

挤压组合凹模的设计

王学文 刘汉贵 编著



国防工业出版社



挤压组合凹模的设计

王学文 刘汉贵 编著

国防工业出版社

内 容 提 要

本书阐述挤压组合凹模的设计理论以及温度应力对组合凹模强度的影响。提出了能概括组合凹模特点的参量——综合屈服极限，在这个基础上对各种形式的组合凹模给出了统一的设计计算公式。此外，还对各种形式的组合凹模列出详尽的数据表和曲线图，供实际设计中方便地应用。

本书适合于从事金属、塑性成形技术的工程技术人员及有关高等院校的师生阅读参考。

挤压组合凹模的设计

王学文 刘汉贵 编著

责任编辑：蒋怡

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 6¹/₄ 133千字

1988年2月第一版 1988年2月第一次印刷 印数：0,001—3,450册

ISBN 7-118-00235-6/TG23 定价：1.30元

前 言

对于挤压组合凹模的最佳设计问题,近二十多年来国内外已有不少学者进行研究。从已发表的众多文献来看,所介绍的设计依据和方法,基本上都是沿用弹性理论中计算厚壁圆筒应力的解析法,并结合古典极值理论而求得最优解。这种传统的研究方法,在工程实践中已被证明有着一定的实用价值。作为一种新颖有效的数值算法著称于世的有限元法,近年来已扩展到模具强度研究和优化设计中,充分显示了它的优越性和广阔前景。但值得人们关注的是,有限元计算结果的精确度在很大程度上取决于力学模型边界条件的真实性、单元形式的优选及专用程序的研制等多方面因素。不少工作尚有待于今后继续完善和提高,一时尚难全面地提供实用的设计公式和图表。因此就当前情况来说,承袭前述的传统解析法作为组合凹模设计的理论基础,并进一步研究提高,得出更加简便的设计公式和图表,在工程上仍不失其实用意义和参考价值。

本书主要是为从事挤压成形工艺的工程技术人员编写的。目的在于使上述人员了解挤压组合凹模的设计理论和方法,借助各种组合凹模的详尽数据表和曲线图,方便地进行实际设计。

全书分三部分。第一部分(前四章)从挤压组合凹模的基本概念讲起,介绍了分析组合凹模应力的弹塑性理论和传热学理论,着重讨论了组合凹模的最佳设计和温度对组合凹

模强度的影响。并且根据作者的研究结果，提出了一个能概括组合凹模特点的参数——综合屈服极限。由此导出包括温度应力在内的组合凹模最佳设计公式，通过这些公式使各种形式组合凹模的设计计算统一起来，普遍适用于各种冷挤压和温挤压的组合凹模设计。第二部分（第五、六章）进一步对各种类型的组合凹模分别给出了计算公式、曲线及详尽的数表，以供实际设计工作中使用，还列述了组合凹模设计中经常遇到的几个问题。所列图表可解决一般常用范围的设计，如对于有特殊要求的情况，则可按公式计算。设计图表具体体现了第一部分中理论研究的结果，所以读者即使不研究前面的理论，亦可直接使用这些图表进行实际设计工作。第三部分（最后一章）讨论了组合凹模两种不同的压合顺序对应力分布的影响，并提出了新的一次压合法。

本书在写作过程中承蒙陈汝舟同志审阅了原稿，并提出不少宝贵意见，在此谨表谢意。

由于作者水平有限，书中如有错误或不妥之处，恳切希望读者批评指正。

本书仍采用工程单位制，请读者在阅读时注意，使用时请按法定计量单位制进行换算。

作 者
于 上 海

目 录

主要符号	1
第一章 挤压组合凹模的概念	2
1.1 概述	2
1.1.1 挤压工艺	2
1.1.2 挤压模具	5
1.1.3 预应力组合凹模	7
1.2 预应力组合凹模的特性	8
1.2.1 两种常用的预应力组合凹模	8
1.2.2 预应力组合凹模的特点	10
1.3 组合凹模的结构形式	11
1.4 组合凹模的分类	11
第二章 组合凹模设计的理论基础	15
2.1 均匀受压凹模的应力	15
2.1.1 厚壁圆筒的应力公式	15
2.1.2 厚壁圆筒的位移公式	19
2.1.3 凹模的应力分析	20
2.2 凹模内的温度分布和温度应力	22
2.2.1 温度应力的基本概念	23
2.2.2 模具内的温度分布	23
2.2.3 凹模的温度应力	26
2.3 屈服准则	31
2.4 组合凹模特性的理论分析	32
2.4.1 提高凹模强度的合理方法	32
2.4.2 组合凹模的应力分布	34
2.4.3 组合凹模的强度分析	36
2.4.4 组合凹模层数预计	37

