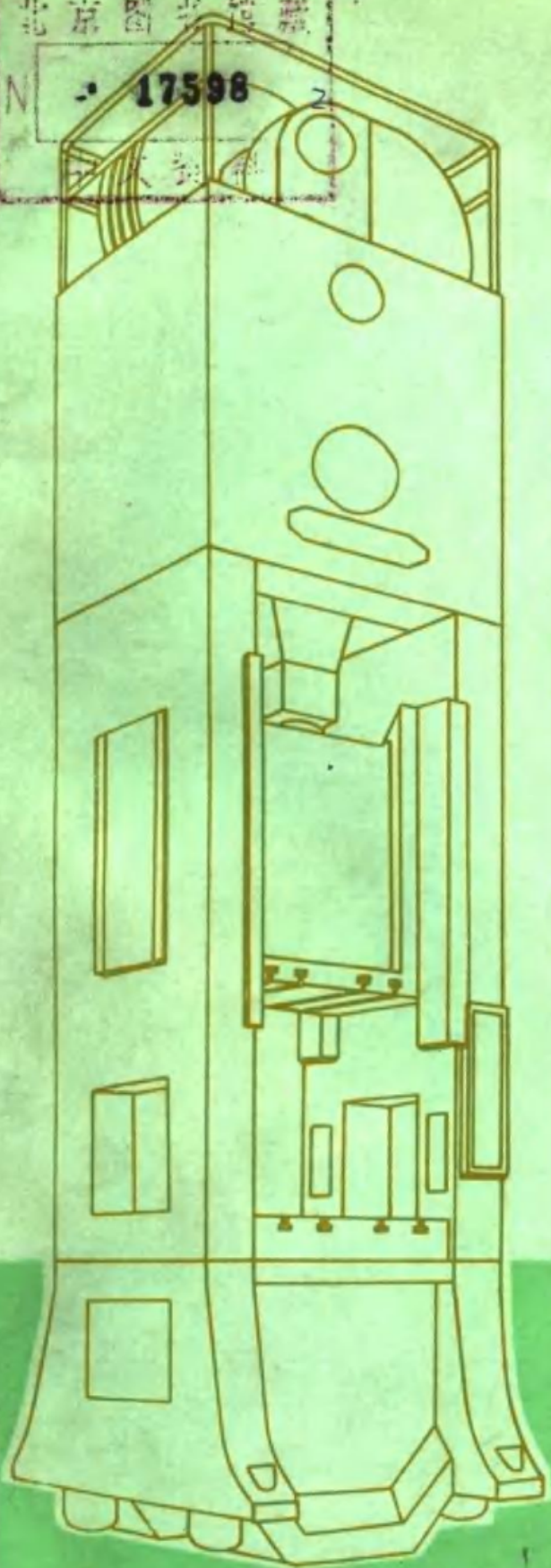


北京图书馆藏

17598

曲柄压力机设计



济南第二机床厂
东南工学院
铸造材料学
锻工所
编印



数据加载失败，请稍后重试！

前 言

随着我国国民经济的飞速发展，尤其是少、无切削先进工艺的推广使用，对锻压机械制造业提出了越来越高的要求。在设计、科研、教学范围内，我们深感这方面资料缺乏；迫于当前供需方面的暂时矛盾，很多单位的同志发扬自力更生，勤俭办企业的革命精神，纷纷自行设计，制造锻压设备，也希望能有这方面的参考资料。

遵照毛主席关于“人类总得不断地总结经验，有所发现、有所发明、有所创造、有所前进”的教导，山东工学院、济南第二机床厂、一机部济南铸锻研究所的同志经过磋商，组成了“闭式单双点压力机设计计算”资料三结合编写小组，在所属单位领导的大力支持下编写了这本资料的初稿。

初稿是以济南第二机床厂的生产实践为基础，对该厂历年来设计、制造闭式单双点压力机的有关资料进行归纳，统计、分析比较的基础上编写的，同时也吸取了国内使用单位的宝贵经验和国外有关先进资料。在编写过程中，邀请了济南第二机床厂的工人、领导干部、设计工艺人员，山东工学院压力加工教研室的老师，铸锻研究所及部分用户同志，针对每一章节进行了多次的讨论和审查。

