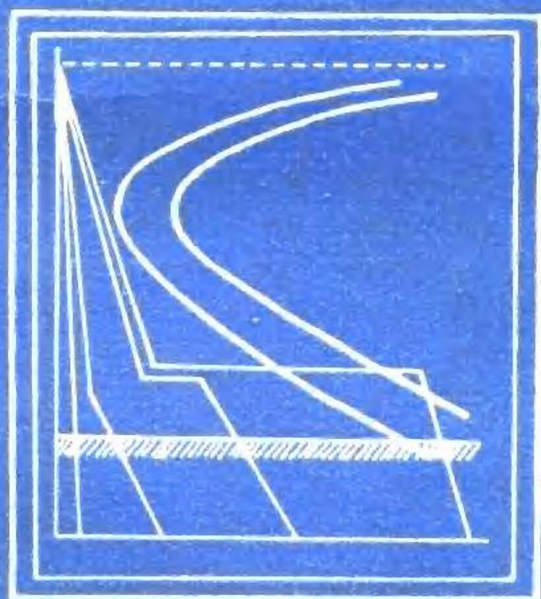


# 模具材料及其热处理

## 译文集



62.4-53

《兵器材料与力学》编辑部

一九七九年十二月

# 前 言

针对当前成批量冲压生产中模具材料及其使用寿命的问题，本网于1979年6月组织有关单位进行了关于提高模具寿命资料的普查会战，并汇编了《模具材料的应用与发展专题资料索引》，在此基础上根据本网专业的需要选择了部分有代表性的文章组织翻译，汇集成本译文集。

本译文集收进了近期国外有关热作模具和冷作模具用材料、提高模具质量及其使用寿命的热处理等方面的内容。在选材上以冷冲模和热挤压模用材料为主。考虑到应用的广泛性也涉及到了有关热锻模的资料。

随着压力加工生产的发展，近年来国内发表的关于研究新型模具材料与探索模具热处理新工艺方面的成功经验的资料 and 介绍国外模具材料的译文很多，仅收入《索引》中的资料就达250余篇。本译文集着重选译了一些国外期刊现刊中有关方面的新资料，以在网内外交流，供有关工厂参考。

大多数的《索引》会战参加者为本译文集提供了译稿；沈达钧和刘继荣等同志参加了译稿的校订工作。文稿最后由吕广庶同志汇总编订，在编订过程中除删去了所有的参考文献外，还对个别文章作了删节。《兵器材料与科学》编辑部和江南机器厂为本译文集的出版做了大量工作。

限于编译者水平，谬误之处在所难免，请读者批评指正。

兵器工业金属材料专业情报网

一九七九年十二月

---

## 目 录

### 综 述

1. 金属压力加工用工具材料的评价.....〔英〕M.T.Watkins (1)

### 热作模具钢

2. 热作模具钢的基本特性.....〔日〕西村富隆(15)  
3. 高耐热性和高韧性模具钢.....〔苏〕Ю.А.Геллер等(29)  
4. 析出硬化型热作模具钢DH7.....〔日〕细井朝次等(32)  
5. CROMO-V钢(AISI H11型热作工具钢).....(36)  
6. THERMOLD J钢(AISI A9型冷作和热作工具钢).....(39)  
7. H13模具钢最优性能的获得.....〔英〕R.W.Hindle等(43)

### 冷作模具钢

8. 冷作模具钢的基本特性.....〔日〕西村富隆(45)  
9. 冷作钢的热处理.....〔英〕T.D.Atterbury(55)  
10. 冷冲压模具钢SKD11的热处理.....〔日〕竹内煌(69)  
11. 冷变形模具用高速钢.....〔英〕M.E.Bush等(80)  
12. VASCO WEAR钢(冷作模具钢).....(83)  
13. APACHE钢(AISI A6型空淬模具钢).....(87)  
14. ONTARIO钢(AISI D2型空淬模具钢).....(92)  
15. HAMPDEN钢(AISI D3型油淬工模具钢).....(97)  
16. DEWARD钢(AISI O2型油淬模具钢).....(101)  
17. 冷作模具钢组织和成分的选择.....〔苏〕А.Т.Евтушенко(107)

### 模具热处理

18. 模具钢的低温气体氰化.....〔捷〕B.Prenosil(110)  
19. 等温淬火提高模具寿命.....〔苏〕В.К.Зыков等(121)  
20. 模具的盐浴热处理.....〔英〕P.Crowther(123)  
21. 高温热机械处理对模具钢热疲劳抗力的影响.....〔苏〕М.А.Смирнов等(128)  
22. 热作模具钢的复合处理.....〔英〕R.McCallum等(130)  
23. XBF钢渗硼件的制造.....〔苏〕Ю.А.Алимов等(137)  
24. 模具工装寿命的提高.....〔苏〕В.Н.Аникин等(138)  
25. 避免工具增碳或脱碳的真空热处理.....〔美〕J.W.Sullivan(140)  
26. 高碳钢的磨粒磨损和裂纹扩展抗力.....〔苏〕Ю.А.Шахназаров等(144)

# 金属压力加工用工具材料的評價<sup>⊖</sup>

〔英〕 M.T. Watkins

大部分工业生产是以在生产工序中能大量采用变形工具、冲模、压模为基础，因为工具的耗费会显著地影响工艺过程的经济性和制件的成本。

本文分析了各种模具和模具工作部位的工作条件，其中包括下列板材冲压工序所用的模具，如下料、打孔、压弯、引伸和旋压工具的工作条件。利用这些模具冲压时毛坯无需加热。这些模具及其工作部位在复杂的载荷条件下工作，并且下料和冲孔时模具的应力状态与拉深模在工作条件下的应力状态又有很大区别。

在以挤压、顶锻、压延和模压法制造另件时，工具中的应力往往达到 $2.3 \times 10^9$ 牛顿/米<sup>2</sup>，而冷挤压工具中的应力比薄板压延模中的应力还要高。对于板材冲压模具可广泛地选用工具钢来制造。但具体选择何种工具钢应根据待冲压之毛坯的材料及其性能、板坯厚度、成型工艺的精度、尺寸公差和生产批量而决定。模具材料的选择不仅取决于工艺要求而且还取决于经济要求。在选择复合模具和多工位连续模具材料时，必须遵循模具不过早地产生破裂的原则。

