

模具材料及其热处理

[日] 佐藤忠雄 著
相沢力



机械工业出版社

模具材料及其热处理

[日] 佐藤忠雄 著
相沢力

叶心德 译
冯家骅 校



机械工业出版社

34

本书介绍了各种模具材料（包括碳钢、合金钢、高速钢及硬质合金等）的选用原则，及其物理与机械性能、热处理理论基础、设备与工艺实践。书中实用图表资料较多。

可供金属压力加工、热处理、模具设计和制造的技术人员、高等院校有关教学人员参考。

2964/17

プレス型材料と热处理

佐藤忠雄 共著
相沢力

日刊工業新聞社

昭和47年5月15日

* * *

模具材料及其热处理

佐藤忠雄、相沢力 著

叶心德 译

冯家骅 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787×1092 1/32 · 印张10¹/₈ · 字数220千字

1982年2月重庆第一版·1982年2月重庆第一次印刷

印数10,001—15,000 · 定价1.05元

*

统一书号：15033·4947

T9162/83
16366
1

译者的话

随着我国工业战线高速高效自动化生产的日益发展，在汽车、电机、电子和电器制造等工业部门中，压力加工生产的自动化是一个十分重要的问题，而其中的关键是模具材料的选择、模具的制造和使用。制造出使用性能好、寿命高的模具已经是现代化工业生产中必不可少的一个环节。本书作者基于大量的试验结果和资料，较系统地阐明了模具材料选择的原则和模具加工、特别是热处理中需注意的各种问题。原著文字简炼，理论计算简明易懂，而所阐明的的问题却很有实用价值。为便于阅读译者增加了一个附录：国内外常用模具材料牌号对照表。译者深信，本书对从事设计、制造和使用模具的工人和技术人员将有所帮助。

本译文曾经嘉兴动力机械厂钱意章同志初校，特在此表示感谢。

由于译者水平有限，译文中难免有不妥和错误之处，请同志们批评指正。

译者于杭州

序 言

近年来，随着汽车和小型电机制造等工业的发展，压力加工也获得了惊人的进步。压力加工容易实现大批量生产，而且，产量越大，优越性越显著。压力加工中所用模具的特性和制造是否适合于大批量生产，在很大程度上决定了压力加工的效果。即使是在生产批量较小的情况下，也得考虑模具的性能，如何制造和处理的问题。换句话说，根据采用的压力加工方式来选择模具材料，最重要的选择标准是模具的性能、寿命和制造的难易程度。

在本书中将重点研究下列各种塑性变形工艺所用的模具材料：

- i) 压力成形 (press forming);
- ii) 拉深 (deep drawing);
- iii) 冲裁 (blanking & punching);
- iv) 冷挤压 (cold extrusion);
- v) 压印和模压 (coining & embossing);
- vi) 冷镦 (cold heading, upsetting)。

由于各种加工方法对模具的性能要求各不相同，所以要论述所有模具材料就非常困难。为了恰当地使用模具材料，本书以上述加工方法中所使用的工具钢为主，对模具材料的

选择、它们的特性和加工工艺、特别对于热处理工艺提供了必要的资料和数据，本书以大量资料为基础，对上述问题作了较详细的阐述。如能对从事压力加工的现场技术人员或研究人员有所帮助，作者将感到非常荣幸。

作者 一九七二年五月十五日

目 录

第一章 模具钢应具有的性能	1
1.1 耐磨性	1
1.1.1 磨损现象	1
1.1.2 工具钢的基体	3
1.1.3 分布在工具钢内的碳化物	9
1.2 淬透性	15
1.3 影响模具材料耐磨性的因素	19
1.3.1 模具材料和被加工坯料与模具磨损的关系	19
1.3.2 模具材料的硬度和钢种与模具磨损的关系	21
1.4 模具钢的基体及其中散布碳化物的作用	22
1.4.1 模具钢基体的性能	22
1.4.2 碳化物的作用	26
1.4.3 模具钢的强韧性	34
1.5 淬火开裂和淬火变形	35
1.5.1 内应力的产生	35
1.5.2 残余奥氏体对内应力的影响	36
1.5.3 质量效应和淬透性对内应力和回火的影响	38
1.6 时效变形(经年变形)	43
第二章 碳素工具钢的种类和特性	48
2.1 普通碳素工具钢	48
2.1.1 淬透性	48
2.1.2 球化退火和淬火	51
2.1.3 回火	52
2.2 含钒碳素工具钢	56

