

使用粉末冶金工具钢,提高冷作模具的寿命

一胜百模具技术(上海)有限公司 (上海 201108) 王赵俊 编译

摘要 冷作模具的寿命受到许多因素影响。为了得到高的模具寿命,通常考虑以下一些因素:模具材料、模具设计、模具的加工工艺、模具钢的热处理、被加工材料、生产条件、模具的维护。本文对上面提到的一些影响模具寿命的因素进行深入探讨。从冶金方式来讨论使用粉末冶金模具钢的优点。从模具失效的主要机理来讨论模具钢的选材原则。对模具的磨损现象将联系模具的应用,例如对冲切软的不锈钢或者硬化钢板来进行讨论。也讨论了模具钢热处理的重要性 and 操作控制。提出了有关热处理工艺的一些实际问题。提到了表面硬化镀层对延长模具寿命的好处。推荐了对模具钢材料中间加工(例如线切割)的正确工序。本文也讨论了与机加工相关的实际问题。

0 引言

随着工业的发展,对冷作模具冲压的性能要求也越来越高。作为一个简单冲切模具,冲 200 000 次的寿命不再符合低成本/高产量标准的要求。使用新开发的模具材料(例如粉末冶金模具钢)能够达到冲百万次以上的模具寿命。从模具经济性方面考虑,使用粉末冶金(PM)模具钢使单件成本大大降低了。尽管模具初始成本高,但是模具寿命延长,使停工时间减少,让使用者因此而得益。从冶金学观点来看,根据特殊冶炼方法推出粉末冶金(PM)模具钢比常规模具钢的寿命长。粉末冶金(PM)模具钢碳

化物细小且分布均匀。碳化物类型经常能够设计出来,如能形成更硬的碳化物 VC。碳化物越硬,尺寸越小,分布越均匀,就越能提高模具寿命。

虽然粉末冶金(PM)模具钢得到越来越多的认可,但是通过客户服务发现,在使用粉末冶金材料时,遇到料想不到的失效实例。这些失效不真正是由于材料的缺陷,而与模具的加工有关。如图 1 所概括的,象冲切这种冷作用用途会受许多因素的影响^[1]。所有参数的正确调整是非常重要的,这样模具能够有可靠而满意的性能。

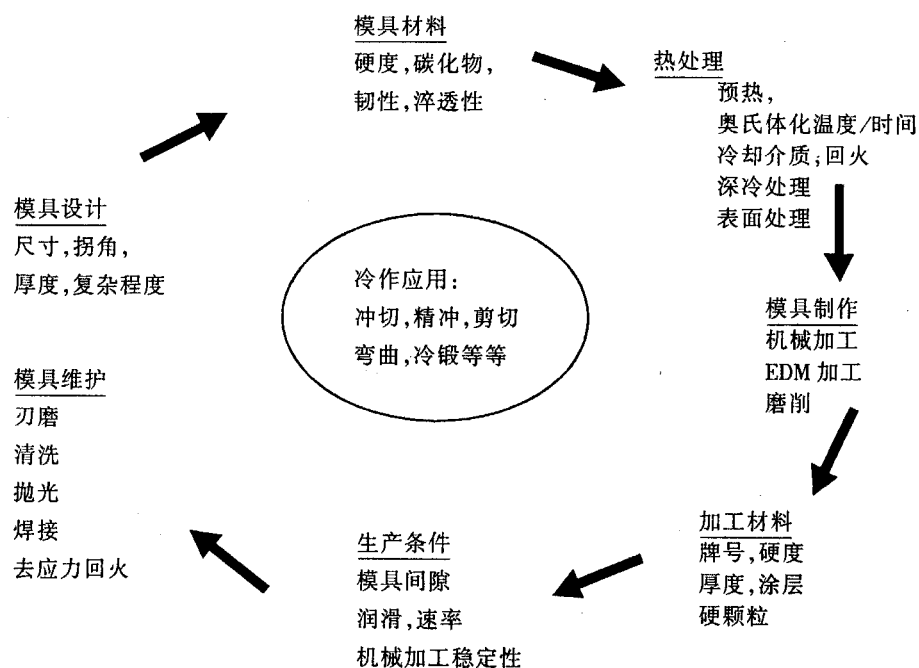


图1 影响冷作钢模具寿命的因素

1 模具钢材料

1.1 选择冷作模具钢的基本原则

在选择冷作用的钢时,首先考虑的两个基本机械性能是硬度与韧性。硬度(或强度)确保模具的切削刃口足以切下加工的材料,同时韧性保证模具在工作时不会发生崩角或开裂。理想状态是,高硬度

