

# 第三章 热作模具材料

热作模具主要指用于热变形加工和压力铸造的模具。其工作特点是，在外力作用下，使加热的固体金属材料产生一定的塑性变形，或者使高温的液态金属铸造成形，从而获得各种所需形状的零件或精密毛坯。

## 第一节 热作模具对材料性能的要求及成分特点

### 一、性能要求

根据工作条件，热作模具可分为热锻模、热挤压模、压铸模和热冲裁模等几类。

热作模具在工作中既有力的作用又有温度的作用，从而使模具的工作条件复杂化，对模具材料的特性要求也更加严格。为了满足热作模具的使用要求，热作模具材料应具备下列基本特性：

1) 较高的高温强度和良好的韧性。热作模具，尤其是热锻模，工作时承受很大的冲击力，而且冲击频率很高，如果模具没有高的强度和良好的韧性，就容易开裂。

2) 良好的耐磨性能。由于热作模具工作时除受到毛坯变形时产生摩擦磨损之外，还受到高温氧化腐蚀和氧化铁屑的研磨，所以需要热作模具材料有较高的硬度和抗粘附性。

3) 高的热稳定性。热稳定性是指钢材在高温下可长时间保持其常温力学性能的能力。热作模具工作时，接触的是炽热的金属，甚至是液态金属，所以模具表面温度很高，一般为400~700℃。这就要求热作模具材料在高温下不发生软化，具有高的热稳定性，否则模具就会发生塑性变形，造成堆塌而失效。

4) 优良的耐热疲劳性。热作模具的工作特点是反复受热受冷，模具一时受热膨胀，一时又冷却收缩，形成很大的热应力，而且这种热应力是方向相反、交替产生的。在反复热应力作用下，模具表面会形成网状裂纹（龟裂），这种现象称为热疲劳，模具因热疲劳而过早地断裂，是热作模具失效的主要原因之一。所以热作模具材料必须要有良好的热疲劳性。

5) 高淬透性。热作模具一般尺寸比较大，热锻模尤其是这样，为了使整个模具截面的力学性能均匀，这就要求热作模具钢有高的淬透性能。

6) 良好的导热性。为了使模具不至于积热过多，导致力学性能下降，要尽可能降低模面温度，减小模具内部的温差，这就要求热作模具材料要有良好的导热性能。

7) 良好的成形加工工艺性能，以满足加工成形的需要。

### 二、成分特点

热作模具钢的成分与合金调质钢相似，一般碳的质量分数小于0.5%（个别钢种碳的质量分数可达0.6%~0.7%），并含有Cr、Mn、Ni、Si等合金元素。碳含量低可保证其具有足够的韧性。合金元素的作用是强化铁素体和增加淬透性。为了防止回火脆性，还加入Mo、W等元素；为了提高高温强度和热疲劳抗力，需增加相当数量的Cr、W及Si。这些元素提高了相变温度，使模面在交替受热与冷却过程中不致发生相变而发生较大的容积变化，从而

提高其抗热疲劳的能力。另外, W、Mo、V 等在回火时以碳化物形式析出而产生二次硬化, 使热作模具钢在较高温度下仍保持相当高的硬度, 这是热作模具钢正常工作的重要条件之一。

## 第二节 热作模具钢及热处理

根据工作温度、性能和用途可将通用热作模具钢分类如下:

1) 按用途分: ①锤锻模和大型机锻模用钢; ②中、小机锻模和热挤压模用钢; ③压铸模用钢; ④热冲裁模用钢。

2) 按工作温度分: ①低耐热钢 (350 ~ 370℃); ②中耐热钢 (550 ~ 600℃); ③高耐热钢 (580 ~ 650℃)。

3) 按性能分: ①高韧性热作模具钢; ②高热强热作模具钢; ③高耐磨热作模具钢。

上述三种分类法之间的关系见表 3-1。

表 3-1 热作模具钢的分类

按用途分	按性能分	按工作温度分	钢 号
锤锻模和大型机锻模用钢	高韧性热作模具钢	低耐热模具钢 (350 ~ 370℃)	5CrMnMo, 5CrNiMo, 4CrMnSiMoV, 5Cr2NiMoVSi, 5SiMnMoV
中、小机锻模和热挤压模用钢	高热强热作模具钢	中耐热模具钢 (550 ~ 600℃)	4Cr5MoSiV, 4Cr5MoSiV1, 4Cr5W2SiV
		高耐热模具钢 (580 ~ 650℃)	3Cr2W8V, 3Cr3Mo3W2V, 4Cr3Mo3SiV, 5Cr4W5Mo2V, 5Cr4Mo3SiMnVAI
压铸模用钢	高热强热作模具钢	中耐热模具钢	4Cr5MoSiV1, 4Cr5W2VSi
		高耐热模具钢	3Cr2W8V, 3Cr3Mo3W2V
热冲裁模用钢	高耐磨热作模具钢	低耐热模具钢	8Cr3, 7Cr3

下面将按照用途分类法介绍各类热作模具钢及其热处理工艺。

### 一、锤锻模及大型机锻模用钢与热处理

#### 1. 锤锻模和大型机锻模的工作条件及性能要求

锤锻模在工作中受到高温、高压、高冲击负荷的作用。模具型腔与高温金属坯料 (钢铁坯料为 1000 ~ 1200℃) 相接触产生强烈的摩擦, 使模具本身温度高达 400 ~ 600℃; 锻件取出后模腔还要用水、油或压缩空气进行冷却, 如此受到反复加热和冷却, 使模具表面产生较大的热应力。大型机锻模的工作条件有所不同, 如成形速度较慢, 单件滞模时间长, 模腔表面温升比锤锻模要高。

锤锻模和大型机锻模的主要失效形式是氧化磨损、断裂、热疲劳裂纹等。

因此, 锤锻模和大型机锻模应具有较高的高温强度和韧性、良好的耐磨性和耐热疲劳性。对于大型机锻模更易发生由于心部韧性不足而造成断裂失效, 所以必须保证模具心部的高韧性; 对于锤锻模, 燕尾处常因韧性不足而开裂, 所以燕尾处的硬度要求比模面低。此外, 锤锻模和大型机锻模的尺寸比较大, 还应具有高的淬透性。

## 2. 锤锻模及大型机锻模用钢

(1) 常用钢种及化学成分 此类钢具有中碳、多元低合金化特点。常用的传统钢种有：5CrNiMo、5CrMnMo 钢；近年来研制的新钢种有 4CrMnSiMoV、5Cr2NiMoVSi、45Cr2NiMoVSi 等。表 3-2 是几种典型锤锻模及大型机锻模用钢的化学成分。

表 3-2 典型锤锻模及大型机锻模用钢的化学成分

钢号	化学成分(质量分数,%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
5CrNiMo	0.50~0.60	≤0.030	0.60~0.90	—	0.15~0.30	—			
5CrMnMo	0.50~0.60	≤0.030	0.60~0.90	—	0.15~0.30	—			
4CrMnSiMoV	0.50~0.60	≤0.030	0.60~0.90	—	0.15~0.30	—			
5Cr2NiMoVSi	0.50~0.60	≤0.030	0.60~0.90	—	0.15~0.30	—			
45Cr2NiMoVSi	0.45	≤0.030	0.60~0.90	—	0.15~0.30	—			

(2) 典型钢种的性能特点 5CrNiMo 钢以良好的综合力学性能和良好的淬透性而著称。淬火后，经 500~600℃ 回火，硬度达 40~48HRC，抗拉强度达 1200~1400MPa，冲击韧度为 40~70J/cm<sup>2</sup>，而且第二类回火脆性不敏感。该钢的不足之处是工作温度稍低，锻坯中易产生白点。5CrNiMo 钢适合于制造形状复杂、冲击负荷大、要求高强度和较高韧性的中大型锤锻模。

5CrMnMo 钢的性能同 5CrNiMo 钢相比，它们的硬度和强度相当，但在相同硬度下 5CrMnMo 钢的冲击韧度低于 5CrNiMo 钢。5CrMnMo 钢的淬透性、耐热疲劳性也稍差，并且热处理时过热倾向较大。因此，5CrMnMo 钢适合于制造受力较轻的中小型锤锻模。

4CrMnSiMoV 钢的强度、热稳定性、淬透性均高于 5CrNiMo 钢，冲击韧度与 5CrNiMo 钢接近，可用于制造中、大型或特大型锤锻模及机锻模。

45Cr2NiMoVSi 是新型热作模具钢，成分与 5CrNiMo 相比，碳含量稍低，提高了 Cr 和 Mo 的含量，并加入了适量的 V 和 Si，回火时析出 M<sub>2</sub>C、MC 型碳化物，使钢具有二次硬化效应。该钢与 5CrNiMo 相比，有如下优点：①淬透性明显提高。②热稳定性比 5CrNiMo 钢高 150℃。③具有高的强韧性。④抗热疲劳和热磨损性能较高，具有优良的使用性能。从加工方面看，热加工时锻造及热处理的加热温度范围宽，开裂倾向小，锻造工艺及热处理工艺易于掌握，冷加工时较 5CrNiMo 钢切削略困难些。该钢适用于制造高强度大截面锤锻模和机锻模用钢，其模具使用寿命较目前应用的国内外锤锻模钢种均有明显提高。

5Cr2NiMoVSi 与 45Cr2NiMoVSi 仅碳的质量分数差 0.05%，所以，两者的力学性能、工艺性能相近，同样适合制作大截面锤锻模和大型机锻模用钢。

(3) 锤锻模与大型机锻模的选材 根据模具的工作条件、失效形式和性能要求，一般中小型 (< 3t) 锤锻模选用 5CrMnMo 钢；大型 (> 3t) 及复杂锤锻模选用 5CrNiMo、4CrMnSiMoV 钢；大型、重载锤锻模及机锻模选用 5Cr2NiMoVSi、45Cr2NiMoVSi 和 4Cr5MoSiV1 等钢。表 3-3 列出了锤锻模与大型压力机锻模的选材情况，供参考。

