



全国高等院校“十二五”特色精品课程建设成果

模具材料与表面处理

(第2版)

◎主编 康俊远 ◎主审 宋丽华



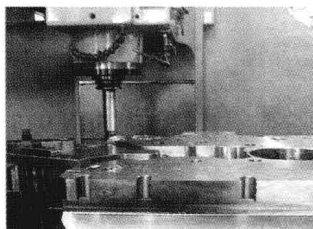
MUJU CAILIAO
YU BIAOMIAN CHULI



全国高等院校“十二五”特色精品课程建设成果

模具材料与表面处理

(第2版)



◎主 编 康俊远

◎副主编 李立明 徐勇军

◎主 审 宋丽华 于国栋

藏书章

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是模具设计与制造专业所用的教材,对合理地选用模具材料,正确地应用热处理工艺和表面处理技术,与模具的使用寿命、精度和表面质量的关系做了系统而详细的论述,并从实用的角度出发,按照模具材料的分类标准,系统地介绍了模具材料的选用和表面处理方法。该书内容丰富、实用,资料性强,反映了近年来模具材料、表面技术应用方面的研究成果与发展方向,主要供高等教育“模具设计与制造”专业学生使用,也可供材料热处理专业,以及从事模具设计与制造的技术人员阅读。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

模具材料与表面处理/康俊远主编.—2版.—北京:北京理工大学出版社,2012.7

ISBN 978-7-5640-6457-0

I. ①模… II. ①康… III. ①模具钢-热处理-教材 IV. ①TG162.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第179723号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京市通州富达印刷厂

开 本/710毫米×1000毫米 1/16

印 张/13.25

字 数/247千字

责任编辑/李秀梅

版 次/2012年7月第2版 2012年7月第1次印刷

张慧峰

印 数/1~1500册

责任校对/陈玉梅

定 价/38.00元

责任印制/王美丽

图书出现印装质量问题,本社负责调换



出版说明>>>>>

北京理工大学出版社为了顺应国家对机电专业技术人才的培养要求，满足企业对毕业生的技能需求，以服务教学、立足岗位、面向就业为方向，经过多年的大力发展，开发了近 30 多个系列 500 多个品种的高等教育机电类产品，覆盖了机械设计与制造、材料成型与控制技术、数控技术、模具设计与制造、机电一体化技术、焊接技术及自动化等 30 多个制造类专业。

为了进一步服务全国机电类高等教育的发展，北京理工大学出版社特邀请一批国内知名行业专业、高等院校骨干教师、企业专家和相关作者，根据高等教育教材改革的发展趋势，从业已出版的机电类教材中，精心挑选一批质量高、销量好、院校覆盖面广的作品，集中研讨、分别针对每本书提出修改意见，修订出版了该高等院校“十二五”特色精品课程建设成果系列教材。

本系列教材立足于完整的专业课程体系，结构严整，同时又不失灵活性，配有大量的插图、表格和案例资料。作者结合已出版教材在各个院校的实际使用情况，本着“实用、适用、先进”的修订原则和“通俗、精炼、可操作”的编写风格，力求提高学生的实际操作能力，使学生更好地适应社会需求。

本系列教材在开发过程中，为了更适宜于教学，特开发配套立体资源包，包括如下内容：

- ▶ 教材使用说明；

- 电子教案，并附有课程说明、教学大纲、教学重难点及课时安排等；
- 教学课件，包括：PPT 课件及教学实训演示视频等；
- 教学拓展资源，包括：教学素材、教学案例及网络资源等；
- 教学题库及答案，包括：同步测试题及答案、阶段测试题及答案等；
- 教材交流支持平台。

北京理工大学出版社



Qianyan

前言 >>>>>

本书是根据原机械工业部教育司批准的“模具设计与制造专业”教学计划和“模具材料与表面处理”课程教学大纲编写的规划教材，主要供高等教育“模具设计与制造”专业学生使用，也可供材料热处理专业，以及从事模具设计与制造和应用模具的技术人员阅读。

