

工模具材料

强化处理应用技术

GONG MUJU CAILIAO

QIANGHUA CHULI YINGYONG JISHU

晁拥军◎编著



工模具材料强化处理应用技术

晁拥军 编著



机械工业出版社

在机械制造工业中,最广泛使用的为各种冷冲压模、热锻压模、塑料模等,当前由于冷挤、冷镦、精冲、精锻等工艺的发展,塑性加工工艺由毛坯生产进入成品加工的领域,使模具的精度不断提高,载荷大幅度增强,由此所用材料由普通结构钢扩展到高强度钢和高温合金。要求模具有更高的强度、耐磨性、耐热性、抗热疲劳能力及良好的韧性,使钢的整体强化和表面强化技术不断提高。但怎样使钢材在进行各种强化的同时具备必要的韧性,即强韧化处理成为解决模具早期破坏问题提高模具寿命的研究课题。

本书从实际应用的角度出发,除了介绍工模具材料的分类、模具失效形式、模具材料的选择和整体强化、表面强化外,还集中介绍了工模具材料的强韧化理论及实践。本书可为工模具的设计、制造、使用人员提供解决模具寿命问题的基本思路和方法,也可供工科院校师生及相关科研单位的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工模具材料强化处理应用技术/晁拥军编著. —北京:机械工业出版社, 2008. 2

ISBN 978-7-111-23349-7

I. 工… II. 晁… III. ①工具钢—金属表面处理②工具钢—韧性—强化(金属学) IV. TG142.45

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第033102号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:孔劲 责任编辑:孔劲 版式设计:冉晓华

责任校对:李秋荣 封面设计:陈沛 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2008年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·19.5印张·480千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-23349-7

定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

前 言

工模具是机械、冶金、电子、轻工、国防等工业部门的重要工艺装备，是保证高效率生产、高产品质量和降低生产成本的重要手段。随着工业技术的迅速发展，各部门都广泛地采用新的高精度、高效率的模具成形工艺，传统的切削加工方法也遇到了空前的挑战。目前，机械工业约 70% 的零件采用模具成形，不少行业中，模具费用已占产品成本的 15% ~ 30%，加工工具尤其是数控加工刀具的费用所占比例在不断提高。模具钢是用于制造冷作模具、热作模具和塑料模具的材料，一般合金工具钢中模具用钢约占 70% ~ 80%。尤其是冷作模具钢和热作模具钢是在非常苛刻的条件下工作，加工工具也向高效、高强韧性方向发展，因此要求工模具材料具有高的强度，高的硬度，良好的冲击韧度、淬透性、热稳定性和抗冷热疲劳性等良好的综合力学性能。

工模具材料品种繁多，热处理工艺要求高，金相组织颇为复杂。因选材或热处理工艺不当，尤其是如果对整体强化、表面强化处理等方法不能很好地运用，将导致综合性能不佳，使工模具过早失效，甚至一用即开裂，这是当前工模具的多发病、疑难症。因而，工模具的设计者、生产者及使用者迫切需要一种形成体系、理论联系实际、系统阐述工模具的使用条件、材料选择、毛坯成形及常规热处理、通过表面强化特别是强韧化处理解决工模具早期失效的指导性书籍。本书从发掘材料的性能潜力出发，从表面强化、整体强韧化及复合热处理综合运用角度入手，深入探讨解决工模具早期失效的有效途径，理论联系实际，简明扼要，图文并茂，实用性强。

本书共分 5 章，第一章：影响工模具寿命的基本因素；第二章：工模具材料的常用热处理和毛坯成形；第三章：工模具材料的性能与应用；第四章：工模具表面强化处理；第五章：工模具材料的强韧化处理。本书是在参阅了大量国内外文献资料的基础上，结合作者多年从事材料热处理工作和教学、科研工作中的思考与实践编写而成，编写的过程中还得到了刘少光、赵昌盛、尤永龙、黄言态、刘长江、李立光等专家、老师的大力支持，同时参考引用了大量的有关文献资料、图表等，在此一并致以衷心的感谢。由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