## 3. 锤锻模及大型机锻模的热处理

该类模具的制造工艺路线一般为：下料→锻造→退火→机械粗加工→探伤→机械加工或电火花加工成形→淬、回火→钳修→抛光。

各热加工工序的工艺方法及特点介绍如下：

(1) 锻造 锤锻模及大型机锻模用钢出厂时,虽然是经轧制和退火的钢材,但因锻模的尺寸较大,且大型轧材又具有各向异性,为了使性能尽可能地均匀并获得所需要的形状,必须进行锻造。锻造加热温度为 1100 ~ 1150℃,始锻温度 1050 ~ 1100℃,终锻温度 800 ~ 850℃,锻后应缓冷至 150 ~ 200℃后再空冷,以防止产生白点。

(2) 退火 锻后模块内存较大的内应力和组织不均匀性,必须进行退火,典型锤锻模及大型机锻模具钢的退火工艺见表 3-4。退火后的组织由珠光体和铁素体组成,硬度为 197 ~ 241HBW。

表 3-3 锤锻模及大型压力机锻模材料选用

类型	工作条件	选用材料		热处理后硬度要求 HRC	
		简单模具	复杂模具	模膛表面	燕尾部分
锤锻模	小型 ( $h < 275\text{mm}$ )	5CrMnMo 5SiMnMoV	4Cr5MoSiV 4Cr5MoSiV1	42 ~ 47 [ ] 35 ~ 39	
	4Cr5W2VSi		39 ~ 44 [ ] 32 ~ 37		
	中型 ( $h = 275 \sim 325\text{mm}$ )	5CrNiMo 5Cr2NiMoVSi 4CrMnSiMoV 45Cr2NiMoVSi	35 ~ 39 [ ] 30 ~ 35	32 ~ 37	28 ~ 35
	大型 ( $h = 325 \sim 375\text{mm}$ )				
特大型 ( $h = 375 \sim 500\text{mm}$ )					
锻模镶块	—	4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V 4CrMnSiMoV、4Cr3Mo3W2V	—	28 ~ 35	
堆焊锻模	—	5Cr2MnMo	32 ~ 37	—	
压力机 锻模	大尺寸	5CrNiMo、5Cr2NiMoVSi	42 ~ 48	—	
高速锻模	—	5CrNiMo 4CrMnSiMoV	4Cr5MoSiV1 3Cr2W8V 4Cr5W2VSi	45 ~ 54	—

表 3-4 典型锤锻模及大型机锻模具钢的退火工艺

钢号	加热温度/℃	保温时间/h	冷却方式
5CrNiMo	780 ~ 800	4 ~ 6	随炉缓冷至 500℃, 出炉空冷
5CrMnMo	850 ~ 870	4 ~ 6	
4CrMnSiMoV	840 ~ 860	2 ~ 4	炉冷至 700 ~ 720℃等温 4 ~ 6h, 再随炉冷至 500℃以下出炉空冷
45Cr2NiMoVSi	850 ~ 870	3 ~ 4	随炉缓冷至 500℃出炉空冷

锤锻模因磨损造成尺寸超差,可以翻新。为了便于进行加工,需翻新的锻模应进行软化处理,软化处理工艺以常规退火为宜,但应注意对燕尾的保护,以防止氧化脱碳。

(3) 淬火与回火 锻模尺寸大,大多采用箱式电阻炉加热,为了防止模具表面氧化和脱碳,应将模面向下放入装有保护剂(铸铁屑和木炭等)的铁盘中,然后用黄泥或耐火泥密封,燕尾部分也采用保护剂及黄泥封盖加以保护。大型或形状复杂的锻模淬火加热时一般需经一次预热,预热温度为 550 ~ 600℃。

锻模的淬火加热温度选择,主要是考虑保证模具获得较高的冲击韧度,具体推荐淬火温

度如下：5CrMnMo 钢为 830 ~ 850℃，5CrNiMo 钢为 830 ~ 860℃，4CrMnSiMoV 钢为 860 ~ 880℃，45Cr2NiMoVSi 钢为 960 ~ 980℃，5Cr2NiMoVSi 为 960 ~ 1010℃。

淬火加热保温时间的确定，是以入炉到温（仪表开始断电控制）或观察模具的加热颜色与炉内颜色一致时开始计算。一般，箱式电阻炉加热系数为 2 ~ 3min/mm，盐浴炉加热系数为 1min/mm。

锻模的淬火可以采用多种冷却方式，如油淬、分级淬火或等温淬火。其中最常用的是油淬。为了减少淬火变形，生产中常在出炉后先在空气中预冷至 750 ~ 780℃再淬火。淬火时，必须防止应力过大而开裂，为此应尽量使油循环（油温为 40 ~ 70℃），特别是要控制锻模的出油温度在 150 ~ 200℃，此时表面油渍只冒青烟而不着火，出油温度也可根据在油中的停留时间来控制，一般小型锻模为 15 ~ 20min，中型锻模为 25 ~ 45min，大型锻模为 45 ~ 70min，模具出油后应尽快回火，不允许冷到室温再回火，否则易开裂。分级淬火主要适于小型锻模，可将工件预冷后淬入 160 ~ 180℃ 硝盐，停留适当时间（按 0.3 ~ 0.5min/mm 计算）后取出立刻回火。

锻模的回火包括模腔和燕尾两个部分的回火，由于燕尾直接与锤头接触，它的硬度不应高于锤头，此外，燕尾的根部易引起应力集中，因而硬度也不宜太高，通常，燕尾的硬度应低于模面的硬度。各类锤锻模的硬度选择范围见表 3-5。

表 3-5 各类锤锻模的硬度选择范围

模具类型	模面硬度 HRC (新规定)	模面硬度 HRC (旧规定)	燕尾硬度 HRC
小型	42 ~ 39	47 ~ 42	35.0 ~ 39.5
中型	42 ~ 39	42 ~ 39	32.5 ~ 37.0
大型	40 ~ 35	40 ~ 35	30.5 ~ 35.0
特大型	37 ~ 34	37 ~ 34	27.5 ~ 35.0

锻模的回火温度，应根据硬度要求来确定。部分锤锻模用钢回火温度与硬度的关系见表 3-6。

锻模的回火次数一般为二次，每次 2h。第二次回火温度应低于第一次回火温度。为了防止第二类回火脆性，回火后采用油冷，在 100℃ 出油。

表 3-6 锤锻模用钢回火温度与硬度的关系

牌号	回火温度/℃	回火硬度 HRC	牌号	回火温度/℃	回火硬度 HRC
5CrMnMo	490 ~ 510	47 ~ 44	5CrNiW	590 ~ 610	37 ~ 33
	520 ~ 540	42 ~ 38		670 ~ 690	30 ~ 25
	560 ~ 580	37 ~ 34	5SiMnMoV	490 ~ 510	46 ~ 40
560 ~ 590	47 ~ 42	600 ~ 620		39 ~ 35	
4SiMnMoV	590 ~ 620	42 ~ 37	5CrNiTi	475 ~ 485	45 ~ 41
	630 ~ 660	37 ~ 32		485 ~ 510	43 ~ 39
	4CrMnSiMoV	520 ~ 580	49 ~ 44	45Cr2NiMoVSi	600 ~ 620
580 ~ 630		44 ~ 41	630 ~ 670		40 ~ 42
610 ~ 650		42 ~ 38	5Cr2NiMoVSi	500	50.5
620 ~ 660		40 ~ 37		550	49.5
5CrNiW	520 ~ 540	45 ~ 41		600	48.7
	530 ~ 550	43 ~ 49	650	43.0	

燕尾可采用单独加热回火和自行回火的方法。单独加热回火是在保证模腔达到硬度要求后,再用专用电炉或用盐浴炉来对燕尾部分单独进行回火加热。自行回火方法是将淬火加热后的锻模整体淬入油中一段时间后把燕尾提出油面停留一段时间,依靠其本身的热量使温度回升,如此反复操作3~5次即可。

## 二、热挤压模及中、小型机锻模用钢与热处理

### 1. 热挤压模及中、小型机锻模的工作条件与性能要求

热挤压模工作时,受到压应力、弯曲应力和脱模的拉应力作用。所受的冲击载荷比锤锻模小,但与炽热金属接触的时间比锤锻模长,工作温度较锤锻模高,挤压不同金属时升温也不同,最高可达800~850℃。因急冷急热造成的热应力也大于锤锻模,摩擦也更为剧烈。热挤压模的主要失效形式是模腔过量塑性变形,反复加热冷却而引起的疲劳破坏、热磨损及表面氧化腐蚀。

中、小型机锻模的工作条件与热挤压模相近,所不同的是所受到的冲击载荷比热挤压模大。因此,中、小型机锻模的失效形式也与热挤压模相近。因而,要求热挤压模及中、小型机锻模具有较锤锻模更高的耐热疲劳性、热稳定性和良好的耐磨性,以及较高的高温强度和足够的韧性。

### 2. 热挤压模及中、小型机锻模用钢

常用的热挤压模具及中、小型机锻模用钢为钨系热作模具钢和铬系热作模具钢,还有铬钼系、钨钼系和铬钼钨系等新型的热作模具钢以及基体钢等。

(1) 钨系热作模具钢 这类钢的代表性钢种为传统的3Cr2W8V钢,由于其耐热疲劳性较差,在热挤压模方面的应用将会逐渐减少,但在压铸模方面的应用较多,故在压铸模用钢中对其作详细介绍。

(2) 铬系热作模具钢 铬系热作模具钢的代表性钢种有4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1和4Cr5W2VSi。前两种相当于美国的H11和H13钢,4Cr5W2VSi则由4Cr5MoSiV钢演变而来,由 $w_w = 2\%$ 代替 $w_{Mo} = 1\%$ 。这三种钢碳的质量分数均为5%左右,属于中碳中铬钢。铬系热作模具钢的化学成分见表3-7。

