

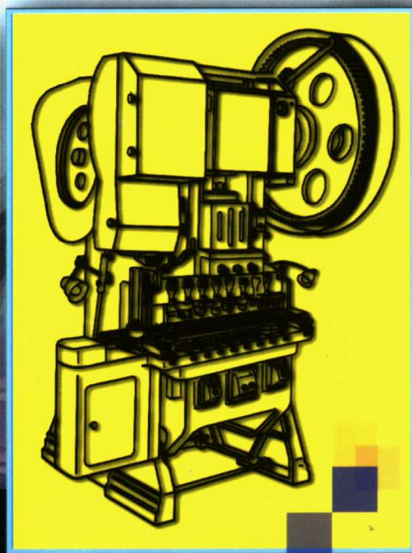
钣金工必读

零件

折弯 与 展开

Lingjian Zhewan yu Zhankai

杨超培 编著



广东科技出版社

钣金工必读

零件折弯与展开

杨超培 编著

广东科技出版社
·广 州·

前 言

坯料通过折弯制作成所需要的零件是最常用的加工手段之一；零件的折弯与展开也是最常遇到的工程技术问题之一。在机械制造、农业机械、电子工业以及民用机电产品等部门所用的机箱机柜，由板料或型材折弯而成非常普遍。

编者力求就机箱机柜生产中零件的折弯与展开作系统、全面的分析，采用最新资料编写，所用图表实例来自生产实践，内容丰富，叙述简单明确。

本书全面地系统地阐述了零件折弯与展开所遇到的各种问题。第一章，介绍弯曲的基本概念，阐述了弯曲时中性层的存在及随着弯曲内半径的减小，中性层位置的变化情况；第二章，详细介绍了弯曲件展开料的计算方法，并总结了90°折弯快速计算公式，这种方法简单实用，对复杂折弯件的计算也举例详解；第三章，详细阐述了最小弯曲半径和弯曲过程中的回弹；第四章，弯曲件的工艺性，对常遇到的工艺问题，如弯曲的精度、弯曲件的挠度和扭转、端面不平、厚度变薄及弯曲擦伤等废品产生的原因以及消除方法都作了具体分析并提出了解决途径和方法；第五章，讲解弯曲件的工艺过程，阐述了常用的80 t（工程压力800kN）折弯机的有关资料；第六章，常见机箱机柜中的弯曲零件及展开图。

本书供从事折弯零件的设计和制造的工程技术人员使用，供冷作工、冲压工使用，对工装制造人员及冷作车间和冲压车间的生产管理人员也有一定的参考价值。

本书由上海交通大学机械工程系汪一麟教授和机械科学

研究院国家级专家强毅先生及国营第七六零厂标准化室主任彭宗初高级工程师和张得峰高级工程师审阅，在此表示感谢。

因编者水平有限，错误和不足之处，望读者批评指正。

杨超培

2004 年 1 月

目 录

第一章 弯曲变形的基本概念	1
第一节 弯曲变形过程	1
第二节 中性层的位置	3
第三节 曲杆弯曲	5
第二章 弯曲件展开计算	8
第一节 弯曲件展开计算方法	8
第二节 板料折弯 90° 时弧长 A 的计算	10
第三节 折弯 90° 快速计算公式	14
第四节 折弯任意角度的展开料计算和折弯 90° 表 2-3 弯曲 90° 中性层弧长 A 的推广应用	16
第五节 复杂折弯件展开料的计算	16
第六节 使用压板的弯曲展开料计算	18
第七节 常见的几种非 90° 弯曲形式展开长度计算	20
第八节 铝板折弯 90° 展开料计算	21
第九节 角钢、槽钢弯曲时展开料长的计算	22
第三章 最小弯曲半径和弯曲的回弹	29
第一节 最小弯曲半径	29
第二节 弯曲的回弹	36
第三节 弯曲力的计算	56
第四章 弯曲件的工艺性	60
第一节 弯曲件的结构工艺性	60
第二节 弯曲件孔的位置精度	66
第三节 弯曲后出现挠度和扭转	69
第四节 弯曲端面不平	72
第五节 弯曲部的厚度变薄	74

