

基于滑移线场的闭挤式精冲主冲力计算及实验验证

吕琳, 王若璜, 马一龙, 邓明

(重庆理工大学, 重庆 400054)

摘要: 目的 研究基于滑移线场的闭挤式精冲主冲力计算, 为后续的仿真模拟提供理论基础。方法 根据闭挤式精冲的成形特点, 建立闭挤式精冲坯料变形区的力学模型, 通过处理刚塑性体平面应变问题的方法, 利用滑移线理论建立闭挤式精冲的滑移线场, 通过该滑移线场的建立计算冲裁过程中的主冲裁力。结果 滑移线法计算出的结果, 并通过精冲实验进行了验证, 实验得到冲裁力的大小与滑移线法所计算出的冲裁力相差 0.8%, 经过分析, 认为误差的存在主要由摩擦力的忽略及材料被视为刚塑性材料所致。结论 滑移线法计算冲裁力是比较适用的, 为闭挤式精冲的工艺参数提供了较为精确的计算方法。

关键词: 精冲; 滑移线; 冲裁力

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.03.018

中图分类号: TG306 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2017)03-0094-04

Main Blanking Force Calculation and Experimental Verification of Closed-Extruding Fine Blanking based on Slip Line Field

LYU Lin, WANG Ruo-huang, MA Yi-long, DENG Ming

(Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

ABSTRACT: The paper aims to research the main closed extruding fine blanking force of the slip line field and provide a theoretical basis for follow up analogue simulation. A mechanical model for the transformation area of closed-extruding fine blanking was established according to its forming features. The slip line theory was utilized to establish the slip line field of closed extruding fine blanking by using plane strain theory of rigid-plastic material to calculate the main blanking force in the blanking process. The result calculated by the slip line method was verified through a fine blanking experiment. The blanking force obtained in the experiment was varied by 0.8% compared with the calculated result. After analysis, it was believed that the error was caused mainly by ignorance of friction and that the material being regarded as rigid-plastic material. The slip line method is appropriate to calculate blanking force; it provides an accurate calculation method for the process parameters of closed-extruding fine blanking.

KEY WORDS: fine blanking; slip line; blanking force

闭挤式精冲工艺是加工厚板和难精冲材料的一种特种精冲技术^[1-4], 滑移线法是研究塑性变形力的主要手段之一^[5]。闭挤式精冲变形区的变形情况见图 1, 尽管坯料变形过程十分复杂, 仍可根据图 1 所

示的闭挤式精冲的变形特性将坯料的变形简化为刚塑性材料的平面应变问题^[6], 从而利用滑移线理论建立闭挤式精冲的应力场模型。这不仅可以求得总体目标量, 如变形量、变形力大小, 而且局部的应力和应

变也能可靠地确定, 在原理上为以后的数值计算奠定基础, 且能够提前对数值计算方法进行验证, 对闭挤式精冲的工艺参数提供较为精确的计算方法^[7-8]。

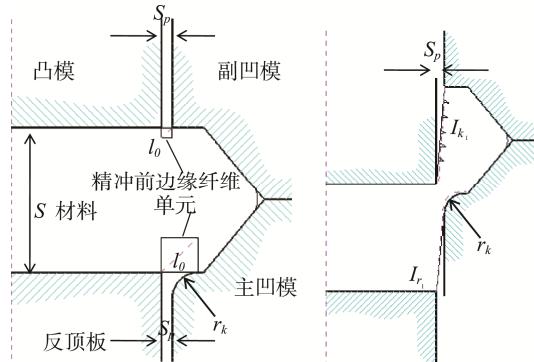


图1 闭挤式精冲落料件变形区的变形

Fig.1 closed-extruding fine blanking blank deformation zone

1 闭挤式精冲滑移线场的建立

通过4点共圆法绘制滑移线场^[9-10]。4点共圆原理见图2, 将曲边 \widehat{AB} 和 \widehat{AC} 用直线 \overline{AB} 和 \overline{AC} 代替, 再分别从B点和C点作 \overline{AB} 和 \overline{AC} 的垂线, 2垂线的交点即为所求的节点D。以虚线表示四边形各边, B, C处均为直角, 因此, 可以得出节点D一定在以对角线 \overline{AD} 为直径的圆上, 4点共圆示意见图3, 因此, A, B, C, D这4点共圆, 圆心为对角线 \overline{AD} 的中点O。