在模具设计与制造中，合理地选用模具材料，正确地应用热处理工艺和表面处理技术，对模具的使用寿命、精度和表面质量起着重要的甚至决定性的作用，因此说模具材料与表面处理是模具设计和制造的基础。根据模具材料的性能特点选择合理的模具结构以及采取相应的维护措施是十分重要的。只有认真做好这些方面的工作，才能有效地稳定和提高模具的使用寿命，防止模具的早期失效，降低生产成本，提高劳动生产率。

长期以来，许多模具企业对模具材料的选用和表面处理重视不够，对模具新材料、新工艺、新技术了解不够。因此，研究和开发高性能的模具材料，根据模具的工作条件合理选用模具材料，采用适当的热处理及表面处理工艺以充分发挥模具材料的潜力就显得十分必要。这些问题反映在模具设计与制造专业的教学上，目前许多学校的模具设计与制造专业并没有开设这门课程，且使用的教材也很少。

本书从实用的角度出发，按照模具材料的分类标准，系统地介绍了模具材料的选用与表面处理方法。全书共分六章，分别介绍了模具材料分类、主要性能、各种冷作模具材料、热作模具材料和橡塑模具材料的牌号、生产工艺、性能特点及选用原则，专门介绍了热处理技术特点以及表面强化技术应用于模具的表面处理方法。该书内容先进，丰富，实用，资料性强，反映了近年来模具材料、表面技术应用方面的研究成果和发展方向，重点章还附有一定数量的思考题与习题，以供学生学习。

参加本书编写的有康俊远（绪论、第1章、第3章）、李立明（第2章）、徐勇军（第4章、第5章）和李辉、田广科（第6章）。全书由康俊远任主编，李立明、徐勇军任副主编。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者



目 录

绪论	1	思考题与习题	72
第 1 章 模具材料综述	5	第 3 章 热作模具钢	73
1.1 模具及模具材料的分类	5	3.1 热作模具钢的分类及钢号	73
1.2 模具的失效形式及影响因素	6	3.2 高韧性热作模具钢	75
1.3 模具材料与使用寿命	10	3.3 高热强性热作模具钢	81
1.4 模具材料的选用原则	11	3.4 高强韧性热作模具钢	91
1.5 模具材料的生产现状和发展趋势	13	3.5 热作模具钢热处理	96
思考题与习题	16	3.6 陶瓷型精铸锻造模具及热处理	102
第 2 章 冷作模具钢	17	3.7 铸钢堆焊制模和电渣熔铸模具及热处理	109
2.1 冷作模具材料及性能要求	17	思考题与习题	111
2.2 碳素工具钢	22	第 4 章 塑料模具钢	112
2.3 油淬冷作模具钢	27	4.1 塑料模具材料的性能要求	112
2.4 空淬冷作模具钢	32	4.2 常用塑料模具材料的类型	114
2.5 高碳高铬冷作模具钢	37	4.3 碳素塑料模具钢	115
2.6 基体钢和低碳高速钢	41	4.4 渗碳型塑料模具钢	121
2.7 高耐磨高强模具钢	45	4.5 预硬型塑料模具钢	126
2.8 其他类型冷作模具钢	49	第 5 章 进口模具钢简介	134
2.9 冷作模具钢材料的选用	56	5.1 美国模具钢介绍	134
2.10 冷作模具钢材料选用实例	66	5.2 日本模具钢介绍	140

5.3 国内市场销售的其他国家 模具钢	147	6.7 稀土元素表面强化技术及 复合表面技术简介	196
		思考题与习题	198
第 6 章 模具的表面工程技术 ...	155	附录	199
6.1 表面工程技术简介	155	附录 A 本书介绍的部分模具 钢钢号、代号及研制 (生产) 单位一览表	199
6.2 模具材料表面化学 热处理技术	157	附录 B 我国与主要工业国家 常用模具钢钢号 对照表	200
6.3 模具表面热喷涂技术	161	参考文献	201
6.4 模具表面的电镀技术	172		
6.5 模具表面的镀膜技术	181		
6.6 模具表面的高能强化 技术	192		