晁拥军

目 录

前言

第1章 影响工模具寿命的基本因素 1

1.1 模具设计对使用寿命的影响 1

1.1.1 结构不合理 1

1.1.2 应力集中因素的影响 3

1.2 模具制造质量对模具寿命的影响 4

1.2.1 模具锻造与热处理对寿命的影响 5

1.2.2 模具冷加工质量的影响 7

1.2.3 模具材料的影响 9

1.2.4 模具使用条件的影响 12

1.3 常用模具的失效形式 13

1.3.1 冷作模具失效特征 13

1.3.2 热作模具失效特征 16

第2章 工模具材料的常用热处理和毛坯成形 22

2.1 工模具钢热处理基础 22

2.1.1 工模具钢退火 22

2.1.2 工模具钢正火 26

2.1.3 工模具钢淬火和回火 27

2.2 模具毛坯的锻造及软化处理 34

2.2.1 锻造质量对性能的影响 35

2.2.2 模具锻造的基本方法 36

2.3 模具冷压毛坯的软化处理 40

2.3.1 冷压毛坯的组织与硬度要求 41

2.3.2 冷压毛坯软化处理 41

2.4 冷作模具钢的热处理 42

2.4.1 非合金工具钢的热处理 43

2.4.2 低合金冷作模具钢的热处理 45

2.4.3 高合金冷作模具钢的热处理 48

2.4.4 火焰淬火型冷作模具钢的热处理 50

2.4.5 冷作模具用高速工具钢的热处理 50

2.4.6 基体钢的热处理 51

2.5 热作模具钢的热处理 53

2.5.1 高韧性热作模具钢的热处理 53

2.5.2 高热强钢的热处理 54

2.5.3 高强韧性热作模具钢的热处理 55

2.6 塑料模具钢的热处理 56

2.6.1 预硬化型塑料模具钢的热处理 57

2.6.2 易切削塑料模具钢的热处理 57

2.6.3 渗碳型塑料模具钢的热处理 58

2.6.4 时效硬化型塑料模具钢的热处理 59

第3章 工模具材料的性能与应用 60

3.1 冷作模具钢 60

3.1.1 非合金（碳素）工具钢 60

3.1.2 低合金工模具钢 64

3.1.3 高碳高铬型微变形冷作模具钢 75

3.1.4 高速钢 80

3.1.5 基体钢 84

3.2 热作模具钢 90

3.2.1 高韧性热作模具钢 90

3.2.2 高热强钢 97

3.2.3 高强韧性热作模具钢 106

3.2.4 高耐磨热作模具钢 117

3.3 塑料模具钢 118

3.3.1 非合金塑料模具钢 119

3.3.2 预硬型塑料模具钢 120

3.3.3 易切削预硬型塑料模具钢 122

3.3.4 时效硬化型塑料模具钢 127

3.3.5 渗碳、淬硬型塑料模具钢 132

3.3.6 耐腐蚀型塑料模具钢 135

第4章 工模具表面强化处理 138

4.1 概述 138

4.2 化学热处理 138

4.2.1 化学热处理的基本过程 139

4.2.2 化学热处理的分类及基本性能 140

4.2.3 渗碳 142

4.2.4 碳氮共渗	149	4.8.3 电渣堆焊	221
4.2.5 渗氮	151	第5章 工模具材料的强韧化处理	224
4.2.6 氮碳共渗	155	5.1 强化钢铁材料的基本手段	225
4.2.7 硫氮共渗	160	5.1.1 加工硬化	227
4.2.8 渗硼	161	5.1.2 固溶强化	227
4.2.9 渗金属	166	5.1.3 晶界强化	229
4.3 表面淬火	172	5.1.4 第二相沉淀强化	231
4.3.1 感应加热表面淬火	173	5.1.5 相变强化	232
4.3.2 火焰加热表面淬火	175	5.1.6 形变热处理	241
4.4 高能量密度表面强化	177	5.2 脆性	247
4.4.1 激光加热表面强化	177	5.2.1 回火脆性	247
4.4.2 电子束加热表面处理	182	5.2.2 低温脆性	251
4.4.3 离子注入表面强化	184	5.2.3 氢脆性	253
4.5 气相沉积技术	186	5.2.4 渗层脆性	254
4.5.1 物理气相沉积技术 (PVD)	186	5.3 工模具材料的强韧化	255
4.5.2 化学气相沉积 (CVD)	193	5.3.1 钢中奥氏体晶粒及自由碳化物相的 超细化处理	256
4.5.3 气相沉积的应用	197	5.3.2 利用混合组织的性能	258
4.6 热喷涂与热喷焊技术	201	5.3.3 控制马氏体、贝氏体形态的淬 火	261
4.6.1 火焰喷涂	202	5.3.4 真空热处理	263
4.6.2 粉末火焰喷焊	206	5.3.5 复合热处理技术	265
4.6.3 其他喷涂技术	208	5.3.6 控制冷却的方法	268
4.7 电火花表面强化	211	5.3.7 合金元素在强韧化中的作用	272
4.7.1 电火花表面强化原理	211	5.3.8 强韧化处理的实践与应用	277
4.7.2 电火花强化层的特性	213	附录	285
4.8 堆焊	215	参考文献	303
4.8.1 电弧堆焊	216		
4.8.2 等离子弧堆焊	220		

第 1 章 影响工模具寿命的基本因素

模具和加工工具是工业生产中不可缺少的重要工艺装备，是降低成本、提高产品质量和适应规模生产的基础和保证。在机电工业中，70% 以上的零件采用模具加工；塑料、陶瓷和建材等制品大部分也采用模具成形。所以，国外把模具工业称为“工业发展的基础”、“促进繁荣的动力”，我们称之为“百业之母”。但是随着工业技术的发展，模具的工作条件日益苛刻，模具的使用寿命严重地影响着工业生产的发展，难加工材料及高效率、高精度的加工同样对加工工具提出了更高的要求。因此，工模具制造的相关技术得到了深入研究、广泛应用和迅速发展。通过分析和研究工模具在使用中失效的原因，才能采取相应的有效措施来提高模具的使用寿命，以取得良好的经济效益。

影响工模具使用寿命的因素很多，包括设计、加工制造、材料的选择、热处理工艺、使用和维护等，任何一个环节安排不当，都可能严重影响模具的寿命。

模具的工作寿命，主要决定于模具在工作时承受的热—机械载荷水平和模具本身的承载能力。影响模具承载能力的因素很多，除压力加工工艺外，还包括模具设计、模具材料、模具的冷加工、模具的热加工、模具的工作条件。

1.1 模具设计对使用寿命的影响

模具结构对模具的承载能力和承载水平都有着明显的影响。合理的结构有助于增强模具承载能力，减轻模具承受的热—机械载荷水平，防止冲头与凹模之间的啃伤。

模具设计不仅要结构合理，还应根据模具服役条件和受力状态选择合适的材料，设计合理的热加工工艺，以取得所期望的硬度值。此外，还要对钢材纤维的取向、模具几何形状变化、圆角曲率半径的大小等作周全的考虑，以防止模具在热处理和服役过程中产生裂纹、断裂、塌陷和变形等早期失效。

1.1.1 结构不合理

1. 壁厚设计不合理

图 1-1 是开裂的热锻模示意图，模具材料为 5CrNiMo 钢，硬度值为 50 ~ 52HRC，由于模腔边缘倾角处曲率半径太小（曲率半径为 0.5mm），模壁厚度与型腔深度也不相适应，模壁强度显得不足，在倾角处形成应力集中，在反复应力作用下形成裂纹，导致仅锻造 200 余件坯件模具就出现粗大裂纹而失效。采用镶拼的方法或使型腔壁厚为型腔深度的 1.5 倍可以解决早期破裂的问题。

国内外许多试验结果表明，采用传统间隙的模具，刃口磨损快、寿命短。适当加大间隙（由料厚的 7% 加

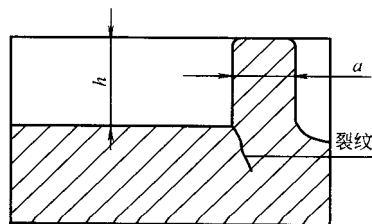


图 1-1 模腔深度与壁厚示意图

大到 15%)，模具寿命显著增加，如图 1-2 所示。

2. 导向结构的影响

可靠的导向结构对于避免冲头与凹模间互相啃伤极为有效，对于无间隙或小间隙的大中型多型腔冲裁模更为重要。

例如用 T10 工具钢制作的冲裁模，工作硬度为 55~59HRC，在 2mm 厚的 08 钢板上冲裁 M3 螺母，若无导向结构，当条料冲至尾端时，常发生冲头冲半孔，对冲头附加弯曲载荷，导致发生啃伤和冲头早期折断，寿命极不稳定。为了防止凹模被啃伤，曾降低冲头的硬度，但又降低了冲头的耐磨性。增加导向板后，冲头悬臂部分的长度由 35mm 缩短到 9mm，提高了冲头的刚性和引导精度，从而减轻了啃伤和早期折断现象，例如，无导向板的冲头平均寿命为 780 件，而加导向板后冲头寿命为 38500 件，使模具寿命大幅度提高。