2.5 组合凹模设计原则	38
第三章 冷挤压组合凹模的最佳设计	40
3.1 组合凹模的综合屈服极限	40
3.2 最佳直径比与最大承载内压	41
3.3 径向过盈量	47
3.4 综合屈服极限的另一种表达形式	50
3.5 冷挤压组合凹模的最佳设计公式	51
3.6 算例	52
第四章 温挤压组合凹模的最佳设计	56
4.1 温度对模具材料强度的影响	56
4.2 温度应力对组合凹模的影响	57
4.3 温挤压组合凹模的综合屈服极限	59
4.4 最佳直径比与最大承载内压	60
4.5 径向过盈量	64
4.6 温挤压组合凹模的最佳设计公式	66
4.7 算例	67
第五章 组合凹模设计实用图表	71
5.1 组合凹模设计要领	71
5.1.1 挤压组合凹模的设计要求和步骤	71
5.1.2 凹模内压与单位挤压力	72
5.1.3 组合凹模材料的选用	73
5.2 设计图表的编制	74
5.2.1 各种类型组合凹模的代号	74
5.2.2 有关符号说明	76
5.2.3 材料的机械性能数据	76
5.2.4 凹模内孔收缩系数的计算	77
5.3 冷挤压组合凹模设计图表	81
5.3.1 $2\sigma_c$ 型	81
5.3.2 $2\sigma_c$ 型与 $2\sigma_c/Y$ 型	86
5.3.3 $3\sigma_c$ 型	91

5.3.4 $3\overline{\sigma}_s$ 型与 $3\overline{\sigma}_s$ Y型	96
5.4 温挤压组合凹模的设计图表	105
5.4.1 说明	105
5.4.2 $2\overline{\sigma}_s$ 型	105
5.4.3 $2\overline{\sigma}_s$ 型	113
5.4.4 $3\overline{\sigma}_s$ 型	121
5.4.5 $3\overline{\sigma}_s$ 型	135
5.5 应用实例	149
5.5.1 用表说明	149
5.5.2 应用设计实例	150
第六章 组合凹模设计中的有关问题	157
6.1 凹模型腔结构及尺寸参数	157
6.2 模具材料及其热处理	160
6.2.1 挤压模具材料的要求	160
6.2.2 挤压凹模常用钢材	161
6.2.3 模具钢的改锻和热处理	162
6.3 模具的使用寿命	165
6.3.1 模具压力与使用寿命的关系	165
6.3.2 提高模具寿命的方法	166
6.4 内压作用区对凹模强度的影响	167
6.5 凹模镶块与预应力环的高度	168
6.5.1 凹模镶块高度	168
6.5.2 预应力环高度	169
6.6 凹模的横向开裂	170
第七章 组合凹模的压装	172
7.1 拉梅公式的特殊形式	172
7.2 接触应力与过盈量	173
7.3 压合顺序对应力分布的影响	175
7.3.1 $E_1 = E_2 = E_3 = E$ 的情况	175
7.3.2 $E_1 \neq E_2 = E_3 = E$ 的情况	179
7.4 不同顺序压合过程的讨论	180

VIII

7.4.1 压合过程中的轴向应力和压合力	180
7.4.2 危险部位的应力分析	181
7.4.3 轴向应力的影响程度	183
7.4.4 引起预应力环破坏的主要原因	184
7.5 一种新的压合方法	186
结束语	187
参考文献	188

主 要 符 号

σ_r	径向应力
σ_θ	切向应力
σ_z	轴向应力
ε_r	径向应变
ε_θ	切向应变
ε_z	轴向应变
u	径向弹性位移
E_i	弹性模量
ν_i	泊松系数
σ_{si}	屈服极限
σ'_{si}	相当屈服极限
$\bar{\sigma}_s$	组合凹模的综合屈服极限 (凹模镶块允许承受拉应力)
$\bar{\sigma}'_s$	组合凹模的综合屈服极限 (凹模镶块不允许承受拉应力)
p_1	凹模工作内压或最大承载内压
p_i	组合凹模各层接触面的径向压力
α	线膨胀系数
T	温度
ΔT	凹模内外表面的温差
Δd_i	径向过盈量
n	组合凹模的总直径 (半径) 比
$n_i = d_{i+1}/d_i = r_{i+1}/r_i$	直径 (半径) 比
$\beta_i = \Delta d_i/d_i$	径向过盈系数