初稿在内容安排上尽量照顾各方面的要求，它可作为从事设计、科研、教学工作人员的参考资料，也适合工人同志自学以提高理论水平的需要。

初稿内容虽然是在生产实践的基础上写成的，但是人们对于自然的认识是逐步的，有待于不断的深化。有些东西可能还只是表象，不是实质，正如毛主席教导的：“因为从事变革现实的人们、常常受着许多的限制，不但常常受着科学条件和技术条件的限制，而且也受着客观过程的发展及其表现程度的限制（客观过程的方面及本质尚未充分暴露）”。因此初稿将接受实践的进一步考查和鉴定，使其逐步符合实际。由于我们对马列主义、毛泽东思想学习的不够，技术理论水平不高，稿中缺点和错误在所难免，热诚希望读者提出批评指正。

“闭式单双点压力机设计计算”资料三结合编写小组

一九七三年三月三十一日

绪 论

一、机械压力机的用途

机械压力机是在锻压生产中得到广泛应用的锻压设备之一。它几乎可以进行所有的锻压工艺。例如：板料冲压、模锻、冷热挤压、粉末冶金及冷热精压等。

锻压生产是一种无切屑和少切屑的先进加工工艺。它具有很好的优点，能达到产品质量好，材料消耗少和生产率高的要求。如采用冷挤压的压力机冷挤压钛合金的六角螺帽，对边尺寸的精度可达到 25.37 ± 0.025 ，这种挤压加工精度和铣削加工的精度相比，毫不逊色，在材料的消耗方面，采用切削加工内六角螺钉的材料利用率为40%，采用热压工艺加工的材料利用率为70%。生产率就显得更加突出了，如果用冷锻自动机加工内六角螺钉的生产率比采用金属切削机床加工这类零件的生产率高400倍。由上可见锻压生产的特点是适应我国社会主义建设总路线“鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义”的要求。毛主席教导我们：“一切产品，不但求数量多，而且求质量好，耐穿耐用。”遵照毛主席这个伟大教导，为了推广新工艺，我国的机器制造业迅速地发展锻压机器。机械压力机在解放后的二十多年中，特别在近十年来有了巨大的发展。压力机的品种不断增加。压力机的吨位结构逐步实现标准化，通用化和系列化。目前，我国不但能制造一般普通的压力机，而且已经能自行设计和制造重型和超重型的机械压力机了，如8000吨热模锻压力机，4000吨精压机，3500吨闭式双点压力机，1000吨摩擦压力机……等。机械压力机在电器仪表、飞机、汽车、坦克、机车等工业部门中得到普遍地采用。

二、机械压力机的分类

我国的锻压机械共分为八大类，具体分类方法见表1。机械压力机共分为九大类，具体分类方法见表2。

表1 锻压机械的分类

名 称 汉 字 代 号	机	液	自	锤	锻	切	弯	他
名 称 拼 音 代 号	J	Y	Z	C	D	Q	W	T
类 别 名 称	机械压力机	液压机	自动锻压机	锤	锻机	剪切机	弯曲校正机	其 他

在表2中的第一、二、三大类是属于一般用途的机械压力机。这类压力机可按其结构特点分类。首先按照床身的结构特点分有开式压力机和闭式压力机；然后按压力机的曲柄数分有单点、双点和四点压力机。