图1所示之零件是经板材冲压制成的，而表1中列举了根据生产批量和毛坯材料建议采用的工具钢材料的牌号〔1〕。

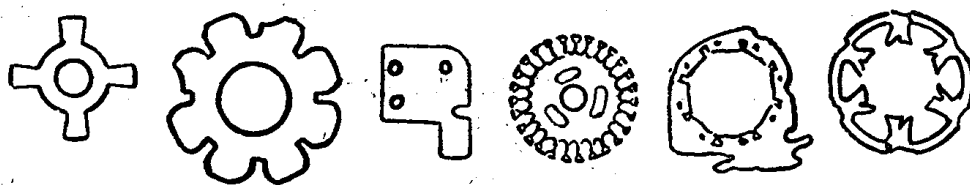


图1

⊖标题按英文原文译得，但全文译自俄译本，而未查对英文原文。——译者注

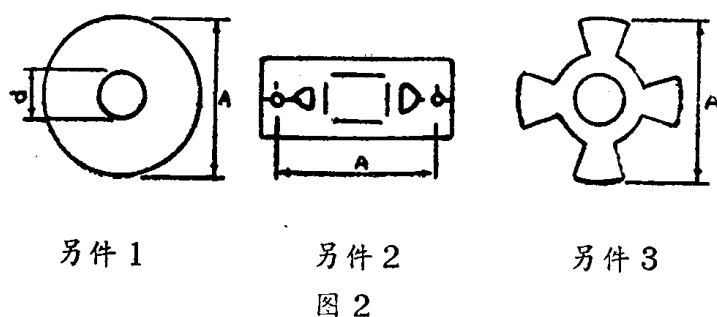
表 1

| 毛 坯 材 料                | 批 量 ( 冲 压 件 数 , 1000 ) |       |       |       |       |
|------------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                        | 1                      | 10    | 100   | 1000  | 10000 |
| 铝合金、铜合金、镁合金            | A2                     | A2    | A2,D2 | A2,D2 | 硬质合金  |
| 碳钢和合金钢(达0.7% C),铁素体不锈钢 | A2                     | A2    | A2,D2 | A2,D2 | 硬质合金  |
| 热处理的奥氏体不锈钢             | A2                     | A2    | A2,D2 | D2,D4 | 硬质合金  |
| 硬度达HRC52的弹簧钢           | A2                     | A2,D2 | D2    | D2,D4 | 硬质合金  |
| 0.63mm厚的变压器钢           | A2                     | A2,D2 | D2    | D2,D4 | 硬质合金  |

表 2

| 尺寸A的公差<br>(mm) (见图2)      | 推 荐 采 用 的 工 具 钢 牌 号 |       |       |
|---------------------------|---------------------|-------|-------|
|                           | 零 件 1               | 零 件 2 | 零 件 3 |
| 当 A = 12.7mm, 毛坯厚为0.508mm |                     |       |       |
| 0.076                     | W1                  | O1    | A2,D2 |
| 0.025                     | O1                  | O1    | A2,D2 |
| 当 A = 50.8mm, 毛坯厚为1.016mm |                     |       |       |
| 0.20                      | W1                  | W1    | A2,D2 |
| 0.076                     | O1                  | O1    | A2,D2 |
| 0.025                     | A2                  | A2    | A2,D2 |
| 当 A = 203mm, 毛坯厚为1.52mm   |                     |       |       |
| 0.38                      | O1                  | O1    | A2,D2 |
| 0.20                      | A2                  | O1    | A2,D2 |
| 0.76                      | A2                  | A2    | A2,D2 |
| 0.025                     | A2                  | A2    | A2,D2 |

表2中根据文献〔1〕列举了适合批量为十万件到一百万件、下料公差不同的各种下料模具钢牌号，所冲压的三种另件如图2所示，图中标注了特征尺寸A。



尽管表1中推荐硬质合金工具于冲压批量为1千万件时使用，但通常在制造批量超过1百万件时便已使用了这种工具。

大量材料都是以热加工法加工的。半成品的形状是棒、管、板材。用这些半成品制成形状不同的锻坯。模锻条件与毛坯材料、锻坯形状的复杂程度以及变形方法有关。这些变形方法包括开式模锻或闭式模锻，在锤锻机、挤压机，或热顶锻机上操作。

操作的连续性可以在很大的范围内变化。模锻的始锻温度和终锻温度是可以变化的，但如果材料的锻造温度范围很窄时，则应准确地控制。模具所受的外力以及产生的应力将因其操作方法不同而不同〔2〕。

美国金属协会（ASM）的指导性技术文件〔3〕中，对于工具钢的选用作了较详细的介绍。在该技术文件中列举了各种牌号的工具钢、推荐的模具热处理规范与其在锻锤或挤压机上应用的关系，以及与模锻的锻坯批量及锻压温度的关系。

为有色合金制件的模锻所采用的相对模锻系数，考虑了在62.8公斤/毫米<sup>2</sup>压力状态下合金能够填满模膛的能力、合金的塑性、最佳锻造温度、模锻速度以及合金性能对模具耐磨性的影响。

很多锻坯是在径向锻压机上采用锻造法或在卧式热轧机上采用碾压法制造的。在这些热加工操作时，工具不断地承受着很高的周期交变温度的作用，因此，由工具与毛坯表面间的接触摩擦而引起的应力值不断变化，这就决定了工具的寿命。

在所有这些情况中，均必须确定工具的工作条件。全面的分析不同工具的工作条件乃是一项很繁重的任务。在很多工业部门中，为了自己的需要均趋向于工具制造专业化；按本单位的需要并结合其特点进行着独立的研究工作。在某些工具材料方面已取得了显著的成绩。

确定变形时与所产生的应力有关的、并能满足平衡方程的应变和位移量乃是某些金属压力加工过程理论研究的主要目的〔4〕。但是，甚至对于比较简单的静态等温条件下的非线性方程，也难于用数值法解析出结果来。

在特殊情况下，例如对薄板状毛坯进行非对称的深拉深或扩口时，只在做了某些补充假

设和简化以后才得到了令人满意的解。

其它方法,例如以滑移线法也只可能得到近似的解,因为这些方法也要求对课题规定补充假设和简化条件。

为了分析塑性变形过程也可利用塑性的能量条件。上述前后两种评定方法均在广泛地应用。通常,位移量比工具中的应力分布容易测定,所以多利用前一种评定方法。可是以这种方法解平衡方程的准确性是不清楚的。利用具有大量自由参数的滑移线的连续场,能够得到最低限度的评价。可把平衡方程列成一个矩阵式,用电子计算机〔5〕进行计算。

为了计算模锻过程也可以利用基于能量守恒定律的有限元法〔6-16〕。

利用上述方法可以确定所需要的变形力和变形功。利用这些方法和结果对顶锻、挤压、液压挤压、弯曲和金属板材的深拉深等工艺进行了研究。通过这些研究可以得到工具中应力和温度分布的详细数据,这些数据在制造冷、热模锻用模具中得到了应用。

