

文章编号:1673-9981(2011)03-0181-05

# 热锻模失效与强化的研究现状

徐静,戚文军,农登,周楠

广东省工业技术研究院(广州有色金属研究院),广东 广州 510650

**摘要:**在对模具寿命和失效形式进行表述和分析的基础上,介绍了热锻用模的损坏形式.为提高模具使用寿命,模具既要具有优良的整体强韧性,还必须具备优异的型腔表面性能.针对热锻模具应用的特点,阐述了如何从模具强韧化工艺和表面处理方面采取措施来提高模具使用寿命,并提出了采用多种合金处理的强韧化手段提高模具的综合性能是模具制造的发展方向.

**关键词:**热锻模;强韧化;表面处理;使用寿命

**中图分类号:** TG76

**文献标识码:** A

随着工业自动化程度的提高,用模具成型的产品愈来愈多.利用模具生产的突出特点是:在模具寿命较高的前提下,生产效率高、产品质量稳定.目前,在我国的许多企业中,模具的使用寿命还比较低,仅相当于国外的1/3~1/5.据统计,由于模具寿命低而造成工时和能源的浪费,以及对产品质量影响所带来的损失,每年达数十亿人民币<sup>[1]</sup>.因此,如何提高模具的使用寿命是当今世界研究的热点课题之一.

## 1 模具失效形式

模具寿命的高低是衡量模具质量好坏的重要指标之一.从目前的实际情况看,模具失效的基本形式主要有以下几种:磨损失效、变形失效、断裂失效和疲劳失效.

### 1.1 磨损失效

磨损的主要形式有:磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损以及腐蚀磨损和摩擦磨损的交互作用<sup>[2-3]</sup>.

磨粒磨损按照磨损形态和应力或冲击载荷的施加方式,可分为凿削式磨粒磨损、研磨式磨粒磨损和划伤式磨粒磨损.凿削式磨粒磨损的应力和冲击载

荷一般很大.对材质不均匀、内有夹杂及脆硬相和硬质点的板料进行冲裁或切断时的凸模,以及采用挤压成型的凸挤阳模,其磨损形式均为凿削式磨粒磨损<sup>[4-5]</sup>.

研磨式磨损的作用应力很大,但冲击载荷不大,如机械制造中的研磨、抛光等.划伤式磨粒磨损多出现在清屑不良的冲裁凹模刃口、凸模表面及润滑不良的模具滑动和导向装置中.外来硬质颗粒加载工件与模具接触面之间,刮擦模具表面引起模面材料脱落以及工件表面的硬质突出物刮擦模具引起的模具损伤均属磨粒磨损.

粘着磨损多发生于拉伸凸、凹模的棱角处.为了防止粘着磨损发生,通过润滑以防温升很重要.在非润滑条件下使用时,应尽量减小金属表面的摩擦系数,以便在高的接触应力下减小温升.为了最大限度地降低粘着磨损,选用抗回火软化能力强的基材,并辅之以表面硬化处理,使之与摩擦密切相关的表层部分获得必要的硬度、自润滑性和耐磨性<sup>[4-6]</sup>.

就疲劳磨损而言,材料本身必须具有足以抵抗变形的切应力强度.由于最大切应力只产生在表层部分,所以提高表层强度的表面硬化处理对防止疲劳磨损很有效.当表层有微小裂纹或缺陷时,以这些缺陷为始源地会发生异常磨损.在这种情况下,不应

收稿日期:2010-10-12

作者简介:徐静(1985—),女,新疆昌吉人,硕士.

只提高硬度,还应提高材料的强韧性.这对模具的材质和表面强化方法提出了更高的要求<sup>[4-5]</sup>.

在模具与工件(或坯料)的相对运动中,磨损并不局限于一种形式,而是多种形式交织在一起.模具与工件表面产生粘着磨损后,部分材料脱落形成磨粒磨损.磨粒磨损出现后,使模具表面变得粗糙,进一步加剧粘着磨损,并出现疲劳磨损,使模具表面粗化并出现沟痕,加剧了粘着磨损和疲劳磨损<sup>[4-5,7-8]</sup>.一般来说,若材料组织均匀,有较好的抗疲劳性、抗腐蚀性、较高的强度和韧性,则抗气蚀和冲蚀磨损性能较好.