1. 模具材料及表面处理在模具工业中的地位

模具是一种重要的加工工艺设备，是机械、电子、轻工和国防等行业生产的重要工艺装备。模具性能的好坏、寿命的长短直接影响模具的质量和经济效益；模具材料的工艺性能将影响模具加工的难易程度、模具加工的质量和加工费用。因此，在模具设计时，除设计出合理的模具结构外，还应选用合适的模具材料及热处理方法，才能使模具获得良好的工作性能和长的使用寿命。所以世界各国都在不断地开发模具新材料，改进强化热处理新工艺和新技术。

现代模具的特点，一是量大面广，品种繁多；二是作为批量生产，模具在提高经济效益方面起着关键的作用；三是模具生产影响到产品开发、更新换代和发展速度；四是模具的成本占产品成本的 20% 左右，它的寿命影响到产品成本；五是现代模具向大型化、复杂化、精密化和自动化发展。随着机械技术的迅速发展，对模具的使用寿命、精度和表面粗糙度等提出了更高的要求。模具制造业已经成为一个发展极为迅速的行业。在许多工业发达国家，模具制造业的产值已经超过机床行业，成为经济发展的一个支柱产业。

上述特点导致对模具的要求越来越高，对模具材料的要求也是如此，因为模具材料和热处理技术对模具的使用寿命、精度和表面粗糙度起着重要的作用。所以，研究开发高性能的模具材料，采用先进的生产工艺生产优质低成本的模具材料，根据模具的工作条件合理选用材料，采用适当的热处理和表面处理技术以充分发挥模具材料的潜力。根据模具材料的性能特点选用合理的模具结构，根据模具材料的特性采用相应的维护措施等是十分重要的，这就要求大力推广新材料、新工艺和新技术。

2. 表面处理技术在模具工业中的地位

模具的失效一般由模具的表面开始，模具表面性能的优劣直接影响到模具的使用和寿命。对模具表面和心部的性能要求是不同的，很难通过更换材料或模具的整体热处理来达到这样的性能要求。采用不同的表面处理技术，可提高模具的表面性能，使模具拥有强韧的心部、耐磨耐蚀的表面，使模具寿命提高几倍甚至

几十倍。

表面处理技术能有效地提高模具表面的耐磨性、耐蚀性、抗咬合、抗氧化、抗热黏附和抗冷热疲劳等性能。模具材料及其热加工工艺的选择必须与表面强化技术结合起来全面考虑,才可能充分发挥模具材料的潜力,提高模具的使用寿命,获得最好的经济效益。例如渗硼层的高硬度、耐磨性和热硬性,以及一定的耐蚀性和抗黏着性,渗硼技术已在模具工业中获得较好的应用效果。除了传统的表面处理技术被广泛应用外,还发展了各种涂覆技术。

3. 国内外模具材料与表面处理技术概况

1) 模具材料技术的发展概况

目前,我国的模具工业已发展成为独立的工业体系,在模具材料的研制和热处理技术方面都取得了巨大的成就。为了适应模具工业生产发展的需要,从20世纪70年代以来,我国陆续推广了电渣重熔、真空电弧重熔、炉外精炼和六面锻造等新技术新工艺,生产的模具钢产品质量与国外水平相当。特别是“八五”时期建成和在建的模具钢扁钢和厚钢生产线,对改善我国模具钢的品种、规格起到了比较大的作用。

新中国成立以来,我国模具钢的生产发展很快,从无到有,从仿制到自行开发,在短短的几年时间里,我国的模具钢产量已跃居世界前列。绝大部分国外的标准钢号和在科研试制中的模具钢号,我国也都开展了生产和研制工作。通过对YB 7—1959、GB 1299—1977的修订补充,制订了GB/T 1299—1985合金工具钢国家标准,基本上形成了具有中国特色的模具用材体系。总的来看,钢材系列比较完整,既包括了国内外通用的性能较好的模具钢,也纳入了一些国内研制的生产应用中已取得良好使用效果的新钢种,基本可以满足模具制造业的需要。