和高韧性的结合给出最好的模具性能。然而,由于冷作模具钢的高合金成分使得硬度增加时,韧性却急剧降低。

表1列出了当前 ASSAB 销售的冷作模具钢的牌号和化学成分。Vanadis 4、ASP 23 和 Vanadis 10 都是粉末冶金高合金模具钢。

表1 本文中提到模具钢的化学成分和相应的 AISI 标准

牌号	化 学 成 分						相应 AISI 牌号
	C	Mn	Cr	Mo	W	V	
DF-2	0.95	1.20	0.60		0.60	0.10	O1
XW-10	1.00	0.60	5.30	1.10		0.20	A2
XW-41	1.55	0.40	12.00	0.80		0.80	D2
XW-5	2.05	0.80	12.50		1.30		D6
Calmax	0.60	0.80	4.50	0.50		0.20	专利
Vanadis 4	1.50	0.40	8.00	1.50		4.00	专利(粉末冶金钢)
ASP 23	1.27		4.20	5.00	6.40		M3:2(粉末冶金钢)
Vanadis 10	2.90	0.40	8.00	1.50		9.80	专利(粉末冶金钢)

图2列出了粉末冶金钢和常规模具钢 AISI O1, D2, D3 的韧性比较。可以看到,与常规模具钢相比,粉末冶金钢在纵向和横向的韧性变化很少。粉末冶金钢显示出比常规模具钢更高的韧性,也预示着粉末冶金钢能在更高的硬度下使用。

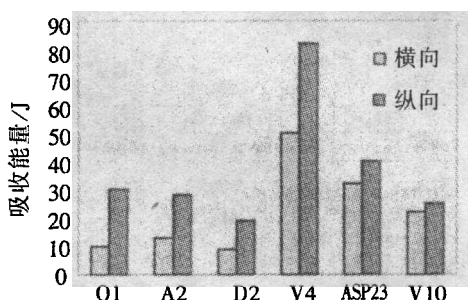


图2 粉末冶金钢与常规模具钢的韧性比较

粉末冶金钢具有更高的韧性和更好的各向同性性能的原因是其独特的钢材制作方法^[2]。粉末冶金模具钢由金属粉末制造,确保成型时碳化物分布均匀、细小、且大小均匀。图3是 Vanadis 4 的显微组织。可以看到它有细的组织和小颗粒的碳化物。

常规模具钢的制造方法是液态金属在钢锭模中冷却而导致严重的网状碳化物偏析。网状碳化物仅在随后的锻造或轧制过程中被打碎成较小的尺寸。这些加工使得在轧制方向和横向上的韧性产生更大变化。与粉末冶金钢相比,韧性也更低。

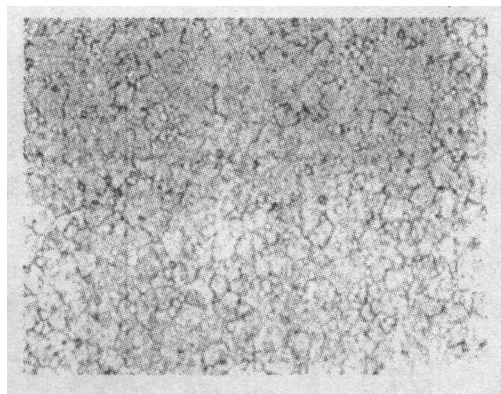


图3 VANADIS 4 硬火态的显微组织

1.2 模具失效机制和模具磨损冷作模通常按下面机制之一失效^[1]:磨损、崩塌、变形、开裂和咬合。很容易理解在冲头和模具之间经过许多次冲切后,冲头和模具的切削刃口会被倒圆,称为磨损。通常被冲切出的材料有多余毛刺,这是模具磨损的征兆。模具粗糙的表面精加工会发生崩塌。冲切实际上是一种低劳过程,粗磨或者 EDM 加工的模具会产生崩塌问题。粗糙的表面代表许多应力集中点,可能是裂纹萌生的位置。

如果模具硬度选择正确,模具的变形很少发生。模具的开裂通常是由于韧性较低。

当冲切软的材料诸如铝或铜时,特别会发生粘模。其有害作用是微量的软材料改变了冲头和模具之间的间隙,这样导致了表面拉毛。

有两种磨损形式——粘着磨损和磨粒磨损。粘着磨损发生在加工软材料时,例如不锈钢或者铜。Uddeholm Tooling Sweden 对粘着磨损的研究表明,粘着磨损是由于垂直冲头运动方向上产生许多微裂纹。图 4a)显示了在冲切不锈钢 90 000 次后冲头 (AISI D2) 圆周部分的 SEM 照片。当冲头在循环载

