

模具的热处理 和 表面硬化技术

刘昌祺 臧锁海 范洪云 编著

机械工业出版社

模具的热处理和 表面硬化技术

刘昌祺 臧锁海 范洪云 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书从实用出发,通过来自生产实际的实验数据和图形曲线,阐明了提高模具精度、寿命、硬度和耐磨性、耐热性、耐腐蚀性的有效途径,在于正确选择模具材料,热处理方法和表面硬化技术。

通过对本书的学习,可以解决读者在模具热处理和表面硬化技术中遇到的有关问题。本书特点是理论结合实践,以实用为主,内容精练、简洁、新颖、图文并茂。可作为从事模具工作的技术人员,大专院校有关专业师生的参考书。

模具的热处理和表面硬化技术

刘昌祺 戚继海 范洪云 编著

封面设计:方芬 版式设计:张世琴
责任编辑:王国光 张世琴 刘思碯 樊中英

机械工业出版社出版(北京海淀区百万庄南街一号)

(北京市新闻出版局出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787×1092¹/₃₂ 印张4·字数86千字

1992年4月北京第1版·1994年3月北京第2次印刷

印数 4 701—6 700·定价:5.80元

*

ISBN 7-111-03026-5/TG·663

前 言

模具在机械工业中的作用是非常突出的。模具工业早已引起世界各国的高度重视，成为基础工业的重要组成部分，被国际工业界誉为“钥匙工业”和“金属加工业的帝王”。

随着科学技术的发展，产品要在国内外市场具有强有力的竞争力，除了应具备先进的技术水平、稳定的使用性能、结构新颖、更新换代快等特点外，还要求产品价格低廉、造型美观大方。为此，必须使用先进和高效率的生产手段，在满足精度条件下，不断提高生产效率，降低成本。模具就是这种重要手段之一。因此，对模具的精度、性能、寿命和成本等都提出了更高要求。

实践证明，提高模具性能的有效途径除选择正确的加工方法外，关键在于正确选择模具材料、热处理方法和表面硬化技术。本书从实际应用出发，对模具热处理和表面硬化技术作了较实用的论述。

本书由九部分组成。第一部分介绍模具材料的选择。第二至第四部分以模具的淬火回火为中心，介绍了光亮热处理、惰性气体和真空热处理在模具中的应用。第五至第九部分对模具的表面硬化技术作了较详细的论述。首先概括了表面硬化技术的种类，要点及其在模具中的应用。然后以实用数据为依据，介绍了对模具特别有效的表面硬化技术，处理条件和各种硬化层的关系，并介绍了最新表面硬化技术——离子电镀在模具中的应用。此外，对氮化和碳化处理，

碳化钛和氮化钛在模具中的应用作了详细说明。最后，介绍了碳化物的分离方法。

由于作者水平有限，不当之处在所难免，敬请读者指正。

目 录

前言

一、模具用钢的特征	1
1. 对模具的要求	1
2. 模具用钢的分类	4
3. 碳化物的作用	8
二、退火、淬火和回火的处理条件	12
1. 退火的种类	12
2. 完全退火	13
3. 球化退火	15
4. 低温退火	16
5. 淬火的目的是方法	17
6. 回火的目的是方法	20
7. 加热介质和冷却剂	21
8. 硬度等力学性能	24
9. 淬火回火的组织变化	34
10. 碳化物的变化	35
11. 变形和尺寸变化	37
三、惰性气体的光亮热处理	43
1. 惰性气体的种类和杂质	43
2. 管道和炉墙材料	44
3. 氮气的光亮加热	45
四、真空热处理	48
1. 真空及其单位	48
2. 真空热处理炉	49

3. 合金元素的蒸发	51
4. 升温 and 冷却的特征	53
5. 光亮性和表面粗糙度	56
6. 高速工具钢的真空气体淬火	58
五、表面硬化技术及其在模具中的应用	63
1. 表面淬火	63
2. 扩散式表面硬化	65
3. 干式覆盖法的表面硬化	68
4. 湿式覆盖法的表面硬化	73
六、离子电镀的应用	75
1. 离子电镀的种类和原理	75
2. 离子电镀的特征和存在的问题	78
3. 对模具用钢进行碳化钛和氮化钛的覆盖	81
七、氮化的应用	91
1. 氮化的种类和特征	91
2. 模具用钢的气体氮化	94
3. 模具用钢的离子氮化	101
4. 扩散层内的氮化物	103
八、覆盖碳化物的应用	106
1. 粉末法	106
2. 盐浴法	109
3. 涂敷剂法	110
九、组织试验和碳化物的取出	112
1. 组织试验法	112
2. 碳化物的取出法	117
参考文献	121

