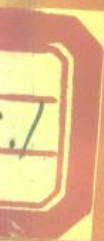


热模锻模具强化 和破坏的热力学

〔苏〕C. A. 多夫拉尔 著

苏祖武 译

刘建宇 校



国防工业出版社

热模锻模具强化和破坏的热力学

〔苏〕C.A. 多夫拉尔 著

苏祖武 译

刘建宇 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书包括模具寿命和可靠性概论、模具的温度场、模具型面的摩擦和磨损、模具的应力状态和连续性破坏、模具材料的强化和软化、模具的强化工艺、双金属制成的模具等七章。

书中系统地阐述了热学、力学和热力学因素对热锻模的强化和破坏过程的影响,并提供了近年来苏联在延长模具寿命、提高模具工作可靠性方面的大量研究成果。对模具钢(高合金模具钢)的合理利用,以及模具制造消耗的减少等方面的问题,也都作了详尽的介绍与分析。同时,对模具制造方面的先进经验进行了广泛介绍。本书对热锻模寿命的延长还提供了许多有益的研究方法。

本书可供冶金、机械、交通运输、轻工、兵工、航空及航天等部门从事热锻模寿命研究的科研人员、技术人员和高等院校师生参考和使用。

ТЕРМОМЕХАНИКА УПРОЧНЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ШТАМПОВ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

С. А. Довнар

МАШИНОСТРОЕНИЕ

1975

热锻模模具强化和破坏的热力学

〔苏〕С. А. 多夫纳尔

苏祖武 译

刘建宇 校

国防工业出版社

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刷

787×1092 1/32 印张9³/₈ 206千字

1988年9月第一版 1988年9月第一次印刷 印数: 0,001—1,580册

ISBN 7-118-00221-6/TG20 定价: 4.70元

前 言

现代锻压生产的发展对模具装备提出了严格的技术要求。同时, 尽人皆知, 要使模具具有较长的寿命和较高的工作能力乃是一项艰难的任务。在模锻的热力学条件差、锻件的精度要求高和在难变形金属加工领域内推广应用热模锻的情况下, 尤其如此。

为了及时解决与满足当前和将来锻压生产在模具需求方面的有关问题, 必须建立关于模具强化和破坏的物理现象的新研究体系。这样的学科正在开始形成。同时, 模具寿命和可靠性理论还应反映模具参数优选时的技术经济问题。理论的发展并应密切联系金属学、热物理学、固体断裂物理学、塑性变形力学和其他学科领域内的新成就。

В. Я. 杜波沃依 (В. Я. Дубовой) 的论文^[48], 可认为是苏联关于模具学说发展的开始。论文中, 首次总结了模具热处理研究的成果和当时的先进经验。随后, 出版了А. Н. 布留哈诺夫 (А. Н. Брюханов) 和 А. В. 列别斯基 (А. В. Ребельский) 的著作^[18]。著作中主要阐述模具的计算和设计。1962 至 1963 年间, 出版了Е. И. 别里斯基 (Е. И. Бельский) 和Р. И. 托米林 (Р. И. Томилиן)^[8]和Б. Ф. 特拉赫登别尔格 (Б. Ф. Трахтенберг)^[125]的著作。著作中反映了向延长热模锻模具寿命方向发展的最新研究。

本书阐述的内容是前已出版的论著中从未涉及的工程物理范畴内的问题。书中的主要内容, 包括作者独立完成的研

究工作，以及著者与 П. А. 切普 (П. А. Чеп)、Н. Н. 杜布罗夫斯基 (Н. Н. Дубровский)、Н. Н. 布特凯维奇 (Н. Н. Буткевич)、Ж. М. 乌尔巴略克 (Ж. М. Урбанек)、В. В. 布娄德柯 (В. В. Бродко)、А. С. 卡德历科维 (А. С. Кадниковый)、И. Ф. 库诺夫斯基 (И. Ф. Куровский)、В. С. 布格列也维 (В. С. Бугреевый)、Э. Г. 卡普切维奇 (Э. Г. Капцевичий)、Е. И. 锡道尔 (Е. И. Сидор) 和 В. Е. 柯罗斯柯维 (В. Е. Колосковский) 等人合作的研究成果。与模具寿命不可分割的模具设计和金属流动力学，在许多基础论著中已有论述，所以未在本书中涉及这方面的问题。