冷、热模锻过程对工具材料的要求是截然相反的,一个是在高温、低应力和不良的润滑条件下工作,另一个是在室温、高应力和良好的润滑条件下工作。

### 热模锻

热模锻通常由两个部分组成即上模和下模。为获得模锻件的最终形状所需要的外力以及该力在模中引起的应力均取决于毛坯材料、锻造温度、锻坯形状的复杂性和润滑条件。而模具本身的温度与其预热的温度以及毛坯在变形前和变形中传给它的热量和其冷却性能有关。毛坯材料及其温度、金属在充满模膛时的流动性质、毛坯与模具的表面状态及润滑条件等均对模具的磨损产生影响。

在设计锻坯时,应考虑以前锻压相似零件的经验,以零件形状作为基础,规定锻件的需要形状,确定分模线和飞边槽的形状。然后据此制造模具组件。借助于电子计算机,可以很容易地设计出适于某些锻坯的模具〔9-17〕。在电子计算机上设计时,需要给出锻坯形状的数学模型,将锻坯不同截面以多边形的形状表示出来。然后将这些数据与形变抗力值和摩擦系数一起输入计算机,便可确定横截面内的应力分布、模锻需要的力、模锻时的平均压力、锻坯体积、模膛的投影面积以及飞边的尺寸。

计算程序中也包括初锻模膛横截面的确定。在计算模膛的尺寸时应考虑温度变化的影响。在计算中也可以将模具的弹性变形考虑进去。

落锻研究协会(DFRA)〔18〕对锻压所需要力的计算方法进行了研究,并将求得之值与实验测量值进行了比较。在文献〔19〕和〔20〕中研究了平面模板间实心 and 空心圆柱墩粗的过程,该文不仅研究了形成飞边的情况,而且也研究了不形成飞边的情况并考虑到由摩擦引起毛坯变形的不一致性的情况。可是,这些研究是在实验室的条件下完成的,而与生产条件下的模锻过程很少有相似之处。

文献〔21〕中采用了有限元法。在模锻轴对称的锻坯时,上模中的接触应力值和应力的分布情况如图3所示。图中标号:1——上模,2——模锻件,3——下模,4——接触压力(达因/毫米<sup>2</sup>),5——模具表面,6——等应力线,7——变形。

文献〔23,24〕研究了温度的影响和温度沿截面的分布。图4示出了温度沿锻件和飞边截面的分布,图中的标号:1——飞边的温度(°C),2——时间(秒),3——飞边轴线

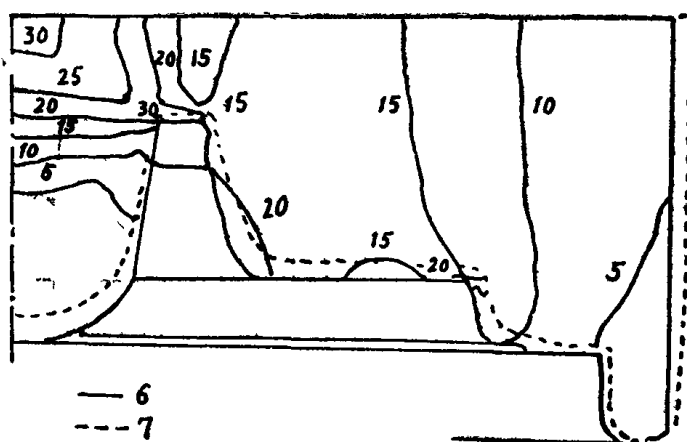
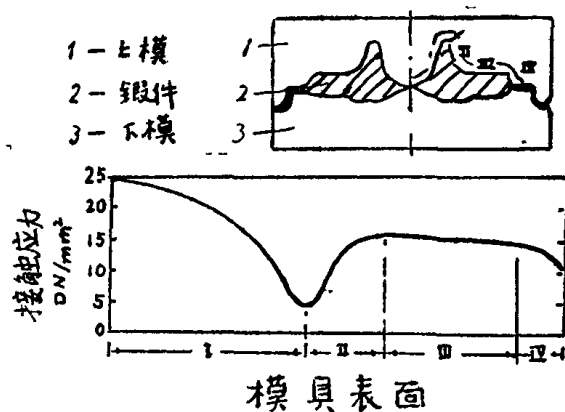


图 3

上的温度，4 —— 飞边的平均温度；a) —— 用机械式压力机模压时和模压后，飞边的计算温度（飞边厚度  $s = 3.2$  毫米， $a = 42$  千瓦/米<sup>2</sup>·度）；b) —— 冷却时锻坯中的温度分布；i —— 模压时测量的温度；ii —— 计算的温度。

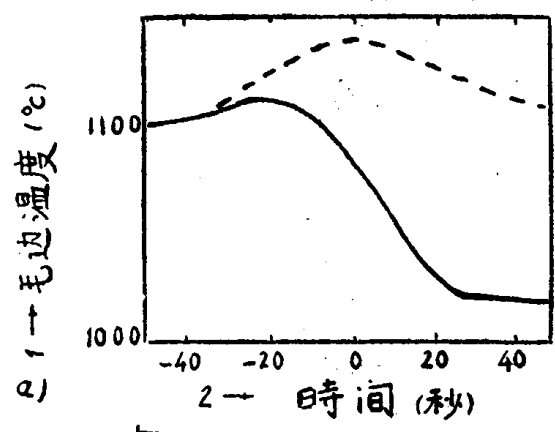
从图 4 可以看出，变形抗力值与温度有关，因此，变形抗力在低温处（例如在飞边上）具有最大值。

### 冷冲压

冷挤压是用组合模具完成的。冲头和下模是这种组合模具的工作部分。组合模是由压入一个或几个预应力圈中的衬套组成。下模是被压到一个或几个有预应力的套环中，装有上模和凹模组件的模套被装在具有导向支柱的模具体中。模具上还装有送料器和退料器。

模具的所有零件在其工作中均承受着应力作用，而它们的应力状态与被加工的毛坯承受的应力有本质的区别〔25、26〕。

冲头是由尾柄或配合部位、凸肩、本体、工作端组成。冲头配合部位的直径可以与其它冲头相同或者稍大些。在挤压中，冲头与被加工件承受一样的应力。在挤压空心零件时，金属将充满冲头和凹模之间的空腔。在这种情况下，冲头上的应力由下式求得：