开式压力机——床身的结构特点是C字形的称之为开式压力机。这种压力机一般吨位都比较小（吨位为2.5~400吨）。

闭式压力机——床身的结构特点是框架式的称之为闭式压力机。这种压力机的吨位一般为160~1600吨。

由于压力机工作台面尺寸大小的不同，为了保证滑块的运动良好，分有一个曲柄、两个曲柄、四个曲柄的压力机。简称为单点、双点、四点压力机。

三、机械压力机的主要参数和型号

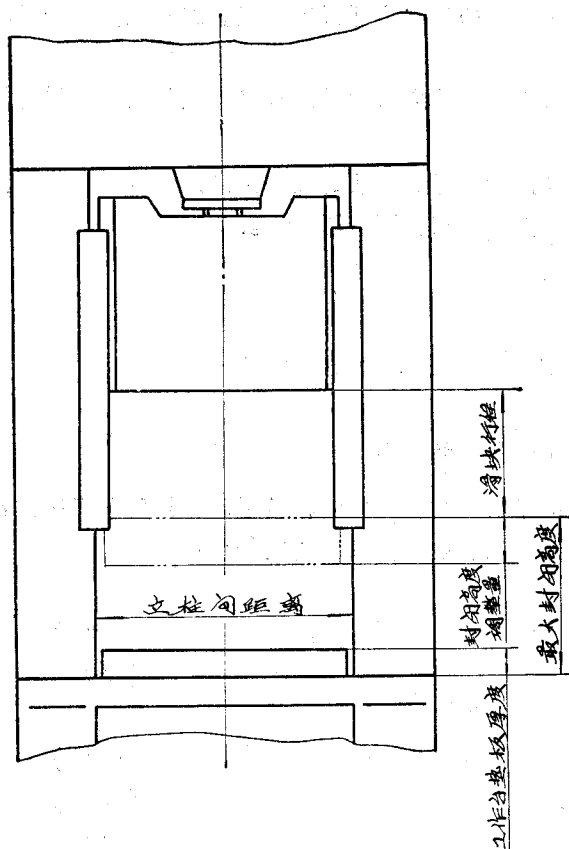
（一）主要参数

机械压力机主要用来进行薄板零件的落料、冲孔、弯曲、校正、和拉延等工序，技术参数是选择压力机完成相应工序的可能性和安装、修理压力机的依据。

机械压力机的技术参数是：

滑块公称压力（距下死点前××毫米）	（吨）
滑块行程长度	（毫米）
一次行程最大功及最大作功时的行程利用率	
滑块行程次数	（次/分）
滑块打料行程长度	（毫米）
最大封闭高度	（毫米）
封闭高度调整量	（毫米）
立柱间距离	（毫米）
滑块底面尺寸（前后×左右）	（毫米）
工作台垫板尺寸（前后×左右×厚度）	（毫米）
气垫压紧力（吨）	相应气压（公斤/厘米 ² ）
气垫退出力（吨）	相应气压（"）
气垫行程	（毫米）
气垫个数	（个）
离合器气压、平衡器气压	（公斤/厘米 ² ）
主电机功率、型号、每分钟转数	
压力机平面尺寸（前后×左右）	（毫米）
压力机地面以上高度	（毫米）
压力机重量	（吨）

压力机模具空间简图



1. 滑块公称压力 P_D ：是指压力机滑块距下死点前一定距离（济南第二机床厂在系列设计中规定为下死点前 $S_P = 12$ 毫米）内压力机主要零件强度所允许的最大压力。

滑块公称压力 P_D 在系列设计中是按 1.25 的公比递增的：

160 200 250 315 400 500 630
800 1000 1250 1600 2000 (吨)……

设计压力机时，根据 S_P 、传动方式、结构尺寸、材料等计算和绘制出曲柄转角 α_P 和滑块允许压力 P_D 之间关系曲线——滑块允许压力曲线 $P = f(\alpha)$ 并载入压力机的“使用说明书”中，供选择压力机完成相应的工序使用。

2. 滑块行程长度：压力机通过曲柄连杆机构，使滑块沿机身导轨做上下往复运动。滑块上下运动的两个极点称为上死点和下死点。从上死点运动到下死点称为工作行程。从下死点返回到上死点称为返回行程，上下两个极点之间的距离称为滑块行程长度（即曲柄半径的两倍）。

系列设计的通用型压力机，滑块行程长度一般随着公称压力的增加而增加，但考虑到一些零件的通用又往往使临近吨位的行程长度相等，例如：系列设计中 250、315 两种吨位的压力机行程长度都是 315 毫米。