### 1.2 变形失效<sup>[3-4,9]</sup>

模具在服役时,一般承受不均匀的应力和载荷.当模具的某个部位所受的应力超过了当时温度下模具材料的屈服强度时,就会以滑移、孪晶、晶界滑移等方式产生塑性变形,造成模具无法修复而报废.在室温下服役的模具(冷作模具),其塑性变形过程是模具材料在室温下的屈服过程.模具在室温下是否发生塑性变形取决于机械负荷以及模具的室温强度,模具的室温强度取决于所选择的材料及热处理制度.在高温下服役的承载模具(如压铸模、塑料注射模、热锻模等),其屈服过程是在较高温度下进行的,塑性变形主要取决于模具的工作温度和模具材料的高温强度.

### 1.3 断裂失效<sup>[7-8]</sup>

锻打时,模膛内产生很大的内应力,有时高达2000 MPa.当应力超过模具材料的强度极限时,模具易断裂.这种情况多数发生在模膛最深处,尤其是容易形成应力集中的转角处.因此,设计模具时,要保证模膛内的内应力不能超过模具材料的强度极限,同时在转角处要圆滑过渡,避免产生应力集中.

此外,模具在承受冲击载荷时,容易开裂.这主要是由模具受力特点决定的.如在冲击载荷下进行闭式模锻时,毛坯充满模腔后,锻锤还有多余能量,必然传递给模具.由能量转换原理得知,当多余能量大时,打击力也很大,模具常常因为承受不了这么大的应力而开裂.

### 1.4 疲劳失效

模具经过长时间的锻打,在模具表面产生微观裂纹,并逐渐扩展成宏观裂纹.当其达到临界尺寸后,会发生低应力脆断,这就是模具的疲劳损坏.主要形式是激冷激热疲劳(热疲劳)和机械疲劳.热疲

劳裂纹有网状、放射状和直线状.疲劳损坏发生在模膛内冷热较敏感处,如凸台、筋部、模具上表面等.机械疲劳裂纹常出现在模膛内容易产生应力集中处,特别是转角和凸台的根部容易出现与打击方向成45°的裂纹.如果模膛内因其他原因已经产生了裂纹,在交变应力的作用下,裂纹就会扩大,达到临界尺寸时,发生低应力脆断.

疲劳裂纹从模具表面和内部某一缺陷处开始,当模具内部受力不均匀时,局部区域就会出现较大的应力集中.在载荷的反复作用下,应力集中处最先出现裂纹,裂纹的尖端形成尖锐的缺口,又造成新的应力集中.在连续使用中,该处会持续开裂,裂纹变得越来越大,模具上能够传递应力的部分越来越少.当不足以传递载荷时,模具就会突然开裂成两块或碎裂为数块<sup>[9-12]</sup>.

## 2 模具强化技术

### 2.1 模具强韧化工艺

鉴于模具恶劣的工作环境,为提高模具的使用寿命,除要求模具应有优良的整体强韧性外,还要求模具在具有优异的型腔表面性能.在这种情况下,出现了在模具整体强韧化的基础上对其表面进行强化的各种处理手段.

在一般工艺条件下,强度与韧性之间存在着制约关系,材料强度增加,通常伴随着材料韧性的降低.要求高强度的同时,又要求材料有较高的韧性,是很困难的.若采取强韧化处理,可使钢的强度和韧性都得到提高.因此,在含碳量较高的模具钢中,采用强韧化处理,可保证模具具有高强度的前提下,提高冲击韧性,使强度和韧性得到最佳配合,有利于进一步提高多次冲击抗力.

强韧化处理方法有多种,归纳起来主要有以下几种:

#### (1) 模具钢高温淬火<sup>[13-16]</sup>

热锻模具钢高温淬火和高温回火:热锻模具钢5CrMnMo在850℃加热淬火,淬火马氏体形态以片状为主.把淬火温度提高到900℃,使奥氏体充分均匀化,消除富碳微区,淬火后可得到板条状马氏体,提高钢的回火稳定性、冲击韧性和断裂韧性,同时也提高了模具寿命.

高温快速短时淬火:高碳钢模具在快速加热条

件下,奥氏体化不均匀,组织中保留未溶碳化物,使奥氏体中固溶碳和合金元素减少,提高了MS点,阻止了富碳区的形成,减少了片状马氏体量,提高了模具的强韧性。

#### (2) 碳化物细化处理(预处理)<sup>[13]</sup>

热锻模具钢经常规球化退火后,很难细化钢中的碳化物并使之均匀地分布,也很难消除链状碳化物,因此无法保证热处理后获得理想的强韧性。瑞典人首先提出“组织处理”的概念,目的在于细化热锻钢的碳化物。对热锻钢进行预处理以细化其碳化物的关键在于:一是高温奥氏体化,使原来组织中较粗大的过剩碳化物适当溶解以减小尺寸;二是其后的快速冷却获得马氏体或下贝氏体,然后再经高温回火或退火,使碳化物重新弥散析出。这样在热处理后就会在马氏体基体上形成弥散分布的碳化物,提高热作模具的强韧性。