荷作用下并开始低周疲劳,粘着磨损产生的微裂纹会进一步发展成崩掉的微坑。图 4b)显示了一件 (AISI D2 类) 模具冲切硬度为 46 HRC 钢带后的磨损痕迹。从这张显微照片可知,磨粒磨损引起沿模具运动方向产生摩擦流线。

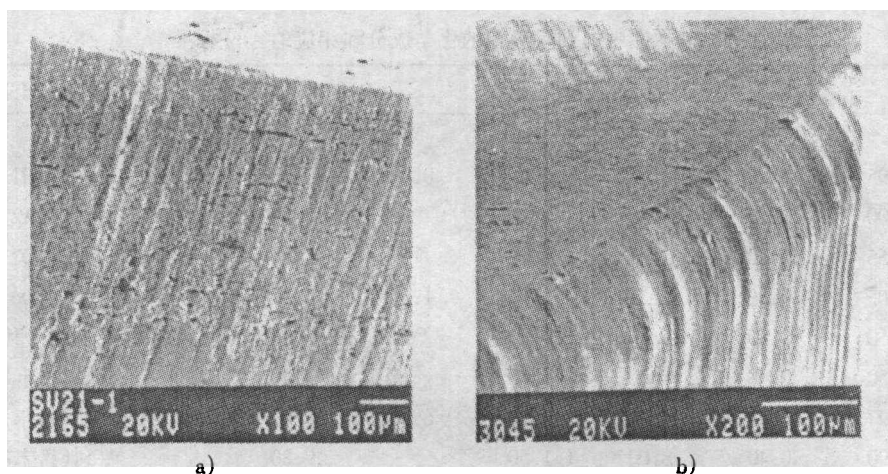


图 4

2 模具钢的加工

制作新的模具需要加工。其可以包括磨,车,钻,线切割,研磨等。在加工过程中表面附近的组织会改变。从冶金学观点来说,在机械切割表面附近产生高密度位错^[3],这样形成了一层应力区。在随后的淬火过程中,加工表面趋于释放这些应力,因而导致模具产生大量的变形。为了使不希望的畸变降到最小限度,在淬火前对加工过的模具进行去应力处理是一个好方法。

2.1 线切割和相关问题

冷作模通常在淬火态用线切割加工。有两种典型的线切割问题:1) 线切割模具的表面太粗糙,不能得到可靠的模具寿命;2) 在线切割时模具裂纹。

众所周知,粗线切割会导致不稳定的模具寿命^[4]。用高电流进行粗线切割会产生可能含有裂纹的脆性重铸层。此线切割表面通常有拉应力,使得模具寿命比预期的要短。必需在比最终回火温度低约 20 °C 的温度进行去应力处理,释放拉应力。有时在去应力处理前推荐对线切割表面进行抛光。然而,由于几何形状复杂,精密设计零件有时有难以抛光的情形。因此,推荐至少进行三次以上的线切割。通常要达到可靠、一致的模具寿命,需要七次线切割。

图 5 是线切割表面的横截面。进行了七次线切割。从照片上可以看到,没有“白层”或者热影响区留下。模具获得了可靠的优良性能。

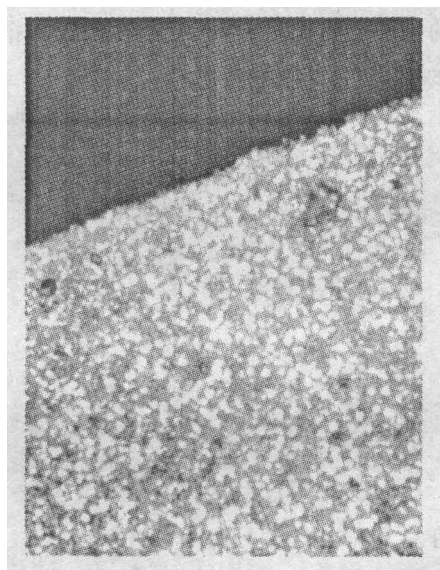


图 5 七次线切割后的模具线切割截面(400×)

当对已淬火和回火过的较厚模具板材(> 35 mm)线切割时,主要问题之一是模具偶然会开裂。发现模具开裂通常与回火温度有关。高温回火(> 500 °C)对于降低淬火模具的应力比较好^[5]。当模具从回火温度冷却时,高温回火也能使残余奥氏体转变成马氏体。对于线切割模具,尽可能少的残余奥氏体很重要,因为在线切割时由于局部高热量输入使得残余奥氏体转变成马氏体而引起开裂。