注: 下标 i 表示组合凹模第 i 层或半径 r_i 处的物理量, 例如 σ_{si} 表示第 i 层的屈服极限, p_i 表示相应于半径 r_i 处各层接触面的径向压力。

第一章 挤压组合凹模的概念

1.1 概 述

1.1.1 挤压工艺

挤压是加工金属零件的少无切削新工艺之一。由于它具有高产、优质、低消耗的特点，已被广泛应用于汽车、拖拉机、仪表、轴承、轻工、电器及军工等工业部门。挤压工艺过程（见图 1.1）就是利用压力机的往复运动，通过凸模对金属毛坯施加足够大的压力，迫使毛坯在凹模腔内产生塑性变形，并经由预定大小的模孔挤出，从而变成所需形状、尺寸及一定性能的零件。

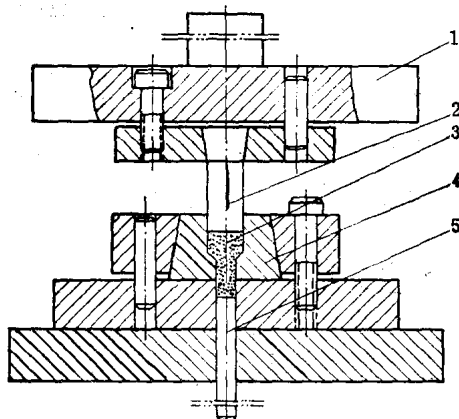


图1.1 挤压工艺过程简图

1—模架；2—凸模；3—挤压件；4—组合凹模；5—顶杆。

挤压一般有两种分类方法:

1. 根据挤压过程中金属被挤出的方向与凸模运动方向间的关系, 挤压又可分为下列三种基本方式:

(1) 正挤压——金属的挤出方向与凸模的运动方向一致。图1.2 (a) 为正挤压过程的示意图, 表示出用正挤压方式加工实心工件的情况。在凹模底部事先设计有一个孔, 该孔的孔径应与所制零件的外径相当。挤压时将实心毛坯放入凹模腔内, 如图1.2 (a) 左半图所示。然后在压力机上通过凸模加力挤压毛坯, 使金属产生塑性变形, 并迫使其从模孔挤出, 制成所需产品零件。如果采用空心毛坯, 并在凸模中央加一芯棒, 就可用正挤压方式制成空心零件。

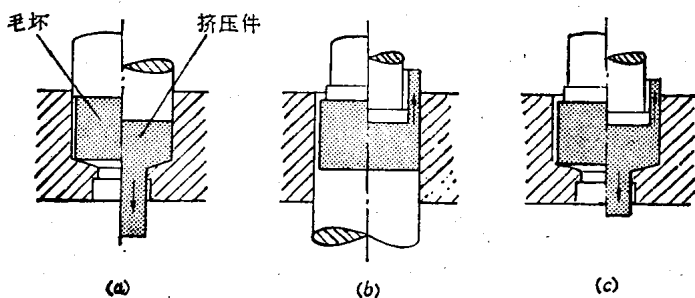


图1.2 挤压的三种基本方式

(a) 正挤压; (b) 反挤压; (c) 复合挤压。

(2) 反挤压——金属的挤出方向与凸模的运动方向相反。图1.2 (b) 表示反挤压杯形件的过程。将凸模外径与凹模内径之差, 设计成等于杯形件的壁厚。挤压时将毛坯放入模腔内, 当凸模下移对毛坯施加压力时, 因凹模底部无通孔, 金属就被迫沿四周的间隙向上流动, 挤成所需的杯形零件。