#### (3) 双重热处理<sup>[17-21]</sup>

在常规淬火、回火前先对热锻钢进行一次高温调质处理,这样可在几乎不降低其冲击韧性的条件下,获得较高的断裂韧性,并且硬度也高于常规淬火。经过以上热处理之后,再进行正常的淬火、回火处理。这样经过双重热处理的钢,其中的碳化物均匀细小,硬度、强度和断裂性能都有所提高,可有效延长模具寿命。

#### (4) 形变热处理<sup>[7,22]</sup>

形变热处理是把钢的形变强化与相变强化结合起来的一种强韧化工艺。低温强化方法有:旋压、锤锻和深拉等热加工方式。其强韧化本质在于获得细小的奥氏体晶粒,细化马氏体并增加马氏体中位错密度,形成胞状亚结构,同时促进碳化物的弥散硬化作用。低温形变淬火适用于有双C曲线亚稳奥氏体区的钢种,将钢加热至奥氏体状态,保温后急冷至亚稳奥氏体区进行快速形变。在形变过程中防止奥氏体分解,使塑性降低。与传统工艺相比,在相同条件下,不降低塑性、韧性的前提下,较大幅度提高了强度极限、屈服极限和疲劳极限,延迟了断裂倾向。低温形变淬火操作难度大,需相应的热加工成形设备,目前仅适用于形状简单的凸模或形变淬火后须经线切割的凹模(形变成模块即可)。变量越大,形变淬火冷却强化效果越显著。若形变淬火冷速过低或掌握不当会出现非马氏体组织,降低模具强化效果。

#### (5) 真空热处理<sup>[16]</sup>

与大气下的淬火比较,真空油淬后模具表面硬

度比较均匀,且略高一些。主要原因是真空加热时,模具表面呈活性状态,不脱C,不产生阻碍冷却的氧化膜,有良好的表面质量。炉内真空度越高,材料抗弯强度越高。

## 2.2 模具表面处理工艺

模具表面处理工艺主要有气体氮化法、离子氮化法、电火花表面强化法、渗硼法、TD法、PVD法、硬铬法、激光表面强化法、堆焊法和等离子喷涂法等。

### (1) 渗碳法和TD法

渗碳具有渗速快、渗层深、渗层硬度梯度与成分梯度可方便控制、成本低等特点,能有效地提高材料的室温表面硬度、耐磨性和疲劳强度。渗碳应用于冷作、热作和塑料模具上,能提高模具寿命。对于注塑模,可采用20钢粗加工成模,进行型腔表面渗碳,再经过精加工抛光后投入使用,这样除了可以降低表面粗糙度外,还可以提高模具的耐磨性。如3Gr2W8V钢制压铸模具,先渗碳再经1140~1150℃淬火,550℃回火两次,表面硬度可达58~61HRC,使模具寿命提高1.8~3.0倍<sup>[25]</sup>。

TD(Toyota Diffusion Coating Process)法(托氏沉积法)亦称液体渗金法,是由日本丰田中央研究所发明的。该方法是在盐浴槽中装入耐热钢制坩埚,将硼砂放入坩埚中加热至800~1200℃,然后加入相应的碳化物形成元素粉末,如V, Nb, Cr, Ti,再将钢或硬质合金工件放入盐浴中浸渍一段时间,加入的元素会扩散到工件表面,并与钢中的碳反应形成几微米至几十微米厚的致密碳化物层。随合金种类的不同,可分别形成VC, NbC, Cr7C3+Cr23C6等渗层。由于这些碳化物具有很高的硬度,所以用TD法处理的工具、模具可以获得优异的性能。TD处理可以显著提高零件的耐磨性和抗粘附性,其寿命高于采用油淬的表面处理方法(详见表1)<sup>[23-27]</sup>。

### (2) 离子氮化法<sup>[23,25]</sup>

离子氮化能够提高模具的抗疲劳性和耐磨性。最好采用N<sub>2</sub>,而不要采用NH<sub>3</sub>进行氮化,避免H<sup>+</sup>对模具的氢脆作用。在真空容器内通入氮气,以真空容器为阳极,工件为阴极,在两极之间加高压电场,引起辉光放电,使氮离子轰击并渗入工件表层,形成氮化层,氮化后表层有很高的耐磨性和热硬性,从而提高锻模的使用性能。离子氮化温度一定要低于淬火后的回火温度,以避免模具基体硬度降低和模具变形。

