

模具

复杂汽车结构件多工位级进模条料冲裁刃口优化设计

李 贵^{1,2}, 刘耀东^{1,2}, 梁仁杰^{1,2}

(1. 武汉科技大学 冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081;
2. 武汉科技大学 机械传动与制造过程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081)

摘要: 复杂汽车结构件的条料冲裁刃口是依据其展开的轮廓线设计得到的, 由于轮廓线为复杂曲线, 刃口的形状各异, 使得其设计比较复杂。因此, 基于轮廓曲线的内凹特征拐点分割思想, 提出一种冲裁刃口优化设计方法。首先, 对条料及其刃口的特点进行总结、分析和研究, 提出冲裁刃口设计的一般性通用准则。然后, 根据刃口外凸性要求, 提取轮廓线相对冲裁区域的内凹点, 基于他们沿送料方向作分割线, 将冲裁区切割为多个异形区域。提出以异形区域与其矩形包容盒面积比作为判断依据, 对分块区域的分割线进行优化, 得到刃口分块方案。最后, 以各刃口冲裁合力作用中心到冲裁模具中心的最小距离为优化目标函数, 求解得到冲裁刃口工位的最优布置方案。实例表明, 通过该方法优化设计得到的冲裁刃口满足外凸性质量要求, 可为多工位级进模条料的全自动化智能设计提供支持。

关键词: 多工位级进模; 条料; 冲裁刃口; 外凸性; 轮廓线

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.022

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 01-0153-08

Optimization design of strip blanking blade of multi-station progressive die for complex automotive structural parts

Li Gui^{1,2}, Liu Yaodong^{1,2}, Liang Renjie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Education Ministry, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: The strip blanking blade of complex automotive structural part is designed according to its unfold outline. Because the contour line is a complex curve, the blade of different shapes makes its design more complicated. Therefore, based on the cutting concept at the inflection points of concave feature for contour curve, an optimization design method of blanking blade was proposed. First, the characteristics of the strip and its blade were summarized, analyzed and studied, and the general design criteria of blanking blade was proposed. Then, depending on the requirements of the blade convexity, the concave points of the contour curve relative to the blanking area were extracted. Based on the concave pole points, the cutting lines were made along the feeding direction, and the blanking was cut into several special-shaped areas. Furthermore, based on the area ratio of the special-shaped area to its rectangular containment box, the segmentation lines of the blanking area were optimized, and the blade segmentation schemes were obtained. Finally, the optimization layout scheme of the blanking blade station was obtained by constructing the minimum distance between the center of the combined blanking force for each blade and the center of the blanking die. The examples show that the blanking blades obtained by the optimized design meets the requirements of convexity quality, which provides strong support for strip automated intelligent design in the multi-station progressive die.

Key words: multi-station progressive die; strip; blanking blade; convexity; contour curve

多工位级进模是当代先进模具技术的典型代表, 是冲压模具重点发展的方向之一^[1]。相比其他零

件, 汽车结构件的多工位级进模具有冲裁和成形工序组合设计、工序间的关联性和依赖性强的特点^[2], 尤其是冲裁工序的精确刃口线的预测严重依赖后续成形工序, 设计过程比较复杂。汽车结构件条料的冲裁轮廓线为无规则的平面复杂曲线, 使得所设计冲裁刃口的形状复杂各异^[3]。不合理的刃口线可能导致冲裁凸凹模的结构强度差, 从而影响模

收稿日期: 2020-12-05; 修订日期: 2021-02-03

基金项目: 容桂科技计划项目 (容桂经发 (2017) 27 号-8)

作者简介: 李 贵 (1983-), 男, 博士, 副教授

E-mail: leegui2030@wust.edu.cn

具的寿命和冲裁零件的质量;或者出现冲裁的废料不能顺利滑出等问题,影响冲压的生产效率、增加成本。因此,对复杂汽车结构件的条料冲裁刃口进行优化设计研究,可为多工位级进模条料的全自动化智能设计提供支持,对于提高模具冲压质量以及生产效益具有重要的工程实践意义。

多工位级进模条料的排样设计一直是近年来的研究热点^[4-7]。其中,冲裁刃口排样是条料设计的重要内容之一。徐幼林和黄凯^[8]通过对刃口多义线进行分析和对外形轮廓的分解与重组,开发了级进模的自动工序排样程序。针对冲裁刃口分解数众多的特点,吴彬等^[9]开发了冲切刃口重组的模糊聚类算法,实现了冲切刃口设计的定量分析。Hussein H M A 等^[10]应用可视化 Petri 网对条料中的排样顺序进行了模拟。曾兆敏等^[11]提出了一种生成条料最优四块排样方式的背包算法,并通过迭代优化得到最优下料方案。为了解决冲裁件无约束排样问题,车念等^[12]提出了一种生成冲裁条带的四块布局方式的最优算法,并通过求解背包问题生成冲裁条带中块的最优布局。Moghaddam M J 等^[13]提出了一种将零件边界离散为特征点的曲线识别方法,并利用代数方程组求解了最佳排样的算法。针对圆形件下料问题,王珂等^[14]提出了一种基于顺序价值修正的启发式下料算法。