一、模具用钢的特征

随着工业生产的迅速发展，对模具提出了高精度、高效率和高寿命的要求。模具能否达到上述要求，其材料的选择是极为重要的。所谓选择优质的模具材料，前提是能够有效地满足模具的使用要求。因此选择模具材料时必须考虑如下条件：

1) 生产批量；2) 加工制品的形状；3) 制品要求的精度；4) 被加工材料变形的难易程度；5) 加工的类型和方法。

此外，还应考虑：

1) 选用材料的热处理性能；2) 机械加工性能；3) 使用可靠性；4) 经济性等。

1. 对模具的要求

根据制品的种类不同，相应地模具的类别也不一样。一般说来，模具包括冲压模、塑料模、压铸模、锻模、粉末冶金模、陶瓷模、橡胶模、玻璃模和铸造模等。不同的模具，性能要求也不一样。为使模具有良好的耐磨性，多采用高硬度的钢种，进行淬火、回火的热处理。耐磨性对模具的寿命影响很大。但是，有时即使耐磨性较好的模具在使用中也会出现破裂和挤伤。为此，对模具必须进行适当降低耐磨性而获得较好冲击韧度的热处理。如果要求模具既要有良好冲击韧度，又要有耐磨性时，则可对模具表面进行硬化处理。对于热锻和塑料成形模具，还要求具有耐热性。

硬度

硬度是模具要求的最基本性能之一。为了使钢硬化，必须采用淬火热处理。淬火硬度的高低与钢的含碳量多少成正比，含碳量高则淬火硬度也高。此外，即使同一种钢，其淬火硬度也受到淬火时奥氏体化的温度、加热保持时间和回火温度的影响。通常，只要淬火温度在规定的奥氏体化温度范围内，并采用低温回火，就能使模具得到高的硬度。值得注意的是，因为高速钢在回火时存在二次硬化现象，所以在 $540\sim 570^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内，由于二次硬化能得到最高的硬度。

耐磨性

一般说来，模具的硬度越高，其耐磨性也越好。但是，由于钢种不同，即使硬度相同，耐磨性也不尽相同。这是因为在各种钢种中所含的合金元素的种类和数量对耐磨性有很大的影响。在模具用钢中添加的合金元素有铬(Cr)、钨(W)、钼(Mo)和钒(V)等。这些合金元素在淬火时与钢中的碳元素化合而形成碳化物。众所周知，碳化物对提高模具的耐磨性有很大的作用。

耐冲击性

许多模具因要求耐磨性而重视硬度。但是对于冷锻模具，因为这种模具在工作中受到较强的冲击力，所以必须重视这种模具的耐冲击性。例如，用高速钢W6Mo5Cr4V2制作的冷锻模进行六角螺栓的镦粗加工时，对这种模具的淬火，回火要求是奥氏体化温度要低，回火温度要高。这样，可以把硬度控制在HRC60以下，而耐磨性可以提高几倍。一般说来，冷加工成形用的冲模钢Cr12MoV的回火温度范围是 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。有时为了提高冲模的耐冲击性，其高温回火的

温度范围是600℃左右。

淬火的硬化深度

按照模具的使用条件不同，要求模具的淬火硬化深度也不尽相同。有的模具只要求表面硬化；有的模具不仅要求模具表面硬化，而且要求模具内部也要有一定的硬度。前者用于受强烈冲击的模具；后者用于受重负荷的模具。

根据钢材的淬透性和使用效果可以推测出它的硬化深度。但是应考虑到合金元素对其硬化深度有很大的影响。图1-1所示为各种模具用钢的淬火特性曲线。根据图1-1的淬火特性曲线可判断Cr和Mo成分的锻造模具钢5CrMnMo和模具钢SKD12的淬透性较好，而碳素工具钢的淬透性则很差。这种淬透性，即使对同一种钢，也受到晶

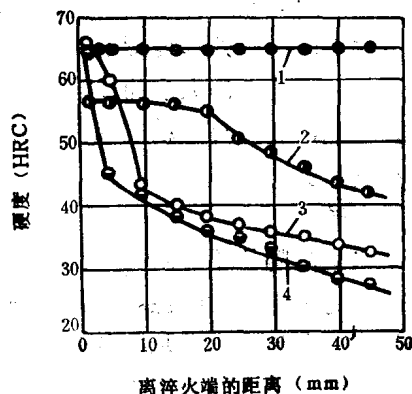


图1-1 模具用钢的淬火特性曲线
1—SKD12(980℃油冷) 2—5CrMnMo
(860℃油冷) 3—CrW(850℃油冷)
4—T10(800℃水冷)

