

现代铸造

设备、材料和工艺

〔美〕T. 阿尔坦等 编

国防

现 代 锻 造

设备、材料和工艺

[美]T.阿尔坦等 编

陆 索 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地叙述了美国七十年代的锻造技术，理论和实践兼顾，深入浅出，颇有实用参考价值。

全书共分九章，对锻造所用的设备、材料和工艺作了全面论述。各章内容包括：锻造设备的应用范围；高能高速锻造设备；封闭模锻工艺过程分析；锻造材料和工艺；等温模锻及其它工艺；锻件质量保证的程序；锻造参数对锻件性能的影响；锻件设计准则；自由锻和制坯方法等。

本书可供从事锻造工作的科技、生产人员以及高等院校师生参考。

FORGING EQUIPMENT, MATERIALS AND PRACTICES

T. Altan, etc

Air Force Materials Laboratory (1973)

*

现 代 锻 造

设备、材料和工艺

〔美〕T. 阿尔坦等 编

陆 家 译

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 印装

787×1092¹/₁₆ 印张28 649千字

1982年4月第一版 1982年4月第一次印刷 印数：0,001—4,900册

统一书号：15034·2292 定价：2.85元

译者的话

《现代锻造——设备、材料和工艺》是根据美国空军材料研究室于1973年出版的《Forging Equipment, Materials and Practices》一书译出。

全书共分九章，对锻造所用的设备、材料和工艺作了较全面的论述。各章内容包括：锻压设备的应用范围、高能高速锻造设备、封闭模锻工艺过程分析、锻造材料和工艺、等温模锻及其它工艺、锻件质量保证的程序、锻造参数对锻件性能的影响、锻件设计准则、自由锻和制坯方法等。

参加本书翻译工作的有陆索、吴世德、李成功、李训悌、刘建宇、贺开运、王乐安、王钧斌、张绍维、邬善道、李光运、葛运桂等，最后由宁玉成和李训悌作了全书初校，并请陈石卿作了部分章节的复校。为便于阅读起见，对全书的英制单位作了公制换算。

限于译者的水平，译文中定有不妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 锻压设备的应用范围	1
一、提要	1
二、导言	1
三、锻造工艺和设备之间的相互关系	1
1. 金属在锻造时的机械性能	2
2. 设备参数对锻造过程的影响	2
3. 锻造所需的载荷和能量	3
四、锻造设备的分类和特征	5
1. 载荷和能量特性	5
2. “时间”特性	6
3. 精密度特性	6
五、水压机	7
1. 水压机的传动系统	7
2. 水压机框架的设计	8
3. 水压机的特性	9
4. 现有水压机的能力和新发展	10
六、机械压力机	13
1. 曲柄滑块机构的运动学	14
2. 载荷和能量特性	15
3. “时间”特性	17
4. 精密度特性	17
5. 最新发展、能量和应用	18
七、螺旋压力机	22
1. 螺旋压力机设计原理	22
2. 载荷和能量特性	23
3. “时间”特性	24
4. 精密度特性和压力机操作	25
5. 新发展、能力和应用	25
八、锤	27
1. 砧座锤	29
2. 对击锤	30
载荷和能量特性	30
“时间”特性	32
精密度特性	32
新发展和应用	33
1. 的专用设备	35
2. 床	35