3. 降低实际承载的影响

对于在接近极限载荷的条件下服役的模具，降低模具在使用过程中承受的载荷，避免局部过载，也是提高模具寿命的重要途径。

在冷锻、冷挤压模的底部如果无排气孔，由于残留空气的影响，会使工件棱角、顶端成形不良。当载荷过大，还可能使模具胀裂。设置排气孔后，避免了残留空气的影响，减少了冲压力，模具寿命可提高 10~20 倍，且保证工件成形饱满、棱角清晰，如图 1-3 所示。对定行程锻压设备（机械压力机）使用的模具，要考虑到毛坯可能超重导致过载，因而对闭式挤压模，应当为多余的毛坯料留出飞边空间。

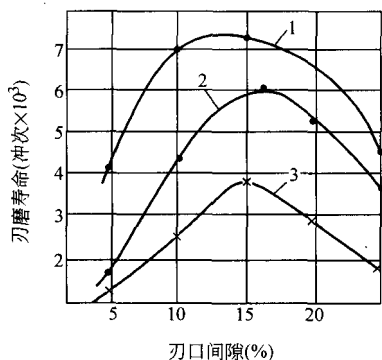


图 1-2 刃口间隙对冷冲模寿命的影响

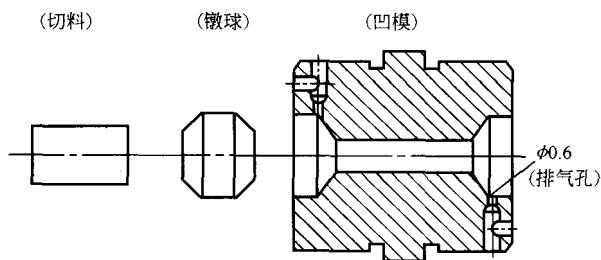


图 1-3 冷锻六角螺母压球模排气孔设置

六角螺栓冷锻冲头承受的压应力大于 1960MPa，冲击频率为 60 次/min。如果按原设计图样加工，冲头根部的应力集中无法避免，使模具处于极限承载状态服役。改进了冲头的形状及尺寸后，则大大改善了应力状态，结果使冲头的工作应力降低了 20 倍，寿命延长了 9 倍。

模锻锤和高速锻锤，主要依靠冲击能使毛坯成形。当工件成形后，还有剩余的冲击能，如果没有足够大的承击面承受和吸收，模具型腔可能因为过载而发生变形或开裂。高速锤锻模由于强烈的冲击载荷而容易发生早期断裂失效，如适当加大模具的承击面，可显著减少早期断裂失效。

如图 1-4 所示的热挤压镍-铜-锌合金棒料的

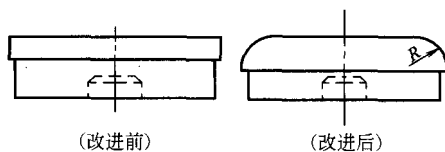


图 1-4 热挤压垫块棱角改圆角

3Cr2W8V 钢制垫块, 其棱角部分因软化变形而早期失效。主要是由于尖角处应力集中及导热不良引起的, 在设计热作模具的型腔时, 应尽量设法防止局部过热。将棱角改为 $R = 20\text{mm}$ 的圆角后, 使用寿命由 95 次上升到 195 次, 提高了 1 倍。

图 1-5 是反挤压凸模的几种结构形式, 采用图 1-5a、图 1-5b 的结构比采用图 1-5c 的结构单位挤压力下降 20%, 模具寿命显著提高, 但其顶部斜角也不宜过大, 否则易因偏载而导致模具弯曲折断。

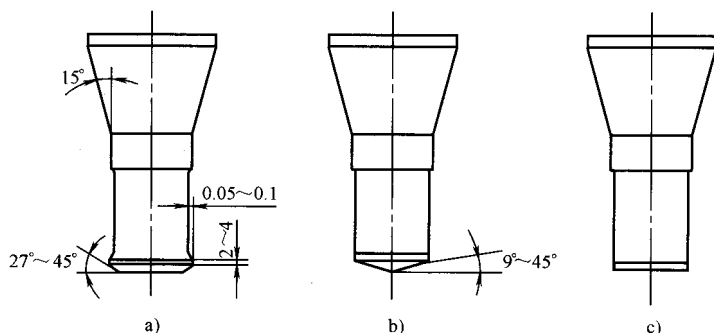


图 1-5 反挤压凸模的几种结构对寿命的影响

1.1.2 应力集中因素的影响

模具的截面尺寸变化处, 最容易因应力集中开裂而导致早期破坏。因为模具钢在大多数情况下, 需要在高强度状态承受载荷, 必然对应力集中十分敏感, 所以合理安排工模具截面尺寸的变化, 对模具的寿命影响颇大。例如, 模腔圆角曲率半径的大小导致裂纹的形成, 裂纹在反复应力作用下迅速扩展, 造成模具开裂, 降低模具使用寿命。

另外模腔过渡圆角半径对模具寿命影响很大。图 1-6 是冷挤压凹模在金属入口处的形状和内径圆角对模具寿命的影响, 由图可见增大圆角半径可提高模具寿命。热锻模的圆角半径同样对模具寿命影响很大, 如模腔外圆角半径由 1mm 增大到 5mm 时, 最大比较应力可减少近 40%, 显著地提高模具寿命。热锻模的内圆角半径也要合理选择, 过小易使模锻工作条件恶化, 锻模易于磨损。根据经验, 内圆角半径值可按 $r = (2 \sim 3.5)R$ 选取 (R 为外圆角半径) 较为合适。