粒度的影响。因此提高淬火时奥氏体化的温度，增大奥氏体晶粒度，从而提高淬透性。在模具的设计与制造时必须注意按照模具的使用要求正确选择淬火的硬化深度。

热处理变形

许多精密模具要求高精度和高硬度。但是，由于热处理后进行精加工是很困难的，因此对于精度要求特别高的模

具，应选择热处理变形特别小的钢种，以减小精加工余量。这样，可降低淬火时的奥氏体化温度，即在空冷中可以硬化的钢材也是理想的模具材料。如果选择淬火时水冷硬化的钢材就不恰当了。

即使同一钢种，变形量的大小也受到热处理方式和条件，以及模具形状的影响。根据模具的实际要求，综合考虑，对于要求高硬度的塑料成形模具，可以采用预先经过淬火回火后的毛坯进行精加工。因为精加工是最后工序，所以没有必要考虑热处理变形的问题。

众所周知，淬火前的残余应力也是导致热处理变形的原因。为此，要求尺寸精度高的模具，有必要进行消除应力的退火处理。

耐热性

当模具随使用时间的增加而温度逐渐上升时，就要求这种模具具有一定的耐热性。模具随温度上升而硬度降低的程度受钢中合金元素种类及其含量的影响。因为Mo、Cr、Co等合金元素在回火时能防止模具用钢回火软化，所以这种模具常选用含有Mo、Cr、Co等合金的钢种。

耐蚀性

对于冷加工成形模具不要求具有耐蚀性。然而对于塑料成形模具，却要求具有良好的耐蚀性。特别是塑料制品是氟化乙烯基系列树脂时，在注射成形时将产生大量的强腐蚀性气体，严重地腐蚀模具。因此制造这种模具时，应选择耐蚀性好的13Cr、18Cr等马氏体系列的不锈钢。最近，常采用含碳量少的析出硬化型的高强度热处理钢，作为模具用钢。

2. 模具用钢的分类

(1) 工具钢

根据工具钢的成分，把工具钢分为碳素工具钢、合金工具钢和高速工具钢等三大类。此外，为了在设计 and 制造模具时便于正确而方便地选择工具钢，表1-1从耐磨性和韧性方面对工具钢进行了分类。这种分类法是以含碳量为基准的，即以含碳量多的钢种开始，按耐磨性、切削性、一般性和耐冲击性的次序排列。按这种方法排列的每一组钢，淬火的难易程度和在使用中随温升而抗软化程度也是有区别的。

表1-1 从耐磨性和韧性的关系对工具钢的分类

用 途	允许淬火变形	避免淬火变形	避免受热软化
耐磨性	CrW5, CrO6, T13, W3CrV,	Cr12W, Cr12, Cr12MoV	SKH3, SKH4, SKH4B, SKH5, SKH10
切削性	T12, W2, WCrV	CrW, WCrV, W2	W18Cr4V, W6Mo5Cr4V2
一般性	T10, CrW, WCrV, V	MnCrWV, CrWMn	3Cr12W8V, 3W4Cr2V
耐冲击性	T8MnA, C60W3, 8V	5CrMn2Si, 5CrNiMo, 50CrMnMo	6CrW2Si, 5CrW2Si, 5CrMnMo, 5CrNiMo

碳素工具钢

根据含碳量多少对碳素工具钢进行分类时，将碳素工具钢规定为T13(1.30~1.50%C)~C60W3(0.60~0.70%C)的七种钢种。即使把含碳量增加到0.6%以上，碳素钢的淬火硬度也几乎不发生变化。之所以把碳素钢的含量规定在0.6%以上，是因为虽然基本硬度相同，但更硬的碳化物(碳素工具钢中的碳化物)越分散，越能提高耐磨性。

此外，虽然碳化物(Fe_3C)相同，但是微小的球状碳化物比粗大的网状碳化物不容易发生淬裂，这有利于提高韧性。为此，商用的碳素工具钢一定要进行球化退火处理。

碳素工具钢的理想的淬火组织是在含碳量为0.6%的马氏体中，均匀分布着细小的球状碳化物。此外，为了减小淬火残余应力和分解残余奥氏体，应在 $150\sim 200^\circ\text{C}$ 的温度范围内进行回火。因为碳素工具钢的淬透性不好，如果大型模具选用这种钢材很难得到理想的硬度。