2. 辗锻机	37
3. 横轧机	38
4. 电锻机	40
5. 轧环机	41
6. 卧式锻造机或顶锻机	42
7. 摆动辗压机	43
8. 径向锻造机和引伸锻造机	44
十、锻造自动化	49
1. 锻机间的工作件自动运输	49
2. 工件在锻机内的自动运输	49
3. 标准锻机的全自动化	50
4. 单一用途自动锻机的自动化	50
参考文献	52
附录	56
第二章 高能高速锻造设备	59
一、提要	59
二、导言	59
三、高速锤的简单介绍	60
1. 迪那派克型高速锤	60
2. 美国工业公司高速锤	64
3. 可控能量流动成型高速锤	65
4. 内燃机式高速锤	66
5. 拉施柯 (Lasco) 公司高速锤	68
四、高速锻造工艺基础	69
1. 锻造的基本原理	69
2. 变形速度和温度对流动应力的影响	70
3. 变形速度对材料破坏和塑性的影响	71
4. 变形速度对惯性力的影响	72
5. 变形速度对摩擦和金属流动的影响	72
五、高速锻的应用及其特点	73
1. 高速锻造的效能及其应用	73
2. 高速锻造的模具设计和模具寿命	76
六、高速锻造和普通锻造的对比	82
1. 高速锤的基本特征	82
2. 高速锤的优越性	82
3. 高速锻和普通锻的比较	83
4. 高速锻造的经济性	85
七、结论和展望	86
参考文献	87
第三章 封闭模锻工艺过程分析	90
一、提要	90

二、导言	90
三、锻件的形状复杂性	91
1. 按锻件形状分类的方法	91
2. 圆形锻件的形状困难系数	92
3. 封闭模锻的毛边设计	93
4. “形状分类法”在毛边设计中的应用	94
5. 形状困难系数在毛边设计中的应用	96
6. 圆形钢锻件的各种几何参数的计算机辅助计算	96
四、封闭模锻的预锻件设计	97
1. 预锻件设计的实验和模拟方法	99
2. 设计预锻件的经验准则	100
3. 预锻模的计算机辅助设计	102
五、封闭模锻的压力、载荷和能量计算方法	103
1. 计算锻造载荷的经验方法	104
2. 计算锻造载荷的“板块”分析法	105
3. “板块”分析法在一些锻件上的应用	107
4. 在生产条件下计算载荷的简化方法	110
5. 计算锻造能量的近似方法	112
六、计算机辅助设计和计算机辅助制造在封闭模锻上的应用	113
1. 涡轮叶片和压缩机叶片精密锻件的计算机辅助设计	114
2. 肋-腹板型锻件的锻造载荷、载荷中心和工件重量的计算	115
3. 计算机辅助设计 (CAD) 和计算机辅助制造 (CAM) 一体化在锻造上的应用	116
七、锻造工序中材料和摩擦条件的影响	117
1. 锻造时金属的流动应力	117
2. 材料与模具分界面上的摩擦状态	120
3. 金属的可锻性	123
附录 A 锻造时的应力和载荷	126
附录 B 封闭模锻的变形模型	133
附录 C 各种金属材料的流动应力资料	135
参考文献	152
第四章 锻造材料和工艺	156
一、耐热合金	156
1. 铁基合金	156
2. 钴基合金	159
3. 镍基合金	162
二、轻金属和合金	167
1. 铝合金	167
2. 铍	172
3. 镁合金	176
三、钛合金	178
1. 基本冶金特性	178
2. 锻造特性	179

3. 锻造工艺	180
4. 锻造工艺对性能的影响	182
参考文献	184
第五章 等温模锻和其它新工艺	186
一、 导言	186
1. 蠕变	187
2. 超塑性	188
二、 新兴的成型工艺	190
1. 等温超塑性模锻 (Gatorizing)	190
2. 相变超塑性工艺 (Microduplex Processing)	192
3. 等温模锻	195
4. 分级锻造 (Incremental Forging)	199
三、 可供选择的锻造方法	201
1. 铸造毛坯	201
2. 粉末冶金毛坯	202
3. 冷锻	205
四、 代替锻造的其它工艺方法	206
1. 扩散焊接	206
2. 摩擦焊接	211
参考文献	214
第六章 锻件质量保证的程序	216
一、 导言和背景	216
1. 质量控制的技术规范	217
2. 质量控制程序	218
3. 锻件原材料的检验	219
4. 锻造车间的质量控制	220
5. 锻件热处理过程中的质量控制	222
6. 锻件的冶金终检	224
二、 无损检验	225
1. 超声波的发生	227
2. 超声波在固体中的传播	227
3. 超声波的衰减	229
4. 超声测试的方法	229
5. 数据的显示	231
6. 超声测试的应用	232
7. 锻坯和锻件的超声检验	234
三、 质量保证的基本观点	237
参考文献	237
第七章 锻造参数对锻件性能的影响	239
一、 导言	239
二、 塑性变形	241
1. 应变速率	241

