

常见工模具钢分类及热处理工艺

谢耀洲¹, 董航宇^{1, 2}

1. 武汉科技大学 湖北武汉 430081

2. 湖北民族大学 湖北恩施 445000

摘要: 工模具钢是模具制造业的基础, 它的选择对模具加工行业中的模具设计和制造有着至关重要的作用。工模具钢广泛应用于汽车、航空航天、无线电仪表等行业, 且随着模具加工行业的进步和模具钢的大范围应用, 研究工模具钢的性能就显得十分重要。热处理工艺是将模具钢应用于实际中的重要一环, 合理的热处理工艺可以改善模具钢的强度性能和工艺性能。目前, 在试验研究和实际生产领域已有多种热处理工艺, 并且研究人员仍在致力于更加高效、更加绿色的新工艺开发。主要概述了一些常见的工模具钢热处理工艺, 并对其发展趋势做出展望。

关键词: 工模具钢; 热处理; 热作模具钢; 冷作模具钢; 塑料模具钢

Classification and heat treatment process of common tool and mold steel

XIE Yaozhou¹, DONG Hangyu^{1, 2}

1. Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China

2. Hubei Minzu University, Enshi 445000, Hubei, China

Abstract: Mold steel is the foundation of the mold manufacturing industry, and its selection plays a crucial role in mold design and manufacturing in the mold processing industry. Mold steel is widely used in industries such as automobiles, aerospace, and radio instruments. With the progress of the mold processing industry and the widespread application of mold steel, it is very important to study the properties of mold steel. Heat treatment process is an important part of applying mold steel in practice, and a reasonable heat treatment process can improve the strength and process performance of mold steel. At present, there are various heat treatment processes in experimental research and practical production fields, and researchers are still committed to developing more efficient and green new processes. This article mainly outlines some common heat treatment processes for tool and mold steel, and makes prospects for their development trends.

Keywords: tool and mold steel; heat treatment; hot work mold steel; cold working mold steel; plastic mold steel

1 序言

模具是轻工、机械及国防等各领域产品制造的重要工艺装备。随着中国工业技术的迅速发展, 模

具加工受到越来越多的重视, 在加工领域越来越多地采用精密冲压、精密锻造、压力铸造、冷挤压、热挤压及等温超塑成形等少无切削的新工艺^[1]。工

基金项目: 湖北省自然科学基金项目 (2023AFB560; 2023AFD087)。

通信作者: 董航宇, 讲师, 博士, 主要研究方向为高性能钢铁材料、高熵合金力学行为和失效分析, E-mail: Donghangyu@hbmzu.edu.cn。

具钢按用途可分为刀具钢、模具钢、量具钢、耐冲击工具钢和轧辊用钢。对于常用的模具钢，根据其用途和工作条件可分为三大类，即冷作模具钢、热作模具钢和塑料模具钢。由于其种类的多样性和加工工艺的复杂性，所以有许多研究人员对其热加工和化学成分进行了广泛的研究。经过大量研究发现，对于工模具钢，通过热处理调整材料的结构和组织，不仅可以改善材料的力学性能，还可以改善加工性能，使其满足在铸造、锻造、冲压等领域的广泛要求。经数十年的研究，已探究出许多不同合金元素体系的模具钢钢种。

工模具钢的热处理工艺研发的重点主要在于如何使模具钢的力学性能、物理性能和化学性能得到提高。随着我国坚持“绿水青山就是金山银山”的绿色发展理念，提出坚定不移地走生态优先、绿色发展之路的产业政策，采用绿色设计、生产、加工方式，以及科学的管理方法，通过简单热处理工艺获得高性能的工模具钢，势必成为未来发展的目标。基于此，本文对工模具钢的热处理现状进行综述，并对未来发展趋势做出预测。

2 工模具钢的种类及用途

2.1 冷作模具钢

冷作模具钢是指使金属在冷态下变形或成形所

使用的模具钢。由于冷作模具多为常温下工作，材料的塑性变形抗力大，模具的工作应力大，工作条件苛刻，因此这类模具性能上一般要求具有足够的强度、适当的韧性、较高的硬度和耐磨性。通常而言，模具的耐磨性与硬度、屈服强度有一定的比例关系。表1是冷作模具对硬度的一般要求，但这些要求不是一成不变的，因为有些工件需要在某些极端条件下仍然保持较高的硬度，这需要具体问题具体分析。

在实际应用中，某些模具在满足高强度的同时还需要具有较好的韧性。影响冷作模具钢强度的因素很多，但主要是钢中碳和合金元素的含量及其分布，晶粒的大小、分布的均匀性，以及内应力的存在。在实际生产过程中，可重点关注以上几点来提高钢的强度。而对于韧性的提高，通常需要在钢的热处理方面下功夫。冷作模具钢常采用淬火和低温回火的热处理工艺，为了提高韧性，可以适当提高回火温度，但同时也会降低钢的硬度。值得注意的是，在提高回火温度的同时，需要避开回火过程中的不可逆回火脆性区，防止韧性下降^[2, 3]。部分冷作模具钢的不可逆回火脆性区见表2。

2.2 热作模具钢

热作模具钢是指适宜于制作对金属进行热变形加工模具用的合金工具钢。例如，热锻模、热挤压

表1 冷作模具对硬度的一般要求 (HRC)

类别	单式、复试硅钢片冲模	级进式硅钢片冲模	薄钢板冲裁模	厚钢板冲裁模	拉深模	拔丝模	剪刀	φ 5mm以下冲头	冷镦模
凸模	60~62	56~60	58~60	56~58	58~62	—	54~62	56~58	60~62
凹模	60~62	60~62	58~60	56~58	62~64	>64			58~61

表2 部分冷作模具钢的不可逆回火脆性区 (℃)

钢号	不可逆回火脆性区温度	钢号	不可逆回火脆性区温度
碳素工具钢	200~300	Cr12	300~375
9Mn2V	190~230	Cr12MoV	325~375
GCr15	200~240	Cr6WV	250~350
9SiCr	210~250	5CrW2Si	300~350
CrWMn	250~300	6CrW2Si	300~350

模、压铸模及热锻模等。这类钢的 w_C 一般为0.3%~0.6%，为了满足其反复急冷急热的工作条件，需要在钢中添加W、Mo、Cr、V等合金元素。热作模具钢具有多种分类方式，若按模具的受力状态，可将其分为热锻模、热镦模、热挤压模及压铸模等；按合金元素总量，可将其分为低合金热作模具钢、中合金热作模具钢和高合金热作模具钢；按模具钢的性能特点，又可将其分成高韧性热作模具钢、高热强性热作模具钢和强韧兼具的热作模具钢。在选择热作模具钢时，需要分析热作模具的工作条件及其性能要求才能合理选材，常见的热压模具的型腔表面工作温度处于300~1200℃，而且在工作中还要承受不同类型的载荷。当锻坯与模具型腔表面接触时，模具温度会上升，从而导致模具软化。甚至在高速模锻时，型腔表面的加热速度可达到2000~4000℃/s。

图1所示为高速锻模具一次循环中模具温度的变化（其中1号距离表面0.5~1mm，2号为3~5mm，3号为≥6mm）。从图1可看出，模具在锻造时的表面温度最高可达到950℃，超过了相变温度；在距离表面3~5mm处，模具温度迅速达到了650~750℃，在这样的高温下，模具表层会迅速软化。因此，一般在使用高速模锻时，会添加冷却装置，以防止材料软化变质^[4, 5]。即在设计模具时，需要关注模具的温升及软化、模具的急剧冷却及热疲劳，以及不同类型的应力对断裂堆塌的作用和模具的高温磨损。

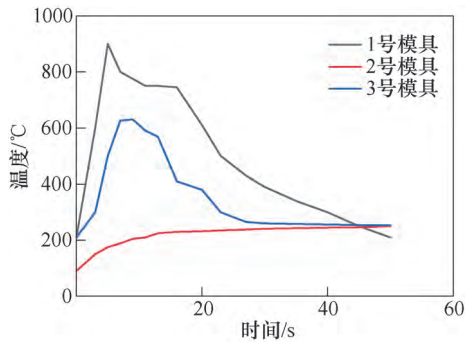


图1 高速锻模具一次循环中模具温度的变化

2.3 塑料模具钢

塑料模具是塑料加工成形过程中不可缺少的部件，其一般可以分为热塑性塑料成形的注塑模和热固性塑料成形的压塑模，这两类模具的工作温度一

般均在200~300℃。虽然塑料模具材料所要求的强度和韧性不如冷作模具和热作模具那样高，但需满足以下性能：一定的综合力学性能、可加工性好、良好的导热性、低的热膨胀系数，以及良好的热加工性能^[6, 7]。此外，在具体实际加工过程中，由于塑料中的氯、氟等其他有害元素可能会以腐蚀气体的方式逸出，从而腐蚀模具，所以塑料模具在满足耐热性的情况下还需具有一定的耐蚀性。

3 工模具钢的常见热处理工艺

热处理工艺对工模具钢的组织与性能影响巨大，不同热处理工艺对同一种钢材产生的影响不同，同种热处理工艺对不同钢材产生的影响也不同。本文在热作模具钢、冷作模具钢和塑料模具钢中各选取一种常见钢材，分别是CrWMn冷作模具钢、5CrMnMo热作模具钢和SM45塑料模具钢，分析其常见热处理工艺。

3.1 CrWMn冷作模具钢的常见热处理工艺

CrWMn是一种低合金冷作模具钢，具有高的淬透性，其化学成分与热处理相关的临界温度见表3。一般加工过程：球化退火→机械加工→淬火→低温回火。

表3 CrWMn钢的化学成分和临界温度

化学成分(质量分数, %)					临界温度/℃			
C	Si	Mn	Cr	W	A_{c1}	A_{cm}	A_{r1}	M_s
0.9~1.05	≤0.4	0.8~1.1	0.9~1.2	1.2~1.6	750	940	710	225

由于在CrWMn钢中比较容易产生网状碳化物，使钢的力学性能降低，且容易造成沿晶断裂，降低钢的耐磨性，所以在对CrWMn钢的预先热处理中通常需要进行锻压和正火。另外，由于W易形成碳化物，这种钢在淬火和低温回火后具有比铬钢和9SiCr钢更多的过剩碳化物和更高的硬度和耐磨性。图2~图6所示为一般情况下CrWMn钢的热处理工艺。CrWMn钢推荐使用的淬火和回火规范见表4、表5。其中，表4中方案Ⅱ和方案Ⅲ适用于形状复杂、要求变形较小的工件^[8-11]。

3.2 5CrMnMo热作模具钢的常见热处理工艺

5CrMnMo热作模具钢具有良好的韧性、强度和

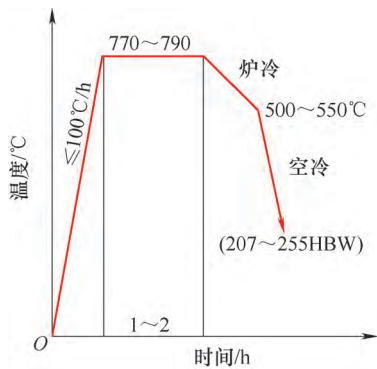


图2 CrWMn钢锻压后退火

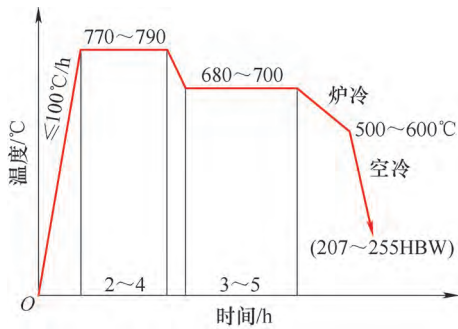


图3 CrWMn钢锻压后等温退火

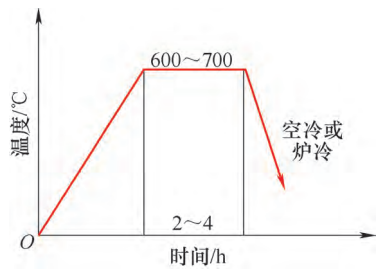


图4 CrWMn钢高温回火

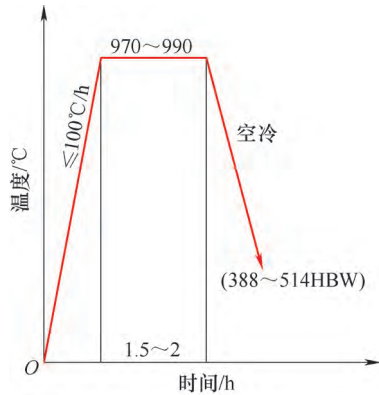


图5 CrWMn钢正火

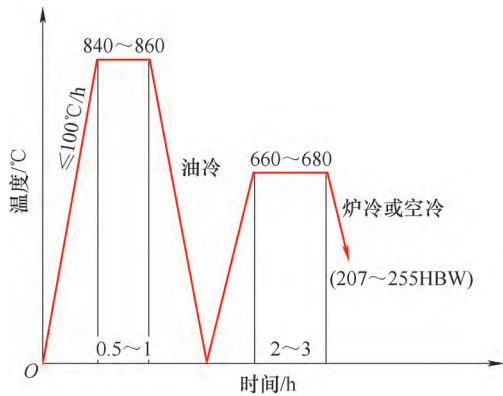


图6 CrWMn钢调质处理

高耐磨性，但其淬透性较差。适合应用于有较高强度和耐磨性要求的模具中。其化学成分及其与热处理相关的临界温度见表6。图7~图9所示为通常情况下5CrMnMo钢的热处理工艺。5CrMnMo钢推荐使

表4 CrWMn钢的推荐淬火规范

方案	淬火温度, /℃	冷却				硬度HRC
		介质	介质温度/℃	延续	至20℃	
I	820~840	油	20~40	至油温	空冷	63~65
II			90~140	至150~200℃		63~65
III	830~850	熔融盐或碱	150~160	3~5min		62~64

表5 CrWMn钢的推荐回火规范

方案	回火用途	加热温度/℃	加热介质	硬度HRC
I	消除应力，稳定组织和尺寸	140~160	油、硝酸盐、碱	62~65
		170~200		60~62
		230~280		55~60

用的淬火和回火规范^[12, 13]分别见表7、表8。

表6 5CrMnMo钢的化学成分和临界温度

化学成分（质量分数，%）					临界温度/℃			
C	Si	Mn	Cr	W	Ac ₁	Accm	Ar ₁	Ms
0.5~0.6	0.25~0.6	1.2~1.6	0.6~0.9	0.15~0.3	710	760	650	22

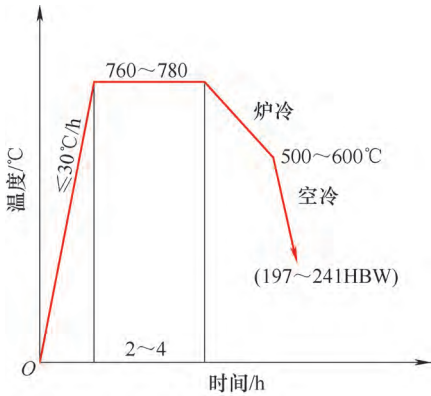


图7 5CrMnMo钢锻压后退火

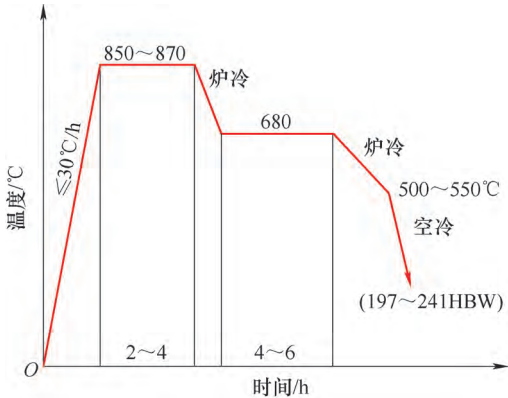


图8 5CrMnMo钢锻压后等温退火

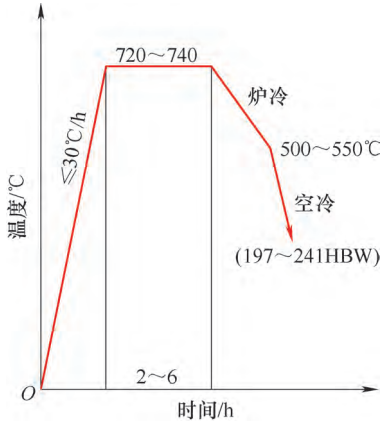


图9 5CrMnMo钢锻模翻新退火

表7 5CrMnMo钢的推荐淬火规范

淬火温度 /℃	冷却			硬度HRC
	介质	温度/℃	方式	
820~850	油	150~180	降至150~180℃后小型模具空冷，大中型模具立即回火	20~58

表8 5CrMnMo钢的推荐回火规范

回火用途	回火部位		加热温度 /℃	加热介质	硬度 HRC
消除应力，稳定组织和尺寸	I 模具工作部分	小型锻模	490~510	煤气灶或电炉	41~47
		中型锻模	520~540		38~41
	II 锻模燕尾部分	小型锻模	600~620		35~39
		中型锻模	620~640		34~37

3.3 SM45塑料模具钢的常见热处理工艺

SM45钢与优质45碳素结构钢相比，其中钢的S、P含量更低，纯净度较好，属于优质碳素模具钢。该钢的优点是价格便宜，切削性能好，在调质处理后有良好的强韧性和耐磨性，但该钢碳含量较高，水淬容易出现裂纹，因此常采用油冷，不适合大尺寸零件，常用于制作中小型塑料模具。其化学成分及其与热处理相关的临界温度见表9。图10、图11所示为通常情况下SM45钢的热处理工艺^[14-16]。

表9 SM45钢的化学成分和临界温度

化学成分（质量分数，%）					临界温度/℃			
C	Si	Mn	Cr	W	Ac ₁	Accm	Ar ₁	Ms
0.42~0.48	0.17~0.37	0.5~0.8	≤0.03	≤0.03	724	780	751	682

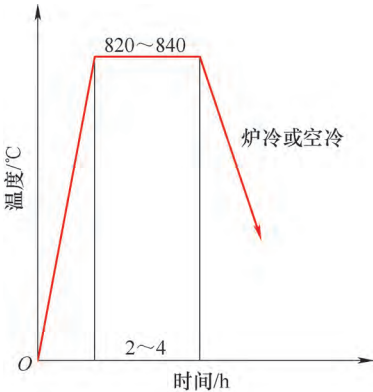


图10 SM45钢锻压后退火工艺

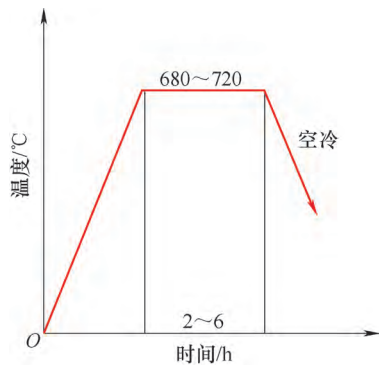


图11 SM45钢高温回火工艺

4 工模具的热处理畸变和开裂

4.1 畸变与开裂产生原理

工模具钢在热处理过程中，可能出现畸变和开裂现象，这会严重影响钢的性能。其主要原因有两个：一是因为钢在加热和冷却过程中会因为表面和中心的温差不同而导致材料各区域热胀冷缩不同；二是材料中各个组织在发生相变时体积变化不同。这两个原因会导致材料内部产生应力，从而引发畸变或开裂。另外，钢的加热、冷却频率越快，截面的尺寸越大，导热系数越小，材料内部的内应力也会越大。当内应力超过钢材的屈服强度时，便会造成材料的畸变，当超过材料的断裂强度时，材料便会开裂。一般而言，因热胀冷缩不同时、不均匀而产生的应力称为热应力；因相变不同时、不均匀而产生的应力称为组织应力。钢中各种组织组成物的比容、马氏体转变时的体积畸变和常见组织转变时尺寸变化分别见表10~表12。

表10 钢中各种组织组成物的比容

组成物	C (质量分数, %)	比体积/ ($\text{m}^3/\text{kg} \times 10^{-9}$)
奥氏体	0~2.11	$0.1212 + 0.0033\% (w_C)$
马氏体	0~2	$0.1271 + 0.0025\% (w_C)$
铁素体	0~0.0218	0.1271
渗碳体	6.7 ± 0.2	0.126 ± 0.001
ε -碳化物	8.5 ± 0.7	0.14 ± 0.002
珠光体	0.77	$0.1271 + 0.0005\% (w_C)$

表11 马氏体转变时的体积畸变

C (质量分数, %)	马氏体密度 / (g/cm^3)	退火状态密度 / (g/cm^3)	马氏体的 体积变化 (体积 分数, %)
0.1	7.918	7.927	0.113
0.3	7.889	7.921	0.401
0.6	7.840	7.913	0.923
0.85	7.808	7.906	1.227
1.00	7.778	7.901	1.557
1.30	7.706	7.892	2.576

表12 常见组织转变时尺寸变化

组织转变	体积畸变 (体积分数, %)	尺寸变化 (%)
球化组织→奥氏体	$-4.64 + 2.21 (w_C)$	$-0.0155 + 0.0074 (w_C)$
奥氏体→马氏体	$4.64 - 0.53 (w_C)$	$0.0155 + 0.0018 (w_C)$
球化组织→马氏体	$1.68 (w_C)$	$0.0056 (w_C)$
奥氏体→下贝氏体	$4.64 - 1.43 (w_C)$	$0.0156 \sim 0.0048 (w_C)$
球化组织→下贝氏体	$0.78 (w_C)$	$0.0026 (w_C)$
奥氏体→铁素体+渗碳体	$4.64 - 2.21 (w_C)$	$0.0155 \sim 0.0074 (w_C)$
球化组织→铁素体+渗碳体	0	0

钢的化学成分、热处理工艺参数，以及工件的几何形状和尺寸，是影响工模具钢畸变的三大要素。对于钢的化学成分而言，C是对淬火畸变影响最大的元素，因为随着C含量的升高，钢中马氏体的含量变大，马氏体变化也会越多，从而因组织相变而引起的淬火畸变越大。但是随着C含量的提高，由于残留奥氏体含量的增加，可以使马氏体相变影响减轻。大部分合金元素会提高钢的淬透性，临界淬火速度下降，因此可以在缓和的介质中进行淬火操作，从而减小内应力，降低畸变发生的概率。对于热处理工艺而言，提高淬火加热温度一般均会使材料的畸变加剧，加热速度和冷却速度对淬火畸变的影响也较大，加热速度和冷却速度太快，会增加材料内部的热应力，因此为减少畸变发生概率，就需要提前预热且加热均匀，并采取合理的冷却介质进行淬火^[17, 18]。工件的几何尺寸对热处理畸变的影响极大，通常情况需要避免工件设计时出

现尖角、内凹形状，但由于工件的形状有很大变化性，难以得出较为同一的规律。

根据热处理裂纹在钢上的分布状态，可以分为纵向、弧状和网状三种形式，如图12所示。纵向裂纹是因切向拉伸应力超过材料的断裂强度而产生的；弧状裂纹是轴向拉伸应力超过材料的断裂强度而产生的；网状裂纹是在多向拉伸应力作用下形成的。

纵向裂纹通常在高淬透性钢中出现，因为钢在淬透时表面会产生较大切向拉应力，除了淬透时可以产生纵向裂纹，原材料中可能在热处理前就存在裂纹或缺陷。

弧状裂纹通常在以下情况形成：第一种是高碳钢中，在截面没有完全淬透的情况下形成；第二种是钢件的几何形状出现明显的尖角、凹槽缺陷；第三种是在表面淬火时，硬化区与非硬化区之间的过渡区存在着较大的切向或轴向拉应力而形成过渡区裂纹^[19]。

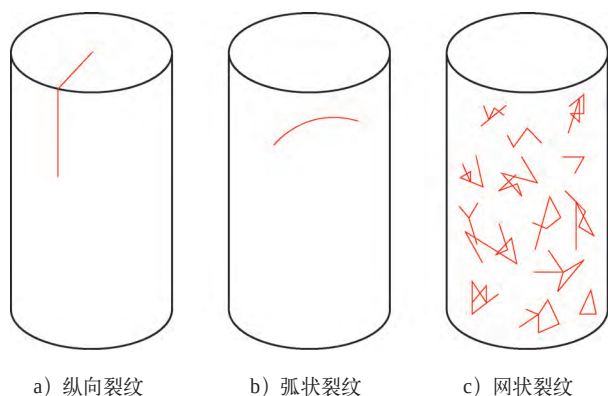


图12 几种常见裂纹形式

4.2 防止畸变和开裂的措施

对于畸变而言，可以通过以下方式减小畸变的影响。

- 1) 根据模具的形状、结构和工作条件选择合适工模具钢。
- 2) 在设计模具时要考虑到畸变和开裂倾向。
- 3) 按照模具的尺寸结构和材料选择合适的加热工艺。
- 4) 调整加热速度。
- 5) 在热处理时可以采用堵塞、绑扎、机械固定等辅助手段防止开裂。
- 6) 合理的淬火和回火工艺对材料畸变的影响巨

大，因此应合理选择淬火冷却介质、淬火温度和回火方式。

对于开裂而言，通常是按钢淬透性进行分类讨论的，即高淬透性钢种、低淬透性钢种和大型非淬透性件。对于高淬透性钢种而言，纵裂是它主要的淬裂方式，这类钢件预防淬火裂纹的原则是尽量减少工件内外发生相变的时间差，防裂的具体措施如下。

- 1) 采用分级淬火、等温淬火和分级淬火加等温淬火等工艺方法降低淬火应力。
- 2) 采用合适的淬火冷却介质。
- 3) 尽可能消除造成零件表面应力集中的因素。
- 4) 尽可能避免钢件在热处理过程中产生的脱碳、增碳、过热和过烧等加热缺陷。

对于低淬透性钢种而言，弧状裂纹是较常出现的一种裂纹，它的产生需要同时满足3个条件：①整体快速冷却。②不能淬透。③具有弧状裂纹形成的几何敏感部位。

在具体生产过程中，需要分析弧裂的真实形成原因，便能分析出合理的有效措施来防止弧裂的产生。如果是材料的结构设计有缺陷，便优化原先模具的结构设计。若在结构设计没有问题的情况下出现裂纹，则首先应该在几何敏感部位进行局部强冷或弱冷来预防开裂，然后再考虑材料淬火工艺，选择合适的淬火方案和淬火冷却介质，通常情况下都是从两个方面采取措施：第一是提高大型零件用钢的综合冶金质量；第二是降低淬火时的热应力，从而改进大型工件的淬火方法^[20]。

对于大型非淬透性件的淬裂，通常需要克服3个困难：第一个是大型零件的开裂一般发生在油冷的淬火条件下，而油淬是较缓慢的淬火方式；第二个是大型零件的断裂多是由于冶金缺陷引起的，而这种缺陷无法提前了解，又难以改变；第三个是大型零件造价昂贵，很少有直接进行工艺试验的措施。

5 工模具钢的先进热处理工艺

科研人员一直持续地在为工模具钢获得更优良的性能而努力，清华大学的鲁思渊对比研究了常规淬火-回火（Q-T）和淬火-配分（Q&P）处理工艺下30Cr13钢微观组织的演变规律。淬火-配分（Q&P）

处理工艺是将钢进行奥氏体化淬火后,在 M_s 点以上的一定温度下进行短时间的等温保持,使淬火马氏体中过饱和固溶C在此过程中完全扩散并配分进入钢中的残留奥氏体中,以保证残留奥氏体在室温下的稳定性,并进而在室温下获得由马氏体和较大数量残留奥氏体组成的微观组织。具体的处理工艺原理如图13所示^[21]。

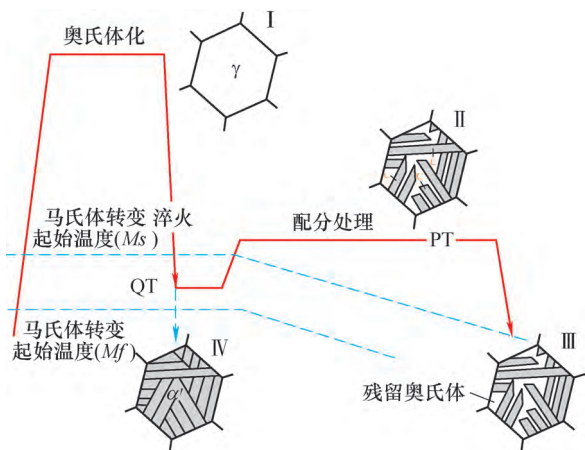


图13 淬火-配分 (Q&P) 处理工艺原理

当前,随着科技的发展,工模具钢的热处理工艺有了许多发展与创新,甚至于改变了热源和环境,或采用冷处理。其中包括真空热处理、深冷处理、气相沉积和激光束热处理等。

5.1 真空热处理

自从真空炉被发明以来,真空热处理技术得到了飞速发展。它是使金属在真空状态下发生相变,具有加热速度缓慢、无氧化、无脱碳和表面净化等特点,是国际上公认的“绿色热处理”^[22-25]。张立文^[26]利用大型非线性有限元软件MSC.Marc对高温合金和钛合金真空热处理及热胀形过程进行模拟研究,并且探索出一种用数值模拟技术精确预测零件真空加热滞后时间的方法。其中,真空加热滞后时间就是当真空炉中测量热电偶升到设定温度时,被加热的工件达到设定温度所需时间,在真空状态下,工程材料可以看作理想灰体,它的传热能力满足斯蒂芬-波尔兹曼定律,表达式为

$$E = \sigma T^4 \quad (1)$$

式中 E ——传热能力 (J) ;

σ ——斯蒂芬-波尔兹曼常量,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

T ——绝对温度 (K) 。

通过式 (1) 可看出,温度越低,工件的传热能力越小。因此,在真空加热时,会出现被加热工件的温度滞后于热电偶。图14所示为真空热处理加热滞后时间曲线。

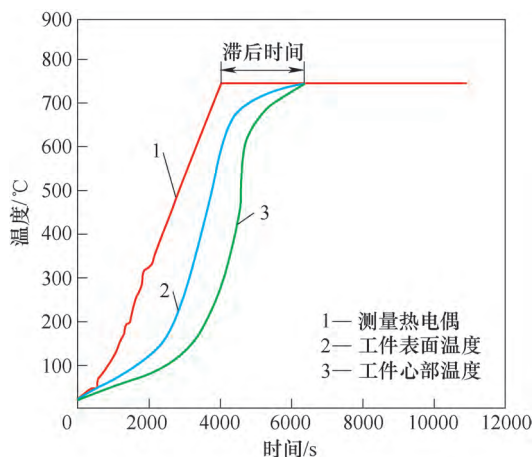


图14 真空热处理加热滞后时间曲线

5.2 深冷处理

深冷处理可在不降低工件强度与硬度的情况下,显著提高工件的韧性,延缓裂纹产生。其通常是以液氮作为制冷剂,在低于 -130°C 的温度下对工件进行处理,是一种常规冷处理的延伸。

在20世纪80年代,该技术传入我国,并在工模具钢上进行了广泛研究和应用,且取得了一定的进展。华中科技大学郭鹏^[27]研究了应用深冷处理对300M钢力学性能的影响与变化规律。发现采用淬火-深冷处理-回火处理后,300M钢的强度和韧性都有下降,这是由于贝氏体增多、孪晶马氏体形成、碳化物粒子增多,以及块状残留奥氏体形成导致的。上海大学的谢尘^[28]采用扫描电镜 (SEM)、X射线衍射仪 (XRD)、透射电镜 (TEM)、高温/低温实时动态模量与内耗测试系统 (IF),结合三维原子探针 (3DAP) 和电阻仪,深入研究了深冷处理对高碳高合金钢SDC99内残留奥氏体、马氏体基体,以及回火后碳化物数量、形态、分布的影响,认为随着深冷保温时间的增加,等温马氏体相变过程中塑性变形导致位错密度升高,位错滑移过程中捕获碳原子,使位错周围碳原子浓度升高,且深冷处理温度越低,SDC99钢中位错密度越高,碳原子偏聚驱动力越大,碳原子在位错附近的偏聚程度加剧。深冷处理作为一种极具前景的材料处理新工艺,在现有材料和工艺的

基础上, 增加一个简单的深冷处理程序, 能够用较低的成本换取高性能^[29, 30]。

5.3 激光束热处理

激光束热处理是一种低消耗、高产出、高效率和无污染的绿色加工技术。激光束热处理中最为常见的便是激光淬火, 其原理是金属材料中自由电子吸收激光光子能量, 使材料表面温度升高, 并且随着材料自身冷却, 奥氏体转变为马氏体, 从而使材料表面硬化的淬火技术。王伟雪^[31]成功使用激光淬火技术, 成功将38CrMoAl和30CrMnSi中碳低合金钢表面改性, 基于氮碳共渗过程中少量N、C元素扩大奥氏体相区的原理, 通过对共渗层激光淬火, 成功实现了改性层层厚倍增。与此同时, 总结了该研究中获得的不同工艺改性层的基本特点及

性能(见表13), 包括表面相组成、基本形貌及渗层硬度与厚度。低温稀土离子氮碳共渗[LT PNC(RE)]的工艺原理是LaFeO₃促进氮化物分解, 形成 $\gamma'-(Fe, La)_4N$, 进一步提高了N的固溶度, 并同时细化组织。离子渗氮/氮碳共渗与激光淬火复合工艺(PN/PNC+LQ)的工艺原理是N元素降低了 $\alpha' \leftrightarrow \gamma$ 转变温度, 在相同的温度梯度下, 奥氏体转变的区域增大, 冷却过程中马氏体相变区域也随之扩大。为进行对比, 表中列举的高温(HT)及低温(LT)离子渗氮(PN)与低温稀土离子氮碳共渗[LT PNC(RE)]的时间数据均为8h。离子渗氮层及稀土氮碳共渗层硬度为渗层表面硬度, 激光淬火(LQ)及复合工艺改性层硬度为渗层内平台的平均硬度^[32-34]。

表13 不同工艺改性层性能

项目	原始基体	PN		LT PNC (RE)	LQ	PN/PNC+LQ
		LT	HT			
相组成	α'	$\gamma'-Fe_4N$ α'_N	$\varepsilon-Fe_{2.3}N$ $\gamma'-Fe_4N$	$\gamma'-(Fe, La)_4N$ α'_N	淬火马氏体 α' , Fe ₃ O ₄	淬火马氏体 α'_N ; Fe ₃ O ₄ 以及低碳化合物
特点	—	(200) γ' 择优取向; 高强韧性 α'_N 层, 组织超细化	白亮层; 脉状组织	白亮层减薄; 渗层增厚; $\gamma'-(Fe, La)_4N$	—	渗硬层层厚提高; 层内硬度倍增
硬度HV	570	≈1380	1016	表面硬度因氮化物分解下降	≈500	800~900
厚度/ μm	—	≈230	≈320	≈300	≈400	>630

6 结束语

目前, 国内外对于工模具钢的热处理进行了许多研究, 有在传统热处理技术基础上研究工模具钢的性能, 也有在先进热处理上进行创新研究。但热处理工艺本身难以改变高耗能产业的现状, 为满足国家提出的“碳达峰”“碳中和”绿色发展理念, 实现新时代绿色生产的要求, 需要相关产业的研究人员积极改变, 努力创新, 在节约能源、减少材料消耗和简化生产工序方面做出相应努力。在对工模

具钢热处理方面, 真空热处理、深冷处理、高能束热处理等先进热处理中有些工艺可以满足绿色热处理的理念, 但这些新型热处理研究主要还是放在材料性能的提升, 缺少主要为了绿色发展生产的研究。因此, 如何在实现提升工模具钢综合性能的基础上, 减少对环境的损害, 则是重要的研究课题。

参考文献:

- [1] 汤猷则. 我国模具技术、产业结构发展现状及发展趋势分析: “2007年中国机械工程学会年会”论文

- 集[C]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 1018-1021.
- [2] 姚艳书. 工具钢及热处理[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2009: 105-108.
- [3] 邱凌, 吴晓春. 国内外冷作模具钢发展概述[J]. 模具制造, 2017, 17 (11): 89-96.
- [4] 牛大忠. 新型热作模具钢工艺和性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2005.
- [5] 姚艳书. 工具钢及热处理[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2009: 203-205.
- [6] 陈艳艳, 孙志华, 孟亚峰. 常用模具材料的合理选择[J]. 科技资讯, 2009 (10): 48-49.
- [7] 鲁思渊. 热处理工艺对Cr13型塑料模具钢组织与耐腐蚀性影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [8] 赵昌盛. 实用模具材料应用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [9] 寇元哲. 模具钢CrWMn碳化物偏析的热处理工艺研究[J]. 模具技术, 2017 (2): 60-63.
- [10] 郭从盛, 夏鹏举, 张会, 等. CrWMn钢等硬度回火曲线的建立及应用[J]. 铸造技术, 2009, 30 (9): 1141-1143.
- [11] 黄超, 方耿然, 陈冰泉. CrWMn热处理工艺及其组织与性能[J]. 企业技术开发 (下半月), 2009 (6): 67-68.
- [12] 潘明. 5CrMnMo钢热锻模热处理工艺[J]. 金属加工 (热加工), 2011 (5): 38-41.
- [13] 刘东. 5CrMnMo钢制热锻模热处理工艺改进[J]. 煤矿机械, 2009, 30 (4): 99-100.
- [14] 王凯旋. 大型不锈钢塑料模具钢模块喷水淬火装置及工艺的研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2012.
- [15] 陈再枝, 蓝德年. 模具钢手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [16] 张先鸣. 几种新型塑料模具钢性能及热处理工艺的研究[J]. 模具制造, 2015, 15 (5): 83-86.
- [17] 钢铁热处理编写组. 钢铁热处理: 原理及应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979.
- [18] 姚艳书. 工具钢及热处理[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2009: 525-538.
- [19] 孙盛玉. 热处理裂纹分析图谱[M]. 大连: 大连出版社, 2002.
- [20] 姚艳书. 工具钢及热处理[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2009: 545-555.
- [21] 鲁思渊. 热处理工艺对Cr13型塑料模具钢组织与耐腐蚀性影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [22] 宋家奇, 张建国, 丛培武. 真空热处理的现状和展望[J]. 机械工人 (热加工), 2006 (4): 16-18.
- [23] 王明伟. 高温合金和钛合金真空热处理及热胀形过程数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [24] TRIPATHI M, MITTELBERGER A, MUSTONEN K, et al. Cleaning graphene: comparing heat treatments in air and in vacuum[J]. Physica Status Solidi (RRL)—Rapid Research Letters, 2017, 11 (8): 1700124.
- [25] RAMEZANI M, PASANG T, CHEN Z, et al. Evaluation of carbon diffusion in heat treatment of H13 tool steel under different atmospheric conditions[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2015, 4 (2): 114-125.
- [26] 张立文. 数值模拟技术在金属材料固态加工中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- [27] 郭鹏. 300M钢热变形和热处理过程中微观组织演化和力学性能优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [28] 谢尘. 高碳高合金钢深冷处理微观结构演化及相变机理研究[D]. 上海: 上海大学, 2016.
- [29] 王锋, 汤立松, 李艳艳, 等. 工、模具深冷处理及其应用前景分析[J]. 科技视界, 2016 (11): 93-94.
- [30] 冯泽轩. 18CrNiMo7-6渗碳钢磁场深冷处理工艺及磨损监测技术的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [31] 王祎雪. 中碳低合金钢渗氮与激光淬火复合改性层组织与性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [32] 周智慧, 樊琳. 高能束热处理及其在工业中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2004 (3): 42-44.
- [33] 郑寅岚. 提高钢轨使用寿命的激光表面复合化技术与机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [34] 张通和, 吴瑜光, 云跃, 等. 先进的离子束热处理技术和工业应用[J]. 热处理技术与装备, 2006 (1): 6-13.

MW 20240216