合金工具钢

为了提高碳素工具钢的淬透性，必须在其中添加一些合金元素。众所周知，特别是合金元素Cr（铬）不但能提高淬透性，而且能提高耐磨性和韧性。为此，在各种合金工具钢中必须添加Cr这一合金元素。

因为冷作模具对耐磨性有严格要求，为保证这种模具的质量，对Cr12，Cr12MoV和Cr12W几种模具钢进行了标准化。这些模具钢的含碳量都很高，使大量的Cr合金元素的碳化物均匀分布，所以大大提高了模具的耐磨性。在这种情况下主要的碳化物是 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ ，比碳素工具钢(SK)系列和合金工具钢(SKS)系列要硬得多。

此外，要求含碳量低于0.3%~0.4%的热作模具用的模具钢也规格化了。为了防止模具因急冷急热造成反复膨胀收缩而产生龟裂，必须减少含碳量，从而减少淬火时未溶解的碳化物。此外，对于含碳量在0.5%~0.6%的锻造模具钢系列也标准化了，但对回火条件尚未规定。

高速工具钢

含有Mo，W和V等合金元素的钢在 $500\sim 600^\circ\text{C}$ 的温度范围内进行回火时，将析出 Mo_2C ， W_2C 和VC等碳化物而呈现

二次硬化现象。这种二次硬化的硬度往往比淬火硬度高。高速工具钢这种二次硬化的性质不但对高速切削有利，而且对随工作而升高温度的模具也特别有利。

一般说来，高速工具钢有两种系列，即以W18Cr4V为代表的W（钨）系列和以W6Mo5Cr4V2为代表的Mo（钼）系列。Mo系列的韧性比W系列的韧性好得多。

此外，在日本JIS标准中对添加Co（钴）合金元素的高速工具钢也进行了标准化。但是，Co这一合金元素不能在高速钢中形成碳化物，而只能固溶在母材当中。为了提高奥氏体中碳化物的固溶度，采取增加抗回火软化的阻力，有利于提高高温硬度。为此，含Co合金元素的高速工具钢适用于制作强力切削和难切削材料的加工刀具。

日本的高速工具钢SKH5比其它的高速工具钢的含碳量虽然低一些，但Co合金元素的含量为16%~17%。这样，由于添加了Co合金而增加了高速工具钢的硬度。此外，还由于碳化物的析出产生二次硬化之外，Co合金元素的金属间化合物的析出也产生硬化现象。

高速工具钢与其它钢种不同，可利用它的二次硬化现象在550℃进行回火。这样可以使残余奥氏体的分解和二次碳化物的析出在反复回火2~3次条件下充分进行。

（2）不锈钢和高强度热处理钢

对于耐热性和耐腐蚀性有特殊要求的塑料成形模具，大多数情况下要使用不锈钢和高强度热处理钢。当模具要求有较高的耐腐蚀性时，虽然也可选用奥氏体系列的不锈钢，但是考虑到既要满足耐腐蚀性要求，又要提高模具的耐磨性，最好是选择马氏体系列的不锈钢。马氏体系列的不锈钢有13Cr和18Cr两种钢号。前者相当于3Cr13不锈钢，后者相当

于9Cr18不锈钢。这两种不锈钢广泛用于塑料成形模具。

析出硬化型的不锈钢也被利用了。这是因为在固溶化热处理后进行机械加工,最后在500~600℃的温度范围内时效处理时被硬化的。这种析出硬化型不锈钢有17Cr7Ni和15Cr7Ni两种。前者析出Ni或Nb的金属间化合物,所以硬度都很高。

因为高强度热处理钢具有良好的耐热性和耐腐蚀性,所以不仅广泛用于塑料成形模具,而且也大量用于冷作成形模具中。为了提高模具的耐磨性,必须进行氮化处理,从而提高模具表面硬度。

这种析出硬化型不锈钢的特点是含碳量不高,在淬火时可以得到较软质的马氏体。当在450℃左右温度条件下进行时效处理时,其硬度的提高非常显著。之所以会提高硬度是由于10%~18%的Ni和添加的合金元素Mo、Ti、Al之间形成了金属间化合物而被析出,从而使硬度增加了。