表1 TD处理在冷镦模具上的应用实例<sup>[23-27]</sup>

Table 1 Applications of TD treatment for cold heading dies

模具	尺寸	材料	比较对象	寿命
逆挤凸模	Φ38×135	SKH9	SKH9 油淬	20倍以上
			SKH9 氮化	12倍以上
顺挤凹模	Φ142×29	SKD11	SKD11 油淬	20~30倍
切边凸模	Φ32	SKD11	SKD11 油淬	3.7~7倍
成形凸模	Φ22×130	SKD11	SKD11 油淬	2~2.6倍

(3) 渗硼法<sup>[25,29]</sup>

渗硼法能显著提高模具表面硬度(HV1300~2000)和耐磨性。渗硼层具有良好的红硬性和耐磨性,广泛用于模具表面强化,尤其适合磨粒磨损条件下的模具。近几年,渗硼技术有新的发展,并获得许多专利。例如英国的硼砂盐浴渗硼工艺专利,在熔融硼砂中加入 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NB<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 B<sub>4</sub>C 或 FE-B 进行渗金属,其中 B<sub>4</sub>C 和 FE-B 是还原剂。当 B<sub>4</sub>C 的硼量为 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的 7%~25% 时,可形成 VC 层;当硼含量超过这一比例时,则在 VC 层下面形成 FE<sub>2</sub>B 层。此时,FE<sub>2</sub>B 层及其次层起到了很好的硬度平缓过渡的作用,有利于提高模具的寿命。

## (4) PVD法(物理气相沉积法)

物理气相沉积涂层是应用最广泛的一种表面强化技术,具有处理温度低、热畸变小、无公害、涂层硬度高及均匀等特点。TiN 涂层具有硬度高、粘着强度高、摩擦系数低、抗腐蚀性优良的特点,已广泛应用于各个领域,特别是在工模具行业。70 年代 TiN 涂层成功地用于刀具钻头工具上,其使用寿命平均提高了 2~10 倍,引起了一场刀具革命。80 年代物理气相沉积 TiN 涂层在成形冲头、冲压模上试用成功,但由于模具的工作条件和影响因素远比刀具复杂,致使单一的 TiN 涂层在模具上的应用受到很大制约。原因是一般模具钢基体较软,涂层与基体的结合力不够,在工作中钢基体不能有力支撑 TiN 涂层而发生早期破坏<sup>[28-29]</sup>。90 年代人们通过多组元涂层、多层涂层和复合涂层来提高 TiN 涂层工模具的性能,取得了一些进展。此处复合涂层是指物理气相沉积涂层与其它表面处理工艺或涂层相结合,形成一种带过渡层(或中间层 interlayer)的双层涂层。目前,TiN 多元涂层、多层涂层由于工艺的复杂性、昂贵的设备造价、高的成本还难以形成广泛的工业应用。由于过渡层与硬质涂层之间具有高的结合力、合

理的硬度分布及良好的组织匹配等特点,可显著提高抗疲劳性、耐磨性、塑变抗力和抗腐蚀能力,是今后复合涂层的发展趋势之一。已报道的并有一定效果的复合涂层有:Ti+TiN 的复合、氮化层+TiN 的复合以及以 TiN 为过渡的复合涂层<sup>[30-31]</sup>。

## 3 结 语

分析模具的失效形式、寿命特性,研究模具的失效机理,挖掘材料的性能和改善材料的表面特性已越来越受到模具加工行业的重视;模具的失效形式是一个很复杂的物理变化过程,需要针对不同的磨损失效形式提出材料的强韧化热处理工艺,以便最有效地发挥材料在抗磨损破坏中的综合性能;现代表面处理技术(如离子复合氮化、PVD、等离子喷涂等)可以将材料的高强韧性和表面的高硬、高耐磨性有机结合起来,获得综合性能优异的高品质模具,已成为现代模具制造的发展方向;采用多种合金处理的强韧手段提高模具的综合性能是模具制造的发展方向。

## 参考文献:

- [1] 刘向阳,屈平.我国模具工业发展现状[J].世界制造技术与装备市场,2004(2):58-60.
- [2] 李月恩,赵军,王维.模具失效形式判定依据与技术应用性研究[J].机械设计与制造,2009(4):84-86.
- [3] 苏以人.冷作模具失效分析及改进措施[J].工艺装备,2010,48:67-68.
- [4] 王荣滨.热锻模失效分析及强化处理研究[J].模具材料及热处理技术,2007,(3):70-75
- [5] 于春风.浅谈金属材料的磨损失效及防护措施[J].硅谷,2011(10):123.
- [6] 许军,采有栋.提高模具使用寿命的方法探讨[J].模具材料及热处理技术,2010(8):83-87.