在20世纪80年代,针对我国生产量较大的大型锻模模块用钢和准备大力推广的Cr12Mo1V1 (D2)、4Cr5MoSiV1 (H13)、塑料模具钢3Cr2Mo (P20)和火焰淬火模具钢7CrSiMnMoV等,组织了重点科技攻关工作,对以上钢种进行了比较系统的研究,试制的模块和钢材已经基本上达到进口钢材的水平。

在塑料成型模具钢方面开发了06Ni6CrMoVTiAl (06Ni)、Y55CrNiMnMo1 (SM1)、Y20CrNi3AlMnMo (SM2)、5NiSCa、25CrNi3MoAl、10Ni3MnCuAlMo (PMS)和0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR)等钢,这些钢种的强韧性适当,分别用于注射模、挤塑模、压塑模和吹塑模等模具。

在冷作模具钢方面开发了6Cr4W3Mo2VNb (65Nb)、6CrNiSiMnMoV (GD)、7Cr7Mo2V2Si (LD)、Cr8MoWV3Si (ER5)和9Cr6W3Mo2V2 (GM)等钢,这些钢种具有较高的强韧性,分别用于冷挤模、冷锻模、冷冲模和切边模等模具,使用寿命成倍提高。

在热作模具钢方面,结合我国资源开发了5Cr4W5Mo2V (RM2)、3Cr3Mo3W2V (HM1)、3Cr3Mo3VNb (HM3)、4Cr3Mo3W4VNb (GR)、4Cr5MoSiV1 (H13)、

4Cr3Mo2NiVNbB (HD) 和 4CrMnSiMoV 等钢, 这些钢具有高的热稳定性、高温强度和热疲劳抗力, 分别用于热挤压模、热锻模、热冲模、热镦模和压铸模等模具, 寿命比 5CrNiMo、5CrMnMo 钢高数倍。

2) 表面工程技术的发展概况

近 30 年来, 有许多新的科学技术渗透到表面强化技术领域, 使模具的表面强化技术得到了迅速的发展, 由此开发出来的表面强化技术构成了目前材料表面工程技术的主流。例如, 激光是 20 世纪 60 年代出现的重大科学技术成就之一, 20 世纪 70 年代制造出大功率的激光器以后, 便开始用激光加热进行表面淬火。激光、电子束用于表面加热后, 使表面强化技术超出了热处理的范畴, 可以通过熔化—结晶、熔融合金化—结晶过程和熔化—非晶态过程, 大幅度改变硬化层的结构与性能。

热喷涂技术作为一种新的表面防护和表面强化工艺在近 20 年里得到了迅速的发展, 热喷涂技术由早期制备一般的装饰性和防护性涂层发展到制备各种功能性涂层; 由产品的维修发展到大批量的产品制造; 由单一涂层发展到包括产品失效分析、表面预处理、喷涂材料和设备选择、涂层系统设计和涂层后加工等在内的热喷涂系统工程。目前, 热喷涂技术已经发展成为金属表面工程技术中一个十分活跃的独立领域。

20 世纪 70 年代发展起来的离子注入技术, 利用注入离子可得到过饱和固溶体、非晶态和某些化合物层, 能改变材料的摩擦系数, 提高表面硬度, 提高耐磨性及耐蚀性, 延长模具的使用寿命。目前我国可提供离子注入 N、C、B 非金属元素和注入 Ta、Ti、W 等金属元素的生产设备。

还有一些历史较长的表面处理技术, 近十几年来也得到了飞速发展, 例如, 电镀技术已由单一的金属镀发展到镀各种合金。尤其是局部电镀技术——刷镀, 已经成为人们公认的金属表面处理新技术, 在我国得到普遍应用。将传统的电镀工艺与近代的激光技术结合形成的激光电镀是新兴的高速电镀技术, 其效率比无激光照射的高 1 000 倍。