第六节	U形弯曲及帽形弯曲	76
第七节	板厚对弯曲尺寸的影响	80
第八节	弯曲擦伤	82
第九节	弯曲件产生废品的原因及消除方法	83
第十节	弯曲件的精度和公差	85
第五章	弯曲件的工艺过程及板料校正直角方法	88
第一节	弯曲件的工艺过程	88
第二节	通用弯曲模及弯曲工步	91
第三节	板料校正直角方法	103
第六章	机箱与机柜中的实用展开	104
第一节	型材切角展开	104
第二节	薄板机箱分解	111
第三节	薄板机箱开角的划线方法	113
第四节	薄板机箱开角实例	115
第五节	容易混淆的两种折边及开角时的冲孔	128
附录		131
表 1	常用黑色金属材料机械性能	131
表 2	钢在加热状态下的抗剪强度	134
表 3	常用有色金属材料机械性能	134
表 4	轧制薄钢板的规格	139
表 5	轧制薄钢板厚度允差	141
表 6	冷轧黄铜板的尺寸及理论重量	143
表 7	冷轧黄铜板厚度及其允许偏差	145
表 8	铝及铝合金板材厚度和厚度允差	146
表 9	常用热轧等边角钢的规格	149
表 10	常用热轧不等边角钢的规格	151
表 11	热轧普通槽钢的规格	152

弯曲是将金属板材、棒料、型材等，用手工或机械加工的方法弯曲成一定的形状。在现代工业的各个部门，都大量地应用折弯的方法将毛坯加工成各种形状的零件，尤其是在弯板机及冲床上将板料折弯成形。掌握弯曲变形原理，熟练地计算毛坯尺寸及采用合理的加工工艺，乃是工程技术人员、工人及生产管理人员所必须具备的基本知识，也是本书讨论的重点。

第一章 弯曲变形的基本概念

第一节 弯曲变形过程

一件板料在弯曲时，它承受弯矩作用、剪切作用和局部压力作用（图 1-1），但使板料产生弯曲变形的主要作用是弯矩。在外力作用下必然产生相应的变形，同时在板料内将出现抵抗变形的内力，此内力和外力相平衡（物体单位面积上的内力称为应力），外力越大，应力就越大，变形也越大。当材料外层应力小于材料的弹性极限，板料处于弹性变形状态，根据虎克定律，变形（外层伸长，内层缩短）与中心层之距离呈直线变化，所以截面上的应力也呈直线变化（图 1-2 甲），若去掉外力，板料可以恢复到弯曲变形以前的形状。若继续增加外力，则弯曲部分的变形程度不断增大，直到外力引起的应力等于材料的屈服极限，外层材料发生塑性变形，随着外力的增加，塑性变形即由表层向中心发展，此时若去掉外力，板料内弹性变形立即消失（回弹），而塑性变形却保存下来，使板料产生了弯曲的永久变形（图 1-2 乙）。当外力引起的应力大于材料的强度极限，板料则由塑性变形

发展至破裂（图 1-2 丙）。板料弯曲时内侧受压，同样产生塑性变形，但这种塑性变形增大了受力面而不引起破坏，通常不予考虑。

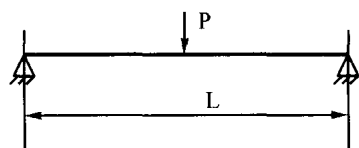


图 1-1 甲（作用力图）

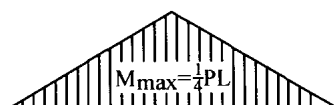
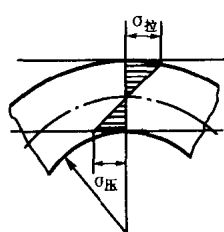
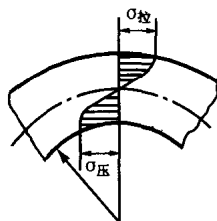