由于这一参数直接影响到可能加工工件的高度，因而设计专用的压力机时，必须根据使用单位提出的“典型零件”进行选定。

3. 滑块行程次数，是指压力机滑块，从上死点运动到下死点，又从下死点返回到上死点每分钟运行的次数。

滑块行程的次数，决定着压力机的生产率，目前压力机设计中此参数有逐渐增加的趋势，但是由于滑块行程长度和滑块行程次数决定滑块的速度，而这个速度又受到被冲压零件材料塑性变形和自动送料精度，工作机构的协调性以及模具工作寿命等的影响，故在设计压力机时必须全面考虑。

一般压力机说明书中所列出的滑块行程次数是指压力机在空载（即无冲压负荷下）时的次数，在压力机负载下（即有冲压负荷时）滑块行程次数随负载的大小（严格说是

做功的大小)较空载时的行程次数降低不同的数值。

一般在使用压力机时,应尽量采用“连续行程”规范进行工作,当必须使用“单次行程”进行工作时,其实际单次行程数不得超过连续行程次数的50%左右,以防止压力机摩擦离合器很快的磨损和过度的发热,以及电机过热或飞轮不能恢复速度。

4.封闭高度:封闭高度是指滑块在下死点时,滑块底面至工作台上表面(不是指垫板上表面)的距离。为了使压力机能适用于不同高度的模具便于安装和调整,压力机的封闭高度是可以调节的,滑块在下死点时至工作台上表面的最大距离,称为最大封闭高度,最小距离称为最小封闭高度,最小封闭高度与最大封闭高度的差值,称为封闭高度调整量。

设计冲模时,考虑到在压力机上安装模具的可能性和模具刃磨后的继续使用,模具的闭合高度不允许采用压力机封闭高度最大和最小两个极限值。

此外,立柱间距离、滑块底面和工作台垫板的尺寸等参数都是设计和使用压力机时重要的依据。

设计压力机时,还必须尽量减少压力机重量。保证压力机在基础上有一定的支承面积,以使压力机工作稳定和不致损坏压力机的紧固。

压力机平面尺寸和地面以上高度是布置冲压车间设备、设计建筑车间高度和使用压力机后能够进行维修的主要依据,同时还必须考虑能从压力机正面、侧面拆卸一些零件,例如,曲柄光轴、传动轴等可能。

表3及表4为济南第二机床厂在1972年以前所设计的闭式单、双点压力机的主要参数。

(二) 达到公称压力时的行程量 S_p

达到公称压力时的行程量 S_p 是指压力机传动零件能够承受公称压力时滑块距下死点的距离(或是达到公称压力时从下死点算起的曲柄转角 α_p)这一参数很重要,因为它能确定压力机的工艺可能性、并且是设计计算曲柄轴强度和传动系统的基础。

研究现有的压力机结构时,可以知道在行程值和公称压力相同的情况下,由于 S_p 值的规定不同、压力机会有不同的工艺性,所设计的压力机曲柄轴强度和传动装置也就不同。

关于 S_p 值在我国过去没有统一的规定标准,过去我们在自行设计的一些压力机中,大体上沿用了与苏联压力机相同的数值 $\alpha_p \leq 25^\circ \sim 30^\circ$ 。按照一些资料介绍,西德大多数的工厂是规定 α_p 值,一般压力机 $\alpha_p = 30^\circ$,对于行程较大的拉延压力机 $\alpha_p = 15^\circ$ 。英美的许多压力机制造厂规定,不论行程大小以 $S_p = 1/2''$ 。日本虽无正式的标准,但在大型压力机上使用了美国的规定。

从设计和使用的两个侧面分析,在不同的压力机上规定相同的 α_p 值是不科学的,由于压力机的行程长度不能统一,而且悬殊太大,当把 α_p 值规定相同时达到公称压力时的行程量 S_p 大小就不一,甚至悬殊很大。如果为了满足工艺使用的可能性将 α_p 增大势必造成设计的困难和制造费用的显著增加。