4. 本课程的性质和要求

由于模具材料种类繁多, 性能各异, 模具使用性能的好坏、模具使用寿命的长短都与模具材料的合理选用、正确的表面处理技术有着密切的关系。编写本书的目的, 是使读者较全面地了解各种模具材料的性能、生产工艺及质量要求, 并能根据模具工作的具体条件, 合理地选用材料, 并能正确地制订生产工艺, 从而提高模具的使用寿命, 降低产品的生产成本, 提高劳动生产率。

学生在学完本课程后应达到如下基本要求:

(1) 了解模具材料与表面处理技术的发展现状和发展趋势。

(2) 掌握模具材料及表面工程技术与模具使用性能、寿命、成本之间的关系。

(3) 掌握常用冷作模具材料、热作模具材料和橡塑模具材料的牌号、性能特点,并能合理选用。

(4) 熟悉各类模具的表面处理方法及其选用。

本课程是在学完“机械工程基础”课程后开设的一门专业课,因此,学生在学习本课程前,必须注意对金属材料部分内容的深入学习。本课程实践性强,应尽可能多参观一些模具制造厂和模具使用厂,以增加学生的感性知识,利于学好本门课程。

在教学中应多采用直观教学、多媒体教学和启发式教学,并培养学生的自学能力,以增加课堂的信息量和课时的利用率,并在后续课程和生产实习、课程设计、毕业设计等教学环节中反复练习、巩固提高。

第 1 章 模具材料综述

随着工业技术的迅速发展,为了提高产品质量、降低生产成本、提高生产效率和材料利用率,国内外的机械制造业广泛地采用各种先进的无切削、少切削工艺,如压力铸造、精密冲压、精密锻造、冷挤压及等温超塑性成形等新技术,代替传统的切削加工。据统计,目前家用电器约 80% 的零部件依靠模具加工,机电工业中约 70% 的零部件采用模具成形,塑料制品、陶瓷制品、橡胶制品,建材产品的大部分也采用模具成形。

1959 年我国根据资源状况,制订了我国冶金工业部标准 Y87—1959;到 1977 年,在整顿原有钢种系列的基础上,吸收我国历年来开发工作的成就,制订了我国第一个合金工具钢国家标准 GB 1299—1977;1985 年,又对该标准进行了修订,颁发了 GB/T 1299—1985。初步建立起具有中国特色的、接近世界先进水平的,包括冷作模具钢、热作模具钢、塑料模具钢和无磁模具钢的模具钢种系列,基本可以适应使用部门和生产部门的需要。

✂ 1.1 模具及模具材料的分类 ✂

模具是一种高效率的工艺装备,在冶金、电子、轻工、机械制造等行业的生产中广泛应用,而模具的使用效果、使用寿命在很大程度上取决于模具设计和制造水平,尤其与模具材料的选用和热处理质量的好坏有关。

1.1.1 模具的分类

为了便于模具材料的选用,通常按照工作条件将模具分为冷作模具、热作模具和型腔模具三大类。

(1) 冷作模具。根据工艺特点,可将冷作模具分为冷冲裁模具和冷变形模具两类。冷冲裁模具主要包括各种薄板冷冲裁模具和厚板冷冲裁模具;冷变形模具主要包括各种冷挤压模具、冷镦模具、冷拉深模具和冷弯曲模具等。

(2) 热作模具。热作模具可分为热冲切模具、热变形模具和压铸模具三类。

热冲切模具包括各种热切边模具和热切料模具；热变形模具包括各种锤锻模具、压力机锻模具和热挤压模具；压铸模具包括各种铝合金压铸模具、铜合金压铸模具及黑色金属压铸模具等。

(3) 型腔模具。根据成形材料的不同，可将型腔模具分为塑料模具、橡胶模具、陶瓷模具、玻璃模具、粉末冶金模具等。

1.1.2 模具材料的分类

模具钢成分、性能及用途各不相同，分类依据是：按合金元素含量的不同一般把模具钢分为碳素工具钢、低合金模具钢、中合金模具钢、高合金模具钢；按用途不同分为冷作模具钢、热作模具钢、塑料模具钢三大类；其余还有按性能分类的。能用于制造模具的材料很多，通常可分为钢铁材料、非铁金属和非金属材料三大类，目前应用最多的还是钢铁材料。