表3-7 铬系热作模具钢化学成分

钢号	化学成分(质量分数,%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	W	Mo	V
4Cr5MoSiV	0.43 [ ] 0.80	0.12 [ ] 0.50	≤0.030 [ ]	4.75 ~ 5.50	1.10 ~ 1.65	0.30 ~ 0.60			
4Cr5MoSiV1	0.030 [ ] ≤0.030 [ ]	4.75 ~ 5.50 [ ] [ ]	1.10 ~ 1.75 [ ]	0.80 ~ 1.20					
4Cr5W2VSi	0.030 [ ] ≤0.030 [ ]	4.75 ~ 5.50 [ ] [ ]	1.60 ~ 2.40 [ ] [ ]	0.60 ~ 1.00					

这类钢的共同特性是:①因含铬量较多,具有较高的淬透性,如厚度为150mm的4Cr5MoSiV1钢件可油冷淬透。而且这类钢的过冷奥氏体在400~600℃之间具有很高的稳定性,可长时间保温而不转变,因而适合于分级淬火。②耐热疲劳性较好,这是因为铬、硅提高了钢的抗氧化性,所以铬系钢较能适应急冷急热的工作条件。③回火稳定性较高,如4Cr5MoSiV、4Cr5W2VSi钢的淬火硬度分别在1070℃和1200℃左右淬火时达到最大值。然后回火,其硬度随回火温度升高而几乎保持不变,并在500~550℃出现二次硬化峰值,以后则迅速下降,如图3-1所示。④与钨系热作模具钢相比,有较高的韧性,但高温强度不足,

耐热性稍差，工作温度一般不超过 650℃。⑤这类钢所含碳化物种类及数量大致相同，因而过热敏感性也大致相同。⑥铬系热作模具钢热塑性较高，变形抗力小，锻造开裂倾向性较小，但锻造温度范围稍窄，必须严格控制锻打温度。

(3) 铬钼系钢及铬钨钼系钢 这类钢包括 4Cr3Mo3SiV ( H10 )、3Cr3Mo3VNb ( HM3 )、3Cr3Mo3W2V ( HM1 )、5Cr4W5Mo2V ( RM2 )、4Cr3Mo3W4VNb ( GR ) 等。

下面简要介绍部分钢种的性能特点与应用。

1) 3Cr3Mo3VNb ( HM3 ) 钢：此钢特点是含碳量较低，并加入少量铌，故具有较高的耐热疲劳性和强韧性，回火稳定性好，其他工艺性能也均优异。适于制造强烈水冷的压力机成形模、辊锻模、小型锤锻模等，其工作寿命明显高于 5CrNiMo、4Cr5W2VSi、3Cr2W8V 钢制造的模具。

2) 5Cr4W5Mo2V ( RM2 ) 钢：该钢碳的质量分数为 0.5% 左右，合金元素总质量分数为 12%，使用状态含碳化物较多，其中以  $M_6C$  为主。因此，该钢具有较高的回火抗力及热稳定性，在硬度 50HRC 时的热稳定性可达 700℃，抗磨损性能也好。适于制作小截面热挤、高速锻模及辊锻模具。

3) 4Cr3Mo2W4VTiNb ( GR ) 钢：该钢是在钨钼系热作模具钢中加入少量铌，而获得高回火稳定性和高的热强性。其耐热疲劳性、热稳定性、耐磨性及高温强度明显高于 3Cr2W8V 钢。该钢经 1160~1200℃ 油淬，630~600℃ 回火 2 次，每次 1h 的处理，其硬度可达 50~55HRC，抗拉强度可达 1880MPa，冲击韧度为 17J/cm<sup>2</sup>。该钢的淬透性、冷热加工性均好，适于制造热墩、精锻、高速锻等热锻模具。

(4) 基体钢 基体钢中有多个钢种可以兼作冷作模具用钢和热作模具用钢，如 6W8Cr4VTi ( LM1 )、6Cr5Mo3W2VSiTi ( LM2 ) 和 6Cr4Mo3Ni2WV ( CG-2 ) 等，其中 5Cr4Mo3SiMnVAI ( O12Al ) 钢较多地用于热挤压模具，如轴承热挤压冲头、传动杆热墩模等，其使用寿命比传统热作模具钢 3Cr2W8V 有较大幅度的提高。表 3-8 给出了部分基体钢和热作模具钢在不同温度下的力学性能，以供选材时参考。

表 3-8 部分基体钢和热作模具钢的力学性能比较

性能 温度/℃	抗拉强度 /MPa		伸长率 (%)	断面收缩率 (%)	冲击韧度 /J·cm <sup>-2</sup>	硬度 HV		
	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
700	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
600	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
500	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
400	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
300	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
200	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
150	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
100	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
70	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
50	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
30	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
20	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
10	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
0	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]

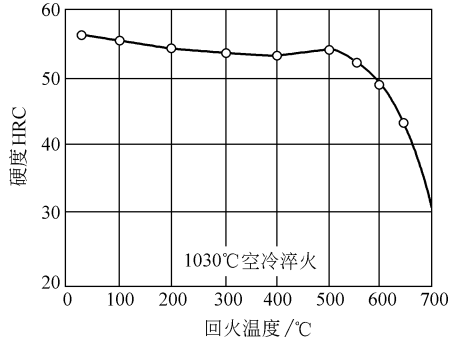


图 3-1 4Cr5MoSiV 钢回火温度与硬度的关系

### 3. 热挤压模具及中、小型机锻模的材料选用

选择热挤压模具材料时，主要应根据被挤压金属的种类及其挤压温度来决定，其次也应考虑到挤压比、挤压速度和润滑条件等因素，以提高模具的使用寿命。表 3-9 所示为热挤压模具材料的选用情况。中、小型机锻模的选材主要考虑锻压材料种类和生产批量，其次也要考虑模具尺寸、变形速度和润滑条件对模具寿命的影响。表 3-10 为中、小型机锻模的选材情况以供具体选用时参考。

表 3-9 热挤压模具材料的选用及硬度要求

被挤金属 推荐选用的材料牌号		钢、钛及镍合金 (挤压温度 1100 ~ 1260℃)	铜及铜合金 (挤压温度 650 ~ 1000℃)	铝、镁及其合金 (挤压温度 350 ~ 510℃)	铅、锌及其合金 (挤压温度 < 100℃)
		工具名称			
挤压模	凹模(整体模块或嵌镶模块)	4Cr5MoSiV1、 4Cr5W2VSi、 3Cr2W8V、 4Cr4Mo2WVSi、 5Cr4W5Mo2V、 4Cr3Mo2W4VTiNb、 高温合金 43 ~ 51HRC <sup>①</sup>	4Cr5MoSiV1、 4Cr5W2VSi、 3Cr2W8V、 4Cr4Mo2WVSi、 5Cr4W5Mo2V、 4Cr3Mo2W4VTiNb、 高温合金 40 ~ 48HRC <sup>①</sup>	4Cr5MoSiV1、 4Cr5W2VSi	45       16 ~ 20HRC
	模垫	4Cr5MoSiV1、 4Cr5W2VSi 42 ~ 46HRC	5CrMnMo、 4Cr5MoSiV1、 4Cr5W2VSi 45 ~ 48HRC	5CrMnMo、 4Cr5MoSiV1、 4Cr5W2VSi 48 ~ 52HRC	不用
	模座	4Cr5MoSiV、 4Cr5MoSiV1 42 ~ 46HRC	5CrMnMo、 4Cr5MoSiV 42 ~ 46HRC	5CrMnMo、 4Cr5MoSiV 44 ~ 50HRC	不用
挤压筒	内衬套	4Cr5MoSiV1、 4Cr5W2VSi、 3Cr2W8V、 4Cr4Mo2WVSi、 5Cr4W5Mo2V、 4Cr3Mo2W4VTiNb、 高温合金 400 ~ 475HBW	4Cr5MoSiV1、 4Cr5W2VSi、 3Cr2W8V、 4Cr4Mo2WVSi、 5Cr4W5Mo2V、 4Cr3Mo2W4VTiNb、 高温合金 400 ~ 475HBW	4Cr5MoSiV1、 4Cr5W2VSi	不用
	外套筒	5CrMnMo、 4Cr5MoSiV 300 ~ 350HBW	5CrMnMo、 4Cr5MoSiV 300 ~ 350HBW		T10A(退火)
挤压垫		4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi、3Cr2W8V、 4Cr4Mo2WVSi、5Cr4W5Mo2V、 4Cr3Mo2W4VTiNb、高温合金 40 ~ 44HRC		4Cr5MoSiV1、 4Cr5W2VSi 44 ~ 48HRC	不用

(续)

工具名称	被挤金属			
	钢、钛及镍合金 (挤压温度 1100 ~ 1260℃)	铜及铜合金 (挤压温度 650 ~ 1000℃)	铝、镁及其合金 (挤压温度 350 ~ 510℃)	铅、锌及其合金 (挤压温度 < 100℃)
挤压杆	5CrMnMo、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1 450 ~ 500HBW			5CrMnMo 450 ~ 500HBW
挤压芯棒(挤压管材料用)	4Cr5MoSiV1、 4Cr5W2VSi、 3Cr2W8V 42 ~ 50HRC	4Cr5MoSiV1 4Cr5W2VSi、 3Cr2W8V 40 ~ 48HRC	4Cr5MoSiV1、 4Cr5W2VSi 48 ~ 52HRC	45  16 ~ 20HRC