2. 变形机理	241
3. 变形经历	242
4. 加热经历	243
5. 热塑性 with 缺陷的形成	244
三、晶粒度	246
1. 钢	246
2. 镍基合金	248
四、纤维方向	250
1. 钢	251
2. 铝合金	252
五、应力腐蚀裂纹	252
六、热机械处理	256
1. 低合金钢	257
2. 镁合金	263
3. 钛合金	263
4. 铝合金	265
5. 镍基合金	265
七、锻造参数对材料性能的影响	266
1. 耐热合金	266
2. 马氏体时效钢	271
3. 难熔金属	277
4. 钛合金	279
参考文献	288
第八章 锻件设计准则	292
一、导言	292
二、背景	292
三、选择最经济的锻件设计方案的指导原则	296
1. 选择锻件设计方案时应考虑的项目	296
2. 材料	297
3. 锻造工艺参数	301
4. 数量	301
5. 交付	302
6. 性能要求	303
7. 锻件的用途	303
8. 预期工作寿命	303
9. 锻件的精度等级	307
四、锻件形状分类	313
1. 粗锻件	313
2. 普通模锻件	313
3. 小余量锻件	317
4. 精密锻件	317
5. 盘形件、锥形件或圆形件	318

6. 结构类锻件	318
五、锻件材料的选择	325
1. 轻金属	325
2. 碳钢和低合金钢	326
3. 钛合金	327
4. 高温合金	327
六、锻造设备的选择	329
1. 锤	329
2. 水压机	332
3. 机械压力机	340
4. 螺旋压力机	341
5. 顶锻机	341
6. 自由锻设备	344
七、不同锻件设计方案的费用比较	344
1. 自由锻件	344
2. 精密锻件	345
3. 数量要求	345
4. 试验要求	345
八、精密锻件的设计和选择	348
1. 选择工艺方案时应考虑的项目	348
2. 铝镁合金的精密锻件	348
3. 钢的精密锻件	355
4. 钛合金的精密锻件	360
5. 高温合金的精密锻件	365
九、影响制备锻模的重要因素	376
1. 锻造材料	376
2. 锻造模块	377
3. 铸造模具	380
4. 采用镶块模降低模具费用	382
5. 镶块模的胀缩配合与压配合	384
6. 特殊用途的模具堆焊	391
7. 模具的损坏分析	393
8. 灼热温度下的模具材料	395
参考文献	399
词汇——有关锻造的术语	402
第九章 自由锻和制坯方法	412
一、导言	412
二、背景	412
三、自由锻工序	414
1. 设备	414
2. 自由锻模具	415
3. 自由锻工序	418

4. 锻造用的传送设备	423
四、制坯	426
1. 制坯方法的比较	426
2. 预锻件形状的研究	434
3. 关于制坯的结论	437
参考文献	438

第一章 锻压设备的应用范围

泰勒-奥尔顿(Taylan Altan)

一、提 要

随着锻造工业的深入发展,必然使复杂程度进一步提高,要求对设备的能力和特性有完整的了解。设备影响锻造工艺,因为它影响变形速度和变形温度,并决定生产率。一定的锻造工艺必须有一定的锻造设备在载荷、能量、时间和精密度上与之相适应。

本章讨论了设备和工艺的相互关系和锻造设备的基本特性,论述了机械压力机、螺旋压力机、水压机和锤的原理及能力,并叙述了锻压车间所用的专用辅助设备。

二、导 言

锻造工业的发展主要是由于在世界范围内日益要求用更难变形的材料制造越来越大和越来越复杂的锻件。由于宇航工业今后的需要,地面动力系统、喷气发动机和飞机锻件数量的增大以及在工艺上的剧烈竞争,要求不断地提高目前的工艺水平。因此,更有效地利用现有锻造设备和装设更先进的锻造设备是必然的。锻造工艺的发展方向是:(1)提高生产率;(2)改善锻件公差;(3)通过减少废料损失和预成形工序以及提高模具寿命的方法来降低成本;(4)提高锻造更大和更复杂零件的能力。