上述研究并未考虑到刃口线的凸凹性对冲裁的质量及废料滑落的影响。鉴于此,文章通过分析复杂结构件多工位级进模的排样案例,总结出条料设计的一般性通用准则。基于轮廓曲线的内凹特征拐点分割思想,提出一种冲裁刃口自动设计算法,并对分块区域进行优化布置,从而提高条料冲裁排样刃口设计的质量。

1 条料冲裁刃口的设计准则

图 1 为某汽车结构件的多工位级进模条料排样,一共有 20 个工序,送料方向为从左至右。该条料最初始的 5 个工序是模具的冲裁刃口区域,其目的是冲制出条料的定位孔,并将板料轮廓线周围的废料切除,为后续成形工序的材料流动变形去除材料约束。由于结构件是三维复杂的空间几何零件,所以,其初始板料轮廓线也为复杂的非规则曲线。一般要求在有限的工序中通过分块冲裁将轮廓线周围的废料切除。那么,如何设计分块以及确定分块数量,使得冲裁工序的刃口结构最优、模具工序数最小,这是条料排样自动化设计必须要解决的首要问题。因此,文章首先从多工位模具结构设计和排样的要求上对条料的结构进行分析,提出条料冲裁刃口设计的一般性准则。

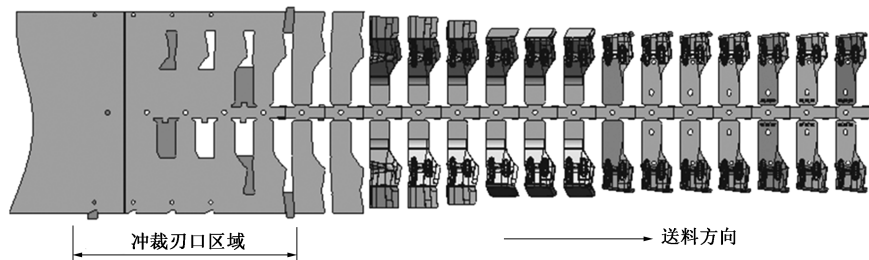


图 1 某多工位级进模条料排样

Fig. 1 Strip layout of a multi-station progressive die

(1) 条料冲裁刃口区域的分块数量不能过多,一般应在 3~5 块之间。如图 2 所示,冲裁刃口区域是由两个步距之间相对的轮廓线包围构成,是一个复杂的异形区域。如果采用整体冲裁,废料难以滑落,且冲裁凸凹模的刃口强度难以保证,也不利于模具的维修更换。一般需要将条料分成多块进行冲裁。因此,为了保证冲裁刃口强度、避免相互之间的干涉以及便于废料的顺利掉落,每一块废料均必须设计独立的冲裁凸凹模。所以,分块的刃口区域被要求交错布置在不同的工序中。如果分块过多,

则要求的冲裁工序数过多,会导致模具的结构尺寸过大。同时,过多工序导致的累积误差也会使冲裁后的板料轮廓线精度降低。所以,在条料刃口设计时,要求分块数尽量控制在 3~5 块以内,再对分块区域进行优化布置,以减少冲裁工序。

(2) 冲裁刃口应满足外凸性要求。图 3 为两个不同的冲裁刃口,他们的矩形包容盒相似,则他们的冲裁凹模外形也相似。从废料滑落的角度分析,图 3a 所示的刃口有内凹区域,对应的凹模部分即为外凸。由于异形废料的重心和几何中心不重合,使