3 --- 毛边轴线上的温度  
4 — 毛边的平均温度

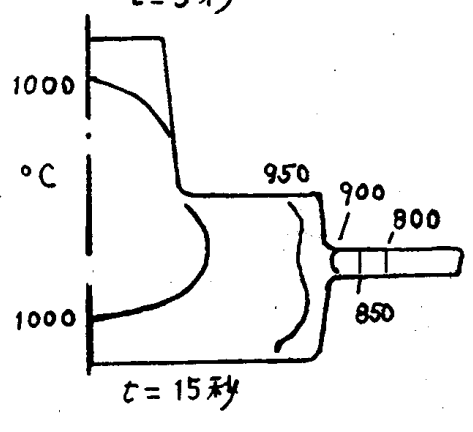
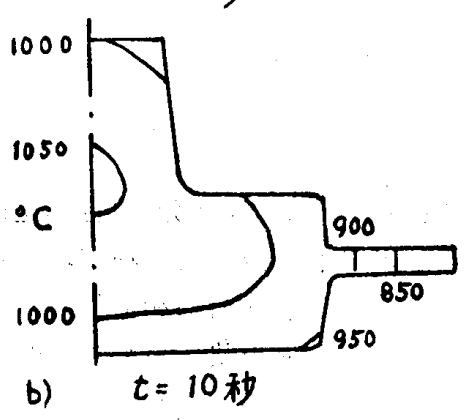
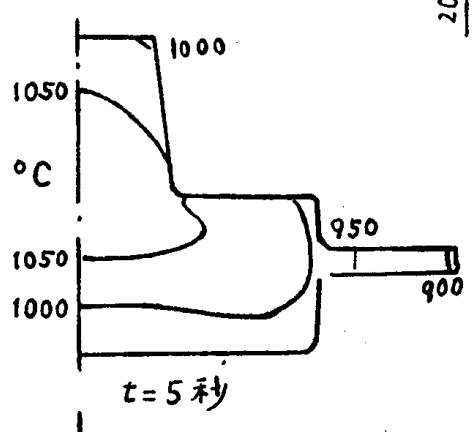
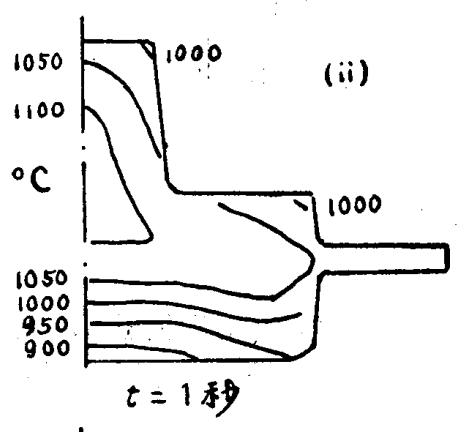
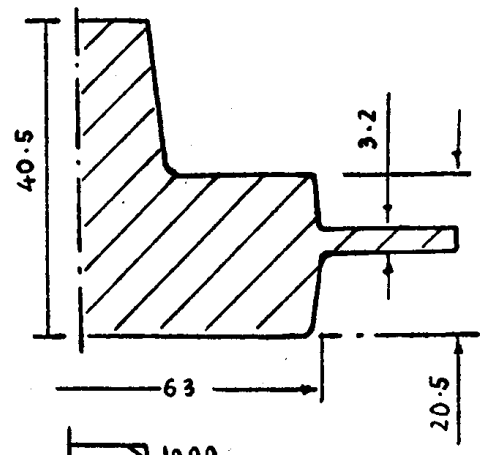
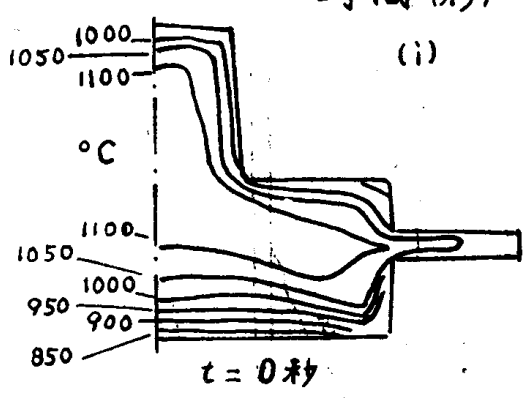


图 4

$$\sigma_F = P \left[ \frac{R}{R-1} \right],$$

式中,  $\sigma_F$ ——冲头上的压应力,  $P$ ——挤压时的压力,  $R$ ——变形程度。

根据变形程度, 冲头中的应力可在15~20%范围变化, 在 $R=2$ 时, 应力值最小, 此时 $\sigma_F=2P$ 。

挤压En 1A钢制毛坯时, 对于E8钢制冲头而言, 其极限值 $\sigma_F$ 可以从 $1.85 \times 10^9$ 牛顿/米<sup>2</sup>变化到 $2.63 \times 10^9$ 牛顿/米<sup>2</sup>。

冲压工具、装卡机构、压机工作台和压机零件的尺寸精度不高会使施加载荷产生偏心, 而在冲头中引起弯曲应力, 从而导致冲头的断裂。以光弹法在不同形状的冲头中获得的应力分布情况如图5所示。对于所有的冲头均在其台肩圆角部位的周围和工作部位向冲头本体过渡区发现了应力集中区〔27〕。

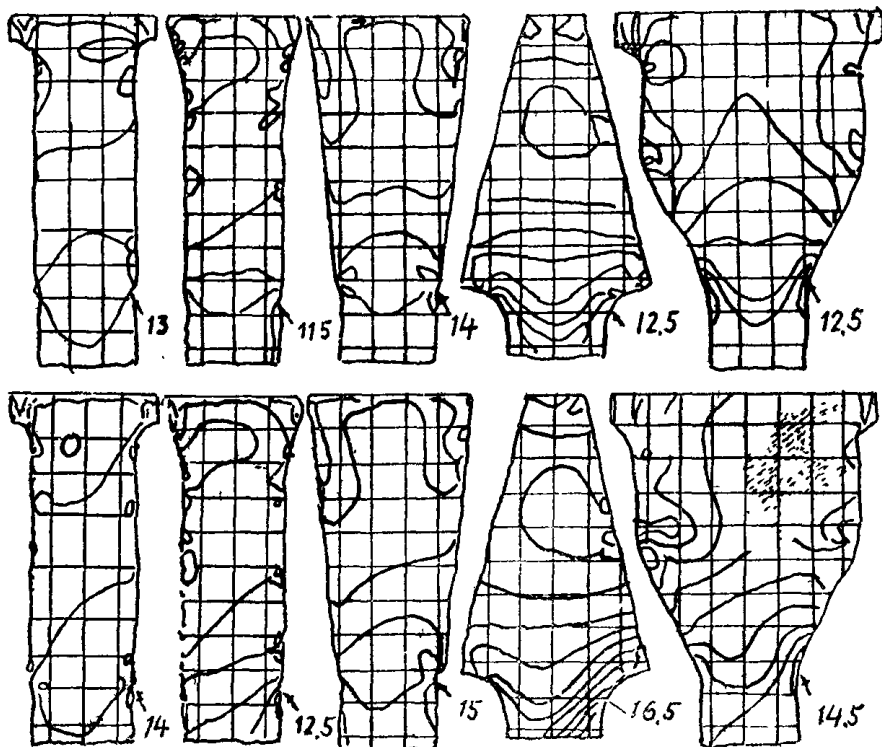


图5

配合部位的长度应当与冲头的长度相配合, 而其直径不应当显著地大于冲头部分的直径。过渡区的半径应当最小。尽管带有配合部分的圆柱形冲头在制造上是合理和经济的, 但在其中却会产生不理想的应力。