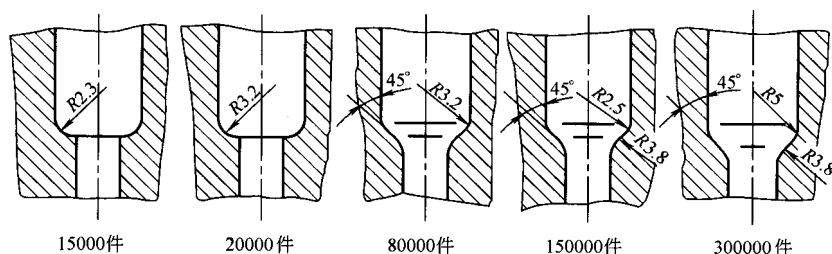


图 1-6 冷挤压凹模的金属入口处的形状和内径圆角对寿命的影响

在使用中易于断裂而又无法消除应力集中因素的模具, 可预先分割, 采用组合或镶块结构。这是克服成形凹模早期断裂失效的一项重要措施。图 1-7 所示的冷挤压顶杆, 用 Cr12MoV 钢制作, 原寿命仅为 1000 至 2000 次, 改为组合结构后, 消除了应力集中因素, 平

均寿命提高到 15700 次，最高达到 28300 次。

受力大冲击力高的模具，如冷挤、冷镦、热锻等模具，采用整体式结构时，由于模具表面拉应力的存在，易于引起模具局部或整体的开裂现象。如塔形锻造凹模，采用组合式模腔，有效降低了模具表面的拉应力，就可避免开裂现象。图 1-8a 所示为高速钢制的 M12 螺栓整体式的冷镦凹模，该凹模出现早期胀裂现象，其寿命约 1 万件。改为图 1-8b 预应力组合式后，由于有效降低了模具受力时的应力梯度，避免了尖角处的应力集中，其寿命达到 6 万件。

整体式高速锤凸模截面尺寸变化很大，工作寿命极短。改为组合结构后，大大减弱了应力集中现象，寿命大幅度提高。整体结构条件的中厚板弯曲凹模，其 V 形槽底部经常由于应力集中而胀裂。改为对开组合结构后，配以通用模架，即可正常服役而不发生早期胀裂失效。

预应力结构可提高冷挤、冷镦凹模的承载能力，充分发挥高耐磨材料的潜力，特别是使用硬质合金制作的模具，如不采用预应力结构，容易发生早期胀裂失效。预应力镶套径向强化可克服径向胀裂，小锥度轴向加压强化既可增强径向断裂抗力，还可克服脱底开裂。如用 W6Mo5Cr4V2 钢制作的整体式凹模，寿命仅为 1000 ~ 1500 件，当采用镶套式结构后，寿命大幅度提高到 50000 ~ 70000 件。

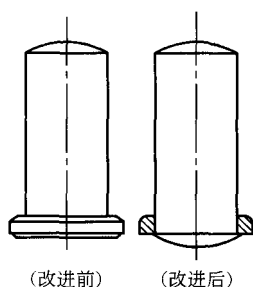


图 1-7 冷挤压顶杆结构改进示意图

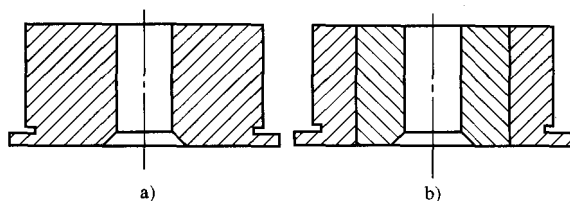


图 1-8 冷镦凹模结构改进示意图

1.2 模具制造质量对模具寿命的影响

模具制造过程中毛坯锻造、预处理、淬火硬化及表面强化等热加工工序对模具的性能和使用寿命有很大的影响。从模具制造工艺和模具寿命的关系出发，对热加工工艺的要求为：通过合理安排锻造工艺避免锻造裂纹；通过合理的预处理保证良好的加工性能及冷压加工所需的塑性；通过合理安排热处理工序及操作，避免表面脱碳层、避免淬火裂纹及变形，保证较高的抗热疲劳能力及热强性、保证较高的抗压强度和较高的强韧性等。

模具在制造过程中，机械加工复杂，包括车、钳、刨、铣、钻、线切割、电火花、磨、冷压等工序，模具表面加工质量的好坏对模具的耐磨性、抗咬合能力、断裂抗力等都有显著影响。加工中如果尺寸、精度、表面质量等稍有失误，就可能造成模具的工作条件发生变化，导致模具早期失效。

1.2.1 模具锻造与热处理对寿命的影响

1.2.1.1 锻造工艺质量的影响

目前我国模块标准化程度很低, 钢材规格也很少, 除大、中型锤锻模块由钢厂直接供应外, 用户需将所购进的圆钢改锻成所需的模具毛坯, 以使钢材达到模具毛坯的尺寸及规格, 为后续加工做好准备。一般外径为 $\phi 40 \sim 70\text{mm}$ 的模具毛坯大多用圆钢改锻而成。

在模具制造业中, 锻坯的质量对淬火变形及开裂倾向、服役时的断裂抗力, 都有显著的影响。模具使用的材料中, 尤其是工作部分的材料, 较多使用合金钢甚至高合金钢。高合金模具钢中, 含有较多的共晶碳化物。在大、中截面钢材中, 碳化物偏析严重, 如不锻造而直接用于制造模具, 易引起异常的淬火变形。在低合金模具钢中, 也存在热锻压流线所引起的方向性效应, 不合理的流线分布容易引起早期断裂失效。

锻造还可以改善模具钢的组织 and 性能, 如使大块碳化物破碎, 获得均匀分布状态; 改善模具金属纤维的方向性, 使流线合理分布; 消除或减轻冶金缺陷, 如焊合气孔、提高钢的致密度等。为了获得优质的锻坯, 应选用足够能量的锻锤, 以充分的变形量进行多向反复锻打, 注意控制锻件流线和型面位置, 以及锻后正确的冷却方法。

如冷冲模材质为 Cr12, 毛坯尺寸为 $\phi 90\text{mm}$, 共晶碳化物大于 5 级, 由轧材直接车削加工, 使用寿命仅数件至数十件, 最高达 3000 件, 均以崩刃、纵向开裂或碎裂而失效。后改用 $\phi 60\text{mm}$ 棒料, 经镦粗锻制成 $\phi 90\text{mm}$ 坯料, 共晶碳化物降为 3~4 级, 分布也较均匀, 制成模具后, 使用寿命达 8000 件以上。规格为 M10~M12 的搓丝板, 如用 Cr12MoV 钢轧材直接切削加工而成, 使用寿命不超过 6 万次; 对毛坯进行充分锻造后, 其寿命将提高近 1 倍, 达到 10 万次。