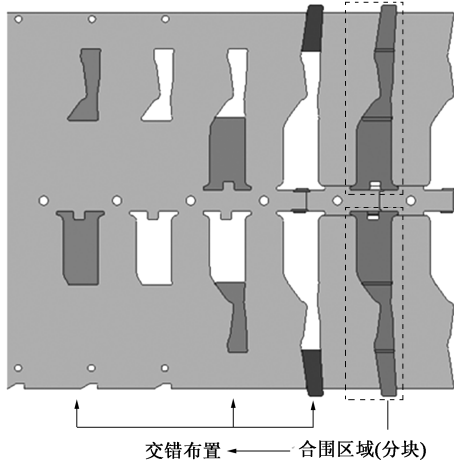


图2 废料分块冲裁

Fig. 2 Blanking in pieces of scrap

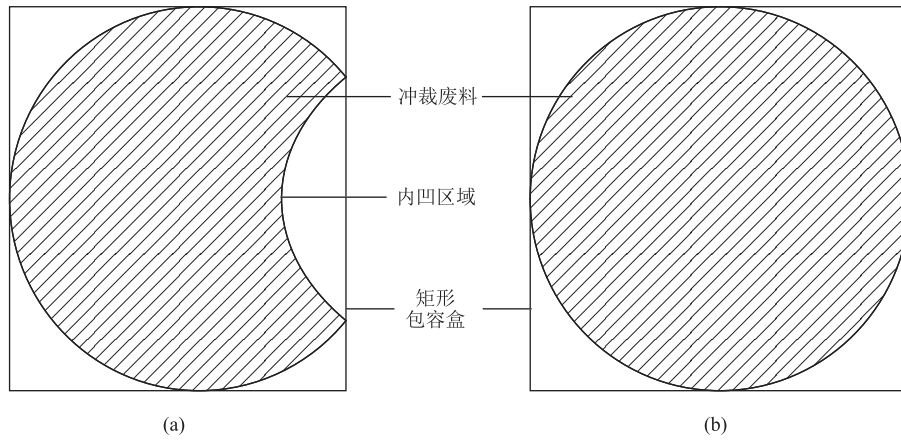


图3 冲裁刃口的凹凸性

(a) 内凹冲裁刃口 (b) 全外凸冲裁刃口

Fig. 3 Concavity and convexity of blanking blade

(a) Concave blanking blade (b) Full convex blanking blade

设计分割线, 将废料区域分割成如图4b所示的两个废料, 其外凸性要明显优于分割前的废料。因此, 在设计刃口的分块线时, 应根据刃口外凸性的要求, 提取复杂轮廓线相对于冲裁废料区域的内凹点, 并以内凹点为废料分块的分割位置, 可以满足废料以及冲裁刃口的外凸性要求。

如图2所示, 两个步距之间相对的轮廓线合围构成的废料是一个封闭区域。需提取这个封闭区域的内凹点, 即对应板料轮廓线的外凸点。

(1) 首先, 对封闭区域轮廓线基于等弧长进行离散, 得到离散点集合 S , 任取其中3个相邻的离散点 P_{i-1} 、 P_i 和 P_{i+1} 。其中 i 为各点在集合中的序号。计算 P_{i-1} 到 P_i 的矢量 $\overrightarrow{P_{i-1}P_i}$ 和 P_i 到 P_{i+1} 的矢量 $\overrightarrow{P_iP_{i+1}}$, 然后求他们之间的叉积 \vec{n}_i , 如式(1)所

得废料滑落时会产生旋转, 此时凹模的外凸部分就会卡住废料, 导致废料的滑落不畅。而图3b所示的全外凸废料掉落的顺畅性相比图3a所示的废料要稳健的多。因此, 可以通过刃口的外凸性来判断刃口的优劣。文章提出外凸性指标, 以废料区域面积与其矩形包容盒面积之比为判断依据, 面积比越大的废料, 对应冲裁刃口的外凸性就越明显, 废料的滑落就越顺畅。因此, 文章将外凸性指标作为刃口优化设计的依据。

2 刃口轮廓线内凹点提取

根据前面分析可知, 在刃口设计时, 应以外凸性设计为标准。如图4a所示, 如果在内凹的拐点上

示, 判断其值是否为零。

$$\vec{n}_i = \overrightarrow{P_{i-1}P_i} \otimes \overrightarrow{P_iP_{i+1}} \quad (1)$$

(2) 如果 \vec{n}_i 为零, 则将点 P_i 剔除, 继续往后取点 P_{i+2} , 与剩余两个点一起作为3个相邻点, 按照相同的方法, 计算相邻两点矢量之间的叉积 \vec{n}_{i+1} , 并判断其值是否为零。如果为零, 按照相同的方法继续向后取点, 直至两矢量的叉积值非零。

(3) 如果 \vec{n}_i 不为零, 则继续取下一个点 P_{i+2} , 与它的前两个点一起作为3个相邻点。按照相同的方法, 计算相邻两点矢量之间的叉积 \vec{n}_{i+1} , 判断其值是否为零。如果 \vec{n}_{i+1} 的值为零, 则按照步骤(2)的方法继续取点。

(4) 判断不为零的两相邻叉积矢量 \vec{n}_i 和 \vec{n}_{i+1} 之

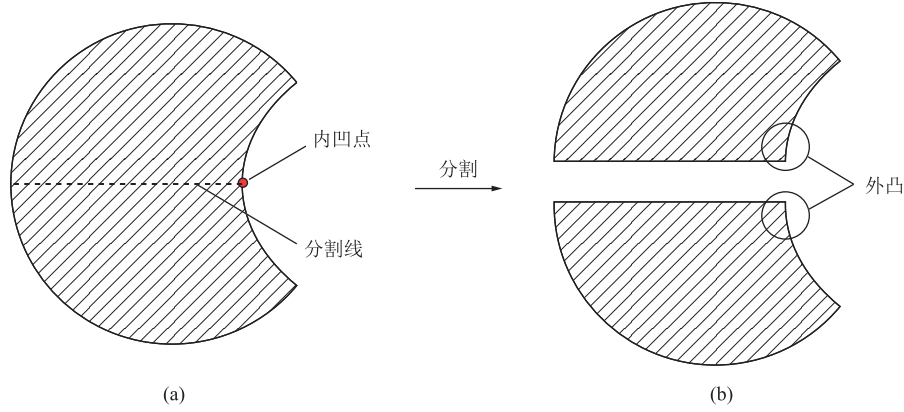


图 4 通过内凹点分割提高冲裁刃口外凸性

(a) 内凹冲裁刃口 (b) 沿内凹点分割

Fig. 4 Improvement of convexity for blanking blade by segmentation of concave point