著者高度评价苏联白俄罗斯科学院院士 К. В. 哥列维 (К. В. Горевый) 在完成研究工作上给予的支持，因为有了这些研究成果才奠定了本书的写作基础。

目 录

模具寿命和可靠性概论	1
1. 热模锻工艺的发展	1
2. 模具破坏及其寿命延长的途径	4
3. 模具制造的技术水平	11
4. 模具正常工作的破坏分析	16
5. 模具装备最佳方案的寻求	22
模具的温度场	28
6. 传热原理和热传导微分方程	28
7. 金属热锻粗过程中平模的热状态	31
8. 平模和变形金属在理想相互热作用下的接触温度	36
9. 工艺隔层对传热速度影响的研究	43
10. 接触热阻的模型	53
11. 模具温度场的调节	62
模具型面的摩擦和磨损	68
12. 固体摩擦和磨损的理论基础	69
13. 金属流动和模具型面破坏	73
14. 氧化皮的形成及其性能	80
15. 模锻过程中摩擦和磨损的试验研究方法	88
16. 摩擦和磨损过程中模具钢的温度、型面显微浮雕和性能	97
17. 工艺润滑剂的迁移和挤出	104
18. 润滑材料及其使用方法	112
模具的应力状态和连续性破坏	121
19. 金属的脆性破坏	121
20. 材料的屈服、弹性和体积变化	125

21. 模具应力状态的基本研究方法	132
22. 模具脆性破坏条件的研究	142
23. 温度应力	149
24. 热裂纹的形成	158
模具材料的强化和软化	165
25. 因不可逆变形而报废的模具寿命预测	165
26. 热处理对模具钢性能的影响	170
27. 双重回火对模具钢脆性强度的影响和重复热处理	177
28. 塑性加工硬化和变形时效	184
29. 模具钢的形变热处理	191
30. 非模具材料在模具制造上的应用	205
模具的强化工艺	216
31. 模具工作型腔成形的工艺方案	216
32. 锻模的热处理方法	222
33. 按高温形变热处理方案制造模具	234
34. 模具工作型腔的塑性加工和湿吹砂处理	241
35. 防护层及其覆盖方法	248
36. 锻模的化学热处理	255
双金属制成的模具	265
37. 靠加热和塑性变形焊接异种钢	265
38. 爆炸焊接	272
39. 双金属镶块凹模的模锻和强化	276
40. 用模锻-铸造方法制造的双金属模具镶块	282
参考文献	288

模具寿命和可靠性概论

1. 热模锻工艺的发展

虽然冲挤和精密铸造工艺有了发展，但热模锻在机器制造业中仍占有一个主导地位。每年锻件产量的增长为15~20%。而且锻压机器生产的增长速度超过切削机床生产的增长速度。由于工艺过程的不断完善而带来的锻件生产上的质量变化，也是很突出的。目前，工艺过程主要沿以下几个方向发展。

1) 一系列工序的机械化与部分自动化 对于现代锻压生产来说，在锻件大量生产的条件下，解决自动化问题成效最大。许多国家已经建造了连杆、阀、齿轮和其它零件模锻用的自动机。在锻件按其形状和尺寸的共性分类的条件下，甚至在成批生产时也可能实现自动化。在这些情况下，都是以通用的曲柄压力机作为自动化的设备。当然，在滑块行程固定的曲柄压力机上实现模锻过程的自动化有困难。困难在于，在压力机动作的过程中，模具没有向上、向下调整的可能性。所以，偶然变化发生时，例如，金属的变形温度发生变化时，模具便有破裂的危险，或出现锻件的模锻不足。此外，重新调整自动机经常还有许多困难。

由于模具寿命太短，自动机在生产上的使用受到了限制。只有在高生产率的设备上实现自动化，它才会显示出明显的经济效果。同时，大家都知道，模具工作的速率高是会导

致其很快破坏的。自动机调整所需的劳动量较大，模具寿命如果不长，自动化的效果则可能很小。

2) 热模锻过程的改进 改进主要是通过增加模锻机的高速冲程次数、使用快速操作机和回转工作台，以缩短锻件的成形周期来实现。周期性纵轧，因其能保证获得由毛边连在一起的一长串零件，所以周期性纵轧有了发展。目前，还在推广一种预成形毛坯模锻的方法。其毛坯是用辊锻、铸造和粉末烧结方法成形的。