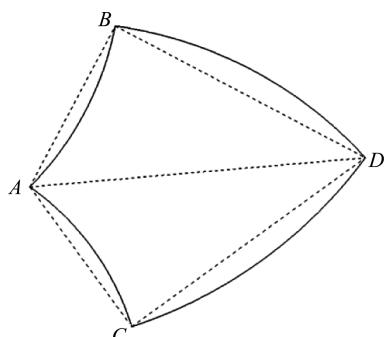


图2 4点共圆原理
Fig.2 Four point circle

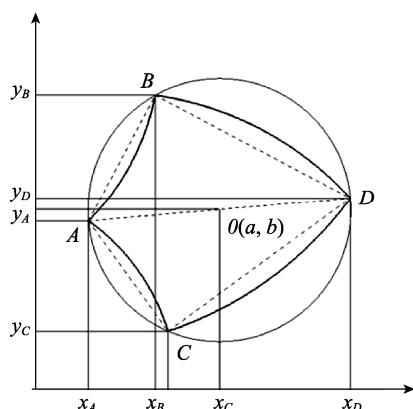


图3 4点共圆示意

Fig.3 Four point circle principle diagram

由于圆心O到节点A, B, C, D的距离相等, 若设圆心O的坐标为(a, b), 根据几何关系, 可解得D点的坐标见式(1)。若A, B, C节点的坐标已知, 利用式(1)即可求得节点D的坐标位置(x_D, y_D)。确定D点的坐标后, 相邻网格的节点坐标可按上述步骤同样计算出来。利用此原理, 并通过绘制有心扇形滑移线场, 就可以较快地绘制出整个滑移线场。建立后的闭挤式精冲滑移线场见图4。

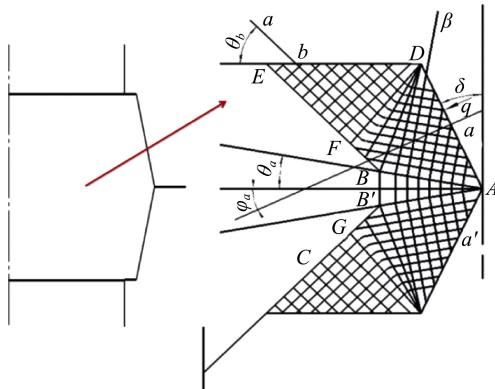


图4 闭挤式精冲滑移线场

Fig.4 Closed-extruding fine blanking slip line field

$$\begin{cases} x_D = 2a - x_A \\ y_D = 2b - y_A \end{cases} \quad (1)$$

2 精冲主冲裁力的计算

精冲时, 冲裁力的计算见式(2)^[11-13]。

$$F = q_1 Lx \quad (2)$$

式中: F 为精冲冲裁力; L 为冲裁轮廓线线长; q_1 为凸模单位压力; x 为冲裁凸模与板料接触宽度。

板料受力以及滑移线见图4。由式(2)不难发现, 需计算凸模的单位压力 q_1 才能计算冲裁力。在求解 q_1 时, 需做如下假设: ① 凸模单位压力 q_1 与板料的作用宽度为 x , 且 q_1 以及外环侧壁单位压力 q 均为均布载荷; ② 板料为理想的刚塑性体材料; ③ 接触面的摩擦因数均设为 0。