第三章 低合金工具钢的种类和特性	59
3.1 含锰低合金工具钢	59
3.1.1 1Mn-0.5Cr-0.5W 系和1Mn-1Cr-1W系	59
3.1.2 2Mn系和 2Mn-1Cr-1.3Mo系	65
3.2 含铬低合金工具钢	72
3.3 含铬和钨低合金工具钢	77
3.3.1 0.35Cr-0.75W 系, 0.75Cr-0.75W系和 0.75Cr-1.25W 系	79
3.3.2 1Cr-1.2W 系	81
3.3.3 0.6Cr-1.6W 系和1.1Cr-2W 系	84
第四章 高铬合金工具钢的种类和特性	87
4.1 高铬合金工具钢的组织	87
4.2 5%Cr 系高合金工具钢	90
4.2.1 淬透性与淬火	90
4.2.2 回火	92
4.3 12%Cr 系高合金工具钢	96
4.3.1 淬透性与淬火	96
4.3.2 回火	100
4.4 高钒-高铬系高合金工具钢	106
第五章 高速钢的种类和特性	115
5.1 高速钢的成分	115
5.2 高速钢的组织	118
5.3 高速钢的分级淬火(马氏体等温淬火)	119
5.4 高速钢的回火	122
5.4.1 二次硬化与回火重复次数	122
5.4.2 冰冷处理	124
5.4.3 因回火引起的机械性能的变化	125
5.5 高速钢在热处理时产生的尺寸改变	132
5.6 高速钢热处理与时效变形	133

5.7 高速钢的高温硬度	136
5.8 高速钢的可切削性	137
5.9 高速钢的表面处理	138
第六章 硬质合金	141
第七章 模具材料的选择	143
7.1 冷挤压模具材料的特性和使用方法	143
7.2 冷挤压模具材料的选择	144
7.3 冲裁模具材料的选择	152
7.4 冷锻模具材料的选择	158
7.5 冷冲压成形模具材料的选择	161
7.6 拉深模具材料的选择	163
7.7 压印(模压成形)模具材料的选择	164
第八章 模具钢的热处理基础	166
8.1 工具钢的相变和组织	166
8.2 退火的基础知识	172
8.2.1 球化退火(Spheroidizing)	172
8.2.2 普通退火	176
8.3 淬火的基础知识	176
8.3.1 马氏体转变	176
8.3.2 残余奥氏体	179
8.3.3 淬火温度与保温时间	182
8.3.4 临界冷却速度与淬透性	185
8.3.5 残余应力与淬火开裂	188
8.3.6 防止淬火开裂的措施	196
8.3.7 防止开裂所采取的淬火方法	197
8.4 回火的基础知识	199
8.4.1 回火时组织的变化	199
8.4.2 回火温度与韧性	202
8.4.3 回火保温时间	203

8.4.4 回火次数	206
8.4.5 回火开裂	208
8.5 氧化、脱碳、渗碳	210
8.5.1 热处理时有关表面反应的基础知识	210
8.5.2 防止氧化和脱碳所采取的热处理方法	214
第九章 热处理设备	222
9.1 热处理炉	222
9.1.1 电炉	222
9.1.2 盐浴炉 (Salt bath)	224
9.1.3 流动粒子炉	226
9.1.4 火焰炉	227
9.1.5 真空炉	227
9.2 回火设备	228
9.3 冷却装置和冷却剂	230
9.3.1 冷却槽	230
9.3.2 淬火冷却液	231
第十章 温度测定	234
10.1 温度计	234
10.1.1 热电偶温度计 (热电偶高温计)	234
10.1.2 光学高温计	236
10.2 炉内温度分布的测定	236
第十一章 模具材料热处理实践	238
11.1 碳素工具钢模具材料的热处理	238
11.1.1 碳素工具钢热处理所必需的基本特性	238
11.1.2 碳素工具钢模具材料的退火	239
11.1.3 碳素工具钢模具材料的淬火	241
11.1.4 碳素工具钢模具材料的回火	246
11.2 低合金工具钢模具材料的热处理	248
11.2.1 低合金工具钢模具材料热处理所必需的	