钢的液态模锻工艺的发展，尚有待于开辟。当然，钢的液态模锻是使锻件成形过程进一步改善的有效方法，但生产上采用这种工艺的尝试均未成功。其原因在于锻件的机械性能低，而且熔炼、配料和向模具里浇入熔融合金的过程都很复杂，模具寿命又短。然而，将熔融金属浇入水冷的铜锭模来实现毛坯预成形的模锻经验，却是值得注意的，因为这种锻件的表面质量高。

近来，金属在超塑性状态下的压力加工工艺研究，有了较快的发展。金属在超塑性状态下的行为，类似于玻璃热态成形时的行为。超塑性开辟了零件成形工艺可能性不受限制的前景。但这也还有困难存在。其中最主要的是，必须使机器的工作行程时间和合金的相变过程一致起来。

3) 精密锻件模锻 使锻件的形状和尺寸接近成品零件的主要方法是等温模锻、高速模锻、可分凹模模锻和无毛边模锻。这些方法可保证获得无拔模斜度、薄肋和高肋的锻件，而且还可减少工步数目。此外，等温模锻还可使用为普通模锻所不能用的玻璃润滑剂。

精密锻件的制造是机器制造业中提高劳动生产率最富有潜力的方法。精密锻件的提供，可减小机械加工劳动量和减

少金属切削损耗。精密锻件切削加工时，可以消除刀具过载和振动，从而使机械加工自动线的正常工作条件得以保证。

妨碍无毛边模锻和可分凹模冲挤模锻发展的主要原因是，产生折叠和缩管缺陷，模锻用毛坯的重量精度不够，以及制造经济而又长寿的模具还存在问题。此外，模锻机还应具有较大的刚度，而且模锻过程的各阶段上的热力学参数都要作出严格规定。

为了提高模锻件的光洁度，必须完善无氧化加热的方法。生产上可采用可调气氛加热，并在毛坯送入模具之前，于毛坯上涂复润滑剂。此外，还可将毛坯预热到氧化皮形成温度（600℃），然后再用感应加热的方法，将其加热到模锻温度。温热模锻目前也有所发展，因为这种方法可保证得到高精度和光洁度的锻件并减少火耗。但温热模锻因其用钢的工艺塑性低、模具寿命短，所以受到了限制。

4) 难变形和低塑性材料加工范围的扩大 热模锻发展的这一方向是由新技术需要所决定的。难变形和低塑性材料的塑性加工规范，和结构钢的模锻规范有许多不同。为了使材料具有必要的组织和性能的配合，这些材料通常都要在很窄的温度范围和高的静水压力场内进行变形。对于某些材料，在加热时还要防止周围介质的作用。由于许多材料有加工硬化倾向等原因，这些材料要在形状和尺寸不同于现有金属热模锻方法所用的模具内进行模锻，而且变形程度要小。由一般用途的模具钢制成的模具，产生局部破裂的情况也是极为严重的。

因此，模具材料问题具有国民经济意义。在解决这一问题时，模具寿命和可靠性理论具有重要意义。这一理论，应当不仅能解释模具的破坏和强化过程，而且还能提出新的技

术决定。

2. 模具破坏及其寿命延长的途径

金属热模锻时，模具常发生严重破坏。如果模具寿命用其与变形金属的有效接触时间之和来表示，则时间只用分钟来计算。模具在这方面便不同于其它形式的金属加工工具。

为了奠定生产经验资料分析的基础，下面将就模具破坏的最重要影响因素加以阐述。为了阐明模具寿命延长的途径，这样的研究应按一定系统进行。但是，拟订这样的系统很困难，因破坏的各过程之间有着密切的联系，在实际条件下不能将其区分开来。所以，在研究这一问题时，可参照不完善的系统（图1）进行，这一系统还能指出模具型腔破坏的主要影响因素及其最重要的联系。根据所采用的系统，模