① 对于复杂形状的模具，硬度比表列值应低 4 ~ 5HRC。

表 3-10 中、小型机锻模的选材

被锻材料	生产批量( $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^4$ 件)		生产批量( $> 1 \times 10^4$ 件)	
	整体模具	镶块	整体模具	镶块
碳钢和低合金钢	5CrNiMo 5CrNiMoV 4Cr5MoSiV 硬度要求: 405 ~ 433HBW	4Cr5MoSiV1 硬度要求: 405 ~ 433HBW	4Cr5MoSiV 4Cr5MoSiV1 硬度要求: 405 ~ 433HBW	4Cr5MoSiV1 5Cr4W5Mo2V 硬度要求: 405 ~ 433HBW
不锈钢和耐热钢	5CrNiMo 5CrNiMoV 4Cr5MoSiV 硬度要求: 388 ~ 429HBW	4Cr5MoSiV1 5CrW5Mo2V 硬度要求: 429 ~ 448HBW	4Cr5MoSiV 4Cr5MoSiV1 3Cr3Mo3VNb 硬度要求: 429 ~ 543HBW	4Cr5MoSiV1 3Cr3Mo3VNb 4Cr3Mo2W4VTiNb 硬度要求: 405 ~ 433HBW
铝、镁合金	5CrNiMo 5CrNiMoV 硬度要求: 341 ~ 375HBW	4Cr5MoSiV1 硬度要求: 405 ~ 433HBW	5CrNiMoV 4Cr5MoSiV 硬度要求: 429 ~ 488HBW	4Cr5MoSiV 4Cr5MoSiV1 硬度要求: 429 ~ 488HBW
铜合金	5CrNiMoV 4Cr5MoSiV 4Cr5MoSiV1 硬度要求: 405 ~ 433HBW	4Cr5MoSiV1 硬度要求: 405 ~ 433HBW	5CrNiMoV 4Cr5MoSiV 4Cr5MoSiV1 硬度要求: 429 ~ 488HBW	4Cr5MoSiV1 5Cr4W5Mo2V 硬度要求: 429 ~ 488HBW

注：压力机锻模采用镶块结构时，模体材料一般可选用 5CrMnMo、5CrNiMo、4CrMnSiMoV 等钢。

#### 4. 热挤压模及中、小机锻模的热处理

这类模具的制造工艺路线一般为：下料→锻造→预先热处理→机械加工成形→淬、回火→精加工。

下面分析各热加工工序的工艺特点。

(1) 锻造工艺 热挤压模及中、小机锻模用钢多为高合金钢, 所以坯需经良好的锻造, 尤其是含钼的热作模具钢, 要注意锻造加热温度和保温时间的控制, 以避免严重脱碳导致模具早期失效。常用热挤压模具及中、小机锻模用钢的锻造工艺见表 3-11。

表 3-11 常用热挤压模具及中、小机锻模用钢的锻造工艺

钢 号	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
4Cr5MoSiV 4Cr5MoSiV1	1100 ~ 1140 1100 ~ 1160	1070 ~ 1100 1060 ~ 1100	≥850	锻后缓冷
5Cr4W5Mo2V (RM2)	1170 ~ 1190	1120 ~ 1150	≥850	锻后在 850 ~ 600℃ 之间快冷, 600℃ 以下缓冷
3Cr3Mo3VNb (HM3)	1150 ~ 1200	1120 ~ 1150	≥850	锻后缓冷
4Cr3MoZW4VTiNb (GR)	1120 ~ 1150	1100 ~ 1150	≥900	锻后砂箱中冷却
5Cr4Mo3SiMnVAI (012A1)	1100 ~ 1160	1060 ~ 1120	≥900	锻后缓冷

## (2) 预备热处理

1) 退火。热挤压模具中、小机锻模的退火工艺主要在于正确地选择退火温度, 保持充分的保温时间, 并以合适的冷却速度冷却。另外, 为了确保良好的耐磨性, 在淬火后需保留一定数量的碳化物, 由于碳化物的形状对钢的韧性有很大影响, 因此还应注意退火后的碳化物形状。一般希望获得圆而细小的碳化物。常用热挤压模具钢及中、小机锻模用钢的退火工艺如表 3-12 所示。

表 3-12 热挤压模具钢及中、小机锻模用钢的退火工艺

钢 号	退火工艺	退火后硬度 HBW
4Cr5MoSiV 4Cr5MoSiV1	860 ~ 890℃ 加热, 700 ~ 720℃ 等温 4 ~ 6h, 炉冷至 500℃ 出炉空冷	≤223
4Cr5W2VSi	860 ~ 880℃ 加热, 炉冷至 500℃ 出炉	≤229
3Cr3Mo3VNb (HM3)	(860 ~ 900)℃ × (2 ~ 3)h 炉冷, (700 ~ 730)℃ × (3 ~ 5)h 等温, 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷	181 ~ 190
5Cr4W5Mo2V (RM2)	(870 ~ 890)℃ × (2 ~ 3)h 炉冷, (720 ~ 730)℃ × 4h 等温, 炉冷到 500℃ 出炉空冷	180 ~ 220
4Cr3Mo2W4VTiNb (GR)	(850 ~ 860)℃ × (2 ~ 3)h 炉冷, (710 ~ 720)℃ × 4h 炉冷至 550℃ 出炉	180 ~ 240

2) 高温调质。为了使锻后毛坯的力学性能 (特别是断裂韧度) 得到改善, 常常采用锻后调质的方法进行毛坯的预处理。此种热处理方法是将锻后的模具毛坯加热到高温淬火, 再经高温回火。经此处理, 可使碳化物均匀分布, 且形状圆而细小, 不仅改善了钢的性能, 而且还缩短了预处理周期。调质处理的淬火加热温度可根据不同的钢种而定, 如 3Cr3Mo3W2V 钢为 1200℃, 同常规淬火温度相近。高温回火温度一般在 700 ~ 750℃ 之间。

3) 锻后正火。对于锻后出现明显沿晶链状碳化物的坯, 须正火予以消除后再进行球化退火。因为这种链状碳化物直接退火是难以消除的。

(3) 淬、回火 对于常用热挤压模具钢及中、小机锻模用钢,选择淬火温度时,主要考虑的是奥氏体晶粒尺寸的大小和冲击韧度的高低,其次还要考虑模具的工作条件、结构形状、失效形式对性能的要求。

对于淬火保温时间的选择,主要考虑要能完成组织转变,使碳及合金元素充分固溶,以保证获得高的回火抗力及热硬性。淬火保温时间系数一般盐浴炉取  $0.5 \sim 1 \text{min/mm}$ ,尺寸愈小系数愈大。

热挤压模具钢及中、小机锻模用钢属于高合金钢,淬透性较好,淬火冷却可采用油冷,也可采用空冷。对要求变形小的模具还可采用等温淬火或分级淬火。

回火工艺的正确与否,对模具的失效形式有很重要的作用。选择回火温度的原则是,在不影响模具抗脆断能力的前提下,尽可能提高模具的硬度,这需要根据模具的具体失效形式来确定回火参数。

淬火后的模具都应尽快进行回火,特别是形状复杂的模具,当模面温度低于  $80^\circ\text{C}$  时,回火就得进行。为了避免残留应力的产生,在回火加热和冷却时都应缓慢进行。

回火一般进行两次,回火时间可按  $3 \text{min/mm}$  计算,但不应低于 2h。第二次回火温度可比第一次低  $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 。

表 3-13 给出了常用热挤压模具钢及中、小机锻模用钢的常规热处理工艺,以供参考。

表 3-13 热挤压模具钢及中、小机锻模用钢的常规热处理工艺

钢号	淬火工艺与淬火后硬度		达到以下硬度的回火温度/ $^\circ\text{C}$		
	淬火温度/ $^\circ\text{C}$	油淬硬度 HRC	50 ~ 55HRC	40 ~ 50HRC	40HRC
4Cr5MoSiV	1000 ~ 1030	50 ~ 55	540 ~ 560	560 ~ 600	640
4Cr5MoSiV1	1020 ~ 1040	53 ~ 55	540 ~ 560	560 ~ 610	640
4Cr5W2VSi	1030 ~ 1050	53 ~ 56	540 ~ 560	560 ~ 580	630
4Cr3Mo3SiV	1010 ~ 1030	50 ~ 55	600 ~ 620	620 ~ 640	—
5Cr4W5Mo2V	1080 ~ 1120	54 ~ 58	600 ~ 630	630 ~ 650	700
3Cr3Mo3VNb	1060 ~ 1090	48 ~ 50	—	550 ~ 600	—
4Cr3MoZW4VTiNb	1160 ~ 1200	55 ~ 58	600 ~ 630	—	—

### 三、压铸模用钢及热处理

#### 1. 压铸模工作条件及性能要求

压铸模用钢用于制造压力铸造和挤压铸造模具。根据被压铸材料的性质,压铸模可分为锌合金压铸模、铝合金压铸模、铜合金压铸模。压铸模工作时与高温的液态金属接触,不仅受热时间长,而且受热的温度比热锻模要高(压铸非铁金属时  $400 \sim 800^\circ\text{C}$ ,压铸钢铁材料时可达  $1000^\circ\text{C}$  以上),同时承受很高的压力 ( $20 \sim 120 \text{MPa}$ );此外还受到反复加热和冷却以及金属液流的高速冲刷而产生磨损和腐蚀。因此,热疲劳开裂、热磨损和热熔蚀是压铸模常见的失效形式。所以,压铸模的性能要求是:较高的耐热性和良好的高温力学性能、优良的耐热疲劳性、高的导热性、良好的抗氧化性和耐蚀性、高的淬透性等。