在提高设备能力方面需着重指出:(1)日本住友公司生产的10000吨机械压力机;(2)美国伊利铸造公司所建11000吨制动扼架式机械压力机已于1972年安装完毕;(3)韦斯汀豪斯电气公司于1972年安装了能力分别为7200和14500吨的两台大型温加登(Weingarten)式螺旋压力机和一台50吨-米的裴希(Beche')对击锤;(4)优质钢和锻造公司于1971年已将西德哈森希夫(Hasenclever)公司提供的一台7000吨螺旋压力机投入生产使用;(5)法国斯奈丝玛(SNECMA)和英国克莱东(Clayton)锻造公司于七十年代初期均装用了80吨-米裴希对击锤。

购买新的锻造设备时,需彻底了解设备特性对锻造工序的影响、特定锻造工序的载荷和能量的要求以及完成该工序所用锻造设备的能力和特性等。深入了解锻造设备的必要性在于:

- (1) 更有效地和更经济地利用现有设备。
- (2) 更精确确定工厂现有设备的最大能力。
- (3) 在设备使用厂和制造厂之间建立更好的联系。
- (4) 发展精锻工艺,例如齿轮、涡轮叶片和压气机叶片的精锻。
- (5) 在不同类型设备之间建立互换性,从而在交货和作业进度方面更好地满足要求。

三、锻造工艺和设备之间的相互关系

只有研究了金属在锻造时的机械性能,设备参数对锻造过程的影响和完成锻造工序的

载荷和能量要求才能对各种锻造设备及其应用范围作出最好的评价。因此,对上述三个因素作简短的评论是需要的^[1]。

1. 金属在锻造时的机械性能

金属在锻造时的机械性能受如下因素的影响:

与变形过程间接有关的因素,例如:化学成分、冶金组织、相成分、晶粒度、偏析、以前的变形过程。

与变形过程直接有关的因素,包括:变形温度(θ),变形程度或应变($\bar{\epsilon}$),变形速度或应变速率($\dot{\epsilon}$)。

因此,决定金属变形抗力的流动应力($\bar{\sigma}$)表示如下:

$$\bar{\sigma} = F(\theta, \bar{\epsilon}, \dot{\epsilon}) \quad (1-1)$$

在再结晶温度以下即在冷变形时,应变速率($\dot{\epsilon}$)和温度(θ)对($\bar{\sigma}$)的影响可以忽略,流动应力仅仅取决于应变。在再结晶温度以上即热变形时,应变的影响微不足道,但流动应力($\bar{\sigma}$)随温度(θ)的降低和应变速率($\dot{\epsilon}$)的增加而加大,不同金属的流动应力随温度和应变速率的变化有很大的不同。因此,热锻时,温度的变化(由于模具的激冷、操作过程中的温降或者因变形而引起的内热)和应变速率的变化(由于所用设备的运行速度——位移特性)对于不同材料的载荷要求和金属流动可能有完全不同的影响,这一事实说明于图 1-1。图 1-1 示出了较小的温度变化对不同材料锻造压力的影响^[2]。可以明显看出,当钛合金的锻造温度略有下降后,锻造载荷便相当大地提高。

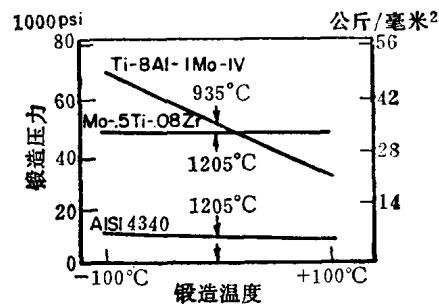


图 1-1 三种合金在各自的锻造温度范围内, 温度变化对锻造压力的影响^[2] (锻造压力在锻造压缩率10%时测定)