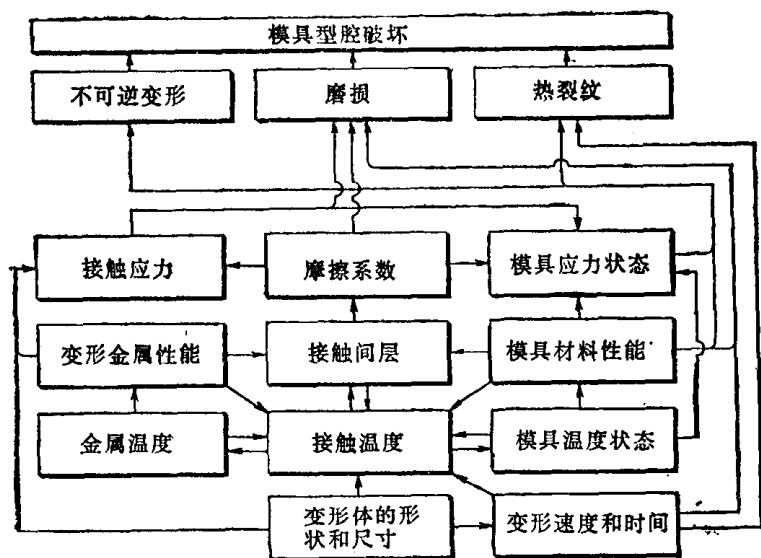


图1 热模锻模具破坏的主要影响因素图

具型腔破坏将分为以下几类：成形部分的不可逆变形、磨损和产生裂纹。

根据模具破坏特征的分布资料（表1）可以看出，锤锻模寿命的延长，主要靠提高模具的结构强度。对于卧锻机锻

表1 报废模具按破坏形式划分占有的百分比（%）

破坏形式	模 具		
	锤 上	热模锻压力机上	卧锻机上
深裂纹，破裂	45	—	—
型槽部分变形	25	10	—
磨损	30	15	—
热裂纹	—	10	75
综合破坏（深裂纹+破裂+型槽部分变形+磨损+热裂纹）	—	65	25

模，技术上需要从阻止热裂纹形成过程方面加以解决。压力机锻模则需同时防止上述三种形式的破坏。

模具破坏的倾向性取决于模具材料的化学成分和强化的热处理制度。这一点，由图2所示的模具寿命随其原始硬度

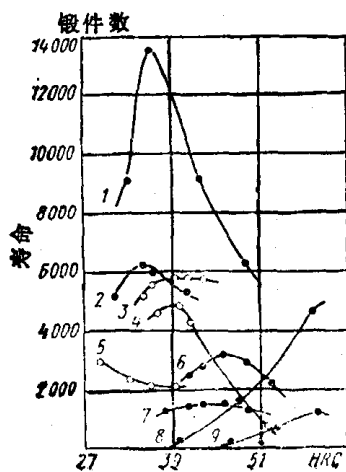


图2 硬度对模具寿命的影响

- 1—履带环(108)，2—法兰盘连接器(126)，3—连杆盖(126)，
4—连杆(66)，5—前轴梁(126)，
6—连杆(127)，7—连杆(127)，
8—半轴齿轮(作者)，9—1英寸球体(104)。

而变化的曲线，可以看得很清楚。曲线的上升部分相应于因不可逆变形和磨损而报废的模具，曲线的下降部分则相应于因产生热裂纹和破裂而报废的模具。曲线的最高点表示在硬度和脆性强度之间采取的合理折衷方案。最高点的位置取决于模具的几何参数和使用条件。所以，材料和强化的热处理制度或形变热处理制度的选择，都要求各自能使模具的寿命达到接近峰值，而且曲线最高点的两侧应具有较宽的变化平缓的部分。

模具钢的使用性能靠经验比较系数 K_u （表 2）加以评定。它是在相对于 5XHB 钢 K_u 值的 1.2~14 的范围内变动。当模具用硬质合金加强时， K_u 值甚至可达到 25。

模具寿命还取决于热处理的方法和制度。例如，模具型槽很快磨损部分补充淬火（重复淬火）到较高硬度，可使 3X2B8 钢制成的模具寿命延长 2~3 倍，而在 5XHB、5XHM 和 5XГCBΦ 钢制成的模具经过强化时，其寿命则可延长 50~80%。等温淬火的应用，可使 5XHM、5XHB、5XHT 和 5XГM 钢制成的模具寿命延长 1 倍^[118]。