表 3

序 号	产 品 型 号		闭 式 单 点 压 力 机 技 术 参 数						
	规 格	号	J31-250	J31-315	J31-400	J31-630	J31-800	J31-1000	J31-1250
1	公称压力	吨	250	315	400	630			1250
2	发挥公称压力时离下死点距离	毫米	10.4	10.5	13.2	20			12
3	滑块行程长度	"	315	315	400	400			500
4	滑块行程次数	次/分	20	20	20	12			10
5	最大封闭高度	毫米	630	630	710	850			1100
6	封闭高度调节量	"	200	200	250	200			250
7	滑块底面尺寸	前 后	850	960	1000	1170			1560
8		左 右	980	1070	1230	1170			1470
9	工作台垫板尺寸	前 后	950	1100	1200	1500			1900
10		左 右	990	1100	1250	1200			1800
11	厚	"	140	140	160	200			270
12	滑块内打料杆行程		100	130	150	160			125
13	主电动机	功 率	30	30	40	55			100
14		型 号	JR2-72-4	JR2-72-4	JR81-4	JR82-4			JR3-25M-4
15	气垫个数	个	1	1	1	1			1
16	气垫行程	毫米	150	160	200	200			250
17	单个气垫退出力	吨	7	7.6	10	16			25
18	单个气垫压紧力	"	40	50	63	100			200
19	压机外形尺寸	前 后	2325	2250	2250	2240			3445
20		左 右	2020	2000	3000	3350			4215
21	地面以上高度	"	5476	5610	6030	6355			8522.5
22	压力机重量	吨	29	35.8	47.5	61.8			142
23	出厂价格	万元	7.5	9	10	18			42
24	备 注								

表 4

序号	产 品 型 号		闭 式 双 点 压 力 机 技 术 参 数							
	规 格		J36-160	J36-250	J36-400	JB36-400	J36-630	J436-800	J36-800	J36-1250
1	公称压力	吨	130	250	400	400	630	800	800	
2	发料公称压力时离下死点距离	毫米	10.8	11	13.7	6.5	26	26	13	
3	滑块行程长度	"	315	400	400	200	500	500	500	
4	滑块行程次数	次/分	2	17	16	23	9	10	10	
5	最大封闭高度	毫米	800	750	900	710	1000	1100	1200	
6	封闭高度调节量	"	250	250	315	200	340	450	500	
7	滑块底面尺寸	前 后	1050	1000	1250	1250	1270	1500	1550	
8		左 右	1980	2540	2550	2550	3200	3700	3640	
9	工作台垫板尺寸	前 后	1250	1250	1600	1600	1500	1790	1800	
10		左 右	2000	2770	2780	2800	3450	4000	4000	
11		厚	130	160	170	170	190	205	210	
12	滑块内打料杆行程	"	100	50	100		150	200	120	
13	主电动机	功率	30	30	40	23	55	55	75	
14		型号	JR272-4	JR2-72-4	JR81-4	JR-72-4	JR32-4	JR82-4	JR3-250M-4	
15	气垫个数	个	2	3	3		3	3	3	
16	气垫行程	毫米	150	150	200		240	200	250	
17	单个气垫退出力	吨	2.5	2.2	4		6.3	8.3	13.3	
18	单个气垫压紧力	"	16	17	35		40	53.3	50	
19	压机外形尺寸	前 后	2105	2300	2315	2146	2170	3100	2825	
20		左 右	2970	4140	3830	4500	4600	5935	6075	
21	地面以上高度	"	5010	5524	6030	5640	6795	6876	7725	
22	压力机重量	吨	37.5	48.6	56	56	97.6	124	153.3	
23	出厂价格	万元	8.5	12	16	15.5	20	48		
24	备 注								移动工作台开出 距离2400	