模具钢要有严格合理的锻造工艺。首先, 加热温度不能过高, 要防止过热和过烧。加热速度不能太快, 加热要均匀, 注意钢料在炉中的位置要适当, 有时加热还要翻转棒料, 以使其受热均匀。锻打时要轻重掌握适度, 打击力过大, 变形量太大, 易产生裂纹。停锻后的冷却速度也很重要, 冷却过快也易开裂。因此, 如果锻造工艺不合理, 不仅达不到改善模具钢质量和提高其性能的目的, 反而会造成锻造缺陷而恶化钢材质量。

1.2.1.2 热处理工艺的影响

模具通过热处理获得所需的工艺性能和使用性能, 保证在正常服役条件下能具有一定的使用寿命。但是, 如果热处理工艺不合理或操作不当, 将会产生明显缺陷, 如变形、开裂, 会严重影响到模具钢的组织状态, 引起模具早期失效, 缩短模具寿命。

模具热处理包括预备热处理, 如球化退火、正火、去应力回火、调质处理等。也包括最终热处理, 如淬火、回火、表面强化处理等。

1. 毛坯预处理工艺的影响

正确的预处理对于提高模具的承载能力和使用寿命起着积极的作用。预备热处理的主要目的是获得需要的加工工艺性能, 为模具最终热处理做好组织准备, 其作用是消除毛坯残存的组织缺陷, 形成有利于强韧性、冷加工工艺性和减少淬火缺陷的原始组织。热处理的关键一是加热温度的选择, 以保证碳化物充分溶解或合金元素充分固溶, 二是冷却方法 (速度或等温温度) 的选择, 以保证能获得合适的切削硬度, 使所析出的碳化物均匀分布。

锻后退火可以去除锻后应力, 调整工件加工硬度, 还可以调整碳化物的形状和分布, 退

火是否充分对模具钢的断裂抗力影响也很大,需要对退火工艺予以足够重视。预处理后的组织对淬火开裂倾向及变形胀缩趋势也有很大的影响,经试验预处理后获得的调质细球化体组织的变形倾向远小于片状珠光体组织。

钢中不均匀分布的碳化物对模具的强度、韧性等会造成明显损害,可以通过锻造工艺处理再进行合适的热处理使之得以改善。如 T8A 钢冲头经碳化物微细化处理后进行低温淬火,可显著减少崩裂,寿命提高 10 倍。Cr2 钢经碳化物微细化处理后,再淬火回火到 59 ~ 60HRC,其无缺口冲击值可比普通处理提高 1 倍以上,可以使模具寿命提高一至数倍。采用高温固溶处理正火消除锻坯中的网状二次碳化物或链状碳化物,可明显提高钢的断裂韧度。细化碳化物后,可使钢的塑性及冲击韧度值提高近 1 倍。

高速钢及高铬钢的共晶碳化物不均匀性经高温奥氏体化退火后,再进行等温退火,可使大、中截面钢材的碳化物不均匀度由 8 ~ 9 级变为 6 ~ 7 级。可显著改善小型毛坯中碳化物的分布,特别是促进小颗粒碳化物球化和大块碳化物棱角圆整化,并细化了晶粒,用于冷镦模可使寿命提高 1 倍以上。

奥氏体晶粒超细化预处理可全面改善模具钢的强度、韧性及抗压强度。W6Mo5Cr4V2 钢超细化处理后晶粒度由常规等温处理的 10 级提高到 12 级,抗弯强度提高了近 20%。9SiCr 钢制滚丝模经超细化预处理后,晶粒度从常规处理后的 8 ~ 9 级细化为 13 ~ 14 级,抗弯强度提高 30%,断裂挠度上升 40%,服役寿命提高 1 倍以上。

2. 最终热处理工艺的影响

最终热处理的关键是淬火工艺的制定。由于热处理工艺或操作不当导致模具早期失效的数量约占模具失效总数的 60% 左右。热处理加热温度的高低、保温时间的长短、冷却速度的快慢和炉内气氛等工艺参数的选择不当,都会造成模具淬火开裂或早期失效。模具在热处理过程中应保证加热均匀,冷却均匀,并应防止模具表面产生氧化和脱碳,淬火后应及时、充分回火,以提高模具硬度的均匀性,从而获得良好的耐磨性和高的疲劳抗力或高的冷热疲劳寿命。

淬火温度如果过高,会使奥氏体晶粒长大,大量碳化物溶入基体,淬火后出现粗针马氏体,增加了模具热处理应力,使模具变脆,服役中容易出现开裂、崩刃、折断等问题。如冷作模具镇流器引伸模,由直径为 150mm 的 CrWMn 钢的棒材锻造后加工成形,热处理淬火温度为 840 ~ 850℃,油冷淬火。当该模具冲压 400 件产品时发生断裂,经调查,是由于控温仪表失灵,使模具淬火加热温度高达 870℃,造成淬火后得到粗大马氏体,使模具脆性增加。又由于有大量残留奥氏体,使钢材热导率下降,在磨削加工中容易形成磨削裂纹,致使模具在服役过程中磨削裂纹迅速扩展而导致开裂。

淬火温度如果过低,则不能保证足够的合金元素固溶于基体之中,致使钢的淬透性下降,回火稳定性降低,模具硬度降低,同时降低钢的高温强度、组织稳定性及冷热疲劳抗力,造成模具产生塌陷、变形和磨损,导致模具的使用寿命降低。

淬火冷却是淬火后能否获得需要的组织性能的决定性因素。如果冷却过快或油温过低,易出现淬火裂纹,将会严重缩短疲劳寿命,甚至引发早期断裂。若冷却速度太慢将发生非马氏体型转变,同样会对模具寿命造成不良影响。对于碳素钢和低合金钢,因淬透性较差,必须采用冷却速度较大的油冷或水冷才能获得预期的效果。合金钢的淬透性高,可采用油冷淬火或空冷。对于大型模具,尤其是模壁较厚的部位,中心区域冷却速度较慢往往得不到马氏