模具可通过化学热处理来发挥其潜力。氮化和渗硼可使模具的工作表面具有高硬度和抗磨性。氮化和渗硼的结果，可使模具寿命延长 0.8~1.2 倍。渗硼可用 $K_u < 1.5$ 的钢，而氮化则用 $K_u > 1.5$ 的钢。

下面分析的是毛边桥尺寸对模具寿命的影响。模具设计时，毛边桥尺寸是根据毛边金属残料最少时，变形金属完全充满模具型腔的条件选择的。毛边桥部高度则根据类似锻件已知的模锻过程相似的条件选取，或通过计算决定。如果模具寿命的意义重大，虽对节约金属不利，但可将桥部高度稍为放大些。不过，当桥部高度增加时，例如增加 10%，模具

表2 不同材料的模具寿命比较系数 K_s 。(标准——正常热处理的5XHB钢 $K_s=1$)

钢	温度(°C)		模具, 硬度	K_s	参考文献
	淬火	回火			
5XГCBΦ	870	610	锤上, 热模锻压力机上, HRC37~39	1.2~1.4	[50]
5XГCTΦ	900	380	中等尺寸, HRC44~52	1.6	[71]
4X3BMΦ	950	590	热模锻压力机, HB415~477	1.4	[127]
4X5B2ΦMC	1040	590	热模锻压力机, HB415~477	1.9	[127]
40XCMΦ	930	560	锤上, 热模锻压力机上, HRC44~47	2.5~3.0	[97]
45X2MΦ	940	670	锤上大型的, HB302~321	1.5~3.0	[20]
(淬火成贝氏体)					
3X2B8Φ	1100	650	热模锻压力机上, HRC40~42	2.0~3.0	莫斯科齿轮厂
P18	—	—	可分式凹模	3.4	[84]
4X4M2BΦC(ДИ22)	1070	(1) 620; (2) 590	热模锻压力机上, HRC46~50	3.0~4.5	[122]
45X3B3MΦC(ДИ23)	1150	(1) 645; (2) 615	热模锻压力机上, HRC46~48	6.0	[111]
5X2BMHΦ(ДИ32)	970	(1) 590; (2) 540	锤上, 热模锻压力机上, HRC46~48	2.3	[121]
5X10B5MΦ	堆焊	550	自由锻压力机砧子, HB500~550	7.0~10.0	[7]
T-620合金	堆焊	580	热模锻压力机上, HV650~690	12~14	[74]
BK20合金	—	—	热模锻压力机上	15~25	[136]

的寿命总共可延长 15~20%^[101]。

在研究变形金属的化学成分对模具寿命的影响时确认，由低碳钢（20、40、20X、2XHP）锻件的模锻改为由高铬钢和奥氏体钢（2X13、9X2B、X18H9T）锻件的模锻时，模具寿命几乎缩短 3/4^[94]。重要的发现是，当被模锻的金属成分改变时，对于形状和尺寸不同的锻件，它的模具寿命大致相同。这说明，变形金属硬度和模具潜力消耗之间存在线性关系。如果毛坯温度的变化不影响接触面上的相对温度，则利用这一规律便可估计毛坯的加热温度对模具寿命的影响。对结构钢进行的热硬度测量指出，毛坯加热温度降低 100°C，模具寿命将缩短 20~30%。

下面就氧化物、气体和有意加入的润滑剂所形成的接触间层对模具寿命的影响作一分析。大家知道，模具连续使用期限和锻件质量，取决于接触间层的厚度和物理化学性能。接触间层隔开摩擦面并阻止热转移过程的进行。例如，玻璃润滑剂可使模锻力减小 1/2~2/3，并可排除划伤^[1]。

润滑对模具寿命影响的数据几乎没有。所以，靠工艺润滑剂来调整模具破坏的真正可能性的秘密尚未被揭开。润滑剂成分对模具寿命的影响较小^[85]，而影响较大的则是模具成形表面上涂覆润滑剂的频率因素。例如，用石墨和盐的润滑剂（10% NaCl；3% 石墨；其余为水）代替重油，只能使模具寿命延长 30%。与此同时，在模锻每个模锻件之后用 10% NaCl + 5% NaNO₃ + 水的润滑剂涂覆模具时，模具寿命可延长 70%。并且发现，水剂胶状石墨的效果良好。应用这种润滑剂，可使模具寿命延长 60% 以上。