在副凹模外环内侧边界和板料的自由界面上分别取一点 a , b 进行分析。假设将边界看成是斜截面, 如果物体已进入塑性状态, 则各点的应力分量应满足式(3)–(4)的条件^[14-15]:

$$\sigma_m = \sigma_n + k \sin 2(\theta - \varphi) \quad (3)$$

$$\theta = \varphi \pm \frac{\arccos\left(\frac{\tau_n}{k}\right)}{2} \quad (4)$$

式中: σ_m 表示静水压力; σ_n 表示界面上的正应力; τ_n 表示界面上的切应力; φ 表示正应力与 x 轴正向之间的夹角; θ 表示滑移线方向与 x 轴正向之间的夹角; k 表示应力莫尔圆半径 (材料的剪切屈服

强度)。

对于 a 点, $\sigma_{na} = -q$, $\varphi_a = -\delta$, $\theta_a = \frac{\pi}{4} - \delta$; 又

根据由图 4 的几何关系可知: $\sigma_{nb} = 0$, $\theta_b = \frac{\pi}{4}$, $\varphi_b = \frac{\pi}{2}$ 。再由汉基方程 $\sigma_{ma} - \sigma_{mb} = 2k(\theta_a - \theta_b)$, 可得: $q = 2k(1 + \delta)$ 。

由图 4 可知, ΔDEF 区域为均匀应力场, 故 F 点的平均应力与 b 点相同, 即: $\sigma_{mf} = \sigma_{mb} = -k$ 。且由几何关系, 有 $\theta_{B'} = \delta - \frac{\pi}{4}$, $\theta_B = \frac{\pi}{4} - \delta$ 。带入汉基方程 $\sigma_{mf} - \sigma_{mb} = 2k(\theta_F - \theta_B)$, 可得: $\sigma_{mb} = -(2k\delta + k)$ 。

由于 $\theta_{B'} = \delta - \frac{\pi}{4}$ 。根据汉基方程, 有 $\sigma_{mb'} = 2k\delta + k - 2k(\frac{\pi}{4} - \delta) = 4k\delta + k - \frac{k\pi}{2}$, $\sigma_{mb'} - \sigma_{mg} = 2k(\theta_{B'} - \theta_G)$, $\theta_G = \frac{\pi}{4}$, 可得: $\sigma_{mg} = 2k\delta + k + \frac{k\pi}{2}$ 。

由图 5 的几何关系可以看出, o_3 点的平均应力和 G 点的平均应力应该相等, 即: $\sigma_{mo_3} = \sigma_{mg}$ 。且 $\Delta o_1 o_3 o$ 是均匀应力场, 那么可以得到: $\sigma_{mo_3} = \sigma_{mo}$; 由塑性变形静水应力方程, 得到 $\sigma_{mo} = \sigma_{no} + \frac{\sigma_{io}}{2}$ (5), $\sigma_{no} - \sigma_{io} = 2k$ (6)。由于 $\sigma_{no} = q_1$, 将 σ_{mo} 所得结果代入式 (5)–(6), 对方程组进行求解, 就可以求出凸模单位压应力 q_1 的值。解方程组得 $q_1 = \frac{4k\delta + 4k + k\pi}{3}$ 。

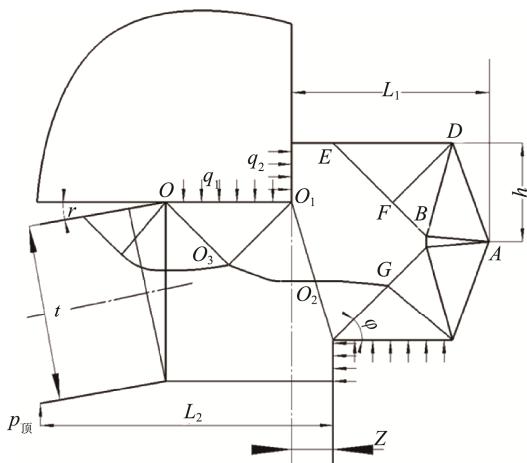


图 5 板料受力及滑移线

Fig.5 Stress and slip line diagram of sheet metal

根据图 4 的几何关系, 即 $PQ = x \tan \gamma$, $OP = OO_3 = \frac{\sqrt{2}x}{2}$, $OR = 2(PQ + OP) = \frac{t}{\cos \gamma}$, 可得: $x = \frac{t}{(\sqrt{2} + 2 \tan \gamma) \cos \gamma}$, 其中 t 为板料厚度, γ 为平衡时板料的弯曲角。弯曲角为 γ 时板料平衡, 通过对板料