(a) Concave blanking blade (b) Segmentation along concave point

间的单位向量是否相等。如果不相等,则点 P_i 和点 P_{i+1} 为曲线的拐点。依次求得曲线所有的拐点。

(5) 利用步骤(4)得到的拐点将离散点分成多个点集 S_j , 其中 j 为各点集的序号。两个相邻拐点之间的离散点归为一个集合。如图 5 所示的离散点被 4 个拐点分成 4 个离散点集。

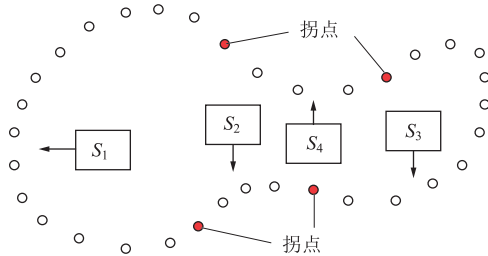


图 5 拐点与离散点集

Fig. 5 Inflection points and discrete point sets

(6) 对每一个离散点集 S_j 中点的外凸性和内凹性进行判别。从离散点集中的起始点开始,依次取 3 个点 $\{A, B, C\}$, 组成一个欧式三角形,如图 6 所示。其中, ∇G_A 、 ∇G_B 和 ∇G_C 分别为 BC 、 AC 和 AB 的梯度,如式(2)、式(3)和式(4)所示。

$$\nabla G_A = \frac{(C - B)^\perp}{2S_{ABC}} \quad (2)$$

$$\nabla G_B = \frac{(A - C)^\perp}{2S_{ABC}} \quad (3)$$

$$\nabla G_C = \frac{(B - A)^\perp}{2S_{ABC}} \quad (4)$$

式中: S_{ABC} 为 ABC 三角形的面积; A 、 B 和 C 为对应点的坐标。

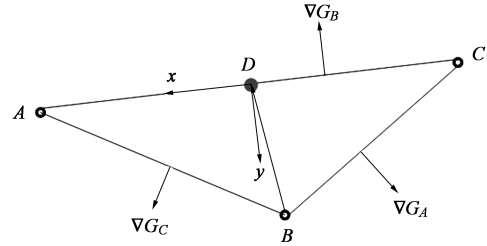


图 6 欧式三角形

Fig. 6 European triangle

以点 A 和点 C 的中点 D 为原点,以三角形中点 B 的对边矢量为 x 轴,以其梯度 ∇G_B 的方向 $\frac{\nabla G_B}{\|\nabla G_B\|}$ 为 y 轴,构建局部坐标系。然后,将 \overrightarrow{BD} 用 $a\vec{x} + b\vec{y}$ 表示,其中, a 、 b 为多项式系数。如果 $b > 0$,则点 B 相对于点 A 和点 C 是内凹点;反之,若 $b < 0$,则点 B 为外凸点。采用上述方法,依次得到每一个离散点集中 S_j 的所有内凹点,得到对应的内凹点集合 O_j 。

(7) 继续对每一个内凹点集 O_j 中点的内凹性进行分析,得到内凹极点。求点集中 O_{jh} ($1 < h < k$) 点到该内凹点集中首尾两点连线的最大距离点,如式(5)所示。依次得到每一个点集中的内凹极点,并将他们作为冲裁废料区域的分块点。

$$\max \left\{ d_{hj} = \left\| \frac{(O_{j1} - O_{jk})^\perp}{\|(O_{j1} - O_{jk})\|} (O_{jh} - O_{j1}) \right\| \right. \\ \left. \mid O_{j1}, O_{jk}, O_{jh} \in O_j \text{ 且 } O_{jh} \neq O_{j1}, O_{jk} \right\} \quad (5)$$

式中: O_{j1} 、 O_{jk} 和 O_{jh} 为内凹点的坐标; h 为点集 O_j 中除首尾点以外的任意点的序号; k 为点集中最后

一个点的序号; d_{hj} 为 O_{jh} 点到点集 O_j 中首尾两点的距离。

3 冲裁刃口区域布局优化设计

依上述方法得到的冲裁废料区域的内凹极点为起始点, 分别沿着条料的送料方向作分割线, 相交于对边的轮廓线。利用这些分割线将冲裁废料区域切割为多个异形区域。这些异形区域并不均匀分布, 有的分块可能会过于狭长。而且, 过多的内凹极点使得分块数量多, 难以满足设计准则中第1点的要求。因此, 需要对这些分块的布局进行优化, 一些不合理的分割线需要被过滤掉, 使得刃口能够满足上述的设计准则要求。

(1) 首先判断各分割线的长度, 长度最短的分割线应被保留。

(2) 分割线与废料区域轮廓线有两个以上交点的, 保留距离轮廓线距离最长的交点之间的分割线段。

(3) 两个分割线之间的距离太短, 导致刃口过于细长时, 即距离小于最短分割线长时, 需要过滤其中一条分割线, 此处采用面积比的方法进行判别。

(4) 此时, 以最短切割线为基线与其他分割线

进行组合切割, 采用面积比法来判断组合分割后刃口区域的外凸性, 保留面积比大的区域对应的分割线。如图7a所示的两个分割线, 分别与左边的边界线组成分割区域, 并求得他们的矩形包容盒, 如图7b和图7c所示。其中, A_1 和 A_2 为两个冲裁区域分块的面积, 如式(6)和式(7)所示; A'_1 和 A'_2 为他们相对应的矩形包容盒的面积, 如式(8)和式(9)所示。他们的面积比判断如式(10)所示, 保留比值大的分割线。

$$A_1 = \left| \int_{x_0}^{x_1} g(x) dx - \int_{x_0}^{x_1} f(x) dx \right| \quad (6)$$

$$A'_1 = |g_{\max}(x) - f_{\min}(x')| \cdot (x_1 - x_0), \quad x, x' \in [x_0, x_1] \quad (7)$$

$$A_2 = \left| \int_{x_0}^{x_2} g(x) dx - \int_{x_0}^{x_2} f(x) dx \right| \quad (8)$$

$$A'_2 = |g_{\max}(x) - f_{\min}(x')| \cdot (x_2 - x_0), \quad x, x' \in [x_0, x_2] \quad (9)$$

$$\left(\frac{A_1}{A'_1} - \frac{A_2}{A'_2} \right) \begin{cases} > 0 \\ < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $g(x)$ 和 $f(x)$ 为分割刃口的两条刃口线的函数; x_0 、 x_1 和 x_2 为分割线的 x 坐标; x' 为两分割线之间的任一 x 坐标; $g_{\max}(x)$ 为刃口线的最大 y 坐标; $f_{\min}(x')$ 为刃口线的最小 y 坐标。

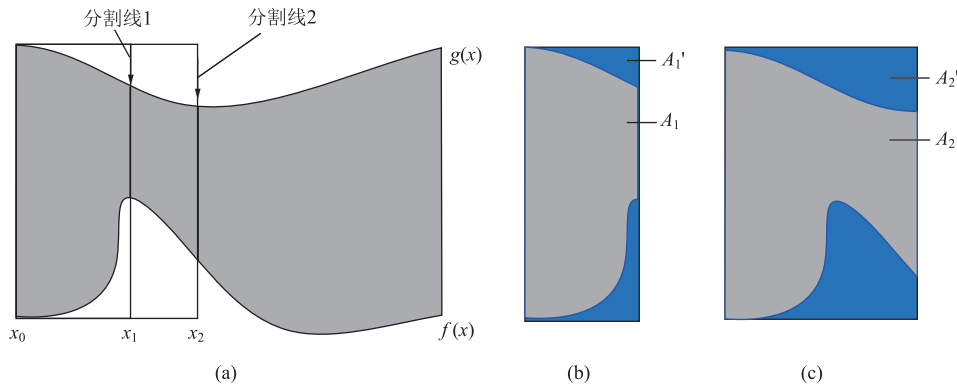


图7 分割区域面积比判断示意图

(a) 分割线 (b) 分割区域1 (c) 分割区域2

Fig. 7 Schematic diagrams of area ratio for divided areas

(a) Segmentation line (b) Divided area 1 (c) Divided area 2

(5) 在设计准则要求(4)的基础上, 继续判断分割线的数量, 如果超过了预计分块的数量。如图8所示, 继续计算分割线所在内凹点的曲率, 如式(11)和式(12)所示, 其中 $\alpha + \beta$ 为内凹点与两相邻点连线的垂直平分线的夹角, 求得内凹点的曲率半径 R 。最后比较曲率半径大小, 保留半径小的分割线。

$$c' = \sqrt{a'^2 + b'^2 - 2a'b'\cos c'} \quad (11)$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \frac{2R^2 - a'^2 - b'^2 - c'^2}{2\sqrt{R^2 - a'^2}\sqrt{R^2 - b'^2}} \quad (12)$$

式中: a' 为图8中内凹点到相邻点2的直线长度; b' 为图8中内凹点到相邻点1的直线长度; c' 为图8中两垂直平分线交点到内凹点的直线长度。

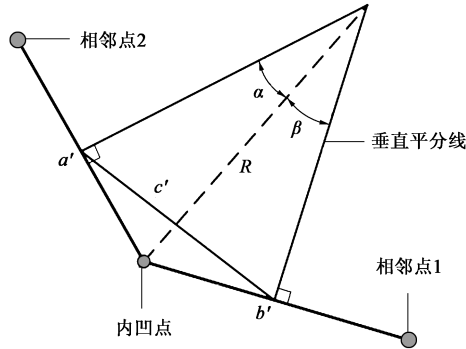


图 8 内凹点曲率判断示意图

Fig. 8 Schematic diagram of curvature judgment for concave point

(6) 如果采用上述内凹点分割所得到的分块数量不够,那么可以按照等间距的方法添加分割线。

(7) 上述操作完成后,即将冲裁区域分成了预定的刃口数量。接下来,需要将这些刃口布置到不同的冲裁工位上。具体要求如下:(a) 每个工位的刃口数量不超过两个;(b) 相邻两刃口不能布置在同一个工位。

(8) 按照上述原则,可以得到多个工位的布置方案。如图 9 所示,假设废料区域被分割成 q 个刃口, t 为工位 1 到工位 T 之间任一工位的序号, $(x_{m(t)}, y_{m(t)})$ 为新布置刃口的冲裁力中心坐标。可以计算得到各个刃口的冲裁力大小和中心坐标。按照逆向设计方法,假定这些刃口按照设计准则要求 (7) 布置在 T 个工位上。本文通过判断各个工位上的刃口冲裁中心合力作用点 W' 到 T 个工位矩形包容盒中心点 (冲裁工位的模具中心) W 之间的距离 r , 确定距离最小的刃口布置方案为最优。具体过程如下。

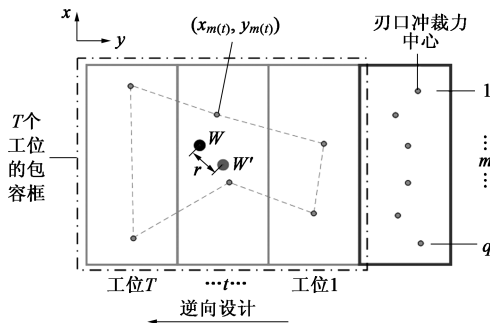


图 9 冲裁刃口的工位布局优化

Fig. 9 Optimization of station layout for blanking blade

① 首先,计算刃口的冲裁力中心。设定冲裁力的中心为 O_m ($1 \leq m \leq q$) 点。每个冲裁刃口的长度

为 L_m , 将其按照等弧长离散为 z 份, 离散后两离散点的长度 (即弦长) 为 $l_{i'}$ ($1 \leq i' \leq z$), 则他们的中心点坐标为 $(x_{i'}, y_{i'})$ ($1 \leq i' \leq z$)。可得到刃口冲裁中心 O_m 的坐标为 (x_m, y_m) , 如式 (13) 和式 (14) 所示。已知材料的厚度 t' 、剪切强度 τ 和安全系数 K , 可得到每一个刃口的冲裁力 F_m , 如式 (15) 所示。

$$x_m = \frac{\sum_{i'=1}^z l_{i'} x_{i'}}{\sum_{i'=1}^z x_{i'}} \quad (13)$$

$$y_m = \frac{\sum_{i'=1}^z l_{i'} y_{i'}}{\sum_{i'=1}^z y_{i'}} \quad (14)$$

$$F_m = KL_m t' \tau \quad (15)$$

② 构造刃口优化布置的目标函数。如图 9 所示, 根据设计准则要求 (7), 可以构建式 (16) 所示的目标函数, 求得 W' 到 W 的最小距离 r 。

$$\text{目标函数: } \min r = \frac{\sum_{m=1}^q F_m \sqrt{(x_{m(t)})^2 + (y_{m(t)})^2}}{\sum_{m=1}^q F_m}$$

$$\text{条件: } \begin{cases} 1 \leq t \leq T \\ \forall m \in \text{工位 } t \vee \forall m_1, m_2 \in \text{工位 } t, \\ |m_1 - m_2| > 1 \\ \forall t_i, t_j \in \{1, 2, \dots, T\}, t_i \neq t_j, \\ \text{工位 } t_i \cap \text{工位 } t_j = \emptyset \\ y_{m(t)} = y_m - T \cdot s, \quad x_{m(t)} = x_m \end{cases} \quad (16)$$

式中: s 为给定的工位之间的步距, 每一个工位可以布置 0 个、1 个或者 2 个冲裁刃口。

③ 求解上述目标函数, 得到各工位上刃口的最优布置方案。

4 实例研究

图 10 为针对图 1 中的汽车结构件的板料展开的二维轮廓线的条带对称布置方案, 中间的废料区域是由两个步距之间相对的板料轮廓线合围而成, 需要被切除。现在用本优化方法对该废料区域的冲裁刃口进行设计。

首先, 对废料区域轮廓线进行离散, 求得它的凹点, 并沿废料方向设计分块线, 结果如图 11a 所示。然后, 利用对分割线进行过滤, 避免狭长的刃

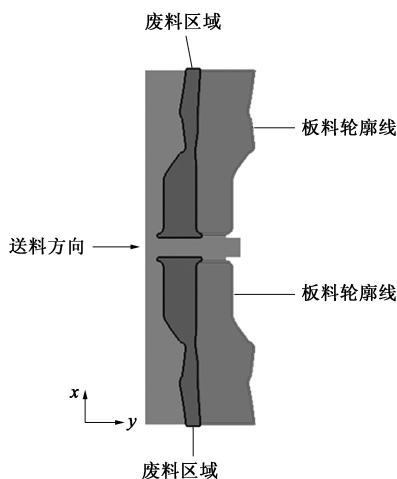


图 10 级进模条料实例#1

Fig. 10 Example #1 of progressive die strip

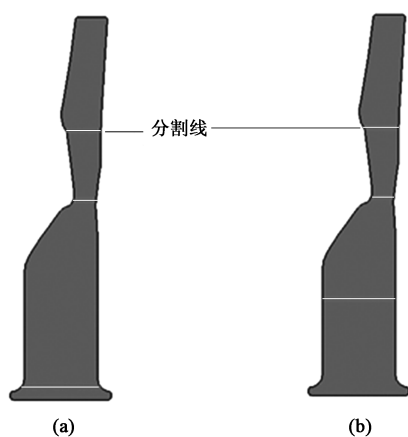


图 11 实例#1 的废料区域分割线

(a) 内凹点和分割线 (b) 最终分割线

Fig. 11 Split line of scrap area for example #1

(a) Concave points and segmentation lines (b) Final segmentation lines

口。并采用面积比法过滤相近的刃口。最终得到的刃口分块方案如图 11b 所示，废料由 4 个刃口冲裁完成。

接着对上-下对称零件的 8 个刃口按照 4 个工位进行优化布置。依次计算得到各刃口的冲裁力中心。按照每个工位不超过 2 个刃口、相邻刃口不能布置在同一工位的要求，求解各布置方案下刃口的冲裁合力中心到 4 个工位包容盒中心的距离。如某工位布置 2 个刃口，则对称零件上各取一个刃口，且对称零件相邻的两个刃口不能布置在同一工位。距离最小的方案即为最优的刃口布置方案。刃口编号从上至下依次为 $m_1 \sim m_8$ ，工位编号从右至左逆送料方向依次为 $T_1 \sim T_4$ ，按照上述要求得到 432 种布置方案，计算各方案中冲裁合力中心到矩形包容盒中心

的距离。受篇幅限制，表 1 仅显示其中 6 种方案和最优方案的计算结果。已知材质为 SAPH440 钢板，厚度为 1.5 mm，抗剪切强度为 330 MPa，安全系数取 1.3。

表 1 各方案中冲裁合力中心到矩形包容盒中心的距离

Table 1 Distances between center of blanking force and center of rectangular containment box in each scheme

方案	工位 T_4	工位 T_3	工位 T_2	工位 T_1	距离/mm
1	m_1, m_5	m_2, m_6	m_3, m_7	m_4, m_8	118.184
2	m_2, m_5	m_1, m_7	m_3, m_6	m_4, m_8	117.752
3	m_2, m_5	m_3, m_7	m_1, m_8	m_4, m_6	120.390
4	m_3, m_5	m_2, m_7	m_1, m_8	m_4, m_6	123.405
5	m_4, m_7	m_1, m_6	m_2, m_5	m_3, m_8	113.813
6	m_4, m_8	m_3, m_7	m_2, m_5	m_1, m_6	114.524
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
最优	m_1, m_8	m_3, m_5	m_4, m_6	m_2, m_7	104.166

经过优化设计，工位 T_1 上布置冲裁刃口 m_2 和 m_7 、工位 T_2 上布置冲裁刃口 m_4 和 m_6 、工位 T_3 上布置冲裁刃口 m_3 和 m_5 、工位 T_4 上布置冲裁刃口 m_1 和 m_8 的方案为最优方案，各刃口的冲裁合力中心距离矩形包容盒的中心距离最小，为 104.166 mm。根据这个布置方案得到该零件条料的刃口排样方案如图 12 所示。

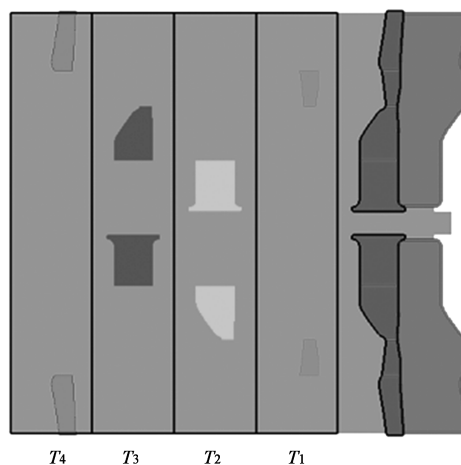


图 12 实例#1 条料的冲裁刃口排样方案

Fig. 12 Layout scheme of blanking blade for strip in example #1

图 13 为另一汽车结构件，该零件的材质为 CR380LA 钢，厚度为 1.5 mm，抗剪切强度为 326 MPa，安全系数取 1.3。采用本优化设计方法得到的冲裁刃口排样方案如图 13 所示，工位 T_1 上布置冲裁刃口 m_2 和 m_7 、工位 T_2 上布置冲裁刃口 m_4 和 m_6 、工位 T_3 上布置冲裁刃口 m_3 和 m_5 、工位 T_4 上布置冲裁刃口 m_1 和 m_8 为最优方案，各刃口冲裁合力中

