直接影响成形质量的好坏。

2) 在金属流动分析中,内凹轮廓精整在切屑形成阶段,材料主要向着基体流动;在稳定精整阶段,内部出现涡流;在切屑分离阶段初始,涡流逐渐消失,基体材料有向切屑方向流动的趋势。外凸轮廓精整在切屑形成阶段,主要向着剪切角方向流动;在稳定精整阶段,成形面附近材料的流动和基体材料一致,都是向着精整方向移动;在切屑分离阶段初始,切屑内出现涡流,后涡流逐渐消失。

3) 内凹轮廓精整时,基体材料的内部有涡流现象出现,涡流可以提高静水压应力,抑制裂纹的产生,促使得得到光洁度较好的零件。然而,在外凸轮廓精整的整个过程中,基体部分没有形成涡流,切屑部分却形成了涡流。两者不同之处在于内凹轮廓切屑的流动是向着径向集聚而外凸则是离心发散,导致外凸轮廓切屑发散的阻力相对较小,容易发散,不易形成涡流。所以,在相同的情况下,内凹轮廓精整相对于外凸轮廓精整容易达到较高的成形质量。

4) 在剪切滑移情况分析中,发现内凹和外凸轮廓精整中,材料的剪切滑移具有相似的规律,即3个阶段的材料在主模具圆角的推挤作用下,都有沿着径向和轴向移动的情形。相同之处是,在稳定精整阶段,在精整方向上,滑移速度最快、滑移距离最长,因为切屑随着主模具的下移受到的支撑作用变小,速度下移得较快,说明稳定精整阶段,金属在精整方向剪切滑移最为剧烈。2种精整的不同之处在于,在整个精整过程中,外凸轮廓相比于内凹轮廓零件,材料在精整方向上滑移了较长距离才

能处于新成形表面上,内凹轮廓变形区材料所受应力多为压应力,所以内凹比外凸轮廓精整易得到较好的成形质量。

参考文献:

- [1] 邓明, 彭成允, 颜井刚. 板状精密轮廓零件的精冲成形[J]. 机械设计与制造工程, 2001, 30(4): 68—69.
DENG Ming, PENG Cheng-yun, YAN Jing-gang. Fine Blanking for Precise Outline of Plat-like Components[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2001, 30(4): 68—69.
- [2] 袁秋, 邓明, 宁国松, 等. 切挤复合精整中凸模圆角对核心变形区应力状态的影响[J]. 精密成形工程, 2014, 6(3): 45—49.
YUNA Qiu, DENG Ming, NING Guo-song, et al. Effects of the Punch-nose Radii on the Stress State of Core Deformation Zone in Shearing-extruding Trimming Technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(3): 45—49.
- [3] LYU Lin, NING Guo-song, DENG Ming. The Actuality & Process Numerical Simulation of Cutting-extruding Compound Trimming Deflashing Technology[C]. The 12th Asian Symposium on Precision Forging, 2012: 63—67.
- [4] 周开华. 精冲工艺图解: 原理·方案·应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
ZHOU Kai-hua. Fine-blanking Process Diagram: Theory·Scheme·Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [5] 万舒, 吕琳, 宁国松. 剪挤式复合精整中材料流动规律和变形过程的研究[C]// 第五届西南锻压技术会议论文集, 2013.
WAN Shu, LYU Lin, NING Guo-song. Research of Deformation Process and Metal Flow Law of Shearing-extruding Trimming Technology[C]// The Collected Papers of the 5th Southwest Forging Technology Symposium, 2013.
- [6] 吕琳, 万舒, 宁国松, 等. 切挤复合精整成形机理及材料流动规律研究[J]. 锻压技术, 2014, 39(3): 25—28.
LYU Lin, WAN Shu, NING Guo-song, et al. Research on Forming Process and Metal Flow Mechanism of Cutting-extruding Compound Trimming Deflashing[J]. Forging & Stamping Technology, 2014, 39(3): 25—28.
- [7] 蒲思洪, 温彤, 吴维, 等. 韧性断裂准则与阈值选取的理论及试验研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(3): 18—21.
PU Si-hong, WEN Tong, WU Wei, et al. Theoretical and Experimental Research on Choosing Criterion and Critical Value of Ductile Fracture[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(3): 18—21.
- [8] COCKCROFT M G, LATHAM D J. Ductility and the Work-ability of Metals[J]. Journal Institute of Metals, 1968(96): 33—39.
- [9] BROKKEN D, BREKELMANS W, BAAIJENS F. Numerical Modeling of the Metal Blanking Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998: 83 (1/2/3): 192—199.
- [10] 邓明, 刘璐周, 吕琳. 闭挤式精冲直齿轮的材料流动分析[J]. 锻压技术, 2014, 39(6): 114—117.
DENG Ming, LIU Lu-zhou, LYU Lin, et al. Material Flow Analysis on Spurgear of Closed Extruding Fine Blanking[J]. Forging & Stamping Technology, 2014, 39(6): 114—117.
- [11] 王振球. 基于平面压边技术的厚板精冲工艺研究及断面质量预测[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
WANG Zhen-qiu. Research on the Fine Blanking Process of Thick Plate Based on the Plane Blank Pressing Technology and the Prediction of the Section Quality [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.