- [7] 赵军. 提高热锻模寿命的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [8] 杨凌平, 杨有才, 丁文伟. 模具的失效分析[J]. 模具技术, 2002(3): 30-33, 54.
- [9] 付传锋, 赵军华, 刘兰霄, 等. 锻模的失效及模拟分析(一)[J]. 机械工人·热加工, 2006(9): 86-90.
- [10] 付传锋, 赵军华, 刘兰霄, 等. 锻模的失效及模拟分析(二)[J]. 机械工人·热加工, 2006(10): 82-84.
- [11] 付传锋, 赵军华, 刘兰霄, 等. 锻模的失效及模拟分析(三)[J]. 机械工人·热加工, 2006(11): 66-78.
- [12] 何柏海. 冷挤压模具的失效与寿命[J]. 模具制造, 2010(10): 66-69.
- [13] 马跃新, 邓俊彦, 邹安全, 等. 热处理工艺对5CrMnMo组织性能的影响[J]. 模具制造, 2006(3): 71-72.
- [14] 周健, 叶久新. 5CrMnMo 锻模失效分析与失效防止[J]. 大型铸锻件, 2002(2): 37-40.
- [15] 葛长路, 孙岚. 5CrMnMo 钢淬火加热保温时间的研究[J]. 金属热处理, 1998(11): 14-15, 31.
- [16] 刘永魁. 5CrMnMo 热锻模热处理工艺改进[J]. 模具工业, 2006(2): 67-68.
- [17] 田金状. 热锻模具钢5CrMnMo 热处理工艺的改进[J]. 科技创新导报, 2010(3): 60.
- [18] 李占坚. 45 钢风扇电机主轴的热处理工艺改进[J]. 热加工工艺, 2010, 39(18): 193-194.
- [19] 曹静, 魏春雪. 5CrMnMo 热锻模淬火工艺研究[J]. 热加工工艺, 2009(8): 154-155.
- [20] 汪新衡, 秦小平, 朱航生. 提高精铸热锻模具性能的研究[J]. 热加工工艺, 2010(19): 200-202.
- [21] 赵一平. 提高热模锻生产中的模具使用寿命[J]. 锻压技术, 2000(6): 43-47.
- [22] 王荣滨. 提高模具寿命的始终强化工艺[J]. 汽车工艺与材料, 1994(12): 1-5.
- [23] 刘雪华. 压铸模具的表面处理新技术[J]. 铸造, 2003, 52(12): 1130-1132.
- [24] 王昌, 于同敏, 周锦进. 表面工程技术在模具制造中的应用[J]. 中国表面工程, 2002(1): 8-17.
- [25] 杨裕雄. 国外模具表面处理技术概况[J]. 模具工业, 1994(8): 2-6.
- [26] 刘先兰, 张文玉, 胡治流. 热作模具的表面强化新技术[J]. 机床与液压, 2006(5): 47-49.
- [27] 孙富. 冷锻工艺的实践及其经济效益分析[J]. 现代零部件, 2004(8): 76-79.
- [28] RANDAWAH J. Technical note: a review of cathodic arc plasma deposition processes and their application[J]. Surf Coat Techn, 1987, 31: 303.
- [29] 李鹏兴, 林行方. 表面工程[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989.
- [30] 郝建军, 黄继华, 刘洪杰, 等. 反应电火花沉积 TiN/Ti 复合涂层机理与性能[J]. 材料热处理学报, 2009(3): 170-173.
- [31] 杨玉玲, 刘常升, 张多, 等. 激光熔覆-激光气体氮化方法制备 TiCN-TiN 复合熔覆层[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2007, 28(9): 1289-1292.

## Research status on failure and strengthening of hot forging die

XU Jing, QI Wenjun, NONG Deng, ZHOU Nan

Guangdong General Research Institute of Industrial Technology (Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals), Guangzhou 510650, China

**Abstract:** The damage form of hot forging die was introduced, based on the description and analysis of die service life and failure mode. To improve the die service life, the mould not only must have excellent strength-ductility, but also must have mould cavities with high surface performance. In view of the application characteristics of hot forging die, this article elaborates how to improve the die service life from technological aspects of improving strength-ductility and surface treatment, and proposes the development trend of mould manufacturing in which the comprehensive properties of the mould are improved by multiple alloys treatment.

**Key words:** hot forging die; strength-ductility; surface treatment; service life