体组织, 会使碳化物或杂质元素沿晶析出或偏聚, 形成“黑色晶界”, 增加模具脆性, 服役中会造成模具脆性断裂。

模具的硬度影响着模具的强度及耐磨性等性能, 但硬度提高往往使模具的塑性和韧性下降。模具发生早期失效大部分是由于工作硬度过高, 损失了韧性而导致早期断裂; 少部分是由于工作硬度过低而呈现早期变形或磨损。对于不同的模具, 有其自身的最佳强韧性配合状态, 应对模具的寿命、失效形式、主要影响因素进行分析后, 找出硬度及韧性等方面的最佳配合。

例如 T10A 钢冲头在软质硅钢片上冲小孔, 仅冲几千片就因毛刺过大而失效。如将冲头硬度从 56 ~ 58HRC 提高到 60 ~ 62HRC, 则寿命可提高到 2 ~ 3 万次, 再继续提高硬度, 则由于韧性不足容易出现早期断裂, 使寿命降低。用 3Cr2W8V 钢制热挤压模, 硬度为 45 ~ 50HRC 时容易出现早期断裂, 硬度降到 38 ~ 40HRC 时, 不再出现早期断裂, 平均寿命明显提高。

另外, 最终热处理中的回火也是重要工序。首先模具回火要充分, 高合金模具一般要求回火两次以上, 这是因为钢中的残留奥氏体在回火冷却过程中会转变为回火马氏体, 经两次以上回火可以使残留奥氏体充分转变。否则, 将在模具中残留较大的淬火应力, 降低模具韧性, 使模具易发生早期断裂。为缩短工时, 提高设备利用率, 回火时间可适当缩短些。

加热过程中对工件的保护不到位引起的脱碳或过保护造成的表面增碳, 都会造成工件的寿命降低。表面过度增碳将使材料的韧性下降, 热疲劳抗力降低, 增加了崩刃、脆断的倾向, 使裂纹扩展速度增加。冷作模具表面增碳后, 主要出现崩刃、脆断等失效形式。用 3Cr2W8V、5CrNiMo 钢制作的模具, 采用气体渗碳炉或固体渗碳剂保护加热淬火, 易形成表面增碳层, 厚度为 0.5 ~ 1.0mm, 含碳量 w_c 可达到 0.7% ~ 1.0%, 导致早期热疲劳龟裂。

脱碳是模具淬火加热过程中最常见的表面缺陷, 加热温度低于 800℃ 的木炭、未充分脱氧的盐浴、未高度净化的分解氨气及氢气, 都不能保证模具表面不发生脱碳。脱碳层强度低、耐磨性差、易产生微裂纹, 如未经去除, 则会降低模具耐磨性及疲劳抗力。3Cr2W8V 钢热冲模在高温箱式炉内加热淬火时, 为了防止氧化脱碳, 操作者采用旧固体渗碳剂保护, 引起了表面渗碳, 淬火前为了清除渗碳剂, 在空气中作了短时间停留则又引起表面脱碳, 在渗碳层外面形成铁素体组织。冲模在服役过程中, 由于表面脱碳, 强度低, 使冲头表面产生强烈磨损, 而脱碳层下面的增碳层降低了钢的热导率, 使模具内外温度梯度加大, 增加了热应力和热应变, 沟槽处成了热疲劳裂纹的起源, 导致冲模早期失效。

4Cr5MoSiV1 是制作大、中型铝合金压铸模的最佳材料, 即使脱碳层极薄, 也明显影响疲劳抗力。用此材料制作的铝合金压铸模至少压铸上万次后才出现热疲劳裂纹。曾有一套上述模具仅压铸 2000 次就出现了早期热疲劳而失效, 对热疲劳裂纹处横截面进行金相分析, 发现表面存在 0.1mm 厚的贫碳层, 距表面 0.05mm 处硬度为 362HV, 0.10mm 处硬度为 386HV, 0.15mm 处硬度为 412HV, 0.2mm 处硬度为 426HV。

1.2.2 模具冷加工质量的影响

模具的冷加工质量不但是使模具达到必须的形状、尺寸等精度的保证, 对模具的寿命也会产生显著的影响。加工过程中如出现尖角、表面粗糙或留有刀痕, 都将容易在刀痕或尖角处萌发疲劳裂纹, 造成模具疲劳失效, 所以模具的切削加工应严格保证尺寸过渡处的圆角半

径，在圆弧与直线相接处应光滑，从而保证工作部位光滑无痕。不正当的磨削工艺如进给量过大、冷却不足等，容易烧伤模具表面或产生磨削裂纹，降低模具的疲劳强度和断裂抗力。模具电加工（包括线切割及电火花成形）能使模具表面产生拉应力及显微裂纹，也易导致模具早期开裂和表面剥落。有时因模块中的内应力，特别是淬火硬化模块的内应力很高，如果电加工前未采取措施降低内应力，则在电加工进程中由于应力重新分布，会导致模具变形或开裂。

1.2.2.1 表面损伤层的影响

1. 磨削烧伤的影响

磨削一般作为工件的精加工，亦即最后的加工。由于磨削时的进刀量及冷却等处理不到位，则有可能在工件表面瞬时温升，会引起模具烧伤。表面磨削烧伤后对模具寿命有如下的不利影响：降低耐磨性、降低疲劳抗力、降低抗咬合能力、加剧脆断及崩刃倾向。所以磨削烧伤往往是模具制造过程中最常见、影响最大的冷加工缺陷。在磨削过程中，由于模具钢的组织缺陷及磨削工艺条件不当，所形成的表面烧伤有如下几种形式。

由于磨削时进刀量太大且冷却不到位，使工件表面产生较大的切削应力，表面出现与磨削加工方向相垂直为主的网状裂纹。轻微的磨裂用肉眼难以觉察，严重时才可用肉眼观察到。

被磨削的表面温度超过相变点时，由于是在非常薄的层面上快速冷却，被磨削表面生成白亮层，如图 1-9 所示，该层具有较高的硬度为 65~67HRC，厚度通常小于 50 μm 。低合金钢的白亮层在 200℃ 以上回火时分解；高速钢的白亮层在 550℃ 以上回火后分解。

被磨削表面温度没有达到相变点，使表面层出现回火或退火现象，使局部硬度降低，导致耐磨性和疲劳性能下降。表面软化层经 5%~10% 硝酸水溶液浸蚀后呈暗灰色。低合金钢的软化层的硬度低于 50HRC，高速钢的软化层的硬度低于 60HRC。被磨削表面表面层的温度达到 300℃ 时加工表面将呈现条纹状色彩（黄、紫、蓝等），类似 250~300℃ 阶段的回火色。