2. 设备参数对锻造过程的影响

在压力机上热锻时主要工艺参数和设备参数以及它们之间的相互关系用图解法示于图 1-2 中, 图中两方块间的连线表示一个参数对另一个参数的影响^[3,4]。

如图 1-2 左方所示, 流动应力($\bar{\sigma}$)、界面的摩擦条件和锻件的几何形状(尺寸、形状)将决定行程每个位置上的载荷(L_p)和锻造过程所需要的能量(E_p)。流动应力($\bar{\sigma}$)随变形速率($\dot{\epsilon}$)的增加和温度(θ)的降低而增大, 其变化的程度取决于所锻的具体材料。摩擦条件随模具激冷作用的增加而恶化。

由温度区的连线可以看出, 在给定的原始毛坯温度下, 锻件温度的变化主要受下列因素的影响: (1) 模具和锻件的接触表面积; (2) 零件的厚度或体积; (3) 模具温度; (4) 变形和摩擦生成的热量; (5) 在加压过程中的接触时间。当采用石墨润滑剂时, 由热锻件向较冷的模具传出热量几乎毫无阻拦, 但是采用玻璃润滑剂时, 热量的传导随界面温度、玻璃的种类和厚度的不同而大大降低。

滑块在加压过程中的速度(V_p)基本上决定了加压过程中的接触时间(t_p)和变形速

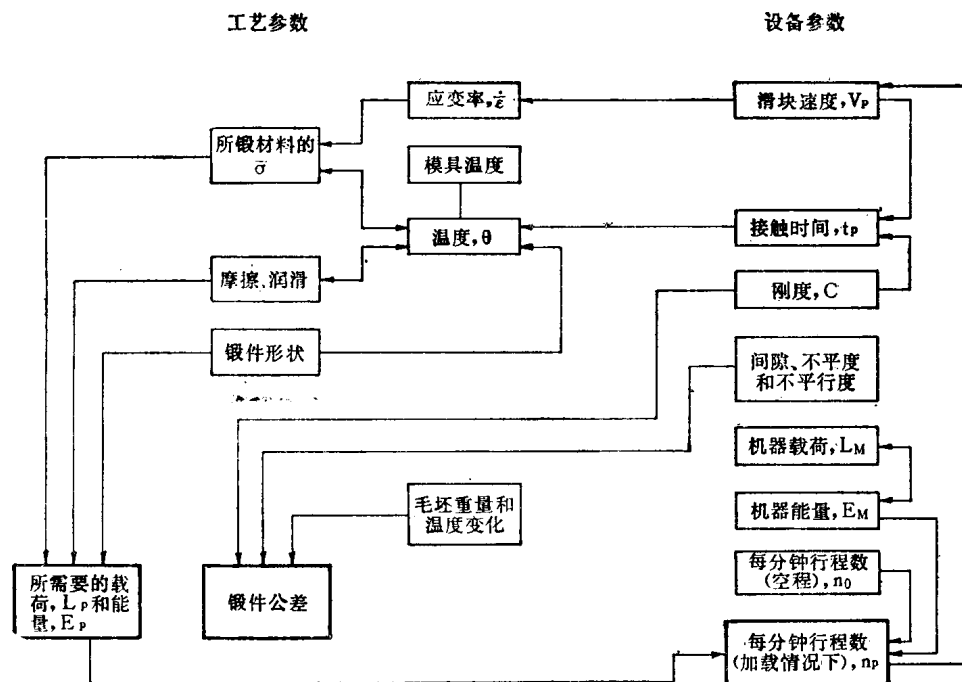


图1-2 在机压力机上模锻时工艺参数与设备参数的关系^[3]

度 ($\dot{\epsilon}$)。空载条件下每分钟的行程数 (n_0)、机器能量 (E_M) 和锻造所需变形能量 (E_p) 影响加载下的滑块速度 (V_p) 和加载下的每分钟行程数 (n_p)；如果在 n_p 这个速度下能够完成送料和卸料工作的话， n_p 决定每分钟能锻出的最多零件数量（即生产率）。