#### 2. 压铸模用钢及其热处理工艺

常用的压铸模用钢以钨系、铬系、铬钼系和铬钨钼系热作模具钢为主,也有一些其他的

合金工具钢或合金结构钢,用于工作温度较低的压铸模,如 40Cr、30CrMnSi、4CrSi、4CrW2Si、5CrW2Si、5CrNiMo、5CrMnMo、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi、3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V 及近年研制的新型热作模具钢 Y10、Y4 等。其中 3Cr2W8V 钢是制造压铸模的典型钢种,常用于制造浇铸铝合金和铜合金的压铸模;与其性能和用途相类似的还有 3Cr3Mo3W2V 钢。值得指出的是,由于 4Cr5MoSiV1 钢具有良好的韧性、耐热疲劳性和抗氧化性,其模具使用寿命高于 3Cr2W8V 钢制压铸模,且这类钢的价格较钨系钢便宜,因此在压铸模上的使用愈来愈多。

下面重点介绍 3Cr2W8V 和 3Cr3Mo3W2V 钢及其热处理。这两种钢的化学成分见表 3-14。

表 3-14 3Cr2W8V 和 3Cr3Mo3W2V 钢的化学成分

钢号	化学成分(质量分数,%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	W	Mo	V
3Cr2W8V	0.30 ≤ 0.40	0.30 ~ 0.40	0.30 ~ 0.70	≤ 0.020	≤ 0.0050				
3Cr3Mo3W2V	0.30 ~ 0.40	2.80 ~ 3.30	1.20 ~ 1.80	2.50 ~ 3.00	0.80 ~ 1.20				

(1) 3Cr2W8V 钢 该钢是我国长期以来应用最广泛的典型的压铸模用钢,也可用于其他热作模具钢。

1) 成分及性能特点。该钢碳含量虽然不高,但铬、钨含量较高,致使共析点(S点)左移。从金相组织上看,属于过共析钢组织。由于含碳量较低,所以该钢的韧性和导热性较好。钨是这种钢的主加合金元素,在钢中生成的钨碳化物很稳定,须在较高温度加热时才能溶于奥氏体中;在淬火后回火时也不易从马氏体中析出和聚集,故钨能显著地提高钢的回火稳定性。从而使钢具有较高的热硬性和热强性。例如在 650℃ 下,3Cr2W8V 钢的抗拉强度可达 1200MPa,硬度可达 300HBW。此外,未溶钨碳化物可阻止淬火加热时的晶粒长大,有利于改善钢的韧性。铬的主要作用是提高钢的淬透性和抗氧化性。钒的主要作用是细化晶粒,并增加回火过程的二次硬化效果。

2) 锻造工艺。因 3Cr2W8V 钢属于过共析钢,在机械加工之前要进行锻造,反复锻粗与拔长以消除碳化物偏析,减少粗大碳化物。锻造工艺为:始锻温度为 1080 ~ 1120℃,终锻温度为 900 ~ 850℃,锻后先在空气中较快地冷却到 700℃,随后缓冷。

3) 预备热处理。3Cr2W8V 钢锻造后一般采用不完全退火,退火工艺为:830 ~ 850℃ 加热并保温 3 ~ 4h 后,以小于 40℃/h 的速度炉冷至 400℃ 出炉空冷。也可采用等温退火,等温温度 710 ~ 740℃,等温时间 3 ~ 4h,然后炉冷至 500℃ 以下出炉空冷。退火后组织为珠光体与碳化物,硬度为 207 ~ 255HBW。

4) 淬火与回火。3Cr2W8V 钢的淬火温度、回火温度与钢的硬度关系见表 3-15。

表 3-15 3Cr2W8V 钢淬火、回火温度与硬度的关系

淬火温度 /℃	淬火后硬度 HRC	下列温度回火后硬度 HRC					
		500℃	550℃	600℃	625℃	650℃	700℃
46 [ ] 47 [ ] 43 [ ]	40 [ ] 36 [ ] 27 [ ]						
47 [ ] 48 [ ] 44 [ ]	41 [ ] 37 [ ] 30 [ ]						
48 [ ] 49 [ ] 45 [ ]	42 [ ] 40 [ ] 32 [ ]						
49 [ ] 53 [ ] 50 [ ]	47 [ ] 45 [ ] 34 [ ]						
[ ] 54 [ ] 52 [ ]	— [ ] 49 [ ] 40 [ ]						

从表中数据可以看出，随着淬火温度的升高，钢的硬度增加，例如 1050℃ 淬火 600℃ 回火后硬度为 43HRC；而 1250℃ 淬火 600℃ 回火后，硬度为 52HRC，提高近 10 个单位。

同一淬火温度，则在 550℃ 回火时硬度值最大，呈现一峰值，而且有二次硬化现象，多一次回火，硬度值会有所提高。

表 3-16 为 3Cr2W8V 钢的淬火温度、回火温度与抗拉强度  $\sigma_b$ 、冲击韧度  $a_k$  的关系。

从表中数据可以看出，提高淬火温度，抗拉强度随之增加，但冲击韧度随之降低，同一淬火温度，在 650℃ 回火时  $a_k$  值最低，说明这是回火脆性区。

综合上述分析，3Cr2W8V 钢常规淬火加热温度应采用 1050 ~ 1150℃。如果模具要求有较好的塑性和韧性，承受较大的冲击负荷时，应采用下限加热温度，对于压铸那些熔点较高的合金（如铜合金、镁合金）的压铸模，为了满足在较高温度下所需的热硬性和热稳定性，可在上限温度范围加热淬火。

表 3-16 3Cr2W8V 钢淬火、回火温度与  $a_k$ 、 $\sigma_b$  的关系

淬火温度/℃	500℃ 回火		550℃ 回火		600℃ 回火		650℃ 回火		700℃ 回火	
	$a_k$ /J·cm <sup>-2</sup>	$\sigma_b$ /MPa	$a_k$ /J·cm <sup>-2</sup>	$\sigma_b$ /MPa	$a_k$ /J·cm <sup>-2</sup>	$\sigma_b$ /MPa	$a_k$ /J·cm <sup>-2</sup>	$\sigma_b$ /MPa	$a_k$ /J·cm <sup>-2</sup>	$\sigma_b$ /MPa
1400	38	1330	35	1200	55	970				
1450	35	1400	33	1300	48	1100				
1600	34	1500	30	1350	37	1140				
1900	32	1700	28	1500	33	1200				
2000	29	1900	22	1800	28	1670				

3Cr2W8V 钢的淬透性很好，厚度在 100mm 以内的工件均可在油中淬透。为了减小模具变形，可采用分级淬火和等温淬火。

回火温度应根据性能要求和淬火温度来选择，回火次数为 2 ~ 3 次。由于该钢有明显的回火脆性，回火后应采用油冷，然后可再经 160 ~ 200℃ 补充回火。

表 3-17 为 3Cr2W8V 钢制压铸模的几种热处理工艺，以供参考。

表 3-17 3Cr2W8V 钢制压铸模的几种热处理工艺

热处理规范	硬度 HRC	应用范围
	40 ~ 44 44 ~ 48	承受一定冲击载荷，要求韧性较高的模具
	40 ~ 44 44 ~ 48	要求热硬性高的模具

(续)

热处理规范	硬度 HRC	应用范围
	40 ~ 48	大型、简单模具

(2) 3Cr3Mo3W2V (HM1) 钢 该钢是参照国外有关钢种结合我国资源条件研制的新型热作模具钢。

此钢在化学成分上通过以钼代钨,使钢的含钨量与 3Cr2W8V 钢相比大大降低,同时铬和钒的含量比 3Cr2W8V 钢有适当的提高。它的特点是具有优良的强韧性,在保持高强度和高的热稳定性的同时,还表现出良好的耐热疲劳性。试验结果和使用实践表明,这种钢的回火稳定性、抗磨损性能均优于 3Cr2W8V 钢,热疲劳抗力比 3Cr2W8V 钢高得多。

3Cr3Mo3W2V 钢的锻造工艺为:加热温度 1150 ~ 1180°C,始锻温度 1120 ~ 1150°C,终锻温度  $\geq 850^{\circ}\text{C}$ ,锻后缓冷。锻造后应及时退火,退火工艺为 860 ~ 880°C 加热保温 2 ~ 4h,炉冷降温至 720 ~ 740°C 等温 4 ~ 6h,炉冷至 550°C 以下出炉空冷。退火后硬度  $\leq 252\text{HBW}$ 。最终热处理工艺为:淬火温度 1060 ~ 1130°C,油淬或分级淬火,淬火后硬度为 50 ~ 56HRC,回火至 600 ~ 630°C 时硬度为 50 ~ 55HRC,630 ~ 650°C 回火后硬度为 45 ~ 50HRC。

(3) 4Cr5Mo2MnSiV1 (Y10) 及 4Cr3Mo2MnVNbB (Y4) 钢 Y10 钢及 Y4 钢是分别作为铝合金及铜合金压铸而研制的新型热作模具钢,Y10 钢的化学成分接近 H13 钢,Y4 钢的化学成分接近 HD 钢,都属于高强韧性热作模具钢。与 3Cr2W8V 钢相比,冷热疲劳抗力、抗溶蚀能力、冲击韧度、断裂韧性均比较高,只是耐热性稍差。但 Y10 钢可在 610°C 以下长期工作,Y4 钢的工作温度可更高些。

两种钢的锻造及退火工艺与 3Cr2W8V 钢相近,但锻造性能良好,锻造温度范围宽,无特殊要求。退火硬度低于 3Cr2W8V 钢。

淬火温度为 1020 ~ 1120°C,回火温度为 600 ~ 630°C,具体淬火和回火温度可根据用途及要求进行选择。

Y10 钢及 Y4 钢用于压铸模,使用寿命普遍提高 1 ~ 10 倍,而用于热挤压模和热锻模的效果也良好。

### 3. 压铸模材料选用

目前常用的压铸金属材料主要有:锌合金、铝或镁合金、铜合金和钢铁等四大类,它们的熔点、压铸温度、模具工作温度和硬度要求都各有不同。由于压铸金属的压铸温度愈高,压铸模的磨损和损坏就愈快,因此,在选择压铸模材料时,首先就要根据压铸金属的种类及其压铸温度的高低来决定;其次还要考虑生产批量大小和压铸件的形状、重量以及精度要求等。