对于整体淬火的模具钢,淬火和回火后的应力

状态为中心是受压,表层受拉。如果在线切割时此应力状态被打乱,模具可能变形或者开裂。

3 模具钢的热处理

冷作模具钢以软的退火态供应。为了得到强度需要淬火。为了得到好的显微组织,应控制淬火质量。应牢记显微组织决定钢的(物理、机械、化学)性能。通过热处理得到好的显微组织确保好的模具寿命。

3.1 模具钢的淬火——热处理循环

模具钢的淬火包括模具组件的加热和冷却。在热处理过程中,模具必须加热到奥氏体化温度(如 AISI D2 的奥氏体化温度为 $1\ 030\ ^\circ\text{C}$)^[5,7],这样模具的基体组织从球化珠光体转变成奥氏体。随后快速冷却(淬火),奥氏体转变成马氏体。理想状态是,正确淬火的高合金冷作钢应该有碳化物强化的马氏体基体组织。

奥氏体化过程中的保温时间和温度必须正确设定。不允许有增碳或脱碳。淬火介质必须正确选择,因为太快的淬火可能会导致开裂。必须牢记当淬火过程中奥氏体转变为马氏体时,会增加 4% 以上的绝对体积。

模具失效经常会与错误的或者不适当的热处理方法有关。这里值得提到的一个失效案例是手表后壳的成型模具。模具经常发生崩塌。模具材料是 Calmax,是 Uddeholm tooling AB 的专利材料。此材料在 57 HRC 的工作硬度具有高韧性。在实验室检验失效模具后,得到图 6 的照片。可以看到,模具表面有局部脱碳区,此是崩塌产生的原因。

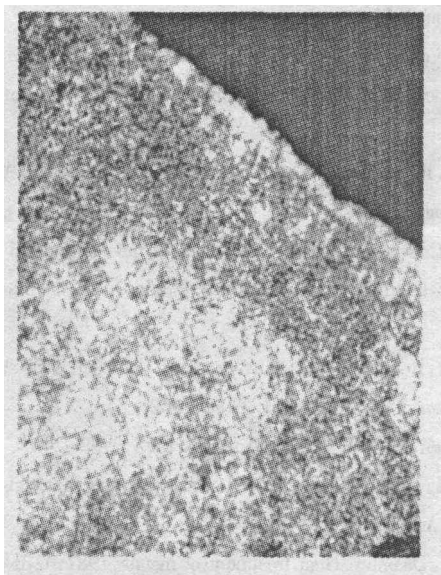


图 6 因淬火过程中脱碳而失效的 Calmax 模具(200×)

3.2 模具钢的变形(变形的控制)

模具钢淬火后由于高温过程会产生变形。考虑到精密模具的应用领域,变形应该最小。如果使用不同的热处理设备,产生的效果会大不一样。要求最小变形的模具钢,其淬火的一种趋势是使用高压淬火的真空炉^[8]。

变形控制的普遍原则是,尽可能慢的加热零件以及尽可能慢的淬火,减小热冲击到最小。从显微组织来看,模具应快速淬火以得到好的显微组织。因此必须找到淬火冷却速度快慢的平衡点,在文献^[5,9]中能够找到更多的一般信息。

在淬火精密模具时,要求在热处理后模具的平整度不能改变。典型的平板尺寸是 $30\ \text{mm} \times 500\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$ 。然而由于热处理前模具上有预加工的细孔,在淬火以后模具呈现弯曲。一旦发生弯曲,应进行矫直。

实际经验表明,平板形状的模具在钢中软的奥氏体向马氏体转变时能矫直。牢记这条规则就是用两种方法能够避免平板模具的弯曲:一是淬火过程中模具从奥氏体温度冷却时,把模具放在夹具中。这种方法可在某种敞开式炉,如盐浴炉中进行。模具应在有关材料的 Ms 点上温度时放进夹具中。

矫直的另一方法是在回火时夹住已淬火的模具。重要的是选择合适的温度,当冷却时,残余奥氏体转变为贝氏体或者马氏体,在相变过程中,回火模具将受到夹具的轮廓限制而使弯曲被矫直。这种方法特别适用于 ASP 23 材料,因为在回火前它有相当高的残余奥氏体量(在 $1\ 170\ ^\circ\text{C}$ 淬火时 30% 的残余奥氏体量)。