(1) 钢铁材料。用于制造模具的钢铁材料主要是模具钢。通常将模具钢分为冷作模具钢、热作模具钢、橡塑模具钢三类。

(2) 非铁金属材料。用于制造模具的非铁金属材料主要有铜基合金、低熔点合金、高熔点合金、难熔合金、硬质合金、钢结硬质合金等。

(3) 非金属材料。用于制造模具的非金属材料主要有陶瓷、橡胶、塑料等。

❖ 1.2 模具的失效形式及影响因素 ❖

为了提高模具寿命，应首先对已失效的模具进行分析。在制订提高模具寿命的技术方案及采取技术措施之前，首先必须了解此类模具的主要失效形式，即了解导致模具失效的最常见、最大量的失效形式及其失效原因和主要影响因素。由于同一类模具也会有不同的失效形式，如某些模具可能会发生断裂而失效，另一些模具则可能因塑性变形而失效，这就需要掌握各种失效形式所占的比例以及每种失效模具的使用寿命。例如某类模具，虽有部分模具最终以磨损而失效，但使用寿命却很高；而其中另一部分模具以断裂失效，其寿命极低，这就要集中分析断裂原因，首先解决断裂问题。

1.2.1 影响模具失效的因素

对于不同类型的模具，失效的主要形式会有所不同，如冷作模具容易出现脆断失效，热作模具容易出现冷热疲劳失效。即使同一类型的模具，失效的形式也是变化的。

1. 模具结构的影响

模具结构包括模具几何形状、模具间隙、端面倾斜角、过渡角大小；热作模具中开设冷却水路、装配结构等。不合理的模具结构可能引起严重的应力集中或

过高的工作温度。图 1-1 所示为三种反挤压模结构，其中图 1-1 (c) 平端型凸模的单位挤压力比其余两种结构约高 20%，易出现早期失效，但图 1-1 (a) 凸端结构和图 1-1 (b) 尖端结构的倾斜角也不能太大，如过大虽能降低挤压力，但凸模容易挤偏，且易折断。

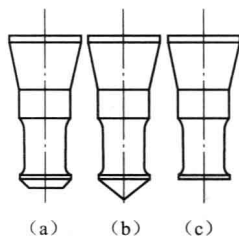


图 1-1 各种反挤压凸模结构
(a) 凸端型；(b) 尖端型；(c) 平端型

图 1-2 为两种不同结构的塔形热挤压凹模，使用图 1-2 (a) 整体式凹模时，由于模具型腔受急冷急热，极易产生热疲劳裂纹，微裂纹的不断扩展，会发生断裂失效。当改用图 1-2 (c) 的组合式凹模后，降低了型腔表面的拉应力，避免了应力集中，不再出现早期失效。

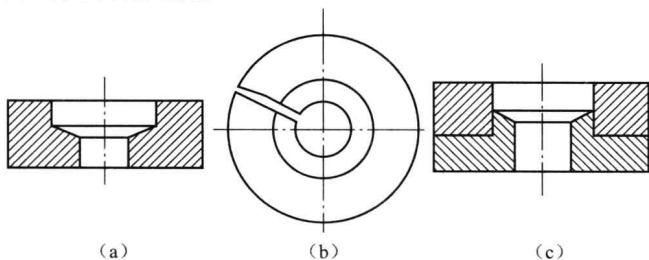


图 1-2 塔形热挤压凹模的早期断裂
(a) 整体式凹模；(b) 整体式凹模的早期断裂；(c) 组合式凹模

2. 模具材料的影响

模具材料必须满足模具对塑性变形抗力、断裂抗力、疲劳抗力、硬度、耐磨性、冷热疲劳抗力等性能的要求，如不能满足，则会发生模具早期失效。在循环载荷下，如果材料疲劳抗力差，经一定应力循环后，可能萌生疲劳裂纹，并逐渐扩展直至模具断裂失效。