基本特性	249
11.2.2 低合金工具钢模具材料的退火	249
11.2.3 低合金工具钢模具材料的淬火	253
11.2.4 低合金工具钢模具材料的回火	259
11.3 高合金工具钢模具材料的热处理	263
11.3.1 高合金工具钢模具材料热处理所必需的基 本特性	264
11.3.2 高合金工具钢模具材料的退火	265
11.3.3 高合金工具钢模具材料的淬火	267
11.3.4 高合金工具钢模具材料的回火	274
11.4 高速钢模具材料的热处理	280
11.4.1 高速钢模具材料热处理所必需的基本特性	280
11.4.2 高速钢模具材料的退火	282
11.4.3 高速钢模具材料的淬火	284
11.4.4 高速钢模具材料的回火	289
11.4.5 高速钢模具材料的低温淬火法	293
附录 国内外常用模具材料牌号对照表	298
索引	300

第一章 模具钢应具有的性能

根据加工成形坯料的种类和尺寸、压力机的性能、压力加工的方法和产品数量等等具体情况，对模具性能提出了相应的要求。为了适应多方面的要求，所选用的模具材料必须具有优良的综合性能。为此，充分了解模具材料的性能是十分必要的。

1.1 耐 磨 性

在压力加工中经常遇到模具寿命问题。决定模具寿命最重要的因素是模具材料的耐磨性。当然也有的模具材料不是因耐磨性，而是因模具承受不住压力而开裂或折断。这时，造成模具早期损坏是由于材料的强度和韧性不够，在这种情况下，磨损不是决定寿命的主要因素。

在本章中，除对模具设计，即凸凹模之间的间隙选择、加工工艺、润滑方法以及模具表面光洁度等影响模具寿命的一些因素进行一般介绍外，重点研究的是模具材料的耐磨性问题。

1.1.1 磨损现象

磨损大致可分为三种：i) 机械磨损，ii) 氧化磨损，iii) 熔融磨损。塑性加工时，在凹凸模中间虽然只是进行着被加工坯料的塑性变形，但由于坯料沿着模具表面既滑动又流动，模具材料与坯料间有很大的摩擦力。由于这种摩擦力，模具将受到剪切应力的作用。尽管模具表面的加工精度依然

保持着，但其表面必定被划出或多或少的凹凸的痕迹，这些痕迹与坯料表面的凹凸不平相咬合，在模具表面逐渐产生因剪切应力造成的机械破损。这种在表面发生的机械破损是模具机械破坏的前奏。在这种情况下，如果在模具和坯料之间有一层粘附性好的润滑膜，机械磨损便可以减轻；反之，如果二者之间夹有细而硬的夹杂物如氧化物等，将会使磨损加剧，甚至会引起模具和坯料表面的刮伤或粘咬等缺陷。

作用于模具和坯料之间的摩擦力还产生摩擦热。由于这种摩擦热的产生，会使模具和坯料表面的温度明显上升。在反复进行塑性加工时，若每次产生的摩擦热都积蓄起来，模具表面的温度就会显著升高。此外，因为反复进行加热与冷却，模具反复地受到摩擦，表面薄层便因反复承受剪切应力或热应力而产生高温疲劳，以致使模具发生疲劳破坏。也就是说，对于模具材料，最重要的一点是能够耐受由于这些重复的剪切应力或热应力产生的疲劳破坏。

一般说，硬度与抗拉强度大致成正比，而耐重复应力的疲劳强度与抗拉强度也大致成正比。所以可以考虑用硬度来表示钢的强度。

由于摩擦热，模具表面温度上升，这就促进了模具材料与空气中的氧以及与润滑剂中某些成分的氧化作用。有的模具材料受氧化，表面生成一层薄而致密的粘附性好的氧化膜，这既能良好地保持润滑剂，又有防止模具材料进一步氧化的作用；这样一来，便产生了减轻磨损的效果。用高铬合金工具钢制作的模具就能生成这样一种既能阻止进一步氧化，又具有保持润滑剂效果的薄膜—— Cr_2O_3 膜。

在难以生成这种稳定而薄的致密氧化膜的时候，氧化膜将从模具表面剥离。这种氧化膜的生成和剥离反复交替进

行，就是所谓的氧化磨损。当氧化磨损显著时，由于润滑膜与模具表面失去强的亲和力，造成润滑膜极易破坏，从而使模具与坯料直接接触，这就加大了摩擦力。这样一来，局部摩擦热便骤增，从而产生模具和坯料的粘咬，甚至发生烧伤或焊合。

快速摩擦时，若具备了能引起模具和坯料烧伤的条件，由于模具表面温度急剧上升，就会产生模具材料因其表面薄层温度超过它的熔点而熔融的现象。因此，模具的这一部分就发生局部的熔融磨损。也就是说，在出现因重复剪切应力而引起的机械磨损的同时，常常有氧化磨损和熔融磨损一起发生。

因而作为模具材料，在常温时要求高硬度，在高温时也应尽量保持高硬度，此外，必须要有好的韧性。为此，希望模具材料具有能生成薄而致密、粘附性好的氧化膜的能力，从而达到具有良好地保持润滑膜、并且具有防止粘咬、烧伤和焊合的性能。

1.1.2 工具钢的基体

模具材料的性能：耐磨性、韧性、热处理变形和可切削性等等，都由模具材料的成分和热处理后的组织所决定。工具钢热处理后的组织是由基体马氏体、以及在基体上散布着的碳化物和化合物等构成的。

(1) 碳素工具钢的基体

SK3或SK5等碳素工具钢，如Fe-C状态图所示，其成分属于过共析钢。一般来说，淬火回火状态的基体是马氏体，其上分布着 Fe_3C 。若进行 250°C 以下的回火，马氏体内便析出微细的 ϵ 碳化物($\text{Fe}_{2.4}\text{C}$)组织。

Fe_3C 可分为在淬火组织中残存的初析 Fe_3C 和 250°C 以

上回火时从马氏体中析出弥散的 Fe_3C 。初析 Fe_3C 主要是从热加工温度冷却下来时，在约 900°C 至 800°C 之间从奥氏体的晶界析出，而在淬火时，在淬火温度保温时间内未能溶入奥氏体而余留下来的。退火时可使它球化。

因为碳素工具钢淬火温度多在 780°C 左右，所以这时奥氏体内饱和含碳量为 $0.8\sim 0.9\%$ 。当加热至淬火温度的加热速度适当，并且淬火保温时间足够充分时，在 SK5 钢中只有奥氏体，所有游离碳化物将全部溶入奥氏体而呈饱和状态。而 SK3 中则有 $0.2\sim 0.3\% \text{C}$ 作为 Fe_3C 残留下来，它溶于奥氏体的饱和含碳量与 SK5 完全相同，亦为 $0.8\sim 0.9\%$ 。所以，如用大于上临界冷却速度的冷速进行淬火，如图 1.1^[1] 所示，无论 SK3 或是 SK5，马氏体的硬度应该是大致相同的，其淬火硬度都为 HRC65 左右。

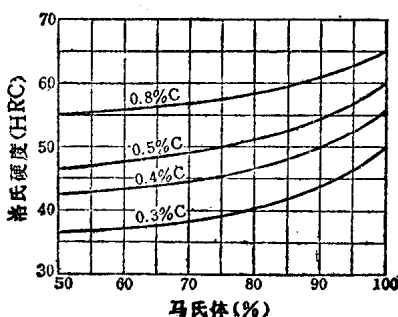


图 1.1 马氏体组织的硬度与含碳量的关系^[1] (J. M. Hodge and M. A. Orchoski)

虽然，在 SK3 淬火组织中还散布有硬度为 HV1340 左右的 Fe_3C ，因为其量很少，所以当洛氏硬度计的金刚锥压入时，几乎不显示抵抗作用。也就是说，可以认为相当于硬度 HRC 65 的 SK3 钢的塑性变

形抗力也就是基体的塑性变形抗力。如图 1.2 所示，碳素工具钢的完全淬火硬度意味着其被 $0.8\sim 0.9\% \text{C}$ 所饱和。

(2) 改善马氏体强韧性和硬度的合金元素

强化碳素工具钢的基体，并且改善其淬透性，减少淬火

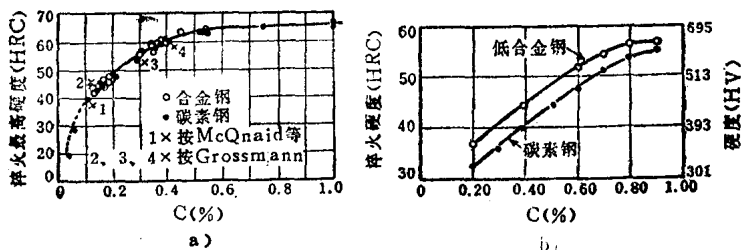


图 1.2 淬火硬度与含碳量的关系 (马氏体的硬度) (A. E. Focke, IRON AGE, 150 (1942), 43)
a) 100% 的马氏体时 b) 50% 的马氏体时

开裂和变形, 是提高模具性能的途径之一。

如图 1.2 所示, 对低合金钢中马氏体的硬度来说, 即使添加合金元素, 也不能期望产生多大的效果。由于过共析钢马氏体所固溶的碳浓度大致与共析点的碳浓度相同, 而马氏体的硬度又由 C% 所决定, 所以了解共析点的含 C% 与合金元素添加量间的关系是极为重要的。如果添加合金元素后共析点 C% 下降得少, 而共析温度上升也少, 所添加的合金元素在奥氏体内大量固溶, 并使 α -Fe 强化, 又容易与碳元素相结合, 阻碍从马氏体中析出 Fe_3C ; 那么, 添加这样的元素对提高马氏体的硬度和强韧性是有利的。

如图 1.3 所示^[2], 使共析点 C% 下降最少的是 Ni, 顺次是 Mn, Cr, Si, W, Mo 和 Ti。另外, 在奥氏体中的固溶量也大体上按此顺序。

图 1.4 表示由于合金元素均匀地固溶于 α -Fe 中硬度提高的情况^[2]。P 使硬度增加的效果最大, 顺次是 As、Mn、Ni、Mo、V、W 和 Cr。

如图 1.5 所示^[8], 合金元素对 α -Fe 的屈服强度和抗拉强度的影响与它们对硬度的影响倾向大致相同。而 Si 则使

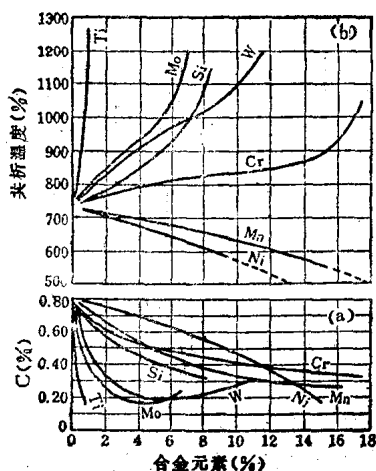


图 1.3 合金元素对共析组成和共析温度的影响 (E. C. Bain)

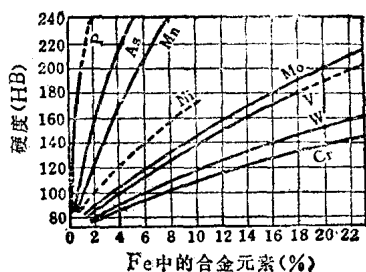


图 1.4 固溶于 α -Fe 中各种元素的硬化作用 (E. C. Bain)

α -Fe 的强度、特别是屈服强度显著上升。

固溶入 α -Fe 的元素对高温蠕变强度的影响如图 1.6 所示^[4]。碳化物形成元素 Mo 和 Cr 的添加极为有效, Ni 和 Co 的效果不怎么大, 但是, Co 在 500℃ 以上时, 对高温强度的改善却极为有效。

(3) 使马氏体提高强韧性和硬度的合金元素的副作用

为使强度和硬度提高, 添加下列合金元素是有效的, 按其有效的程度依次是 P、As、Mn、Ni、Mo、V、W 和 Cr。但是必须防止添加这些合金元素后产生的副作用, 这包括马氏体脆化、残余奥氏体增加、以及硬度下降等。

单独添加 Si 和 W 会促使石墨游离和材质脆化, 必须再加 Cr 防止这些副作用发生。由于 P 和 As 使偏析和冷脆性显著增大, 一般都不添加。如图 1.7 所示^[5], Mn 和 Ni 的加