3. 碳化物的作用

(1) 模具用钢中的碳化物

经过淬火、回火后的模具用钢主要是由坚硬的碳化物和支承这种碳化物的母材构成的。这种母材经过回火后以马氏体为主体。此外,根据钢种和热处理条件不同有时也含有奥氏体成分。碳化物有直径几微米的一次碳化物和直径在0.1μm以下的微细的二次碳化物两种。表1-2所示为模具用钢碳化物的种类。表中的英文字母M表示金属(Metal),它可以表示Fe或其它合金元素的单独和复合的两种情况。超硬钢种不是模具用钢,但对模具很有用处。在超硬钢中碳化物的含量是相当高的。

表1-2中所示的碳化物是钢中所含碳元素与Fe或与合金元素的化合物。其类型决定于含碳量和合金元素的种类及含

量。如表1-2所示那样，碳化物的硬度很高，这对提高耐磨性有很大的作用。当对模具要求有较高的耐磨性时，应选含有较硬的碳化物的钢种。例如可以选择含有比 M_3C 更坚硬的 M_7C_3 的钢种。当要求模具有更高的耐磨性时，最好选择含有 M_2C 或 MC 的钢种。

表1-2 在模具用钢中的碳化物的种类

渗碳体的量	硬 度 (HV)	模具用钢的渗碳体		主要钢种
		种 类	硬度(HV)	
M_3C	1150~1760	Fe_3C	1150~1340	T10, WCrV
$M_{23}C_6$	1000~1800	$(Cr, Fe)_{23}C_6$	1000~1520	CrW, 3Cr13
M_7C_3	1800~2800	$(Cr, Fe)_7C_3$	1820	Cr12MoV Cr12
M_2C	1800~3000	Mo_2C	1800~2200	W6Mo5Cr4V2
		W_2C	1900	W18Cr4V
M_6C	1600~2800	Fe_4Mo_2C	1670	W6Mo5Cr4V2
MC	2250~3200	$VC(V_4C_3)$	2500~2800	超 硬
		WC	2400~2740	
		TiC	3200	

众所周知，如果对能够淬火的钢种只进行淬火处理时，淬火后的材料脆性很大，不能使用。为了提高淬火的材料韧性，必须在淬火后进行回火处理。这时碳化物将起很大的作用，即退火时存在的碳化物通过淬火后全部或一部分固溶于基体中。通过回火处理之后，这些固溶体作为二次碳化物而析出来了，从而降低了母材中的含碳量，因此回火处理后的钢材的韧性大为增加了。

(2). 各种碳化物的性质

Fe_3C

Fe_3C 是钢中最基本的碳化物。在碳素钢或低碳钢中，特别是在合金钢中的 Fe_3C 碳化物中的部分Fe原子被合金元素Cr, W, Mo等置换后，其总称用 M_3C 的碳化物形式来表示。

当钢在淬火后在200℃左右的温度条件下进行回火时，将有 ϵ 碳化物析出（这种碳化物总称为 Fe_2C 或 Fe_{7-8}C ）。若再在300℃以上温度条件下进行回火时，则变成 Fe_3C 。这种在回火过程中发生变化的碳化物叫做迁移碳化物。在 ϵ 碳化物之外尚存在许多其它类型的碳化物。

M_{23}C_6

M_{23}C_6 形式的碳化物主要存在于Cr的高含量钢中，如各种不锈钢和高速工具钢。这种碳化物 M_{23}C_6 在淬火或固溶化处理条件下，容易固溶在母材中，并只在高温回火时才能析出。当只有合金元素Cr时，其碳化物的形式是 Cr_{23}C_6 或 $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ 。若有Cr、W、Mo等合金元素存在时，其碳化物的形式是 $(\text{Cr}, \text{FeW})_{23}\text{C}_6$ 或 $(\text{Cr}, \text{Fe}, \text{Mo})_{23}\text{C}_6$ ，而且硬度增加很多。

M_7C_3

M_7C_3 是存在于高Cr钢中的碳化物，其表示形式是 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 。 M_7C_3 这一碳化物与其它碳化物相比较形状粗大，特点是淬火后难以固溶在母材中。并且，无论是淬火还是回火状态下均有大量的 M_7C_3 碳化物存在，从而大大地提高了Cr12MoV这种模具钢的耐磨性。此外，由于含有 M_7C_3 碳化物的钢在锻造方向或压延方向上呈纤维状分布，所以这种钢在淬火回火后的尺寸变化和冲击值均有方向性。

M_2C

存在于高速钢中的碳化物 Mo_2C 和 W_2C ，只要在回火状