(3) 复合挤压——挤压时一部分金属的挤出方向与凸模运动方向相一致，而另一部分金属的挤出方向则相反。图 1.2 (c) 为复合挤压的示意图。

以上是挤压成形工艺中应用最广泛的三种基本方式。因为这三种方式的金属挤出方向皆与凸模的轴线平行，故又可统称为轴向挤压。

2. 根据挤压时所采用的毛坯温度不同，挤压又可分为下述三种情况：

(1) 冷挤压——挤压时毛坯不加热，即在室温（冷态）下进行挤压成形。

冷挤压加工出来的产品精度高，可达 GB3 级，表面光洁度可达 $\nabla 6 \sim 9$ 或更高，一般不必再切削或仅少量切削即可使用。而且冷挤压件的机械性能（包括强度、硬度、疲劳极限等）可得到显著改善，故可用一般的低强度材料代替贵重的高强度材料来制造零件。可见冷挤压工艺具有材料利用率高，生产效率高，成本低廉等显著优点。

冷挤压工艺对毛坯材料的要求为：塑性较好，屈服极限较低，加工硬化指数较小。这样可使所需的挤压力不致十分太大，保证冷挤压加工能顺利进行。目前可被冷挤的常用金属材料主要是有色金属及其合金、低碳钢、中碳钢、低合金钢等。

(2) 热挤压——挤压前将毛坯加热至再结晶温度以上，即在一般热锻温度范围内进行挤压。

热挤压的特点是挤压力较小，可以加工强度较高的材料，如高碳钢、合金结构钢和不锈钢等。并可挤压尺寸较大和形状复杂的零件。但是，由于加热后产生氧化、脱碳及膨胀等缺陷，使挤压件尺寸精度和表面光洁度降低，一般需再

进行多量的切削加工，才能成为最终产品。并且在挤压过程中，要求对模具进行充分冷却，以降低模具的工作温度。这种热挤压应用不广。

(3) 温挤压——挤压前将毛坯加热至金属再结晶温度以下的某个适当范围，然后进行挤压。对于钢来说，适于温挤压的温度范围是高于室温而低于热锻终锻温度。根据1975年第五届国际冷锻会议资料，定为200~850℃。

采用温挤压可以保持热挤压加工过程中挤压力低、材料塑性好的优点，其挤压力一般仅为冷挤力的1/3左右。温挤压的加热温度较热挤压低，金属的氧化、脱碳现象大大减弱，这样，产品的尺寸变化小，精度和光洁度有所提高，加工余量、尺寸公差皆可控制在较小范围内。温挤压可加工铬钢、钛合金、奥氏体不锈钢和合金工具钢等材料。

温挤压虽有一系列的优点，但由于需要加热设备，劳动条件恶化，而且产品尺寸精度和表面光洁度亦较冷挤压为低。所以在一般情况下，在生产中应用最为广泛的是冷挤压方式。如果所需冷挤压力高，而压机吨位不够时，或者当材料塑性差、强度高及硬化指数大以致用冷挤压加工发生困难时，则可选择温挤压方式加工。

1.1.2 挤压模具

由上述可知，挤压工艺必须通过凸模对金属毛坯施加压力，并迫使金属材料在凹模内产生塑性变形，从而挤出产品，所以凸模与凹模是挤压模具中最重要的两个工作零件。因为本书内容主要是讨论凹模设计，所以下面着重介绍凹模的概念。

正挤压凹模与反挤压凹模的形状有所不同。正挤压凹模兼有容纳变形金属坯料以及控制金属流动的双重作用，图

1.3所示为它的基本形式。 d 为凹模工作带的孔径， d 的大小相当于挤压成品杆部的外径。图1.3(a)为整体型的正挤压凹模，一般在热挤压或有色金属冷挤压的情况下采用。而在钢及其它合金的冷挤压、温挤压情况下，由于拐角处(C区)产生的应力集中现象非常严重，往往在这里开始出现裂纹，导致凹模开裂。因此设计模具时，一般在可能产生强烈应力集中之处，先将凹模分割开来，这样可以有效地提高凹模的使用寿命。而且这样做对凹模的加工制造也方便。图1.3(b)及(c)为正挤压凹模常用的两种分割形式，其中(b)为横向分割型，(c)为纵向分割型。