反之如果满足设计和制造的要求,使用就又造成一定的困难。

济南第二机床厂在新的系列设计中规定不论行程值大小 $S_P=12$ 毫米,这一规定满足了大部分冲压车间压制一般工件的需要。

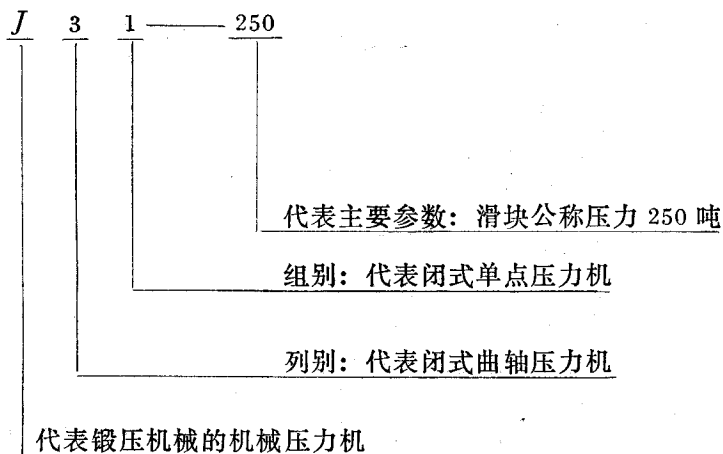
根据冲裁时的最大负荷值是在当凸模切入板厚 $1/3$ 处的理论,并考虑到为使制件或废料能从凹模中脱出、冲裁时凸模需进入凹模 $1\sim 3$ 毫米。当 $S_P=12$ 毫米时,可冲裁的最大板厚约为16毫米左右,这一冲裁厚度对一般冲压车间是完全满足需要的。

英、美、日的规定 $S_P=1/2''$ 与我们的规定大体相同,从资料介绍和我国几年来引进的日本压机来看,也基本上满足了这一冲裁厚度的要求。

同时 S_P 规定为一定值,对于当前生产的闭式单、双点压力机零部件的通用化将带来一定的方便。

(三) 锻压机械型号编列办法

1. 锻压机械的基本型号(基型)由一个汉语拼音字母和几个阿拉伯数字组成,汉语拼音字母代表锻压机械的大类称为类别。同一锻压机械中分为若干列,称为列别。由第一位阿拉伯数(自左向右、下同)代表。同一列锻压机械中分为若干组、称为组别,由第二位阿拉伯数字代表,第二位阿拉伯数字后的阿拉伯数字,代表锻压机械的主要参数、并一律用实际数字表示。第二位阿拉伯数字与规格部分的阿拉伯数字之间以一短横“—”隔开。汉语拼音字母一律用大写。



统一名称是: 闭式单点压力机

主要参数是: 滑块公称压力 250 吨

2. 类、列、组和主要参数完全相同,只是次要参数与基型不同之锻压机械、均按变型处理。对型号已确定的锻压机械如在结构上和性能上有所改进时,均按改进处理。

(1) 变型: 在原型号汉语拼音字母后(即第一位阿拉伯数字前)加一个汉语拼音字母A、B、C……等依次表示第一、第二、第三……种变型。

例: J431—250

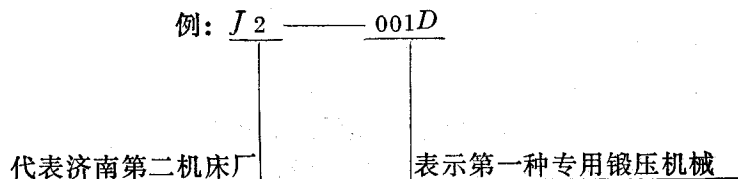
(2) 改进: 在原型号(基型或变型)的末端加一个汉语拼音字母A、B、C……等,

依次表示第一、第二、第三……次改进。

例: J31—250A

(3) 专用锻压机械的型号由汉语拼音字母和三位阿拉伯数字组成。汉语拼音字为工厂代号。阿拉伯数字为专用锻压机械产品设计的品种顺序号(从001开始)汉语拼音字母与阿拉伯数字间用一短横“—”隔开。专用锻压机械不分类别,列别和组别。

在济南第二机床厂为区别专用金属切削机床和专用锻压机械,除按上述办法编列外,须在型号的末端(即最后一位阿拉伯数字后加一个字母“D”(表示“锻压机械”))



四、产品设计的技术文件和经济指标

(一) 产品设计的技术文件

1. 技术任务书
2. 技术设计
3. 总装配图
4. 产品总目录表
5. 各部件装配图
6. 零件图
7. 各部件基本件目录表(包括通用件和借用件)
8. 各部件标准件目录表
9. 各部件外购件目录表
10. 产品通用件综合目录
11. 产品外购件综合目录(机械、电器两部分)
12. 产品标准件综合目录
13. 产品验收试验技术要求及合格证
14. 产品鉴定大纲
15. 包装箱图纸目录, 装箱单
16. 产品“使用说明书”(包括易损零件图册)
17. 产品“合格证明书”
18. 产品“计算书”
19. 出国特殊要求

(二) 产品设计的技术经济指标

所设计产品与已有国内、外同类产品相比:

1. 在结构、性能、质量方面有所改进提高、满足使用工艺要求, 效率提高, 操作使用方便、安全可靠, 受用户欢迎。
2. 零、部件寿命长, 便于调整, 修理。
3. 产品零件、种数、件数尽量少力求结构简单, 并且标准化, 通用化系数高。
4. 所有外购的材料、外购件(液压、电气元件、轴承等)尽量少采用稀有、特殊或正试制品种, 以保证配套供应方便。
5. 制造过程中(如铸、焊、锻、机加工、装配、吊运等)工艺性好、占用关键设备少, 质量易保证、工时少。
6. 设计结构上, 为成批生产, 稳定保证质量, 创造良好条件。
7. 压机重量轻, 材料利用率高, 产品成本下降。

目 录

绪 论

第一章 曲柄压力机的运动学与动力学

第 1 节 曲柄压力机运动学·····	1
第 2 节 曲柄压力机动力学·····	3

第二章 传 动 系 统

第 1 节 传动系统总述·····	6
第 2 节 齿轮传动·····	24
第 3 节 曲轴的计算·····	56
第 4 节 三角皮带传动·····	92
第 5 节 轴 承·····	99
第 6 节 键·····	114

第三章 电动机和飞轮的计算

第 1 节 总 论·····	115
第 2 节 工作行程作功的计算·····	119
第 3 节 主电机额定功率的计算·····	121
第 4 节 飞轮转动惯量的计算·····	122
第 5 节 电机的类型和起动·····	124
第 6 节 离合器结合时的高峰电流·····	125
附录 1: 能量计算公式的简化·····	127
附录 2: 电动机及飞轮计算公式的推导·····	128

第四章 离合器和制动器

第 1 节 离合器和制动器的作用·····	134
第 2 节 摩擦离合器与制动器的接合过程·····	134
第 3 节 离合器与制动器设计的基本要求·····	135

第4节	解决离合器制动器摩擦件过热的主要措施	135
第5节	离合器制动器的结构设计	139
第6节	离合器和制动器计算	150
附 录		165

第五章 滑 块

第1节	连 杆	170
第2节	滑块体	192
第3节	封闭高度调整机构	203
第4节	打料装置	221
第5节	超负荷保险装置	224

第六章 床 身

第1节	概 述	243
第2节	床身的设计要求	244
第3节	床身的分类	245
第4节	闭式床身的设计计算	245
第5节	焊接床身的焊接加工	295
第6节	机械压力机拉紧螺栓的电感应加热予紧法	306