图 1-1 乙（弯矩图）



甲—弹性变形



乙—塑性变形



丙—破裂

图 1-2

现在我们对塑性弯曲变形进行仔细观察，在弯矩的作用下，板料断面上不同的三条相等的线段（图 1-3 甲），即 $ab = a'b' = a''b''$ 。弯曲后，内层缩短，外层伸长（图 1-3 乙），即： $\widehat{ab} < \widehat{a'b'} < \widehat{a''b''}$ 。所以一般常说，弯曲时内层材料受压而缩短，外层材料受拉而伸长。那么在拉伸与压缩之间，必有一层材料不受拉伸也不受压缩，它的长度不发生变化，既不伸长也不缩短，这层叫中性层（图 1-3）。

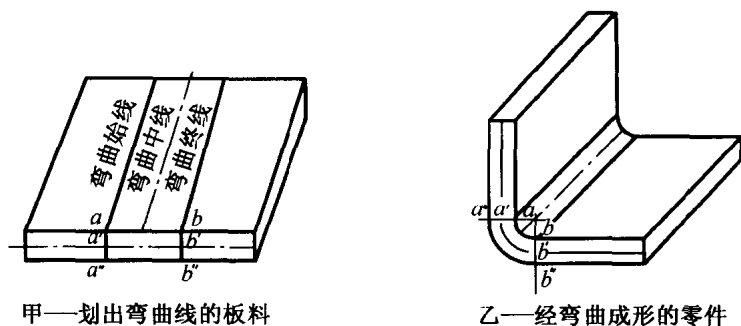


图 1-3

第二节 中性层的位置

上面我们谈到中性层的存在，自然就会提出中性层的位置怎样确定。图 1-4 甲是弯曲前的情况，图 1-4 乙是在弯矩作用下的情况。从图 1-4 甲可知 $\overline{cd} = dx$ ，在图 1-4 乙中 dx 处在中性层位置不发生变化， $dx = \rho d\phi$ ， $d\phi$ 为在弯矩作用下横截面 mm 与 nn 的夹角； ρ 为中性层曲率半径。 $\overline{cd}$ 变为 $\widehat{cd}$ ， $\widehat{cd} = (\rho - y) d\phi$ ，(y 在中性层下边，坐标选在中性层

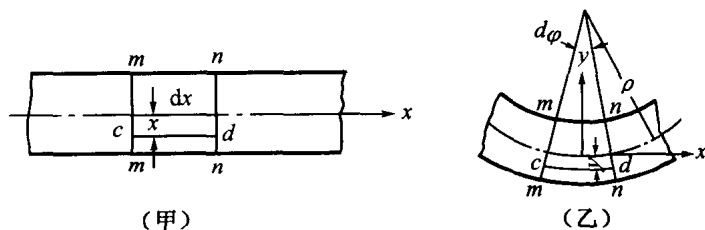


图 1-4

位置上，所以此处为 $-y$)。

$$\epsilon = \frac{(\rho - y) d\phi - \rho d\phi}{\rho d\phi} = -\frac{y}{\rho}$$

式中 ϵ ——相对线变形

可见弯曲板（梁）的纵向纤维的应变与该纤维离中性层的距离 y 成正比，而与中性层的曲率半径 ρ 成反比。

纵向纤维产生应变是由相应的应力引起，即纵向纤维受到了拉力或压力才有长度的改变。根据虎克定律，截面上的正应力：

$$\sigma = E\epsilon = -\frac{E}{\rho}y$$

式中 E ——材料的弹性模数，即材料对线变形的抵抗能力。

对于特定的弯曲变形来说， $\frac{E}{\rho}$ 为常量。

由上式可知应力与该纤维至中性轴（中性层与横截面的交线称为截面的中性轴）的距离成正比。可见最大应力处在板的上下边缘处（图 1-5）。

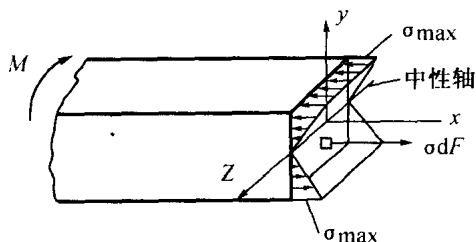


图 1-5

从图 1-5 所取的弯曲板为截面所截开的部分，在弯矩 M 和分布在截面上的内力作用下相互平衡，所有的应力均与 x 轴平行。故必有 $\sum x = 0$

$$\text{所以 } \int_F \sigma dF = 0 \quad \int_F -\frac{E}{\rho} y dF = -\frac{E}{\rho} \int_F y dF = 0$$