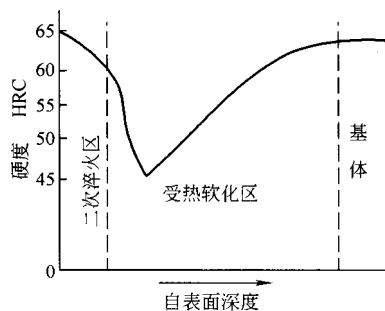


图 1-9 低合金钢表面磨削烧伤影响区

表面脱碳层也明显加剧合金工具钢和高速钢的磨裂和淬裂倾向，模具钢材或锻坯表面通常存在厚度为 0.5~3.0mm 的脱碳层。如在切削加工时未将脱碳层除尽，将在淬火后出现软点或软区，甚至会造成表面硬度普遍偏低。此外，还会降低模具的耐磨性、抗咬合能力、抗热疲劳能力和疲劳强度。对此较敏感的常用钢种为 Cr2、CrWMn、W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2 等。T10A 钢制的冷镦螺钉光冲，其型腔深而陡，使用中常发生早期塌陷失效，寿命小于 4000 次。经分析是由于型腔磨削时进刀深度过大，烧伤软化。后改进磨削工艺，光冲寿命显著提高，稳定在 3 万次以上。

9Cr2 钢制小型冷轧辊，硬度为 62~64 HRC，在使用中常表现为表面早期剥落失效，主要体现在模具表面有约 0.02~0.03mm 的磨削烧伤层，改变磨削工艺，增加一次预磨削后，解决了表面磨削烧伤层的问题，寿命显著提高。

2. 电火花烧伤层的影响

模具加工过程中广泛应用电火花穿孔、线切割、电火花成形等方法。电加工过程中，由

于放电产生大量的热,使加工表面温升到熔融状态,剧冷后在加工面上得到白色熔淬层,如图1-10所示,具有较高的硬度,其厚度与电火花加工规范有关。该熔淬层不仅会使模具硬度出现异常,而且会产生微裂纹。若表面白色层未经去除或未采取低温回火方法防止微裂纹的扩展,则模具在服役过程中微裂纹就可能成为疲劳源,使模具使用寿命降低。对于承受冲击载荷的模具及重载模具,经电火花加工后应补充回火,以减轻电火花加工层的脆性。

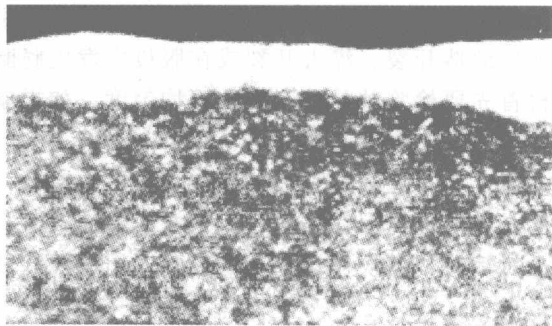


图1-10 电加工后表面形成的白色熔淬层

1.2.2.2 模具表面加工质量的影响

模具处于高硬度、高强度状态时,往往也是处于低塑性、低韧性的状态,所以对表面缺陷十分敏感。表面粗糙度数值的降低,一方面可减少坯料的流动阻力,降低模腔的磨损率,另一方面可减小表面缺陷(如刀痕、电加工熔斑等)和产生裂纹的倾向。表面粗糙度对模具寿命影响很大,试验表明,表面粗糙度对静弯强度有一定影响,如W9Cr4V2钢,与铣削相比磨削的抗弯强度可提高25%,抛光度可提高33%。

如用6Cr3SiV钢制造冷挤压模,表面粗糙度为 $R_a 1.6 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 时,其寿命约3万件左右;如经精抛光,表面粗糙度达 $R_a 0.2 \sim 0.1 \mu\text{m}$,寿命可提高到4.5~5万件。

表面残存的刀痕、尺寸变化处的圆角半径、刻印的标记、锻压引起的夹层、裂纹、撞击伤痕等,如位于应力很大的部位,将成为断裂失效源,会造成模具的早期脆断,降低工作寿命。如风动铆钉模在使用中铆合几百个铆钉后头部碎裂,断口呈现疲劳断裂形貌,疲劳源位于印痕处。

1.2.2.3 加工精度的影响

模具零件工作部位的几何形状,如圆角半径、出模斜度、刃口角度的加工应严格按照设计要求进行。在刀具或设备不能实现时,应由人工修磨并严格测量,以保证模具合理的受力状态,有配合尺寸的部位,应保证其公差或进行配磨。5CrNiMo钢制热锻模的型腔,不应出现尖角。重载锤锻模型腔中的凹槽根部,应保证圆角半径大于2~3 mm。否则,容易由此导致严重碎裂。

目前,圆滚模及搓丝板普遍采用反滚压法制成,如毛坯软化不充分或工序安排不当,在滚模及丝板的牙尖将残存夹层缺陷。工作时,将在夹层处萌生裂纹而发生早期崩裂失效。模具间隙量及均匀性的调整,增加配合承载面及合模面的接触,保证凸模和凹模受力中心的一致性,这些措施都可提高模具的装配精度,从而提高模具的寿命。

1.2.3 模具材料的影响

1.2.3.1 冶金缺陷的影响

根据模具钢中使用环境较复杂的大、中截面钢材的使用经验,模具淬火时出现的工艺缺陷及服役时的承载能力主要与钢材冶金质量有关。含碳及合金元素较多的模具钢,具有较强的出现冶金缺陷的倾向。模具材料不仅要具有适应模具工况的优良性能,更重要的是材料本

身的质量。例如材料内部存在疏松、夹杂、化学成分偏析、碳化物不均匀等,往往造成模具毛坯的锻造开裂、淬火开裂或在服役中发生脆断,是导致模具早期失效的重要因素。购进的钢材首先要检验共晶碳化物的不均匀度,如果碳化物不均匀度级别大于3级,则钢材力学性能下降。如果未经充分改锻,则会因组织不均匀而造成组织应力,热处理时易发生变形及开裂。因此,对这类钢材最好采取多向多次锻拔,以便尽量击碎碳化物和改善锻件金属纤维方向性。模具钢材中存在中心疏松或残余缩孔时,易导致锻裂或在服役中脆断。此类缺陷只有通过钢材、模块作切片低倍检验,用热酸浸蚀后方能显现。模具钢的冶金质量,应具备下列条件:

- (1) 成分及性能稳定,材质洁净度高,各种有害元素、气体、非金属夹杂物的含量少。
- (2) 碳化物颗粒分布均匀、细小,无网状碳化物,带状偏析轻微。
- (3) 断口宏观组织细密,无孔洞、疏松、白点等缺陷。

进行模具设计时不仅必须考虑到金属材料的纤维组织的走向,而且还要利用合理的锻造工艺改善金属材料的化学成分和组织的均匀性,注意把模具型腔安排在金属组织最致密和均匀的部位,使模腔部位处于良好的组织状态,以便充分发挥材料的潜力,提高模具的使用寿命。白点是锤锻模块及大截面合金钢材常见的一种冶金缺陷。由于内部存在大量微裂纹,易导致淬火开裂或在服役中脆断,必须以足够大的锻压比改制成小规格钢材。通常截面小于 $\phi 150\text{mm}$ 的已发现有白点缺陷的钢材,经大变形量压力加工后,原有的白点可被焊合。

例如,采用直径为200mm的5CrMnMo钢棒,经热锻粗后加工成泵盖和扇形物两副热锻模具,分别模锻300件和1000件产品后,模腔凸边即出现密集的热裂纹和整个膜腔下陷,经取样热酸浸蚀后发现,模腔部位存在严重的疏松和粗大的枝晶组织,显然模坯经热锻粗也未能改善棒材中心组织的缺陷,导致了模具的早期破坏。

当碳化物呈现网状、带状、棱角状、链状等形态时,都将严重损害钢的力学性能,会增加淬火变形及开裂的倾向。例如,冲切钢板的凹模,材料是CrWMn钢,由棒材直接加工而成,硬度为62.5HRC,冲切1300只产品后模具即开裂,断口平整呈低周疲劳特征,显微组织中有二次碳化物网。由于有网状碳化物的存在,使模具脆性增加,在冲切过程中易在应力集中部位形成微裂纹。经锻造快冷消除了网状碳化物后,模具使用寿命提高了6倍左右。

1.2.3.2 模具用钢的影响

合理选择模具用钢的基本目的在于避免模具在服役时出现早期失效,以及在制造时减少废品率。模具用钢的性能水平、材质优劣、使用合理与否等因素,和模具制造的精度、合格品率以及服役时的承载能力、寿命水平,均有密切的关系。

材料的选择和使用因为影响因素多,彼此关系复杂,所以是模具制造的一个重大问题。材料是产品的基础,材料影响着模具产品的功能适用性、耐用度、安全性,在模具及其零件的设计、制造过程中,选择何种原材料是至关重要的。模具设计时,材料确定后才能安排制造、装配的加工路线和加工工艺方法,以及估算制作成本。通过对各种典型模具的失效分析,设法满足材料的使用性能和工艺性能两方面的要求,找出能影响模具寿命特点的性能指标,然后,以此为依据,有针对性地选择模具用钢及热处理工艺。表1-1为各种模具钢的性能要求。

在选用材料时要注意使用新型材料,我国已经研制出不少适合我国特点的新型高效模具钢,如热作模具钢中的3Cr3Mo3W2V、5Cr4W5Mo2V、4CrMnSiMoV等,冷作模具中的

6Cr4W3Mo2VNb、7Cr7Mo3V2Si、7CrSiMnMoV 等新钢种的采用，均获得提高模具寿命数倍的效果。如冷作模具钢选用 6Cr4W3Mo2VNb（65Nb）代替 T10、Cr12MoV、W6Mo5Cr4V2 等制作多工位冷墩机用的内六角凸模、钢板弹簧冲孔凸模、螺栓压角凸凹模、螺栓平圆头冲模、圆环冷冲模等；热作模具钢选用 3Cr3Mo3W2V（HMI）代替 3Cr2W8V 钢等制作轴承套圈的热冲压凸模和凹模、连杆辊锻成形模、小型机锻模等，都显著提高了模具寿命。

表 1-1 模具钢的性能要求

性 能	冷作模具钢	热作模具钢	塑料模具钢
耐磨性	●	●	●
强度	●	●	●
韧度	○	●	○
硬度	●	○	○
耐蚀性		○	●
热稳定性	○	●	●
抗热疲劳龟裂		●	
抗氧化性		●	
组织均匀性各向同性	●	●	●
尺寸稳定性（零件精度保持性）	●	●	●
抗粘着（咬合）性、擦伤性	●	○	○
热传导性	○	○	●
工艺性能			
可加工性（冷、热加工成形性）	●	●	●
镜面性和蚀刻性			●
淬透性	●	●	●
淬硬性	●	○	○
焊接性			○
电加工性（包括线切割）		○	○

注：●表示为主要要求，○表示次要要求，空白表示可以不做要求。

如轴承套圈毛坯（ $\phi 31 \sim 33\text{mm}$ ）热墩锻冲头，用于高速墩锻机，每分钟墩锻 80 ~ 100 件，对冲头喷水进行强制冷却。采用 3Cr2W8V 钢制作的冲头，热稳定性虽高但多数以早期热裂失效，主要问题是抗热疲劳性能不够，采用 4Cr5MoSiV 钢制作后，提高了韧性及抗热疲劳能力，使寿命提高 60%。钢件反挤压模具冲头承受的压应力接近工具钢的极限承载能力，用 Cr12MoV、Cr12 等钢制作的冲头（硬度为 61 ~ 66HRC），其服役寿命仅几十件，呈现墩粗后断裂失效。若采用 W18Cr4V 高速钢制作冲头，其服役寿命高于 3000 次。若采用强韧性更好的 W6Mo5Cr4V2 钢制作冲头时，并辅以模具结构的改进措施，在大量生产中，平均寿命可达到 7000 次的水平。

当然改用钢材时不一定总是改到更高级的，有时利用普通材料采用强韧化的处理工艺替代也会有很好的效果。如冷墩卡车车箱螺栓凹模，原用 Cr12 钢制作，尽管凹模壁厚达 40mm 左右，在服役中却常出现早期劈裂失效，寿命仅为 1 ~ 2 千次。用于剪切厚度为 11mm 的中