一般,常用于锌合金压铸模具的材料有合金结构钢,如 40Cr、30CrMnSi、40CrMo 钢等;模具钢,如 5CrNiMo、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V、CrWMn 钢等。合金结构钢制压

铸模寿命为 20 ~ 30 万次，模具钢可达到 100 万次。

铝合金压铸模具钢有 4Cr5MoSiV1 (H13)、4Cr5MoSiV (H11)、3Cr2W8V 及新钢种 4Cr5Mo2MnSiV1 (Y10)、3Cr3Mo3VNb (HM3) 钢等。其中 H13、H11、Y10、HM3 钢使用效果良好，模具寿命均高于 3Cr2W8V 钢。

铜合金压铸模具钢有 3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V (HM1) 及新钢种 4Cr3Mo2MnVNbB (Y4) 钢，其中 3Cr2W8V 钢用量最大，但使用效果不如 HM1 和 Y4 钢。

钢铁压铸模具材料最常用的仍为 3Cr2W8V 钢，但因该钢热疲劳抗力差，使用寿命低。目前国内外趋向使用高熔点钼基合金及钨基合金制造钢铁压铸模，其中 TZM 及 Anviloy1150 两种合金普遍受到重视。

铜合金制造钢铁压铸模，也收到良好效果。使用的铜合金主要有铍青铜合金、铬锆钒铜合金和铬锆镁铜合金等。

表 3-18 列出了压铸模成形部分零件的材料选用举例，可供选用时参考。

表 3-18 压铸模成形部分零件的材料选用举例

工作条件	推荐选用的材料牌号		代用材料	要求的硬度 HRC	备注
	简单的	复杂的			
压铸铅或铝合金(压铸温度 < 100℃)	45	40Cr	T8A、T10A	16 ~ 20	
压铸锌合金(压铸温度 400 ~ 450℃)	4CrW2Si、 5CrNiMo	3Cr2W8V、 4Cr5MoSiV、 4Cr5MoSiV1	4CrSi、 30CrMnSi、 5CrMnMo、 Cr12、T10A	48 ~ 52	分流锥、浇口套、 特殊要求的顶杆等 可采用 T8A、T10A
压铸铝合金、镁合金(压铸温度 650 ~ 700℃)	4CrW2Si、 5CrW2Si、 6CrW2Si	3Cr2W8V、 3Cr3Mo3W2V、 4Cr5MoSiV、 4Cr5MoSiV1、 4Cr5W2VSi	3Cr13、4Cr13	40 ~ 48	
压铸铜合金(压铸温度 850 ~ 1000℃)		3Cr2W8V、4Cr5MoSiV、 4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi、 3Cr3Mo3W2V、3Cr3Mo3Co3V、 YG30 硬质合金、TZM 钼合金、钨基 粉末冶金材料		37 ~ 45	
压铸钢铁材料(压铸温度 1450 ~ 1650℃)		3Cr2W8V(表面渗铝)、钨基粉末 冶金材料、钼基难熔合金(TZM)、 铬锆钒铜合金、铬锆镁铜合金、钼 铍铜合金		42 ~ 44	

注：成形部分零件主要包括型腔（整体式或镶块式）、型芯、分流锥、浇口套、特殊要求的顶杆等，型腔、型芯的热处理，也可先调质到 30 ~ 35HRC，试模后，进行氮碳共渗至  $\geq 600\text{HV}$ 。

#### 4. 压铸模的热处理特点

根据压铸模形状、精度要求，压铸模的制造工艺路线如下。

1) 一般压铸模: 锻造→退火→机械粗加工→稳定化处理→精加工成形→淬火及回火→钳工修配。

2) 形状复杂、精度要求高的压铸模: 锻造→退火→粗加工→调质→电加工或精加工成形→钳工修磨→渗氮(或软氮化)→研磨抛光。

工序中的热处理为退火、稳定化处理、调质和淬、回火,其工艺目的和特点如下:

1) 压铸模型腔复杂,在粗加工和半精加工时会产生较大的内应力。为了减小淬火变形,在粗加工之后应进行去应力退火(也称稳定化处理)。去应力退火工艺为 $650\sim 680^{\circ}\text{C}$ ,保温 $3\sim 5\text{h}$ 。保温结束后,型腔简单的模具可直接出炉,在静止空气中均匀、缓慢地冷却。而形状复杂的压铸模需炉冷至 $400^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷。经电火花加工的模具型腔,表面会产生变质层,变质层具有脆性,形成拉应力,易引起裂纹。消除变质层的办法是采用研磨或抛光,同时进行去应力退火。

2) 压铸模的预处理一般采用球化退火或调质处理,其目的是在最终热处理前获得均匀的组织 and 弥散分布的碳化物以改善钢的强韧性。由于调质处理的效果优于球化退火,所以,强韧性要求高的压铸模,常常以调质代替球化退火。

3) 压铸模用钢多为高合金钢,因其导热性差,热处理加热必须缓慢进行。对于防变形要求不高的模具,在不产生开裂的情况下,预热次数可以少些。但防变形要求高的模具,必须多次预热。较低温度( $400\sim 650^{\circ}\text{C}$ )的预热,一般在空气炉中进行;较高温度的预热,应采用盐浴炉,预热时间仍按 $1\text{min}/\text{mm}$ 计。

4) 淬火加热。对于典型压铸模用钢来说,高的淬火加热温度有利于提高热稳定性和抗软化的能力,减轻热疲劳倾向,但会引起晶粒长大和晶界形成碳化物,使韧性和塑性下降,导致严重开裂。因此,压铸模要求有较高韧性时,往往采用低温淬火,而要求具有较高的高温强度时,则采用较高温度淬火。

为了获得良好的高温性能,保证碳化物能充分地溶解,得到成分均匀的奥氏体,压铸模的淬火保温时间都比较长,一般在盐浴炉中加热保温系数取 $0.8\sim 1.0\text{min}/\text{mm}$ 。

5) 淬火冷却。对于形状简单、防变形要求不高的压铸模采用油冷;而形状复杂、防变形要求高的压铸模采用分级淬火。为了防止变形和开裂,无论采用什么冷却方式,都不允许冷到室温,一般应冷到 $150\sim 180^{\circ}\text{C}$ 均热一定时间后立即回火,均热时间可按 $0.6\text{min}/\text{mm}$ 计算。

6) 回火。压铸模必须充分回火,一般回火3次。第一次回火温度选在二次硬化的温度范围,第二次回火温度的选择要使模具达到所要求的硬度,第三次回火温度要低于第二次 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。回火后均采用油冷或空冷,回火时间不少于 $2\text{h}$ 。

7) 表面强化处理。为了防止熔融金属粘模、侵蚀,提高压铸模成形部分的抗蚀性和耐磨性,压铸模常采用表面强化处理,常用工艺方法有渗氮、氮碳共渗、渗铬、渗铝、渗硼等。

#### 四、热冲裁模用钢

在热作模具中,热冲裁模的工作温度较低,因此,对材料的性能要求也相对放宽。除了应具有高的耐磨性、良好的强韧性以及加工工艺性能外,几乎所有的热作模具钢均能满足热冲裁模的工作条件要求。所以在选材时,可着重考虑材料的经济性和生产管理上的方便,推荐使用的钢种有 $5\text{CrNiMo}$ 、 $4\text{Cr5MoSiV}$ 、 $4\text{Cr5MoSiV1}$ 和 $8\text{Cr3}$ 等。其中 $8\text{Cr3}$ 钢是使用较多的

钢种，它的化学成分为： $w_C = 0.75\% \sim 0.85\%$ ， $w_{Si} \leq 0.40\%$ ，锰质量分数  $\leq 0.40\%$ ， $w_{Cr} = 3.20\% \sim 3.80\%$ 。

热冲裁模主要有热切边模和热冲孔模等，它们的材料选用举例见表 3-19。

表 3-19 热冲裁模的材料选用举例及其要求的硬度

模具类型及零件名称		推荐选用的材料牌号	可代用的材料牌号	要求的硬度	
				HBW	HRC
热切边模	凸模	8Cr3、4Cr5MoSiV、	5CrMnMo、5CrNiMo、		35 ~ 40
	凹模	5Cr4W5Mo2V	5CrMnSiMoV		43 ~ 45
热冲孔模	凸模	8Cr3	3Cr2W8V、6CrW2Si	368 ~ 415	
	凹模	8Cr3		321 ~ 368	

热冲裁凹模的主要失效形式是磨损和崩刃，凸模的主要失效形式是断裂及磨损。为此，凹模的硬度较高，以保证耐磨性；凸模并不要求高的耐磨性，硬度不必过高。在生产中，8Cr3 钢制凹模的硬度为 43 ~ 45HRC。如被冲材料为耐热钢或高温合金，其硬度还应增高，但不宜超过 50HRC。凸模的硬度在 35 ~ 45HRC 之间。

8Cr3 钢锻后必须进行退火，退火工艺一般为加热 790 ~ 810℃，保温 2 ~ 3h，出炉空冷至 700 ~ 720℃ 等温 3 ~ 4h，炉冷至 600℃ 出炉空冷。退火后的硬度一般小于或等于 241HBW。

8Cr3 钢制热冲裁模的淬火温度为 820 ~ 840℃，淬火冷却在油中进行。为避免开裂及变形，在入油前可在空气中预冷至 780℃。在油中冷却到 150 ~ 200℃ 时出油，并立即进行回火。

模具的回火温度根据其工作硬度而定，8Cr3 钢经 480 ~ 520℃ 回火后，其硬度为 41 ~ 45HRC。8Cr3 钢的回火温度不应低于 460℃，低于此温度回火韧性太低。