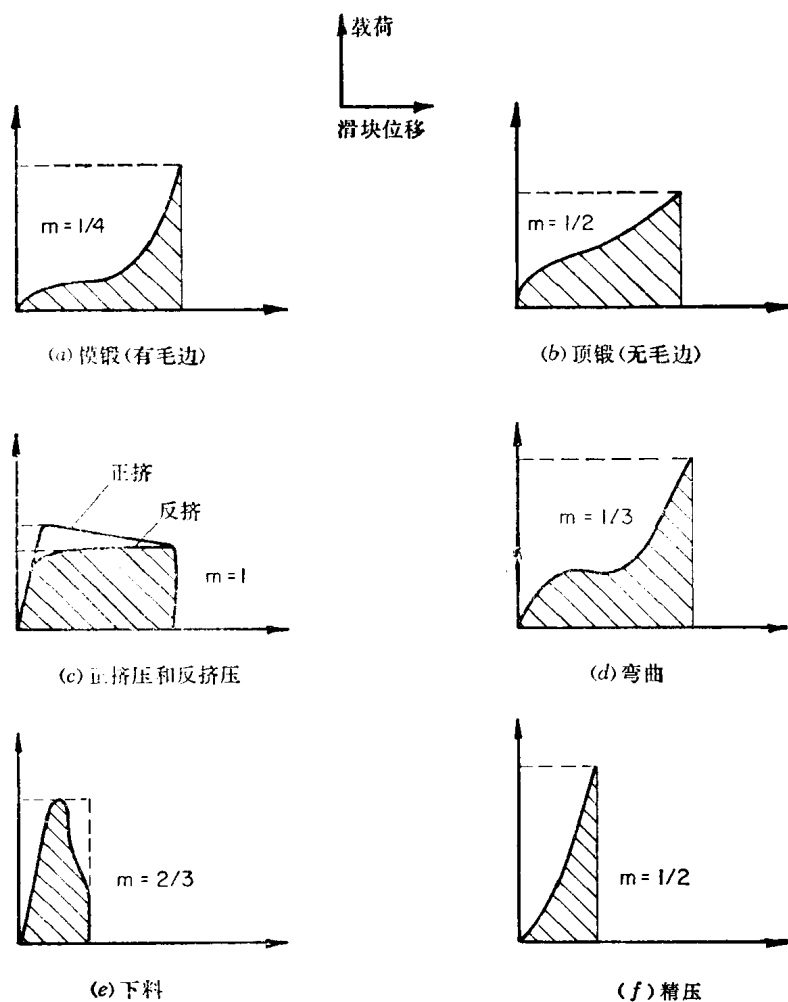
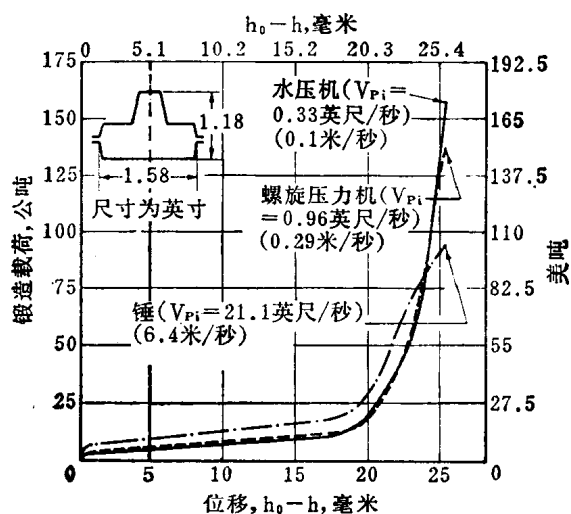
3. 锻造所需的载荷和能量