受力的分析, 可得到板料弯曲时, 平衡方程式为:

$$q_2 y u + M_{抗} + p_{顶} L_2 + 2q h L_1 \cos \delta = q_1 x S$$

式中: L_1 为型腔外环至凸模刃口距离; L_2 为工件半径; $p_{顶}$ 为反顶力, $p_{顶} = f p_g$; p_g 为单位面积上的反顶力, 一般 $p_g = 2 \sim 7$ MPa; f 为工件受顶面积; $u = \frac{t}{\cos \gamma} - y - z \tan \gamma$, $S = x + z$ 。 $M_{抗}$ 为材料内部单位长度的抵抗弯矩, $M_{抗} = \frac{t^2 \sigma_s K_0}{6}$ ($K_0 = 1.5$, σ_s 为材料屈服强度)

求得 q_1, x, γ 代入式(2)即可求得冲裁力的大小。

相应的模具参数为 $\sigma_s = 245$ MPa, $K = \frac{\sigma_s}{2} = 122.5$ MPa, $\delta = 10^\circ$, $h = 5$ mm, $L = 61.2$ mm。带入式(2), 求得冲裁力 $p = 441$ kN。

3 实验

首先进行了闭挤式精冲圆柱形零件的冲裁试验, 精冲后的零件见图 6。冲裁过程中行程载荷曲线见图 7, 由图 7 可知, 实际冲裁力最大为 445 kN。与经验公式所计算的 441 kN 相比结果相差 0.8% 左右。误差产生的主要是在计算过程中忽略了摩擦力, 且假设板料为刚塑性材料的原因。



图 6 精冲零件及其废料环

Fig.6 Fine blanking parts and scrap ring

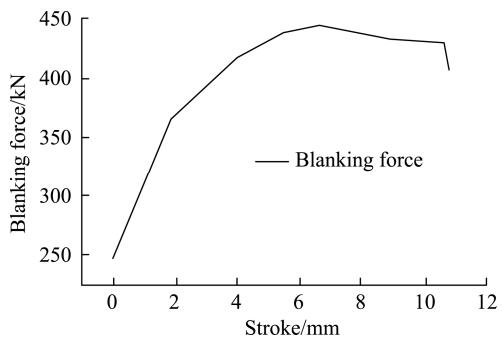


图 7 载荷行程曲线

Fig.7 Load stroke curve

4 结论

利用 4 点共圆的方法, 通过计算机绘制出闭挤式精冲的滑移线场, 利用滑移线理论, 并假设材料为刚塑性材料, 通过刚塑性模型建立滑移线场来近似求

解,在此基础上分别分析了闭挤式精冲过程的冲裁力和静水应力等参数的计算方法。

1) 闭挤式精冲冲裁力的计算公式为

$$F = q_1 Lx = \frac{tL(4k\pi + 4k + k\pi)}{3[(\sqrt{2} + 2\tan\gamma)\cos\gamma]}.$$

2) 通过物理实验,得到实验中冲裁力的大小为445 kN,与滑移线所计算出来的结果441 kN相差很小,说明滑移线计算冲裁力是较符合实际的。

参考文献:

- [1] 邓明, 王正立, 吕琳. 精冲成形机理的再探讨[J]. 精密成形工程, 2009, 1(3): 18—20.
DENG Ming, WANG Zheng-li, LYU Lin. Discussion on Theory of Fine-Blanking[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2009, 1(3): 18—20.
- [2] 邓明, 夏庆发. 精冲挤压复合成形机理浅析[J]. 第十届全国塑性工程学术年会, 2007.
DENG Ming, XIA Qing-fa. Study of the Fineblanking-extruding Forming Principle[J]. The Tenth Annual National Conference on Plastic Engineering, 2007.
- [3] 邓明, 张会杰, 吕琳, 等. 闭挤式精冲工艺及其成形规律[J]. 锻压技术, 2009, 34(6): 39—41.
DENG Ming, ZHANG Hui-jie, LYU Lin, et al. Research on Process of Closed Extruding Fine-blanking and Material Flowing Rule[J]. Forging & Stamping Technology, 2009, 34(6): 39—41.
- [4] 邓明, 张会杰, 吕琳, 等. 基于物理实验的闭挤式精冲工艺研究[J]. 锻压技术, 2010, 35(4): 43—46.
DENG Ming, ZHANG Hui-jie, LYU Lin, et al. Research on Squeeze-type Fine-blanking Process Based on Physical Experiments[J]. Forging & Stamping Technology, 2010, 35(4): 43—46.
- [5] 张国泽, 叶旭明, 申奎东. 滑移线法求变形力实验模拟与计算修正[J]. 锻压技术, 2004, 30(1): 54—56.
ZHANG Guo-ze, YE Xu-ming, SHEN Kui-dong. Experimental Simulating and Calculateion Correction of Deformation Force Slipde-line Method[J]. Forging & Stamping Technology, 2004, 30(1): 54—56.
- [6] 吴承建, 陈国良, 强文江, 等. 金属材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
WU Cheng-jian, CHEN Guo-liang, QANG Wen-jiang, et al. Metal Material Science[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [7] 王峰, 程万军, 高文平, 等. 圆柱体闭式镦粗变形力的计算[J]. 模具工业, 2013, 39(7): 57—60.
WANG Zheng, CHENG Wan-jun, GAO Wen-ping, et al. Calculation of Deformation Force of Cylinder Closed-upsetting[J]. Die & Mould Industry, 2013, 39(7): 57—60.
- [8] 林志平, 夏泰明. 圆柱体闭式镦粗力的上限解[J]. 模具技术, 1985, 11(1): 11—19.
LIN Zhi-ping, XIA Tai-ming. Upper Bound Solution of Cylindrical Upsetting Force[J]. Die & Mould Industry, 1985, 11(1): 11—19.
- [9] 汪大年. 金属塑性成形原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
WANG Da-nian. Principles of Metal Plastic Forming[M]. Beijing: China Machine Press, 1986.
- [10] 邬移华, 罗文波, 彭炎荣. 利用四点共圆作图法构建复杂滑移线场[J]. 力学与实践, 2010, 32(2): 125—128.
WU Yi-hua, LUO Wen-bo, PENG Yan-rong. Four Point Common Circle Method is Used to Build Complex Slip Line Field[J]. Mechanics and Engineering, 2010, 32(2): 125—128.
- [11] 李和平. 精密冲裁力理论计算公式推导[J]. 模具工业, 1998, 24(11): 32—34.
LI He-ping. Precision Blanking Force Theoretical Formula Derivation[J]. Die & Mould Industry, 1998, 24(11): 32—34.
- [12] 涂光祺. 精冲技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
TU Guang-qi. Fine-blanking Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [13] 周开华. 简明精冲手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
ZHOU Kai-hua. Fineblanking Handbook[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982.
- [14] 彭大暑. 金属塑性加工原理[M]. 北京: 中南大学出版社, 2006.
PENG Da-shu. Principle of Metal Plastic Processing[M]. Beijing: Central South University Press, 2006.
- [15] 徐洲, 姚寿山. 材料加工原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
XU Zhou, YAO Shou-shan. Material Processing Principle[M]. Beijing: Science Press, 2003.