反挤空心零件时, 冲头的长度与其直径应有一定的限定关系, 以防止产生纵向弯曲。限定条件是根据Euler和Johnson的公式求出的。在该公式中, 工具钢的断裂应力值为 $3.08 \times 10^9$ 牛顿/米<sup>2</sup>。在生产条件下, 高速钢冲头的长与直径之比不大于2.5, 而硬质合金制冲头的不大于5.5。

挤压用模具的冲头和凹模可以制成单独的一个部件或者制成组合件固定在上下模座上。在参考文献中描述了冷挤压用模具的各种结构。

载荷作用下模具弹性变形量及其在挤压过程中的变化对制出零件的尺寸精度产生影响。Dalheimer和Dieterle [28] 研究了冷、热状态下不同变形程度和变形速度下具有轴对称圆形模孔的凹模组合件的弹性变形。而Gieselberg [29] 研究了方孔凹模组合件的弹性变形。

分布在凹模表面的正应力是通过试验得到的。温度场是通过极限温度测定的。将施加工作载荷所引起的变形和温度引起的热变形总计起来, 冲头在凹模导入区的总变形量很小, 因此, 挤压零件的尺寸偏差主要与毛坯温度有关。Dalheimer和Erbslöh [30] 试验研究了凹模表面和型腔壁中正应力的分布。而El-Behery和Lamble, Johnson [31] 以及Schmitt [32] 试验研究了模具座中正应力的分布。文献 [33、34] 中以光弹法研究了方孔模具的应力, 而文献 [35] 以同样的方法研究了六角凹模型腔的顶锻模的应力。

Kudo和Matsubara [36、37] 对有限长度的圆形凹模中的应力做了分析, 在此凹模中仅型腔的腰部承受压应力的作用。这就导致了在凹模腰部与平面间界上的应力集中。凹模型腔中的正常压力值通常选用与挤压时压力相等的值。在大多数的情况下, 采用这样的值过大, 在最大压力下, 该值通常约定为 $1.85 \times 10^9$  牛顿/米<sup>2</sup>。

冲头与凹模的直径取决于加工零件的尺寸, 而模套直径取决于压机工作空间的尺寸, 模套环的数量及其直径的选定应以在挤压空间能够容纳下为准。

设计了计算凹模模套套环直径的各种方法 [33-40]。在文献 [41] 中, 将凹模模套的各种计算方法进行比较, 并根据最大切应力的测定提出了新的方法。结合模具外形尺寸, 给出了凹模孔最大直径和挤压最大压力的计算公式, 利用这些公式能够确定单个模套的尺寸。在文献 [42] 中提出了计算多层模套和凹模的方法。

安装冲头和凹模用的底板也承受施加载荷的作用, 因此它们也用工具钢制造。对这种零件的支承面的平行度及其与模具垂直轴的倾斜度均有较高的要求。这些零件的弹性变形应当最小。

英国的工业部门设计了大约1500种工具钢, 供制造各种工具之用 [43]。根据英国标准 BS 4659 (工具钢), 这些牌号的钢可分为10个级别或40个专用组。在文献 [44、45] 中, 列举了各种工具钢的化学成分、推荐的热处理规范、金相组织和机械性能。

编制了工具钢材料手册, 其中列出了硬度、热处理规范、相变图、物理性能 (密度、热膨胀系数、导热系数、热容、弹性模量), 并提出了机械加工和焊接的方法、热处理时间和温度对表面硬度的影响、硬度与零件截面厚度的关系、表面光洁度等等。

表3列举了钒合金钢公司、Alleheny Ludlum制钢公司和Universal Cyclop制钢公司出产的铬钼工具钢的机械性能。这些工具钢广泛地用于制造热作模具。

表3中的符号: b——化学成分: 0.40% C-0.92% Si-5.09% Cr-1.34% Mo-0.52% V; 热处理: 加热到1010°C空冷, 然后在570°C二次回火, 保温2.5小时; c——化学成分: 0.40% C-1.00% Si-5.25% Cr-1.15% Mo-1.00% V; 热处理: 1010°C奥氏体化油淬, 然后在565°C回火, 保温2小时; d——化学成分: 0.33% C-0.85% Si-5.00% Cr-1.25% W-1.45% Mo-0.23% V; 热处理: 1060°C奥氏体化后油淬, 565°C保温2小时回火; e——热处理: 982°C奥氏体化后空冷, 565°C回火, 保温1.5小时; f——化学成分: 0.5% C-

热模锻用铬钼钢的高温性能〔44〕

表 3

| 试验温度<br>(°C)   | 强度极限<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | 屈服极限<br>(σ <sub>0.2</sub> )<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | 伸 长 率<br>(50.8mm)<br>(%) | 断面收缩率<br>(%) | 室温硬度(HRC) |     |
|----------------|-------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------|--------------|-----------|-----|
|                |                               |                                                      |                          |              | 试验前       | 试验后 |
| 530钢 (H11) (b) |                               |                                                      |                          |              |           |     |
| 20             | 184                           | 152                                                  | 10.0                     | 35.8         | 50        | 50  |
| 165            | 172                           | 138                                                  | 10.1                     | 36.1         | 50        | 50  |
| 275            | 163                           | 137                                                  | 9.8                      | 34.5         | 50        | 50  |
| 358            | 161                           | 134                                                  | 10.0                     | 35.2         | 50        | 50  |
| 440            | 154                           | 131                                                  | 11.4                     | 38.7         | 50        | 50  |
| 495            | 145                           | 116                                                  | 12.2                     | 38.9         | 50        | 50  |
| 550            | 126                           | 98                                                   | 11.0                     | 35.4         | 50        | 50  |
| 605            | 98.4                          | 74                                                   | 12.8                     | 46.2         | 50        | 47  |
| 660            | 60                            | 45                                                   | 18.9                     | 66.6         | 50        | 41  |
| 521钢 (H13) (c) |                               |                                                      |                          |              |           |     |
| 495            | 157                           | —                                                    | 9                        | 37           | 52        | —   |
| 550            | 144                           | —                                                    | 11                       | 43           | 52        | —   |
| 605            | 121                           | —                                                    | 15                       | 49           | 52        | —   |
| 660            | 88                            | —                                                    | 22                       | 59           | 52        | —   |
| 522钢 (H12) (d) |                               |                                                      |                          |              |           |     |
| 412            | 155                           | —                                                    | 12                       | 36           | 53        | —   |
| 550            | 151                           | —                                                    | 12                       | 41           | 53        | —   |
| 660            | 54                            | —                                                    | 32                       | 83           | 53        | —   |
| 780            | 26                            | —                                                    | 71                       | 97           | 53        | —   |
| 522钢 (H12) (e) |                               |                                                      |                          |              |           |     |
| 550            | 138                           | 110                                                  | 10                       | 55           | 50        | —   |
| 633            | 66                            | 40                                                   | 24                       | 71           | 49.3      | —   |
| 527钢 (A9) (f)  |                               |                                                      |                          |              |           |     |
| 275            | 165                           | 137                                                  | 7.6                      | 28.8         | 50        | —   |
| 330            | 162                           | 134                                                  | 7.9                      | 29.3         | 50        | —   |
| 440            | 151                           | 126                                                  | 9.1                      | 35.2         | 50        | —   |
| 495            | 142                           | 116                                                  | 9.4                      | 38.2         | 50        | —   |
| 550            | 127                           | 99                                                   | 10.5                     | 42.1         | 50        | —   |