模具钢的冶金质量对模具的失效形式也有很大影响。钢中的非金属夹杂物自身强度和塑性很低，容易形成裂纹源，引起模具早期断裂失效。钢中碳化物的数量过多，形状、尺寸至分布不理想，严重降低钢的冲击韧度及断裂抗力，引起模具的崩块、折断、劈裂等。中心疏松及白点，降低钢的抗压强度，易发生模具工作面凹陷及淬火开裂。图 1-3 (a) 为因热裂而失效的凸模，图 1-3 (b) 为所切取的试样金相组织分析照片，发现碳化物带状严重。

3. 热处理及加工制造工艺的影响

模具的热处理目的是为使模具获得理想组织，从而获得所需性能。但若热处理不当或工艺不合理，则可导致模具产生热处理缺陷，或性能降低，从而引发模具早期失效。如淬火温度过高，则会引起钢的过热，甚至过烧，从而引起

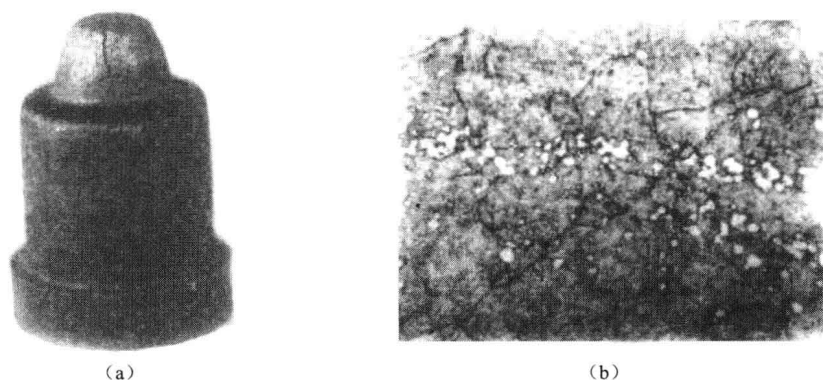


图 1-3 因严重碳化物偏析导致凸模热裂

(a) 凸模因热裂失效；(b) 金相组织

晶粒长大、晶界熔化等。这就导致模具韧性下降，使模具发生崩刃或早期断裂，特别是对承受巨大冲击载荷的锻模及冷作模具更应严格控制钢的晶粒度不使其长大。如淬火温度过低时，则难以保证有足够的合金元素固溶于基体之中，这将会降低钢的基体强度和组织稳定性，使钢容易产生早期变形、压塌或热疲劳裂纹。淬火冷却速度过快或油温太低，都会出现淬火微裂纹，这将更容易产生热疲劳裂纹，甚至早期断裂。模具回火温度过高，则硬度下降，降低了强度和耐磨性能，而且难以补救。但若回火温度过低，回火不足，则会在模具中残留较高的淬火应力，使模具韧性下降，从而使模具发生早期断裂。图 1-4 所示为凹模因回火不足而发生早期脆断，同一批处理的凹模，再经一次较高温度的回火后未再发生脆断。

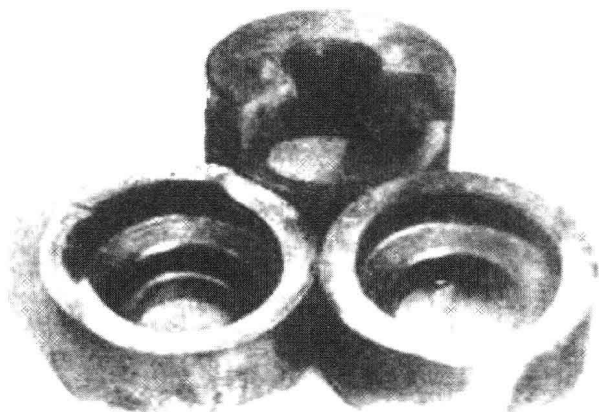


图 1-4 凹模因回火不足而早期脆裂