研究确认^[126]，当用重油加热改用煤气加热时，连杆的模具寿命将缩短 15%。用感应加热代替火焰炉加热毛坯时，模

具寿命可延长0.5~1倍^[87]。加热前清除毛坯上由冶金工厂带来的氧化皮,模具寿命可延长20~25%^[84]。上述报导清楚地说明,因改变工艺润滑层的参数而使模具寿命延长的潜力,是不太大的。比较系数的最大值也只可取1.5~2.0。

模具破坏的温度因素具有极其重要的意义。一切破坏特征都和模具的温度状态有关。如同以下所述,模具的温度状态预先取决于金属的变形速度和变形程度、模锻的频率、冷却方法及其它对模具破坏情况有反应的因素。

模锻的速率高时,模具受热强烈。为了调节模具温度,可采用设在型槽附近的管路通循环水的办法,实现模具的外冷或内冷。内冷极为有效,但有时会引起裂纹的产生。例如,当两个环形件同时模锻时,其模具寿命为1250~1500个锻件,而在装上内冷后,模具寿命则可延长5.5倍^[142]。阀杆模锻用的凹模,采用内冷的效果较小,模具寿命仅延长50%^[125]。当用外冷的方法并恰当解决排热问题时,也可获得良好的效果。例如,在可分凹模上模锻万向十字接头锻件时,经孔引水到上半凹模的顶杆下方对型槽进行冷却,可使模具寿命延长2倍^[90]。根据上述数据,用排热的办法调节接触面温度的模具,其寿命的比较系数可取等于3.5。

下面,将就模具寿命和锻件重量的关系(见图3)作一分析。图中曲线的分布情况指出,变形速度对模具的使用期限有明显影响。锤锻模的平均寿命比热模锻压力机的模具寿命长0.2~0.4倍。但是,从这一事实不应得出结论:金属的变形速度应提高到技术上可能达到的极限。研究确认,金属在高速锤上模锻时,模具的工作表面受到强烈破坏。而且,其寿命和可分凹模上的冲挤或无毛边模锻方式挤压时的模具寿命处于相同水平^[100]。研究者甚至发现,锤上模锻时的模具

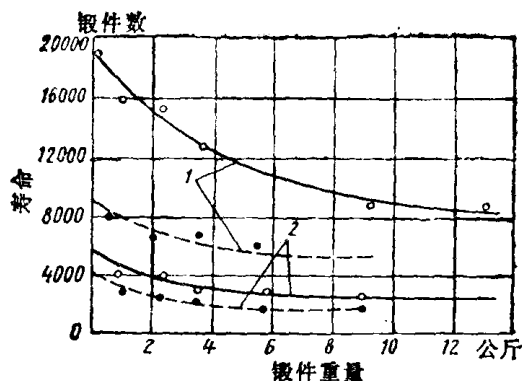


图3 压力机锻模和锤锻模寿命与模锻件重量的关系

(明斯克拖拉机厂、明斯克汽车厂、莫斯科齿轮厂)

1—总寿命，2—一次有效寿命，——锤锻模

(5XHT)，----压力机锻模 (5XHB)。

磨损比热模锻压力机上模锻毛坯时的模具磨损大 0.5 倍，并且随模锻锤吨位的增加而显著增大^[86]。产生如此变化的原因，可能是金属的流动速度高，虽可缩短有效的接触时间，但在接面上同时却出现巨大的热源，它加剧了模具型槽的破坏过程。所以，为了使模具具有最长的寿命，应当用中等的速度进行模锻，但有效的接触时间应是允许的最短时间，因为要保证送往终锻毛坯的预成形。

因毛坯预成形而得到的模具延寿的效果，可根据图 3 所示曲线确定。为此，可将曲线延长到与纵坐标轴相交，然后读出锻件重量为零的条件下的模具寿命，并将其值与锻件真实重量相应的模具寿命进行比较。通过这样的简化计算的办法可以看出，能反映模锻过程预成形效果的模具寿命比较系数，大约可取等于 2。

根据各因素对模具寿命比较系数的影响分析（见表 3），