1.00%Si-5.00%Cr-1.4%Mo-1.0%V-1.5%Ni; 热处理: 加热到1010°C空冷, 随后二次回火使硬度达HR C50。

### 对工具钢的要求

由工具钢制成的模具零件应坚固, 因为它们承受着冲击载荷的作用, 并在其中产生很大的应力。很多工具钢, 特别是淬硬性较高的工具钢的强度很难测定。在这种情况下, 为了测定其强度, 应查明是否存在组织缺陷, 以及组织缺陷的形式, 因为这些缺陷主要影响着强度。

因此, 英国标准BS4659规定, 工具钢中应无缩孔、无粗大夹杂和条状碳化物; 对表层增碳与脱碳程度以及成分偏差范围作了限定, 并限定热处理后的硬度值。从该标准中可见, 高合金工具钢的质量, 在很大程度上还与碳化物的存在有关, 虽然这些碳化物几乎不影响硬度值, 但它明显地降低断裂强度和冲击韧性〔43〕。

夹杂物的存在会使强度降低并导致断裂, 其断裂特点因断口的形式而异。细晶粒组织乃是理想的组织, 但是在标准BS4695中并未规定各种钢的晶粒度和棒材的直径。

高韧性是对工具钢提出的另一个要求, 不仅弯曲和扭转试验测得的韧性要高, 而且在冲击韧性试验中当裂纹出现的瞬间能直接测量断裂功时, 以断裂功表示的韧性也要高。在文献〔46〕和〔47〕中描述了以不同方法对高强度钢和合金断裂机理所作的研究。

通常, 在任何零件的表面或其组织中均有微观缺陷, 它可能成为施加载荷作用下的断裂源。如果在试样中已有裂纹, 而当贮备能的释放速度等于裂纹形成开始瞬间吸收能的速度时, 则该裂纹在载荷的作用下可能很快地扩展。该瞬间能量的吸收速度是表示材料产生裂纹倾向大小的一个指标。贮备能的释放速度则与试样中应力的分布以及材料的弹性特点有关。考虑到缺口端部的塑性变形区比缺口尺寸小, 可以利用弹性变形法来计算贮备能的释放速度。

在文献〔47〕中表明: 裂纹区的弹性变形场与 $K/r^{3/2}$ 成比例关系(式中:  $K$ ——应力场强度因子,  $r$ ——离裂纹顶点的距离)。当存在裂纹的情况下, 材料的性能取决于系数

$$K_1 = \sigma(\pi a)^{1/2} \alpha,$$

式中,  $\alpha$ ——与加载条件有关的系数, 近似等于1,  $\sigma$ ——应力,  $a$ ——裂纹长度的二分之一,  $K_1$ 值与各因子有关。

在施加静载荷的情况下, 当达到临界值 $K_{Ic}$ 时, 便可出现裂纹,  $K_{Ic}$ 决定着材料的脆性断裂抗力。

裂纹的扩展速度用下式可求出:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n,$$

式中,  $\Delta K$ ——应力场强度因子幅度, 在 $n=3$ 时, 应力不超过屈服极限80%。

文献〔48〕研究表明, 热模锻模具在使用中, 其表面上产生同样的裂纹。在某些情况下, 这些裂纹非常小, 而局部应力也低, 所以裂纹并不扩展。在另一些情况下, 由于促进裂纹扩展条件的出现, 而使模具的寿命显著地降低。可在韧性断裂条件下研究热模钢中出现的裂纹。

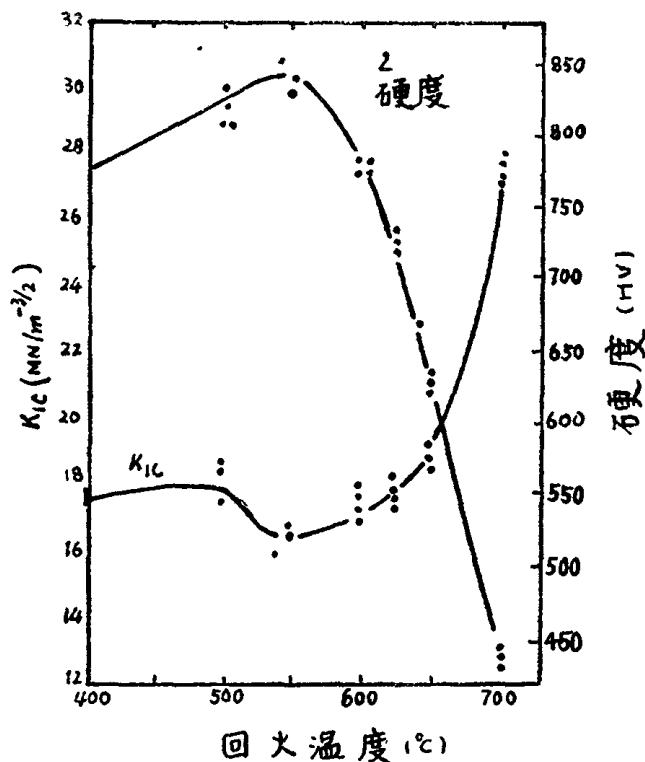
落锻研究协会的综述指出〔49〕，对于热轧锻模具钢， $K_{IC}$ 与变形度及变形速度有关。模具钢№5所得的应力值在 $(0.85 \sim 1.3) \times 10^9$ 牛/米<sup>2</sup>的范围内。