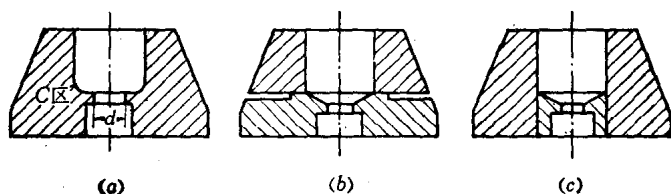


图1.3 正挤压凹模

(a) 整体型；(b) 横向分割型；(c) 纵向分割型。

反挤压凹模的作用是容纳变形的金属坯料，其内腔形状大都是圆柱形或其它各种截面形状的柱体，图1.4所示为反挤压凹模的基本形式。凹模底部的孔供安装顶料杆，顶料杆将挤压成形后的产品从模腔中顶出。图1.4(a)为整体型的反挤压凹模，一般在热挤压和有色金属冷挤压的情况下采用。在单位挤压力较高的黑色金属冷挤压和温挤压情况下，为了防止拐角处由于应力集中而产生裂纹，可采用图1.4(b)所示的横向分割型或图1.4(c)所示的纵向分割型反挤压凹模。

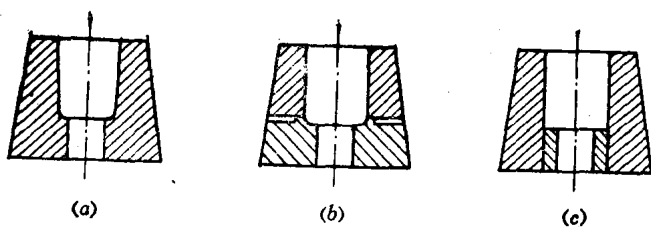


图1.4 反挤压凹模

(a) 整体型; (b) 横向分割型; (c) 纵向分割型。

根据力学分析原理可知, 挤压过程中的金属坯料是处于三向不均匀的压应力状态下, 产生塑性变形并被迫向预定的方向流动, 因此模具与金属坯料的接触面上承受非常大的单位压力。就凸模而言, 其轴向所受的单位挤压力要比其它常用的成形工艺(锻造、冲压)的单位压力高得多。例如: 有色金属冷挤压时, 单位压力一般都在 100 kgf/mm^2 以上; 钢材冷挤压时其单位挤压力可达 250 kgf/mm^2 , 甚至更高。同样, 挤压过程中凹模的内腔壁上也承受着强大的压力。生产实践中大量事实表明, 这个压力往往造成凹模发生切向开裂(或称纵裂)。图1.5、1.6所示, 即为冷挤压凹模切向开裂(裂面与切线方向垂直)的实物照片。这种切向开裂破坏问题, 如果采用增加凹模壁厚(即加大凹模外径)的办法来解决, 是徒劳的, 白白浪费了贵重的模具钢。经过理论分析及生产实践证明, 解决凹模切向开裂的有效措施和重要关键是将凹模设计成带有预应力的多层组合模。

1.1.3 预应力组合凹模

多层组合凹模的设计制造, 是事先在凹模外径圆柱面处

● $1 \text{ kgf/mm}^2 \approx 10 \times 10^8 \text{ 帕 (斯卡)}$, 余同。

套上一个或两个圆环。圆环的内径略小于凹模外径，即为过盈配合。利用过盈配合，套环对凹模外壁施加了附加的均匀压力。这一附加外压可使凹模内产生预置压应力，从而提高凹模强度。套环还可使凹模在受工作内压时不致过分地向外扩张，防止胀裂。这种组合式的凹模，称为预应力度组合凹模。外圈的套环就称为预应力环，而被套在中央的凹模，就称为凹模镶块，或称凹模芯。这种组合凹模亦称为年轮式组合凹模。

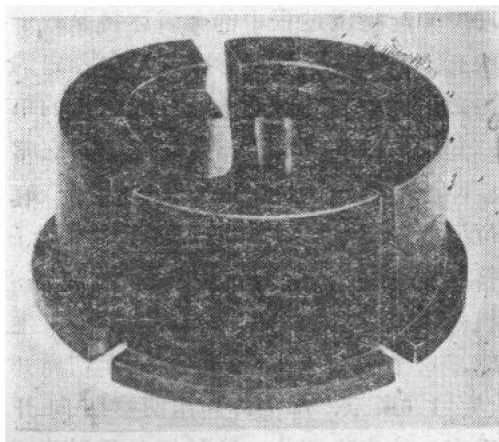


图1.5 冷挤压凹模切向开裂



图1.6 冷挤压凹模切向开裂，伴随产生横向裂纹

1.2 预应力组合凹模的特性

1.2.1 两种常用的预应力组合凹模

按照对凹模施加预应力的情况，常用的挤压组合凹模有：两层组合凹模，即凹模镶块外装有一个预应力环，如图1.7（b）所示；三层组合凹模，即凹模镶块外装有两个预