锻造载荷和能量的预测以及影响其大小的工艺参数将在第三章中详细论述。本节仅叙述锻造载荷和能量与锻造设备的关系。

就给定材料的具体锻造工序而言（例如有毛边模锻、正挤或反挤、镦粗和弯曲等），所要求的锻造载荷在滑块整个位移（或行程）范围内有一定的变化。图 1-3 定性说明这一事实，它表示出各种锻造工序的载荷-位移曲线的特征^[5,6]。就给定几何形状的零件而言，载荷的绝对值随材料的流动应力以及摩擦条件而变化。在锻造时，设备必须供给工艺所需要的最大载荷和能量。

在不同类型的锻造设备上锻造某一钢零件的载荷-位移曲线示于图 1-4^[7]。图中曲线表明，由于应变速率和温度的影响，在不同的设备上进行相同的锻造工艺，需要不同的锻造载荷和能量。对于锤来说，由于应变速率的影响，锻造载荷开始较高，但其最大载荷比水压机和螺旋压力机都低。其理由是，在压力机上挤出的毛边很快冷却，而在锤上，毛边的温度仍然接近毛坯的原始温度。

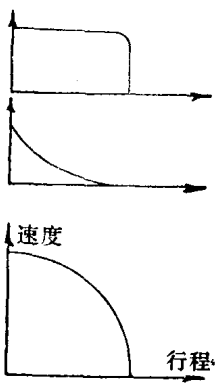
因此，在热锻时，不仅材料和锻件形状，而且变形速度和模具激冷作用以及所用设备的类型将决定金属的流动行为和工艺所需要的锻造载荷和能量。表面龟裂和裂纹或者锻后材料上剪切带的发展，这些都可用锻件表面层与模具交界面处的过分冷却来解释。

图1-3 各种锻造工序的载荷-位移曲线^[5,6]能量 = 载荷 × 位移 × m 式中 m 是具体锻造工序的特征系数。图1-4 用三种不同初始速度 (V_{Pi}) 的设备在1100°C模锻图示轴对称钢零件所获得的载荷-位移曲线^[7]

四、 锻造设备的分类和特征

在讨论具体设备的特征时，应根据其工作原理对设备进行分类。水压机基本上是载荷限定机器，即它们完成锻造工序的能力主要受最大载荷的限制。机械（偏心或曲柄）压力机是行程限定机器，因为这些机器的能力是用压力机的行程长度和在不同行程位置上的有效载荷表示的。锤和高能高速锤是能量限定机器，因为变形是由于消耗锤头的动能而产生的。锤的框架给锤头以导向，在锻造时基本上是不受力的。螺旋压力机也是能量限定机器，但这种压力机又类似于水压机和机械压力机，因为在锻造过程中其框架是受力的。如表1-1所示^[8]，根据机器设计的不同，其速度范围和速度-行程特性有很大的不同。

表1-1 锻造设备的速度范围和速度-行程特性

锻 机	速 度 范 围		速 度 行 程 特 性
	英尺/秒	米/秒	
水压机	0.2~1.0①	0.06~0.30①	
机械压力机	0.2~5	0.06~1.5	
螺旋压力机	2~4	0.6~1.2	
重力落锤	12~16	3.6~4.8	
动力落锤	10~30	3.0~9.0	
打击锤（总速度）	15~30	4.5~9.0	
高能高速锤	20~80	6.0~24.0	
低速内燃锤	8~20	2.4~6.0	

① 低速适用于大能量压力机。

机器的特性包括全部设计数据和性能数据，这些数据与经济地使用它密切相关。对于给定的工艺需要用这些数据最佳地选择设备的类型。锻造设备的特性数据可以分为如下三类：（1）载荷和能量特性，（2）“时间”特性和（3）精密度特性^[4,10]。

1. 载荷和能量特性

有效能量 (E_M)（单位为磅-英尺或公斤-米）是机器在一个全行程为完成锻件变形所提供的能量。有效能量 (E_M) 不包括为克服轴承和滑块的摩擦所需要的能量 (E_f)，也不包括框架和传动系统中因弹性变形所损失的能量 (E_d)。