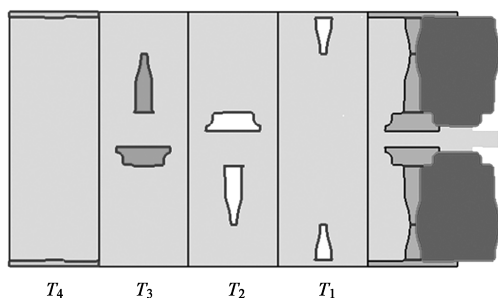


图 13 实例#2 条料的冲裁刃口排样方案

Fig. 13 Layout scheme of blanking blade for strip in example #2

心距离矩形包容盒中心的最小距离为 118.497 mm。

上述两个实例是最理想化的情况下的冲裁刃口排样方案。在某些情况下,一些工位也可以布置 3 个不相邻的刃口。如实例#2 的 T_4 工位上的两个刃口可以布置到 T_3 工位或 T_2 工位上,这样就可以减少 1 个工位,降低模具的尺寸和重量。因此,本优化方法在具体应用时可以设置不同的排布规则和条件。

5 结语

文章通过分析复杂汽车结构件多工位级进模具条料冲裁刃口的特点,提出了两个设计准则,即冲裁的工位数要求和刃口的外凸性要求。根据外凸性要求,以冲裁区域的内凹点为分割点设计分割线,并通过面积比法优化废料区域的分块线得到满足要求的刃口。最后,以刃口冲裁合力中心距离模具中心距离最小为目标构建优化函数,得到冲裁刃口的排样优化方案。实例表明,本优化设计方法可以实现复杂汽车结构件多工位级进模条料冲裁刃口排样的自动优化设计。所设计刃口的数量能够满足工位数要求,且可以最大程度上满足刃口的外凸性要求。同时,采用本优化设计的刃口的冲裁凸凹模的强度和废料的顺利滑落可以得到有效保证,且冲裁力的合力中心靠近模具冲裁部分的中心,可以减少模具冲裁时的偏载,进而延长模具的寿命和提高冲压件的精度。

参考文献:

- [1] 袁博,陈淑花,于来宝,等. 空调蒸发器边板零件多工位级进模设计[J]. 锻压技术, 2021, 46 (8): 138-142.
Yuan B, Chen S H, Yu L B, et al. Design on multi-station progressive mold for side plate parts of air conditioning evaporator [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (8): 138-142.
- [2] 赵殿明,王利,黄昭明,等. 多弯角车身钣金件多工位级进模设计与应用[J]. 锻压技术, 2020, 45 (3): 125-130.
Zhao D M, Wang L, Huang Z M, et al. Design and application of multi-

- position progressive die for multi-angle car body sheet metal parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (3): 125-130.
- [3] Li G, Zhou M, Wang W, et al. Accurate trimming line optimization of multi-station progressive die for complex automotive structural parts [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95 (1-4): 1185-1203.
- [4] 雷贺功,孙厚芳,刘汉雄. 遗传模拟退火算法在冲裁件优化排样中的应用[J]. 现代制造工程, 2004, (6): 55-57.
Lei H G, Sun H F, Liu H X. Application of genetic simulated annealing algorithm in optimal layout for blanking part [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2004, (6): 55-57.
- [5] Zhang Z B, Liu Y Q, Du T, et al. Blank design and formability prediction of complicated progressive die stamping part using a multi-step unfolding method [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205 (1-3): 425-431.
- [6] 唐伟萍,王坤,黄欣. 矩形件二维正交排样的一种混合遗传算法[J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 106-111.
Tang W P, Wang K, Huang X. A hybrid genetic algorithm on two-dimensional orthogonal layout for rectangular parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 106-111.
- [7] Li X D, Zhan X H. Digital strip layout design of multi-station progressive die [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 687-691: 3433-3436.
- [8] 徐幼林,黄凯. 级进模自动排样冲切刃口设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37 (12): 193-196.
Xu Y L, Huang K. Blanking edge design of progressive die strip layout system [J]. Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37 (12): 193-196.
- [9] 吴彬,张小萍,王国伟. 一种基于模糊聚类级进模冲切刃口设计的改进方法[J]. 现代制造工程, 2015, (5): 89-93.
Wu B, Zhang X P, Wang G W. A method of improvement about cutting edge design in progressive die based on fuzzy clustering [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015, (5): 89-93.
- [10] Hussein H M A, Kumar S, Abouel-Nasr E S. Computer aided design and simulation of strip layout for progressive die planning using Petri-net [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8 (4): 1-9.
- [11] 曾兆敏,管卫利,潘卫平. 冲裁件条料最优四块剪切下料方案的生成算法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52 (20): 75-79.
Zeng Z M, Guan W L, Pan W P. Algorithm for generating optimal four-block cutting stock patterns of punched strips [J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52 (20): 75-79.
- [12] 车念,张军,潘立武. 冲裁条带剪切下料问题的一种求解算法[J]. 机械设计与制造, 2016, (2): 37-40.
Che N, Zhang J, Pan L W. An algorithm for solving the cutting stock problem of punched strips [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016, (2): 37-40.
- [13] Moghaddam M J, Farsi M A, Anoushe M. Development of a new method to automatic nesting and piloting system design for progressive die [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77 (9-12): 1557-1569.
- [14] 王珂,胡小春,陈燕,等. 减少切割成本的圆形件下料优化算法[J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 50-55.
Wang K, Hu X C, Chen Y, et al. Optimization algorithm of blanking for circular part with reduced cutting costs [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 50-55.