第七章 气 垫

第1节	气垫用途及结构分析	310
第2节	气垫设计中的若干问题	316
第3节	气垫计算	320

第八章 气路系统

第1节	气压传动	329
第2节	平 衡 器	333
第3节	常用的气动原件	339

第九章 润滑系统

第1节	润滑剂的选用	356
第2节	润滑系统的设计	358

第十章 基 础

第1节	基础设计	367
第2节	基础的计算	371

第一章 曲柄压力机的运动学与动力学

第1节 曲柄压力机运动学

压力机一般用曲柄连杆机构使曲轴或偏心齿轮的转动变为滑块的往复直线运动，如图1—1所示。

图中：

h ——压力机的闭合高度，压力机计算中取最大闭合高度；

H ——压力机的开口高度；

S_0 ——滑块全行程；

S ——任意曲柄转角时的滑块行程；

R ——曲柄半径，等于滑块行程 S_0 之半；

L ——连杆长度，计算时取连杆之最短长度（对于连杆长度可变的压力机）；

β ——连杆与滑块行程间的夹角；

ω ——曲柄的旋转角速度

α ——曲柄旋转角

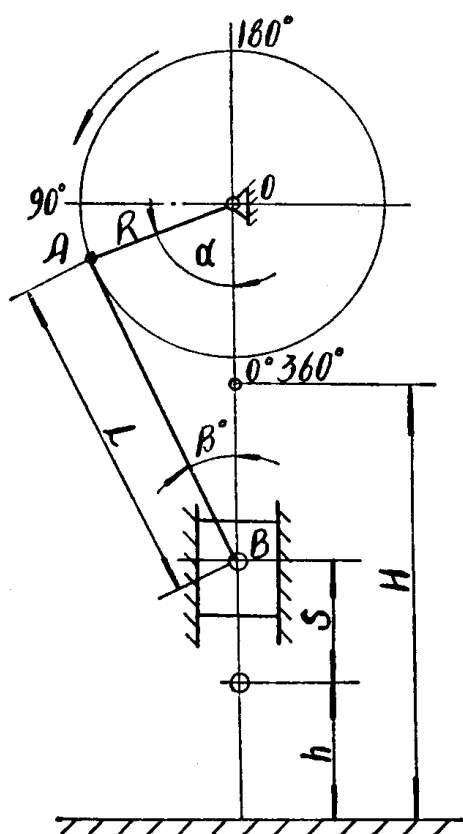


图1—1

一、滑块行程 S ：滑块行程是曲柄转角的函数，即 $S = f(\alpha)$ ，当已知转角时，滑块行程可用以下近似公式计算

$$S = R \left[(1 - \cos \alpha) + \frac{K}{4} (1 - \cos 2\alpha) \right] \quad (1-1)$$

式中 K —— 连杆系数， $K = \frac{R}{L}$ ，对一般压力机 $K = 0.1 \sim 0.12$ ，对连杆与滑块间带中间柱塞的压力机， $K \approx 0.2 \sim 0.27$

二、滑块速度 v ：行程 s 对时间 t 进行一次导数得各转角时相应的滑块速度 v ，其近似式为：

$$v = \frac{ds}{dt} = \omega \cdot R \left(\sin \alpha + \frac{K}{2} \sin 2\alpha \right)$$

$$=0.105nR(\sin\alpha + \frac{K}{2}\sin 2\alpha) \quad (1-2)$$

式中 n ——曲柄每分钟转数

由式可知在 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=180^\circ$ 时, (即滑块在上下死点时) $v=0$,

在接近 $\alpha=90^\circ$ 和 $\alpha=270^\circ$ 时滑块速度达最大值, 最大滑块速度 $v_{max} \approx \omega R = 0.105nR$
当压力机主要用于拉延的情况时滑块的最大速度应该小于板料的最大允许拉延速度, 板料的质量对最大允许拉延速度的数值影响很大。下表仅为各类材料的最大允许拉延速度的参考值。

表1—1 各种材料的拉延速度

材 料 名 称	钢	不锈钢	铝	硬 铝	黄 铜	铜	锌	
最大拉延速度 (毫米/秒)	406	179	890	204	1020	765	765	

表1—2 现有压力机的滑块最大速度 (毫米/秒)

压 机 型 号	v_{max}	压 机 型 号	v_{max}
J31—250	330	J36—160	330
J31—315	330	JB36—160	252
J31—400A	419	J36—250	357
J31—400	280	J36—400	336
J31—630	252	J36—630	236
		JA36—800	263

三、滑块加速度 j : 行程 S 对时间 t 的二次导数为滑块的加速度 j ,
其近似式为:

$$j = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2S}{dt^2} = -\omega^2 R(\cos\alpha + k\cos 2\alpha) \quad (1-3)$$

由式可知当 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=180^\circ$ 时 (即滑块在上下死点位置) 具有最大加速度 j_{max} ;
 $j_{max} = -\omega^2 R(1+K)$

将 J31—250 闭式单点压力机各参数代入 (1—1), (1—2) (1—3) 可求得各转角 α 时相应的位移 S , 速度 v 和加速度 j 的一系列数据, 并将计算数据按一定比例尺绘制成相应的坐标曲线 (图1—2)。

当已知滑块的行程时可用下式求出相应的转角:

$$\alpha = \arccos \frac{2(1 - \frac{S}{R})(1 + \frac{1}{K}) + (\frac{S}{R})^2}{2(1 - \frac{S}{R} + \frac{1}{K})}$$