### 第三节 其他热作模具材料

#### 一、硬质合金

由于硬质合金具有很高的热硬性和耐磨性，还有良好的热稳定性、抗氧化性和耐蚀性，因而可用于制造某些热作模具。钨钴类硬质合金（通常制成镶块）可用于热切边凹模、压铸模、工作温度较高的热挤压凸模或凹模等。例如气阀挺杆热锻挤模，原采用 3Cr2W8V 钢制作，热处理后的硬度为 49 ~ 52HRC，使用寿命 5000 次。后在模具工作部分采用 YG20 硬质合金镶块，模具寿命提高到 15 万次。应用于热作模具的还有奥氏体不锈钢钢结硬质合金和高碳高铬合金钢钢结硬质合金等。例如 ST60 钢结合金制热挤压模在 960℃ 左右挤压纯铜时，其使用寿命比 YG15 高得多。ST60 还用于热冲孔模、热平锻模等。R5 钢结硬质合金等也可用于热挤压模。

#### 二、高温合金

高温合金的种类很多，有铁基、镍基、钴基合金等。其工作温度高达 650 ~ 1000℃，用来制造黄铜、钛及镍合金以及某些钢铁材料的热挤压模具。当模具本身的温度上升到 650℃ 以上的高温状态时，一般的热作模具钢都会软化而损坏，但这些高温合金仍能保持高的强度和硬度。表 3-20 是几种常用高温合金的化学成分。A-286 合金经热处理后可被有效硬

化，常用于热挤压黄铜的模具，其使用寿命可达铬系热作模具钢的两倍。常用镍基高温合金的工作温度可达 800 ~ 1000℃，可用于挤压耐热钢零件或挤压钢管的凹模或芯棒等。钴基高温合金在 1000℃ 以上可保持很高的强度和抗氧化能力。S-816 合金经固溶处理和时效后，具有比镍基高温合金更好的耐热疲劳性，故用于热挤压模具可获得较高的使用寿命。

表 3-20 几种高温合金的牌号和化学成分

种类	牌号	化学成分(质量分数,%)										
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Ti	Al	Ni	Co	Fe	其他
0.05	铁基 A-285	15	1.25	其余	W025	26						
0.08	镍基 B3008	4.4	2.08	其余								
0.08	镍基 KX2	14	6.0	4.0	28.85	其余						
	钴基 S-816	0.38			20	4			20	其余	4	W4, Cd4

### 三、难熔金属合金

通常将熔点在 1700℃ 以上的金属称为难熔金属，其中如钨、钼、钽、铌的熔点在 2600℃ 以上，其再结晶温度高于 1000℃，可长时间在 1000℃ 以上工作。在热作模具制造中应用的主要是钼基合金和钨基合金，其中 TZM 和 Anviloy1150 两种合金尤其受到关注。TZM 合金的成分为： $w_{Mo} > 99\%$ 、 $w_{Ti} = 0.5\%$ 、 $w_{Zr} = 0.08\%$ 、 $w_C = 0.03\%$ ；Anviloy1150 合金的化学成分为： $w_W = 95\%$ 、 $w_{Ni} = 3.5\%$ 、 $w_{Nb} = 1.5\%$ 。

这类材料的特点是熔点很高，高温强度较大，耐热性和耐蚀性好，有优良的导热、导电性能，热胀系数小，耐热疲劳性好，不粘合熔融金属，塑性也比较好，便于加工成形。其缺点是在 500℃ 以上易氧化，在再结晶温度以上将发生脆化，此外价格昂贵。它们主要用于制作在较高温度下工作的模具，如铜合金、钢铁材料的压铸模和钛合金、耐热钢的热挤压模等，可获得良好的使用效果。

### 四、压铸模用铜合金

钢铁材料压铸时，高温金属液体（1450 ~ 1580℃）迅速压入模腔，模腔最高工作温度可达 1000℃ 以上，瞬时形成很高的温度梯度。铜合金因导热性好，能将压铸件的热量很快散发出去，使模具的温升和内部的温度梯度大为降低，从而降低了模具的应变和应力，使其强度足以承受压铸时的压力，同时也减轻了热疲劳作用。此外，铜合金弹性模量低，热胀系数较小，不会发生相变，故所制作的模具在工作过程中性能及尺寸稳定。模具型腔可用精铸、压铸或冷挤压等多种工艺加工成形，制造周期短，成本低。

用于压铸模的铜合金有铍青铜合金、铬锆钒铜合金和铬锆镁铜合金。其中，铬锆钒铜合金的化学成分为： $w_{Cr} = 0.5\% \sim 0.8\%$ ， $w_{Zr} = 0.2\% \sim 0.5\%$ ， $w_V = 0.2\% \sim 0.6\%$ ，杂质的质量分数  $\leq 0.35\%$ ，其余为铜；铬锆镁铜合金的化学成分为： $w_{Cr} = 0.25\% \sim 0.6\%$ ， $w_{Zr} = 0.11\% \sim 0.25\%$ ， $w_{Mg} = 0.03\% \sim 0.1\%$ ，其余为铜。上述铜合金的热处理工艺为固溶处理与时效。用这些铜合金制作的用于钢铁件的压铸模，其使用寿命常常远高于各种热作模具钢。

## 第四节 热作模具的强韧化处理

为了使热作模具获得合理的性能和满意的使用寿命，一方面要重视热作模具材料的选

择, 另一方面还应重视模具热处理工艺的合理性和热处理新工艺的开发。下面简要介绍一些提高热作模具使用寿命的热处理新工艺以及热作模具的热处理实例。

### 一、热作模具的高温淬火

5CrNiMo 和 5CrMnMo 钢按常规工艺加热淬火后, 获得片状马氏体和板条马氏体的混合组织。将其淬火温度分别提高到 950℃ 和 900℃, 可获得以板条马氏体为主的淬火组织, 并提高钢的淬透性, 使模具具有高的强度、塑性和断裂韧度。通过调整回火温度 (>450℃ 高温回火), 可使钢的冲击韧度亦满足要求。这对于防止热锻模过早脆断、减缓磨损和热疲劳是有益的。

含有较多钨、钼、铬、钒的热作模具钢, 若按常规工艺在 1000 ~ 1100℃ 加热淬火, 实际上尚有许多合金元素未固溶于基体。过去一般认为提高淬火温度将导致晶粒长大而降低钢的冲击韧度, 但实践证明, 热冲压、热挤压和压力机锻造时, 模具所受的冲击载荷并不很大, 远小于锤锻, 所以钢的冲击韧度略有下降并不会引起早期断裂。相反, 采用高温淬火后, 钢的强度、热硬性、热稳定性、断裂韧度、热疲劳抗力均有明显增加。在很多场合, 3Cr2W8V 钢的淬火温度由 1050℃ 提高到 1150℃ (甚至 1200℃), 4Cr5MoSiV1 钢的淬火温度由 1030℃ 改为 1130 ~ 1160℃ 后都可使热作模具的使用寿命得到有效提高。

### 二、热作模具的复合热处理

#### 1. 复合强韧化处理 (双重淬火法)

复合强韧化处理是将模具的锻热淬火与最终热处理淬火回火相结合的处理工艺, 它是在模具毛坯停锻后用高温淬火及高温回火取代原来的球化退火 (预备热处理), 所以又称双重淬火法。经此复合处理后, 钢中碳化物细小且分布均匀, 基本上消除了常规工艺难以消除的带状碳化物。例如, 3Cr2W8V 钢经 1200℃ 的锻热固溶淬火 (将终锻后的锻件立即返回锻造炉中加热, 到温后油淬) 后, 可使以带状、网状、链状分布的各种合金碳化物充分溶入基体中, 一次碳化物的大小可由 50 ~ 90 μm 降至 8 ~ 13 μm, 碳化物级别不大于 2 级。经 720 ~ 730℃ 高温回火后, 可获得高度弥散析出的合金碳化物及高强韧性的索氏体组织。最终热处理时可根据模具使用要求而采取常规淬火工艺或高温淬火。3Cr3Mo3W2V、5Cr4W5Mo2V 钢等皆可采用这种复合强韧化处理, 对于克服模具早期断裂失效, 改善耐热疲劳性等有明显的作用; 同时缩短了生产周期, 节约了能源。

#### 2. 复合等温处理

5CrNiMo、5CrMnMo 钢按常规淬火时, 为了防止变形开裂, 出油温度通常为 150 ~ 200℃, 仅略低于钢的  $M_s$  点, 此时工件的心部仍处于过冷奥氏体状态。在随后及时进行的回火过程中, 这样的心部组织有可能转变为上贝氏体组织, 使热锻模的韧性变差, 使用寿命降低。针对这一问题, 采用如图 3-2 所示的复合等温处理可取得明显效果。其方法是将工件先油淬至 150℃ 左右 (或在 160 ~ 180℃ 硝酸盐中分级淬火) 之后, 再转入 280 ~ 300℃ 硝酸盐中等温 3 ~ 5h 后空冷。这样处理后模具的表层组织为马氏体与下贝氏体, 心部组织为下贝氏体。最后按所需硬度在规定的温度下回火。

### 三、热作模具热处理实例

#### 1. 4Cr5MoSiV1 钢制汽车凸轮轴锻模的热处理

某载重汽车发动机凸轮轴锻模, 尺寸为 950mm × 200mm × 160mm, 模具型槽的尺寸公差和表面粗糙度等有较高要求, 热处理后的硬度要求为 37 ~ 41HRC。该锻模在 40MN 机械锻压