$$\text{因为 } \frac{E}{\rho} \neq 0 \quad \text{所以 } \int_F y dF = 0$$

这个式子表示横截面对中性轴 Z 的静距为零。即中性轴必通过截面的形心。对于对称的截面如板料，它的中性轴即为它的横截面的对称中心线。对于非对称截面的型材如角钢，它的中性层也必过形心。必须先求其形心位置，也即确定了它的中性层位置。作用力必须通过形心，否则弯曲时还要引起扭转变形。对于常用的标准型材如角钢槽钢等，它的形心位置只需在材料力学中查有关表即可，也可见本书附录。

第三节 曲杆弯曲

由前面讨论可知，直杆（或平板）在弯矩的作用下，如果应力等于材料的屈服极限，将引起塑性变形，直杆变为曲杆。此时，若继续施加弯矩，这时就是曲杆弯曲了。此时它的变形和应力又是怎样的呢？

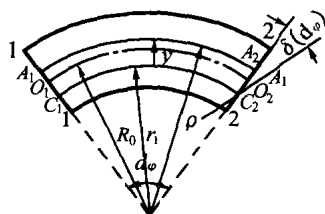


图 1-6

我们可截取在弯矩作用下的一个单元体来讨论（图 1-6）。

图中单元体的二截面 1-1 和 2-2 在弯矩的作用下可视 1-1 截面不动，截面 2-2 和截面 1-1 的相对转角为 δ ($d\phi$)。 R_0 表示轴线 $\widehat{o_1 o_2}$ 的曲率半径， r_1 表示中性层的曲率半径。现在我们来求离中性层距离为 y 的面上的正应力。距中性层为 y 的纤维 $\widehat{A_1 A_2}$ 在弯矩的作用下伸长了 $\widehat{A_2 A_3}$ ，而相对线变形为

$$\epsilon = \frac{\widehat{A_2 A_3}}{\widehat{A_1 A_2}} = \frac{\gamma \delta (d\phi)}{\rho d\phi} = \frac{\gamma}{r_1 + y} \frac{\delta (d\phi)}{d\phi}$$

$$\text{所以 } \sigma = \epsilon E = E \frac{\gamma}{\rho} \frac{\delta (d\phi)}{d\phi} = E \frac{\gamma}{r_1 + y} \frac{\delta (d\phi)}{d\phi} =$$

$$C \frac{1}{r_1/y + 1}$$

对任一段曲杆来说， $r_1 \delta (d\phi)$ 及 E 都是不变值。所以 σ 只与 y 有关。故由上式可知，曲杆里纤维的应变和正应力与距中性层距离呈双曲线关系。距中性层外侧的 y 为正值，内侧 y 为负值，故外侧纤维里单位变形及应力值，比 y 增加得慢，而内侧纤维里单位变形及应力值，比 y 增加得快。根据中性层内外侧正应力系的合力值是等值反向的情况，可以预见，中性层不通过轴线而必自轴线向内缘移动（图 1-7）。对于弯曲内半径 r 相对于板料厚度 t 较大，即 $r/t \geq 5$ 时，通常可视为直（平）板弯曲；当 $r/t < 5$ 时，必须考虑

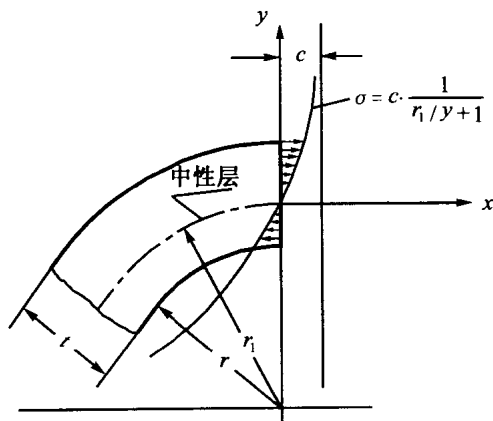


图 1-7

中性层向内缘移动。这个移动量可用材料力学的方法计算出来，但计算比较复杂，通常借助试验得到中性层位置系数。（见第二章表 2-1）

上面的讨论是在纯弯曲情况下进行的，且假设横截面在弯曲时仍保持平面，纵向纤维相互间没有挤压。这两个假设在纯弯曲下得到实验证实。我们所遇到的弯曲是比较复杂的，借助纯弯曲的理论为指导，也基本上符合实际情况。

第二章 弯曲件展开计算

第一节 弯曲件展开计算方法

计算弯曲件展开长度的方法，是将弯曲件分成若干直线段和圆弧线段的基本几何单元，分别计算出各单元部分的长度，然后求出各单元部分长度的总和，即为该弯曲件的展开长度。图 2-1 甲所示 U 形弯曲件，可按图 2-1 乙分成五个单元，1、3、5 为直线段，2、4 为圆弧线段。

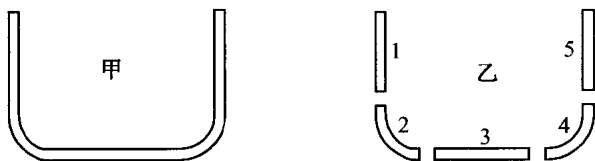


图 2-1

直线段可由图中所注尺寸直接求得。

由第一章讨论可知，坯料弯曲前后，中间长度不变的纤维层叫中性层。我们计算圆弧段的展开长度，实际就是计算圆弧段的中性层长度。中性层离圆弧内侧的位置 x (图 2-2)，一般由 r/t 比值大小来确定。

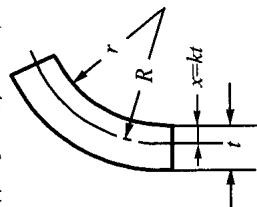


图 2-2

$$x = Kt$$

式中 t ——材料厚度

K ——中性层位置系数（或称中性层系数）

$$K = \frac{R - r}{t}$$

$$R = r + Kt$$

式中 R ——从半径 r 的中心至折弯中性线的距离，即中性线的弯曲半径

K 值随内侧半径与板料厚度 t 的比值而变化。见表 2-1。

表 2-1

r/t	0.25	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	> 12
K	0.26	0.33	0.35	0.375	0.40	0.415	0.43	0.44	0.45	0.46	0.465	0.47	0.475	0.48	0.5

注：本表 K 值适用于无顶板 V 形弯曲件。

根据表 2-1 中性层位置系数 K 可以绘出 K 值与 r/t 的关系曲线。如图 2-3。根据图 2-3 可以用插入法求出任意 r/t 的相应的 K 值。

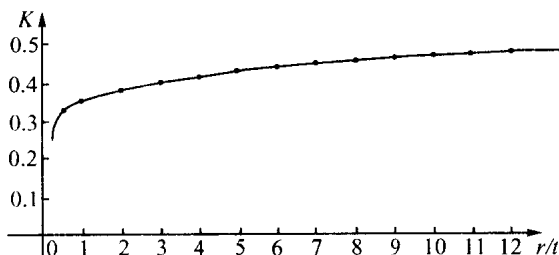


图 2-3

圆杆件的弯曲如弯曲内半径 $r \geq 1.5d$ 时（ d 为圆杆直径），剖面几乎无变化，故中性层系数近似 0.5，而 $r < 1.5d$ 时，剖面畸变，中性层外移。据圆铝杆件弯曲试验所得中性层位置系数如表 2-2 所示。

表 2-2

弯曲内半径 r	$\geq 1.5d$	d	$0.5d$	$0.25d$
系数 K	0.50	0.51	0.53	0.55

说明：(1) 中性层位置系数 K 主要由 r/t 决定。但由于影响弯曲的实际因素很多，所以 K 值大小主要由试验而定，往往由于资料来源不同而稍有差异。

(2) 表 2-1 对碳钢、低碳钢都适用。对加压板的 V 形弯曲和 U 形弯曲的计算，将在本章第六节叙述。

我们知道了中性层的位置，那么中性层的弧长是 $A = \frac{\pi\alpha}{180^\circ}(r + Kt) \cdots \cdots I$ ， α 为弯曲角度，如图 2-4 所示。 α 角不同于 α' 角，二角互补。

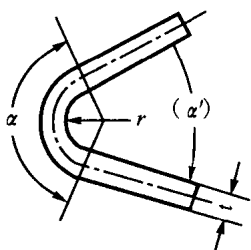


图 2-4

当我们知道板料厚度 t 、折弯件内侧半径 r 和弯曲角 α 时，我们就可利用式 I 计算出展开弧长。

例：图 2-4 中，当 $t = 5$ $r = 10$ $\alpha = 135^\circ$ 计算展开弧长。〔注〕

$$\frac{r}{t} = 2 \quad \text{查表 2-1} \quad K = 0.375$$

$$A = 3.14 (10 + 0.375 \times 5) \frac{135^\circ}{180^\circ} = 27.97$$

第二节 板料折弯 90° 时弧长 A 的计算

在生产实践中，将钢板折弯成直角形状最为普遍。将 $\alpha = 90^\circ$ 代入式 I：

注：书中所涉及到的长度计量单位，未注明的，一律为毫米 (mm)。

$$A_{90^\circ} = \frac{90^\circ}{180^\circ} \pi (r + Kt) = \frac{\pi}{2} (r + Kt) \cdots \cdots \text{II}$$

A_{90° 为弯曲成直角时的中性层弧长。

当已知 r 和 t 时, 根据表 2-1 或图 2-3 查出相对应的 K 值, 可通过式 II 计算出弯曲 90° 的弧长。同样我们可以计算出各种不同的 r 和 t 的弯曲 90° 的弧长, 见表 2-3。在实际应用中只需查表而已。

表 2-3

材料 厚度	内侧弯曲半径 r															
t	0.25	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5	6	7	8	9	10
0.2	0.475	0.91	1.7	2.5	3.3	4.1	4.9	5.7	6.4	7.2	8.0	9.6	11.1	12.7	14.3	15.9
0.4	0.556	1.0	1.8	2.6	3.4	4.2	5.0	5.8	6.6	7.4	8.2	9.7	11.3	12.9	14.4	16.0
0.6	0.638	1.1	1.9	2.7	3.5	4.3	5.1	5.9	6.7	7.5	8.3	9.9	11.4	13.0	14.6	16.2
0.8	0.72	1.2	2.0	2.8	3.6	4.4	5.2	6.0	6.8	7.6	8.4	10.0	11.6	13.2	14.7	16.3
1.0	0.8	1.3	2.1	2.9	3.7	4.5	5.3	6.1	6.9	7.7	8.5	10.1	11.7	13.3	14.9	16.4
1.2		1.4	2.2	3.0	3.8	4.6	5.4	6.2	7.0	7.8	8.6	10.2	11.8	13.4	15.0	16.6
1.4		1.5	2.3	3.1	3.9	4.7	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	10.3	11.9	13.5	15.1	16.7
1.6		1.6	2.4	3.2	4.0	4.8	5.6	6.4	7.2	8.1	8.9	10.5	12.0	13.6	15.2	16.8
1.8		1.7	2.5	3.3	4.1	4.9	5.7	6.5	7.3	8.2	9.0	10.6	12.2	13.7	15.3	16.9
2.0		1.8	2.6	3.4	4.2	5.0	5.8	6.6	7.4	8.3	9.1	10.7	12.3	13.9	15.4	17.0
2.2			2.7	3.5	4.3	5.1	5.9	6.7	7.5	8.4	9.2	10.8	12.4	14.0	15.5	17.1
2.4			2.8	3.6	4.4	5.2	6.0	6.8	7.6	8.5	9.3	10.9	12.5	14.1	15.6	17.3
2.6			2.9	3.7	4.5	5.3	6.1	6.9	7.7	8.6	9.4	11.0	12.6	14.2	15.7	17.4