如果有一种钢，其初始裂纹是逐渐发展的，那末这种钢的 $K_{IC}$ 值比那些裂纹能在其中瞬间就可扩展的钢的该值还高，利用这种钢也是合算的。在试验钝切口的试样时，可以发现裂纹形成抗力较低。

在冷挤压时，例如，反挤压的冲头是由淬火钢BAl2制成，这些冲头在高应力下发生断裂；在某些情况下，冲头的断裂是由于制钢技术不能保证好的表面质量，或者钢中碳化物没有聚集成粒状而造成时；从而，加剧了裂纹在模具使用中的扩展。对冷挤压钢韧性断裂的研究表明，应把检验中用显微镜发现的缺陷允许尺寸限定到1微米，而在表面上用超声波检查发现的缺陷的允许尺寸限定到100微米。

图6是高速钢D12的断裂韧性 $K_{IC}$ 与硬度随热处理温度变化的关系曲线〔50〕。图中符号：

1 温度(°C)， $K_{IC}$   $10^6$ 牛顿/米<sup>-3/2</sup>，2 硬度。



1 →

图6

从图6可见，在硬度和 $K_{IC}$ 之间存在着相反的关系。而伴随着断裂韧性的变化，疲劳强度也发生类似的变化。这就证实了，低韧性的钢具有低劣的疲劳强度。但是他们之间不是直线关系，这是由于钢中碳化物的尺寸及其分布特点、晶粒大小和夹杂物含量影响的结果。

如果淬火温度从1050°C提高到1250°C时，在应力值等于 $\frac{1}{2}\sigma_s$ 时，表面缺陷的极限值从168微米减到46微米，而在应力值等于 $\sigma_s$ 时，则从35微米减到9微米，碳化物的尺寸通常不超过1~8微米。

对于冷挤压模具用的低合金工具钢，由于各种形式夹杂的存在，在平面应力状态条件下，可使冲击韧性降低10%。

## 磨 损

在变形时，由于毛坯发生位移，在工具与毛坯相接触的表面上产生摩擦磨损。因此，对于精确确定的条件，规定了磨损抗力指标，在一些学科分类中，磨损抗力值规定得非常严格。对于每一个生产工序而言，工具的磨损过程是不相同的，它与毛坯的尺寸、形状、形变速度、形变方式、润滑方式、模具材料及其原始组织有关。

在生产条件下测定工具的磨损是一个很困难的课题。文献〔52〕和〔53〕研究了毛坯切断刀的磨损；而冲孔、下料用的冲头和凹模的磨损，作者在文献〔54、55〕中进行了研究。在文献〔56〕中给出了在自动冲压机上模具预热的环境下对11种热作模具钢磨损所做的研究

结果。合金元素含量最少的№5钢的磨损量最大。铬钼含量高的加钒钢具有中等磨损抗力。含12~13%Cr和大量合金元素的钢其磨损抗力很高。

模具的磨损也在实验室条件下进行了研究〔57,58〕,落锻研究协会〔57〕在这方面所作的广泛研究表明,不仅实验室的实验结果与生产条件下钢中的变化有着固定的关系,而且还可按照钢的化学成分预先非常精确地提出磨损抗力。

表4列出了16种工具钢的化学成分及其相对磨损指标R〔57〕。

表 4

| 材 料              | C                                                                   | Si   | Mn  | Ni  | Cr   | Mo   | W      | V    | 相对<br>磨损<br>指标<br>R |
|------------------|---------------------------------------------------------------------|------|-----|-----|------|------|--------|------|---------------------|
| 工 业 合 金          |                                                                     |      |     |     |      |      |        |      |                     |
| 1. 工厂用碳钢         | 0.65                                                                | 0.3  | 0.6 | —   | —    | —    | —      | —    | 158                 |
| 2. №5模具钢         | 0.6                                                                 | 0.3  | 0.6 | 1.5 | 0.6  | 0.25 | —      | —    | 100                 |
| 3. Cr-Mn-Ni-Mo钢  | 0.5                                                                 | 0.3  | 1.0 | 1.0 | 1.2  | 0.6  | —      | 0.1  | 73                  |
| 4. En 40 C       | 0.4                                                                 | 0.3  | 0.6 | 0.4 | 3.0  | 1.0  | —      | 0.2  | 45                  |
| 5. Mo-Ni- Cr-V钢  | 0.2                                                                 | 0.3  | 0.6 | 2.5 | 1.0  | 3.0  | —      | 0.25 | 32                  |
| 6. 5 Cr-Mo-W钢    | 0.33                                                                | 0.3  | 1.0 | —   | 5.0  | 1.5  | 1.5    | 0.5  | 51                  |
| 7. Ni- Cr-Mo钢    | 0.1                                                                 | 0.6  | 0.6 | 4.8 | 3.9  | 3.0  | —      | —    | 61                  |
| 8. Cr-Co-Mo-V-W钢 | 0.33                                                                | 0.9  | 0.6 | —   | 3.0  | 3.0  | 1.0    | 1.0  | 41                  |
| 9. Cr-Ni-Mo-V钢   | 0.1                                                                 | 0.25 | 0.7 | 2.4 | 12.0 | 1.8  | —      | 0.35 | 32                  |
| 10. 10%W 钢       | 0.35                                                                | 0.2  | 0.3 | —   | 3.0  | —    | 10.0   | 0.5  | 26                  |
| 11. Cr-Mn-Ni-N钢  | 0.5                                                                 | 0.1  | 9.8 | 3.9 | 21.7 | —    | (N0.5) |      | 6                   |
| 12. Ni 基合金       | (C 0.12 Cr 12.5 Mo 4.2 Ti 0.8 Al 6.1<br>Nb 2.0 B 0.012 Zr 0.1 Ni 基) |      |     |     |      |      |        |      | 10                  |
| 实 验 用 合 金        |                                                                     |      |     |     |      |      |        |      |                     |
| 13. Cr 钢         | 0.32                                                                | 0.3  | 0.6 | —   | 4.6  | —    | —      | —    | 149                 |
| 14. Cr-Mo 钢      | 0.35                                                                | 0.3  | 0.6 | —   | 4.9  | 0.57 | —      | —    | 97                  |
| 15. Cr-Mo 钢      | 0.35                                                                | 0.3  | 0.6 | —   | 9.5  | 0.59 | —      | —    | 75                  |
| 16. Cr-Mo钢       | 0.25                                                                | 0.3  | 0.6 | —   | 9.6  | 0.56 | —      | —    | 85                  |