3.3 表面处理

冷作模具钢典型的表面扩散处理为渗氮或者氮碳共渗。这些工艺中,氮(或碳氮共渗中的碳)原子扩散进钢的基体中,在钢中与合金元素形成了氮化物。大多合金元素如 Cr, Mo, V 等是强氮化物和碳化物形成元素。一定时间的处理后,能形成一层均匀分布的氮化层,这将延长模具寿命,因为它有高的硬度并降低摩擦系数^[11,12]。

工业上应用已经证明,通过 PVD 或 CVD 处理的如 TiN 或 TiCN 沉淀陶瓷,有延长模具寿命的作用,寿命增加约 10 倍^[13]。表面硬涂层的有效性依赖于涂层与基体的附着程度。当用粉末冶金钢作硬涂层的基体,达到了好的附着效果。这是因为在粉末冶金钢中的 MC 类碳化物与 TiN 类的涂层有一定的晶体亲和力^[14]。

4 磨削和模具维护

磨削粉末冶金钢时,正确选择砂轮至关重要。这是因为粉末钢含有硬的碳化物(例如 VC = 2 900 HV),它比砂轮的磨粒(例如 Al_2O_3 = 2 200 HV)更硬。立方氮化硼(CBN = 4 700 HV)砂轮在研磨已硬化粉末冶金模具钢时表现出好的效果。不适合使用 CBN 砂轮的地方,通常可以用 Al_2O_3 砂轮以避免研磨烧

伤。

对模具组件的适当维护会延长模具的寿命。维护中涉及的通常方法是重磨,机械调整,间隙检查,焊接等。

使用粉末冶金钢的益处之一是减少重磨次数。重磨时,通常要停机,增加产品成本。表 2 是使用常规材料和粉末冶金材料时单件成本的比较。

表 2 用粉末冶金模具钢生产 330 000 件产品时在成本/零件方面经济节省的实例

用途:用于排气管凸缘的精冲 模具类型:冲切	加工材料:软结构钢 厚度:9.8 mm	
模具钢牌号	AISI D6 类	Vanadis 4
每次再磨削后生产零件数	10 000 件	41 000 件
每件模具需要再磨削总数	4	8
每次再磨削所需时间	2 h	2 h
所需模具总数	8	1
刃磨总次数	32	8
模具更换总数	8	0
误工时间	$2 \times 32 + 8 = 72$ h	$2 \times 8 = 16$ h
模具成本	$8 \times 1\,540 = 123\,840$ Kr	22 440 Kr
维修成本	$72 \times 200 = 144\,000$ kr	$16 \times 200 = 3\,200$ kr
生产 330 000 件凸缘的成本	138 240 kr	25 640 kr
制造 330 000 件法兰时单件的成本	0.41 kr/件	0.078 kr/件

5 总结

冶金工艺的优越性使粉末冶金工具钢在冷作钢用途中获得了越来越多的认可。推荐用于特殊用途的工具钢时,应考虑失效机制。模具正确地淬火很重要,这样能得到良好的组织,获得良好的性能。通过降低冷速能最大限度的减少变形。对于高精度的模具,在软奥氏体转变为马氏体时,能用夹具矫正弯曲。使用高温回火能避免线切割的开裂问题。诸如 TiN 的表面涂覆可以延长模具寿命。磨削粉末冶金工具钢时,使用经良好修整的 CBN 砂轮能避免研磨烧伤。

参 考 文 献

- O. Sandberg, Proceedings of an international conference on tool steel for dies and molds, Shanghai, 1998
- Steels for cold work tooling, ASSAB handbook, internal publication, 1996
- E. M. Trent, Metal cutting, 2nd edition, Published by Butterworths & Co. Ltd., 1984
- Hihara, Y. Mukoyama, and I. Ogata. Journal of Advanced Science, 1990, 2(2): 73
- E. K. Threling, "Steel and its heat treatment", Butter worth, London, 1975
- Stig Sameulsson. "ASSAB tool steel handbook: steel selection, tool design hints, heat treatment", ASSAB publication, 1996 print
- R. W. Reynoldson. "Fluidised bed heat treatment", . ASM international, 1996
- J. G. Conybear, Advanced materials & processes, 1993, 2
- "Heat treating". ASM Handbook Volume 4. ASM international, 1991
- G. A. Roberts, J. C. Hamaker, A. R. Johnson. Tool steels, third edition, ASM, MetalsPark, Ohio, 1962
- T. Bell, Heat treatment of metals, 1975, 2: 39 ~ 49.
- Shi Li and R. R. Manory. Metallurgical and Materials Transaction A, Jan., 1996
- P. A. Dearnley. Heat treatment of metals, 1987, 4: 83 ~ 91
- "Titanide hard coating of punching tools". application report, APP TiN coating Technology Pte. Ltd.