机上使用，锻件材料为 45 钢，锻造温度为 1220 ~ 1240℃。

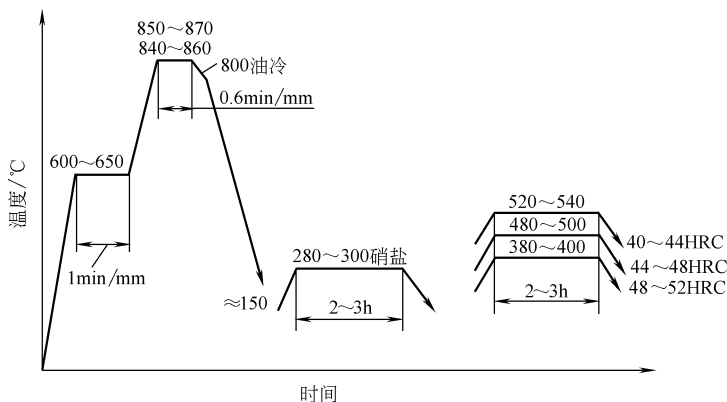


图 3-2 5CrNiMo、5CrMnMo 钢的复合等温处理工艺

凸轮轴锻模的加工工艺路线为：毛坯→机械加工→热处理→机械加工→仿形铣削加工→加工型槽→修磨→检验。用 5CrNiMo 钢制的凸轮轴锻模的平均使用寿命一般为 8000 件左右，其主要失效形式是磨损。改用 4Cr5MoSiV1 钢制造后，锻模的平均寿命提高到 1.1 万件，磨损和热疲劳情况比 5CrNiMo 钢模具有显著改善。锻模的热处理工艺如图 3-3 所示。模块在大型高温箱式电阻炉中加热，在油中淬火，冷至 150 ~ 200℃ 时出油。4Cr5MoSiV1 钢制模具在型槽较深时，使用中应特别注意锻前预热，以防止模具早期脆断。

## 2. 3Cr2W8V 钢制大力钳热锻模的淬火不回火处理

3Cr2W8V 钢模具通常在 500 ~ 650℃ 的回火脆性区间回火，因而回火愈充分，韧性愈低，在服役初期往往出现脆性开裂。

根据试验证明，3Cr2W8V 钢淬火态的断裂韧度比回火态的

高一倍；淬火态或低于 400℃ 回火后的冲击韧度高于 500 ~ 650℃ 回火的冲击韧度。因此，未经回火的模具或较低温度回火的模具反而不易出现早期脆性开裂。例如，用  $\phi 160\text{mm}$  的 3Cr2W8V 钢改锻成的  $110\text{mm} \times 110\text{mm} \times 160\text{mm}$  的大力钳模具，经球化退火和 1150℃ 加热、风冷、580℃ 回火三次的常规工艺处理后，硬度为 45 ~ 47HRC，在摩擦压力机上用以压制  $\phi 20\text{mm}$  的 45 钢钳口时，易出现早期脆性开裂。改用 1150℃ 加热、风冷、不回火的工艺处理后，模具硬度为 44 ~ 45HRC，平均使用寿命可达 1 万次以上，最终以磨损报废。

应当指出的是，未经回火的 3Cr2W8V 钢的抗磨损性和耐热疲劳性远低于回火的。所以，对抗磨损性能和耐热疲劳性要求高的热锻模，不能不回火。

## 3. 3Cr2W8V 钢制压铸模的离子渗氮处理

为提高压铸模的耐蚀性、耐磨性、抗热疲劳性和抗粘附性能，可采用离子渗氮的方法。

离子渗氮渗层的硬度分布曲线比较平稳，不易产生剥落和热疲劳。但对形状复杂的压铸模，难以获得均匀的加热和均匀的渗层，因此不宜采用离子渗氮的方法。

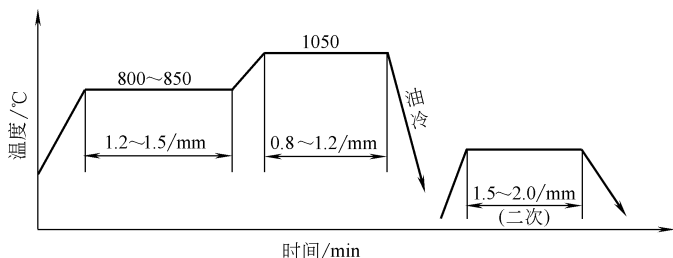


图 3-3 4Cr5MoSiV1 钢制凸轮轴锻模的热处理工艺

离子渗氮前, 模具的预处理条件, 对渗层质量和模具寿命有极大的影响。3Cr2W8V 压铸模在渗氮前的预处理状态, 以淬火最好, 调质次之, 退火的效果最差。

经淬火或调质的压铸模, 在离子渗氮后, 可极大地提高脱模性和抗粘模能力。

离子渗氮温度以 450 ~ 520℃ 为宜, 经处理 6 ~ 9h 后, 渗氮层可达 0.2 ~ 0.3mm。温度过低, 渗层过薄, 温度过高, 则表层易出现疏松层并降低抗粘模能力。

离子渗氮的渗层厚度以 0.2 ~ 0.3mm 为宜。磨损后的离子渗氮模, 经修复和再次离子渗氮后, 可重新投入使用, 从而可极大地提高模具总的使用寿命。

#### 4. 综合实例

表 3-21 给出了热作模具选材、表面强化处理与使用寿命关系的实例, 以供参考。

表 3-21 热作模具的选材、表面强化处理与使用寿命的关系

模具	材料	原热处理工艺	寿命与失效方式	现热处理工艺	寿命与失效方式
热冲头	3Cr2W8V 钢	1050 ~ 1100℃ 淬火, 630℃ 回火 2 次, 45 ~ 47HRC	200 ~ 350 件, 软化变形和开裂	1275℃ 加热, 300 ~ 320℃ 等温淬火, 46 ~ 48HRC	1500 ~ 2200 件, 不再开裂
热挤压模具	3Cr2W8V 钢	1050℃ 淬火, 620℃ 回火 2 次, 45 ~ 48HRC	1200 件, 早期开裂	1200℃ 淬火, 680℃ 回火 2 次, 40 ~ 45HRC	3300 件, 变形和疲劳
热挤压冲头	3Cr2W8V 钢	1050℃ 淬火, 620℃ 回火	200 件, 开裂	改用 4Cr3Mo2NiVNb 钢, 1150℃ 淬火, 2 次回火, 39 ~ 42HRC	650 ~ 700 件
热冲头	3Cr2W8V 钢	1100℃ 淬火, 600℃ 回火 2 次, 47 ~ 51HRC	250 件, 开裂	1200℃ 淬火, 680℃ 回火, 40 ~ 45HRC	500 件, 变形及磨损
精锻锥齿轮模	3Cr2W8V 钢	常规工艺处理	寿命低, 开裂	1150℃ 和 1050℃ 两次加热淬火, 600℃ 回火 2 次, 45 ~ 48HRC	500 件
粗锻锥齿轮模	3Cr2W8V 钢	常规工艺处理	2000 件, 齿形堆塌	1150℃ 加热, 400℃ 等温淬火, 660℃ 回火 2 次, 渗氮, 39 ~ 42HRC	>5000 件
半轴摆模	3Cr2W8V 钢	1075℃ 淬火, 600℃ 回火 3 次, 49 ~ 51HRC	1200 件, 开裂	900℃ 淬火, 600℃ 回火 2 次, 44 ~ 46HRC	>4000 件
锤锻模	5CrMnMo 钢	860 ~ 880℃ 淬火, 燕尾油淬空冷, 480℃ 回火, 32 ~ 35HRC	2500 件, 燕尾开裂	880℃ 加热, 450℃ 等温淬火, 480℃ 回火	6000 ~ 10000 件, 燕尾不再开裂
齿轮毛坯半精锻模	5CrMnMo 钢	840℃ 淬火, 500℃ 回火, 44 ~ 47HRC	414 件, 热疲劳	改用 H13 钢	1780 件, 热磨损

(续)

模具	材料	原热处理工艺	寿命与失效方式	现热处理工艺	寿命与失效方式
精锻齿轮模具	4Cr5MoSiV 钢	48HRC	半轴: 715 ~ 1700 件 行星: 2530 ~ 2400 件	半轴: 改用 5Cr4W5Mo2V 钢, 1140℃ 淬火, 600 ~ 610℃ 回火 2 次, 49HRC 行星: 改用 3Cr3Mo3W2V 钢, 1120℃ 淬火, 550℃ 回火 2 次, 48HRC	1449 ~ 3427 件 5349 ~ 5475 件

## 复习思考题

1. 归纳热作模具的工作条件及失效形式。
2. 热作模具的失效抗力指标主要有哪些? 它与材料性能间的关系如何?
3. 常用锤锻模用钢有哪些? 试比较 5CrNiMo 与 45Cr2NiMoVSi 钢的性能特点、应用范围有什么区别?
4. 确定锤锻模材料和工作硬度的依据是什么?
5. 5CrNiMo、5CrMnMo 钢制锤锻模淬、回火时应注意哪些问题? 锤锻模的燕尾可采用哪些方法处理?
6. 常用热挤压模具钢有哪些系列? 举出各系列的典型钢种, 并比较铬钢、铬钼钢和铬钨钼钢的成分、性能、应用上的区别。
7. 有哪些基体钢可用于制作热作模具, 其性能特点是什么?
8. 热挤压模的预先热处理方法有哪些? 各用于什么场合?
9. 热挤压模对材料性能有哪些要求? 其淬回火工艺制定应注意什么问题?
10. 与其他热作模具相比, 压铸模的工作条件、对材料的性能要求有什么不同?
11. 比较压铸模用钢 3Cr2W8V 与 4Cr5MoSiV 的成分、性能特点。
12. 选择压铸模材料的主要依据有哪些?
13. 分析 3Cr2W8V 钢制压铸模的热处理工艺特点。
14. 有哪些铜合金可以制造压铸模? 与热作模具钢相比有哪些优点?
15. 热作模具钢的强韧化处理工艺方法有哪些? 并分析其原理。
16. 试写出下列模具钢的常规热处理工艺规范: 5CrMnMo、4Cr5MoSiV1、5Cr4Mo3SiMnVAl。