注: 研究最后这四种材料是确定C、Cr和Mo含量对防蚀性能的影响。

在实验室条件下所作的研究〔59—61〕是以采用同位素为基础的。Sata等〔60〕对以

高速钢制的冲头和凹模剪切低碳钢、不锈钢和硅钢制的毛坯时的磨损进行了研究。Solowag和Quaas [61] 研究了用260 Cr46钢制冲头反向挤压 CK10Al钢制空心零件时的磨损。

Hornbogen [62] 提出一种用以说明合金韧性降低时使相对磨损量增加的模式。它是以变形比较为基础的，即：材料中的临界变形导致裂纹形成时，在毛坯与模具相互作用的情况下，对所产生的变形进行比较。施加的应力超过临界值时，便增加了裂纹扩展的或然率并加速了磨损的过程。

工具磨损之后，使保持在许用公差范围内的锻坯尺寸发生变化，并使锻坯丧失原来的形状。因此，如果所得的公差太大，则必须更换工具。

工具的寿命与其磨损有关。模具零件寿命与各种压力加工用钢的化学成分有关，同时，也与毛坯的材料特性、截面大小以及原始条件有关。这种关系被绘制成曲线图的形式。

由D2钢制的淬火硬度达HR C62~64的冲头，在对302不锈钢、碳钢和黄铜零件进行成型和90°角弯曲时，其寿命分别为500、1800和2200万件。零件的最大面积是25.8厘米<sup>2</sup>。

所作的比较表明，由O2、W1和D2钢制的成型或弯曲冲头在加工1008钢制、1.6毫米厚的毛坯时，其寿命分别为300、500和1800万件。

利用W1 (HRC62~63)、O1(HRC60~62)和D2钢 (HRC63~65) 制的冲头、硬质合金凹模和氮化合金G合金 (HR C66)，由厚为3.17毫米的热退火态的 1008 钢用成型法或拔伸法制成套筒，模具寿命分别约为二千、二千、五千、二万、四万二千件。

也研究了被加工毛坯材料对模具寿命的影响。对含碳量为0.6~0.8%、硬度为HR C35~42的碳钢、1100铝合金和黄铜，在制造其壁厚为1.6毫米、面积为13.35厘米<sup>2</sup>的零件时，所用的成型凹模寿命的研究结果如表5所示。

表 5

| 工 具 钢 牌 号         | 寿 命 ( 万 次 ) |       |     |
|-------------------|-------------|-------|-----|
|                   | 毛 坯 材 料     |       |     |
|                   | 碳 钢         | 铝 合 金 | 黄 铜 |
| O1、O2 (HR C61~62) | 5           | 10    | 14  |
| A2 (HR C62~64)    | 12          | 12.5  | 18  |
| D2 (HR C61~62)    | 16          | 18    | 24  |
| D3 (HR C61~63)    | 22          | 27.5  | 34  |
| A2、D2 (氮化的)       | 40          | 49    | 55  |

根据毛坯材料 (0.6~0.8% C的1008钢、1100铝合金及黄铜)及其热处理状态和厚度也得出了A2钢制的成型模具的冲头和凹模磨损的对比研究结果。

但是，模具的寿命不仅取决于磨损，也与工具中所产生的应力值和温度有关。

在连续冷冲压情况下，工具的温度可达到200~250°C，冲头工作行程的压应力值达

$1.3 \times 10$  牛顿/米<sup>2</sup>，反行程时当冲床滑块的速度为每分钟60~100次时，其拉应力达 $0.13 \times 10$  牛顿/米<sup>2</sup>。模具寿命与磨损、钢的韧性以及由于机械和冶金缺陷或工具的塑性变形而引起的应力集中有关。

在热模锻中，工具承受冷热交替作用，使模具的表层产生很大应力。模具的上部由于与热毛坯接触而迅速被加热，但该部位由于温度变化而引起热膨胀，又受到模体其余低温部分的限制。

因此，材料表层处于压应力作用下，在其冷却时会促进裂纹的形成。循环加热和冷却时，在模具钢中产生的相变以及表面的氧化加速了断裂过程的发展。

在生产条件下研究模具的寿命时，必须记录模具使用前后及使用当中的尺寸。Aston和Muir〔63〕分析了大锻件模具寿命的记录。分析统计结果表明，磨损随毛坯尺寸的增大而加剧。所需变形力的值对磨损有明显的影响，但未考虑模具材料的影响。

Aston和Barry〔64〕研究了制造不同锻坯用模具的磨损，记录了制造41种锻坯的几百个模具的尺寸。这就可能对大部分锻坯磨损的影响作出结论。模具寿命还与飞边面积及形成飞边的金属量有关。将锤锻和挤压相似零件而得到的结果加以比较，就可以看到，前者的寿命高。3Ni-3Mo钢比No.5工具钢具有更高的耐磨性。

由于缺乏准确的资料和必须得到关于磨损的精确数据，尽管在实验室根本不能创造一个与所有生产情况都很相似的条件，还必须做实验室试验。利用文献〔49〕和〔65〕中的研究结果可以确定在缓慢或加速加载两种情况下裂纹产生的可能性。在模锻情况下，关于温度的循环变化对热裂纹形成的影响，在实验室以加热到模锻温度的试样进行了研究。结果表明，在降低最高加热温度时，模具材料的疲劳迅速增高。

所采用的应力状态简化图解，可用来评定模锻时工具中所产生的应力和确定热锻压模具材料的磨损、疲劳与塑性变形之间的关系〔66〕。

为了提高模具工作部件韧性和改善其应力状态的分布状况，建议利用马氏体时效钢。一些学者认为，形变热处理可以改善模具的性能。

文献〔67〕研究了高碳高铬钢和BM2钢形变热处理的奥氏体化温度及其组织对钢性能的影响。这种处理方法对铬合金钢性能的影响很小；但对以钼、钨和钨合金化并能引起二次硬化的钢，可明显提高强度和塑性。

BM2高速钢在沿厚度方向进行压下量为50%的轧制后，具有最大的抗弯强度极限，其值为 $3.9 \times 10$  牛顿/米<sup>2</sup>，屈服极限为 $2.9 \times 10$  牛顿/米<sup>2</sup>，吸收能为750公斤·毫米，该指标比经过普通热处理的钢高7倍。

McCallum和Lang认为〔68〕，AISI H13热作模具钢经奥氏体形变热处理后，可使机械性能得到提高。例如，抗拉强度极限等于 $2.7 \times 10^8$  牛顿/米<sup>2</sup>，比该钢经一般热处理后高80%。

BM2钢形变热处理，在动载作用下，由于碳化物的负作用，不能明显提高其机械性能。

为了减少碳化物及其它夹杂物的尺寸，可用预先烧结的粉末毛坯来制造模具组件。在这种情况下，模具组织是均匀的，碳化物的尺寸不超过3~4微米。粉末烧结毛坯制的模具的形变热处理对其机械性能具有良好的影响。