有效载荷 (L_M)（单位为吨）是滑块完成变形过程的有效载荷。对于水压机这个载荷基本上是不变的，但对于机械压力机它随滑块相对于“下死点”的位置而变化。

效率系数 (η) 由变形有效能量 (E_M) 除以供给机器的总能量 (E_T) 求得，即 $\eta = E_M/E_T$ 。通常总能量 (E_T) 还包括：（1）电动机的损失 (E_e)；（2）导轨和传动装置中的摩擦损失 (E_f) 以及（3）机器总弹性变形的损失 (E_d)。

完成一个锻造工序必须满足如下两个条件^[1]：

（1）在工作行程的任一瞬间，机器的有效载荷 (L_M) 和锻造所需要的载荷 (L_p) 的

关系应该是

$$L_M \geq L_p \quad (1-2)$$

(2) 整个打击过程中机器的有效能量 (E_M) 和锻造所需要的能量 (E_p) 的关系应该是:

$$E_M \geq E_p \quad (1-3)$$

如果不等式 (1-2) 的条件未能满足, 则水压机停止而不能完成所需要的变形; 机械压力机则发生摩擦离合器打滑, 或者, 在没有过载保险装置时, 发生压力机过载, 模具或者压力机本身可能发生损坏。如果不等式 (1-3) 的条件未能满足, 则机械压力机的飞轮将减速到不能允许的速度; 螺旋压力机或锤一次打击不能锻成零件。

2. “时间”特性

每分钟的行程数 (n) 是任何机器的最重要特性, 因为它决定生产率。当需要多次和连续打击才能锻造出零件时 (用锤、自由锻造水压机和螺旋压力机), 在不重新加热的条件下, 机器每分钟的行程数大大地影响锻出零件的能力。

加压过程中的接触时间 (t_p) 是锻件在模腔中受到变形载荷的时间。在加压过程中温度高的锻件和温度低的模具之间热传导很快。对模锻时工件温度和模具温度之间所作的广泛研究清楚地表明, 在锻造压力作用下的热传导系数比自由接触时的热传导系数要大得多^[11,12]。加压过程中的接触时间愈长模具的磨损愈大。此外, 工件变冷则要求增加锻造载荷。

加压过程中的速度 (V_p) 是滑块在加载期间的速度。这是一个重要参数, 因为, 它决定加压过程的接触时间和变形速度或应变速率。应变速率影响锻造材料的流动应力, 因而影响锻造所需要的载荷和能量。

3. 精密度特性

在空载条件下, 固定模具的表面和它的相对位置取决于 (1) 导轨间隙; (2) 上下工作台面的不平行度; (3) 上下工作台面的不平度; (4) 滑块运动方向相对于下工作台的垂直度; (5) 模座的同心度。机器的精度特性影响锻件公差。例如, 反挤压时, 下工作台面稍微有些不平行或者滑块运动稍微偏离理想的垂直位置, 则会在冲头上引起过大的弯曲应力, 并引起挤压件尺寸的不均匀。

在加载条件下, 特别是偏心载荷的情况下, 滑块的倾斜和滑块与框架的挠曲会引起导轨严重磨损、锻件厚度的偏差和模具严重磨损。在多工序锻造工艺中, 滑块的倾斜和挠曲决定锻造给定零件是否可行和是否经济。为了减小偏心载荷和滑块的倾斜, 锻件的载荷中心, 即锻造载荷合成矢量作用点应该与锻造设备的载荷中心重合。

在框架和传动机构承受载荷的机械、液压或螺旋压力机上, 压力机的刚性 (C) 也是一个重要特性。刚性是载荷 (L_M) 与压力机上下工作台之间总弹性变形 (d) 的比值, 即:

$$C = L_M/d \quad (1-4)$$

机械压力机上总的弹性变形 (d) 包括压力机框架的变形 (约为总变形的 25~35%) 和传动机构的变形 (约为总变形的 65~75%)。刚性 (C) 对锻造过程的影响主要有: