

陈蕴博 主编

机械工业技术发展基金委员会科技成果
热作模具钢的选择与应用

42.45

YB

国防工业出版社

机械工业技术发展基金委员会科技成果

热作模具钢的选择与应用

陈蕴博 主编

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

内 容 简 介

本书主要叙述目前模具工业中应用量大面广的锤锻模、机锻模、热挤压模、压铸模和热冲裁模等热作模具的服役条件、失效特征和规律。全书分四章:热作模具的失效,热作模具钢性能数据,各类热作模具的失效抗力指标与选材实例,非标准试验方法。

本书力图根据测试研究所获得的大量数据提出旨在减少钢材消耗、延长模具使用寿命的失效抗力指标体系和选材准则,从而实现模具选材从过去沿用经验走向科学化和判据量值化的飞跃。

本书可供从事模具材料生产、模具设计、制造、使用和维修工作的工程技术人员阅读,也可供科研单位及高等院校有关人员参考。

机械工业技术发展基金委员会科技成果

热作模具钢的选择与应用

陈蕴博 主编

责任编辑 周润芬

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京昌平环球印刷厂

*

787×1092 毫米 32 开本 印张 5 105 千字

1993 年 8 月第一版 1993 年 8 月第一次印刷 印数:0 001—4 000 册
ISBN 7-118-01210-6/TG·80 定价:12.00 元

前 言

机械工业技术发展基金委员会自 1986 年成立以来,本着发布指南、公开招标、专家评议、择优录取的原则,已经支持了近千项科研课题。不少成果已经或正在起着促进机械工业科技水平不断提高和发展的作用。

为了让广大企业能够更快地得到科研成果并在设计和生产中加以应用,现将一些涉及面广、有普遍意义的成果逐个予以公开出版,期望能对机械行业的技术进步起一点作用。

本书主要叙述目前模具工业中应用量大面广的锤锻模、机锻模、热挤压模、压铸模和热冲裁模等五大系列热作模具的服役条件、失效特征和规律;并结合 27 种目前国内外工业应用和新研制成功的热作模具钢的基本力学性能、特殊性能、工艺性能和使用性能等共 18 种性能的测试研究所获得的大量数据,指明了与相应模具及材料实际承载能力有关的一些表征参量和各性能之间的配合要求;提出了旨在减少钢材消耗、延长模具使用寿命的失效抗力指标体系和选材准则,且列举了应用实例,从而促进模具材料的内因和服役条件的外因达到完好的统一,实现模具选材从过去沿用经验走向科学化和判据量值化的飞跃。

“热作模具钢的选择与应用”这项研究工作由北京机电研

究所、上海材料研究所、华中理工大学等三个单位共 15 位同志完成,参与协作的企业有 20 余家。现由机械工业技术发展基金委员会共性技术专业组请陈蕴博同志根据课题研究成果进行主编并撰写第一章;朱宗元同志撰写第二章;罗学心同志撰写第三章;施占华、李平安、朱宗元同志撰写第四章。

本书以公开出版的方式向企业推荐科研成果,对我们来说还是一种新的尝试,这种方式是否可行,欢迎广大读者提出意见,对这本书的内容和编写方式也欢迎予以批评指正。

机械工业技术发展基金委员会共性技术专业组

1993 年 7 月

① 参加课题研究工作的有:陈蕴博、李平安、施占华、朱宗元、张嘉立、高军、罗学心、李熙章、金志坚、王璐、王文正、吴一平、何香山、刘树德、肖钟义。

目 录

第一章 热作模具的失效	1
一、热作模具的失效特征	1
(一) 模具工作部位的塑性变形和型腔堆塌	1
(二) 热疲劳	2
(三) 热磨损	2
(四) 断裂	2
(五) 热熔损和冲蚀	3
二、各类热作模具失效特征的概率统计	3
三、热作模具钢的性能及失效抗力评价体系	5
(一) 热作模具钢的性能	5
(二) 热作模具失效抗力评价体系及其与材料性能间的关系	6
第二章 热作模具钢性能数据	10
一、试验用钢的来源、化学成分和热处理工艺	10
(一) 钢的来源、冶炼方法和化学成分	14
(二) 钢种编号与试样硬度的关系	14
(三) 试样热处理工艺	14
二、性能数据	14
(一) 室温与高温拉伸性能	14
(二) 室温与高温冲击韧性和室温断裂韧性	22
(三) 高温硬度	23
(四) 热稳定性	23
(五) 抗氧化性	23
(六) 热疲劳性能	40
(七) 热磨损性能	42
(八) 热熔损性能	44

(九)切削性能	44
(十)锻造性能	50
(十一)热塑性摩擦系数	50
(十二)回火稳定性	59
(十三)心部性能	68
三、热作模具钢各项性能指标的分级	69
(一)室温和高温强度韧性的分级	69
(二)特种使用性能的分级	71
(三)热作模具钢各项指标的分级	71
第三章 各类热作模具的失效抗力指标与选材实例	75
一、大截面热锻模	76
(一)大截面压力机模具的失效分析	76
(二)大截面锤锻模具的失效分析	78
(三)模具的失效抗力指标	79
(四)选材实例	80
二、中小机锻模	82
(一)中小机锻模的失效分析	82
(二)中小机锻模的失效抗力指标	84
(三)选材实例	85
三、压铸模	94
(一)压铸模的失效分析与失效抗力指标	94
(二)选材实例	98
四、热挤压模	101
(一)铜材热挤压模	101
(二)铝型材挤压模	105
(三)选材分析	109
五、热冲裁模	109
(一)模具的工作条件与失效形式	109
(二)模具的选材原则	112
六、各类热作模具的失效特点、抗力指标和材料选择	117
第四章 非标准试验方法	118

一、S. R. Tittagala 热磨损试验方法	118
(一)试样和制备	118
(二)试验机	118
(三)试验程序	119
(四)磨损性能评判准则及数据处理	121
二、A. Thomas 热磨损试验方法	121
(一)试样和制备	122
(二)试验机	123
(三)试验程序	123
(四)评判准则	124
(五)数据处理	124
三、热疲劳性能试验方法	124
(一)试样和制备	124
(二)试验设备	124
(三)温度测试	125
(四)试验注意事项	127
(五)热疲劳性能的评定	127
四、热塑性摩擦系数试验方法	138
(一)试样和制备	138
(二)试验机	138
(三)试验方法	138
(四)评判准则	139
(五)数据处理	140
五、热熔损试验方法	140
(一)试样和制备	140
(二)试验机	140
(三)试验方法	140
(四)评判准则	141
(五)数据处理	141
六、钢的热稳定性试验方法	142
(一)试样及所用试验设备	142

(二) 试验方法和程序	142
(三) 钢的热稳定性的评判标准	143
七、高温硬度试验方法	144
(一) 试样尺寸	144
(二) 试验机	144
(三) 试验程序	144
(四) 评判准则	145
(五) 数据处理	145
八、热锻模具钢心部机械性能的模拟冷却试验方法	145
(一) 试样与试验机	146
(二) 模拟冷却装置	146
(三) 实验步骤	147
(四) 评判准则	147
九、锻造性能的试验方法	147
(一) 试样的形状与尺寸	148
(二) 试验机	148
(三) 试验方法	148
(四) 评判准则	149
(五) 数据处理	149
参考文献	150

第一章 热作模具的失效

一、热作模具的失效特征

热作模具的基本失效形式可以归纳为断裂(包括整体开裂、局部开裂以及机械疲劳裂纹)、变形、热疲劳、热磨损和热熔损等五种,但对某一种模具可能仅出现其中一种,也可能同时出现数种失效形式,这主要取决于模具的工作条件和所用模具材料的特性。

(一)模具工作部位的塑性变形和型腔堆塌

通常由于锻压工艺特点和模具结构的不同,五类热作模具的表面温度波动范围示于表 1-1。模具材料在上述温度范围内长期使用致使模具表面受到不同程度的过度回火而被软

表 1-1 五类热作模具表面温度波动范围

模具类型		模具表面温度(℃)	
		一般	最高
大截面锤锻模机锻模		650	高于模具钢的相变点
中小机锻模		600	≥650
热挤压模	铝合金	550	≥600
	铜合金	750	
压铸模	铝合金	600	700
	铜合金	≥750	
热冲裁模		300~500	500

化,使强度降低。当模具型腔表面软化到某一硬度值时,便容易产生塑性变形。

(二)热疲劳

热疲劳是热作模具特别是压铸模和精密热锻模的主要失效形式之一。工作时,由于模具型腔表面存在较大的温度梯度层和急冷急热的作用,使模具表面产生较大的热应力。当温度反复变化时这种热应力也反复变化,加之模具工作时承受机械载荷;当其应力值超过材料屈服强度时,则在模具表面产生网状或放射状的疲劳裂纹;当材料的抗氧化性较差时,会加速热疲劳裂纹的萌生与扩展,并伴随产生热磨损,特别当外载荷较大时,如疲劳裂纹扩展到一定程度且达到某一临界尺寸,则发生机械疲劳断裂。因此,热疲劳性能就是指模具钢在反复加热和冷却中对产生表面裂纹的一种抗力,它是材料高温韧性、高温屈服强度和抗回火稳定性的综合函数。

(三)热磨损

热作模具的磨损主要以表面疲劳磨损为主,因工况条件的不同,往往常伴随有粘着磨损和磨粒磨损。摩擦表面的破坏特征主要有刮伤、沟槽、裂纹、麻点和剥落。磨损不仅破坏模具的尺寸精度和表面粗糙度,并使锻件超差。对热作模具磨损有较大影响的因素是模具材料的成分、模具的温度、高温强度和热稳定性。

(四)断裂

早期断裂是模具最为有害的失效事故。其中往往由于模具严重偏载,或模具表面严重的应力集中或在模具表面已存在工艺裂纹,或在材料内部存在严重的缺陷而引起瞬时断裂。模具使用寿命往往只有几百件,甚至几件、几十件。这时,断裂开始于表面并在断裂面上只有一个断裂区。另一种断裂失效

形式是疲劳断裂,是指在循环应力作用下,在模具表面萌生疲劳裂纹并发生亚临界扩展,最后发生失稳扩展造成断裂失效。这时在宏观疲劳断口上有时可分出疲劳扩展区和瞬时断裂区。

(五)热熔损和冲蚀

这种失效形式仅出现于压铸模具中。压铸时,熔融金属被注入型腔模,在被高温金属冲刷的模具部位,有可能发生冲蚀的危险。特别是当金属以高温高速注入时,这种现象尤为严重。除冲蚀外,在液体金属与模具表面之间直接接触的部位也会引起腐蚀问题。但要严格区分这两种失效形式是很难的。这类失效形式与热疲劳裂纹的差别,就其产生的原因,前者往往均在熔融温度和注入速度过高的情况下发生,而后者是一个连续的过程,且只能采取措施以减少其裂纹的扩展速率,而难以避免它的出现。

二、各类热作模具失效特征的概率统计

引起模具失效的原因很多,主要可以分为以下几个方面:

- 1)模具设计不合理引起的失效;
- 2)模具材料质量差引起的失效;
- 3)机械加工不当引起的失效;
- 4)热处理制度不合适引起的失效;
- 5)操作方法不正确引起的失效。

通过对国内 60 余家工厂模具使用情况的实地调研、统计分析以及对全国 100 多个热作模具使用厂家的函调,积累了有关热作模具失效特征的大量数据资料。现将其失效特征的概率统计结果示于表 1-2。实际试验分析统计结果表明:由于

选材和热处理不当致使模具早期失效约占 70%，因此合理的选材和适宜的热处理仍是控制模具质量和提高使用寿命的关键。

表 1-2 各类热作模具失效特征的概率统计结果

模具类别	模具名称	模具失效	
		特征	概率统计 (%)
大截面锤锻模和机锻模	锤锻模	磨损+深型槽底角裂纹	70
		塑性变形	20
		燕尾开裂	10
	压力机模	磨损+深型槽底角裂纹 塑性变形	80 20
中小机锻模	工作温度为 600℃ 用中小机锻模	热磨损 压塌	>74
		热磨损 开裂	少量型腔 较深的模具
	工作温度为 650℃ 用中小机锻模	热磨损 压塌	>87.5
		热磨损 开裂	少量型腔 较深的模具
热挤压模	铜管热挤压模	压塌 开裂	88 5~12
	铝合金挤压模	断裂 磨损 变形	>50 25~40 ~6
压铸模	铜压铸模	热疲劳 熔蚀 变形	95 5
	铝压铸模	热疲劳 熔蚀 变形	60~70 <5 5~15
冲裁模		磨损 崩刃	≥80 ≤20

三、热作模具钢的性能及失效抗力评价体系

热作模具的种类繁多,工作条件有很大差别,因此对材料的性能及其相互配合要求也各有不同。此外,无论对机械零件或模具构件最薄弱环节的实际有效性能即抵抗失效的能力,由于材料的内因和服役条件外因的影响,往往不一定与标准试样在特定条件下测得的数据相一致,所以除了测定材料的常规性能外,还必须根据并模拟实际模具工况条件进行有关使用特性的研究工作。若离开模具服役条件及材料的性能要求,就缺乏明确的针对性。因此,如何根据模具的工况特点、材质的特点和失效方式的不同,并找出材质的内因和模具使用寿命之间的变异规律,建立和正确使用模具性能的评价体系,仍是当前发展模具工业所急待解决的、带有普遍指导意义的基础性工作。

(一)热作模具钢的性能

其性能主要包括:

- 1)不同温度条件下的拉伸性能;
- 2)不同温度条件下的冲击韧性和室温断裂韧性;
- 3)不同温度条件下的硬度值;
- 4)热稳定性;
- 5)抗氧化性;
- 6)热疲劳性;
- 7)热磨损性;
- 8)热熔损性;
- 9)切削性;
- 10)锻造性;

11)热塑性摩擦系数;

12)回火稳定性;

13)心部性能。

(二)热作模具失效抗力评价体系及其与材料性能间的关系

系

长期以来,评价热作模具的性能时,主要沿用室温和高温条件下的硬度、强度和冲击韧性分别表征材料的耐磨性、变形抗力、静载断裂和冲击断裂的抗力。但从热作模具的失效形式来看,许多模具都存在热疲劳、机械疲劳破坏。它要求材料必须具有热疲劳抗力、低的疲劳裂纹扩展速率、断裂韧性以及其他相关的特性。现将模具失效抗力评价体系及其与材料性能间的关系分述如下:

1. 热疲劳抗力

它表征材料热疲劳裂纹萌生前的工作寿命和萌生后的扩展速率。抗热疲劳能力高的材料,不易发生热疲劳裂纹或发生热疲劳裂纹的循环次数要多;或当裂纹萌生后在锻压力的作用下扩展时,每一应力循环的扩展量要小、循环次数要多。与疲劳抗力密切相关的另一种使用特性——断裂韧性,它表征对已存在的裂纹发生失稳扩展的抗力;在应力值恒定的条件下,模具中已存在裂纹,如果模具所使用的材料断裂韧性值高,则裂纹必须扩展得很深时,才发生失稳扩展。因此热作模具如欲得到高的寿命,则模具材料应具备高的抗热疲劳性能,低的裂纹扩展速率和高的断裂韧性值,如果仅根据单一指标来选用钢种或热处理工艺,可能导致相反的效果。

影响模具产生热疲劳裂纹的因素主要有:

1)模具材料的物理性能 模具钢的传热系数及膨胀系数对热应力的关系可由下式表示

$$\sigma = \frac{E\alpha}{(1-\mu)} \cdot \Delta t (\text{MPa})$$

式中 σ ——热应力；
 E ——弹性模量；
 μ ——泊松系数；
 α ——热膨胀系数。

模具中温度梯度愈大，热应力也愈大；模具钢的传热系数愈小，则温度梯度愈大；模具钢的热膨胀系数愈大，则热应力愈大。

由此可见，热作模具应具有尽可能大的传热系数，尽可能小的热膨胀系数。当增加钢中碳和合金元素的含量均可减少传热系数，使温度梯度增大。

2)材料的高温屈服强度 通常，热疲劳裂纹的萌生是表面层材料在循环热应力作用下，周期性地发生塑性变形的结果。因此，提高模具材料的高温屈服强度及塑性，有助于延迟热疲劳裂纹的萌生与扩展。

本工作采用 Uddholm 试验方法对模具钢的机械性能与热疲劳抗力之间的关系进行了研究。结果指出，当热疲劳试验温度较高时，材料热疲劳抗力主要决定于高温屈服强度，即 $\sigma_{0.2}$ 值愈大，热疲劳抗力也愈大。但当热疲劳试验的上限温度较低时，则其热疲劳抗力主要取决于高温冲击功 (A_k)，其次是高温屈服强度。此外，材料的热稳定性能和抗高温氧化能力对热疲劳抗力亦有直接的影响，热稳性越低、抗氧化能力越差，则会加速疲劳裂纹的萌生与发展。

2. 塑性变形抗力

热模具钢的变形抗力是表征模具在一定温度下抗堆塌变形的能力。因此，经热处理后的模具不仅应具备较高的高温屈

服强度,还应具备高的热稳定性和热硬性(高温硬度)。试验结果表明,热模具钢的高温屈服强度与其高温硬度之间存在明显的对应关系,通常,高温屈服强度高的模具钢,其高温硬度亦高。

3. 热磨损抗力

热磨损抗力是指热作模具服役条件下,摩擦表面的抗疲劳磨损、粘着磨损和磨粒磨损的能力。本研究工作采用 Tittagala 试验法和 S. R. Thomas 试验法对热作模具钢的热磨损进行了深入研究。结果指出,同一钢种,热处理到高强度级别时的磨损抗力优于低强度级别;不同类型钢种的热疲劳抗力与其他机械性能之间存在不同的关系式:如大截面热作模具钢(5CrNiMo、5CrMnMo、3Cr2MoWVNi 等)与含 Cr5%系模具钢(4Cr5MoSiV1、4Cr5MoSiV、4Cr5W2VSi 和 4Cr5WMoVSi 等)的热磨损性能随其高温屈服强度($\sigma_{0.2}^T$)、高温冲击功(A_k^T)和热稳定性性能的提高而上升,其他如 3Cr2Mo 系、3Cr—3Mo 系及基体钢的热磨损抗力,与其在高温时的单位韧性强度($\sigma_{0.2}^T/A_k^T$)呈线性关系。因此,模具的热磨损抗力主要与所用材料的高温屈服强度、高温冲击功、抗氧化性以及热稳定性息息相关。

4. 断裂抗力

由于模具技术的发展,使模具的设计和模具材料的使用愈来愈科学化,因此热作模具发生突然断裂的几率也愈来愈小。其断裂过程主要是疲劳断裂,所以热作模具钢的断裂抗力应包括:萌生疲劳裂纹的抗力,疲劳裂纹亚临界扩展的抗力和裂纹失稳扩展的抗力。前者可用萌生热疲劳裂纹的热循环次数,也可用经过一定循环次数后所出现疲劳裂纹的条数及平均深度来表征,且与模具材料的热疲劳抗力密切相关;而后者则与材料的断裂韧性有关。