

绪 论

一、模具材料的作用和地位

模具是材料成形加工中的重要工艺装备，是机械、电子、轻工、国防等工业生产的重要基础之一。利用模具可以实现少、无切削加工，从而提高生产效率、降低成本。由于模具成形具有高产、优质、低消耗等特点，因而其应用十分广泛。其中占飞机、汽车、拖拉机、机电产品成形加工的 60% ~ 70%；占家电产品、塑料制品成形加工的 80% ~ 90%。

随着模具工业的迅速发展，对模具的使用寿命、加工精度等提出了更高的要求。模具材料性能的好坏和使用寿命的长短，将直接影响加工产品的质量和生产的经济效益。而模具材料的种类、热处理工艺、表面处理技术是影响模具使用寿命的极其重要的因素，所以世界各国都在不断地研究和开发新型模具材料、改进模具的热处理工艺、选用适当的表面处理技术、合理地设计模具结构、加强对模具的维护等措施，来稳定和提高模具的使用寿命，防止模具的早期失效。

模具材料的使用性能将直接影响模具的质量和使用寿命。模具材料的工艺性能将主要影响模具加工的难易程度、加工质量和生产成本。为此，应合理选择模具材料，改进热处理工艺和表面处理工艺，大力推广模具生产中的新材料、新工艺和新技术。

二、模具材料的应用与发展

在建国以来的 50 多年中，我国的模具工业发展迅速，现已成为独立的工业体系，特别是 1989 年国务院在《当前产业政策要点的决定》中将模具列为“机械工业技术改造序列的第一位”以来，在模具材料的研制与开发、模具的热处理工艺、模具的表面处理技术等各方面都取得了巨大的成就。目前，我国的模具钢产量已跃居世界前列，基本满足了模具制造业的需要，已逐步发展成为国民经济中重要的基础工业。

在冷作模具钢方面开发出了一批性能优良的新钢种，如 6Cr4W3Mo2VNb (65Nb)、6CrNiSiMnMoV (GD)、7Cr7Mo2V2Si (LD)、9Cr6W3Mo2V2 (GM)、Cr8MoWV3Si (ER5) 钢等。这些钢具有较高的强韧性、耐磨性以及良好的综合工艺性能，可用于冷挤压模、冷镦模、冷冲模、切边模等冷作模具，并使其使用



寿命成倍提高。

在热作模具钢方面,结合我国矿产资源研制和开发了 3Cr3Mo3W2V (HM1)、3Cr3Mo3VNb (HM3)、5Cr2W5Mo2V (RM2)、4Cr3Mo3W4VNb (GR)、4Cr5MoSiV1 (H13)、4Cr3Mo2NiVNbB (HD)、5Cr4Mo3SiMnVAI (012Al)、6Cr4Mo3Ni2WV (CG-2) 钢等。这些钢具有高的热稳定性、高温强度、耐磨性及抗热疲劳性,常用于制造热挤压模、热锻模、热冲压模、热镦模、压铸模等,其使用寿命比 5CrNiMo 和 5CrMnMo 钢提高数倍。

在塑料模具钢方面,相继开发了 Y55CrNiMnMoV (SM1)、Y20CrNi3AlMnMo (SM2)、5NiSCa、06Ni6CrMoVTiAl (06Ni)、25CrNi3MoAl、0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR)、10Ni3MnCuAlMo (PMS) 钢等。这些钢具有适当的强韧性,热处理工艺简单,变形小,易于切削加工,常用于挤塑模、压塑模、注射模、吹塑模等模具的生产。

用于制造模具的普通硬质合金和钢结硬质合金材料正在走向成熟,目前已在冷冲裁模、拉丝模、冷镦模、无磁模等模具上广泛应用。与传统模具材料相比,其使用寿命大幅度提高。如采用钢结硬质合金制造的 M12 冷镦模,使用寿命在 100 万次以上;采用普通硬质合金材料制造的硅钢片高速冷冲裁模,使用寿命可达上亿次。

在模具的表面处理技术上也有了很大的发展,除了有传统的渗碳、渗氮、氮碳共渗、渗硫、渗硼、渗金属等工艺被广泛使用外,还发展了气相沉积技术、热喷涂技术、激光表面处理技术、离子注入技术、电子束表面处理技术等,有效地提高了模具的性能和使用寿命。

虽然我国的模具材料和模具表面处理技术有了较大发展,但与发达国家相比仍存在着一定的差距,模具材料的生产和使用水平还有待提高。

我国模具材料及其处理技术的发展前景十分广阔。应积极开发和引进高性能的新型模具材料,增加模具钢材的品种、规格,形成符合我国资源情况的系列化和标准化的模具材料,以满足不同模具的使用性能和寿命的要求;重视模具的设计、选材、加工、处理、检验等全过程控制,不断降低生产成本,提高经济效益;加强对模具的新技术、新材料、新工艺的研究,发展模具的成套加工精密设备,提高模具生产的整体水平。

三、本课程的性质、教学目标和基本要求

模具材料是普通高等教育应用型本科材料成形与控制工程专业(模具方向)的一门专业课程,虽然学生已经学过一些工程材料方面的知识,对材料及热处理、材料成形加工等有了初步的了解,但缺少对模具选材、加工等综合分析方法的训练,缺少模具新材料、新工艺、新技术方面的知识,与模具设计、制造工艺



之间的联系不够紧密；同时，由于模具材料种类繁多，性能各异，模具的使用性能和使用寿命都与合理选择模具材料、确定合适的热处理工艺、采用适当的表面处理技术等密切相关。因此，编写该教材的目的，就是使学生能够较全面地了解各种模具材料的性能、热处理工艺、表面处理技术，并且根据模具的具体服役条件、模具结构合理地选择模具材料、正确地制定模具的生产工艺，从而提高模具的使用寿命，降低生产成本，提高产品的经济效益。

通过本课程的学习，希望学生能达到如下基本要求：

- 1) 了解常见模具的失效分析方法。
- 2) 熟悉常用的模具材料、热处理工艺及模具的表面处理技术。
- 3) 明确模具材料、热处理工艺及表面处理技术与模具使用性能、使用寿命、生产成本、经济效益之间的关系。
- 4) 掌握常用的冷作模具材料、热作模具材料、塑料模具材料以及其他模具材料的牌号、主要成分、性能特点、工艺特点、主要用途等，并能合理地选择模具材料及热处理方法。
- 5) 熟悉各类常见的模具表面处理方法，并能进行合理选用。

模具材料课程的理论性和实践性都很强，而钢的热处理原理与工艺、合金钢等知识是其重要的理论基础。因此，在学习模具材料课程时，应紧密结合以上两部分内容进行深入学习。其次，还应注意实践知识的学习，尽可能参观一些模具的生产和使用厂家，增加专业感性认识。同时将模具材料与其他相关的专业课程结合起来，认真分析模具的生产工艺、设计方法、失效形式及原因等，以便更好地学习好本门课程。

第一章 模具失效与使用寿命

模具失效是指模具丧失正常的使用功能，不能通过一般的修复方法（如刃磨、抛磨等）使其重新服役的现象。模具失效既有达到预定寿命的正常失效，也有远低于预定寿命的非正常失效（早期失效）。正常失效比较安全，而非正常失效则不然，常常造成人身或设备的恶性事故，并造成经济上的损失，因此应尽量避免。通过对模具失效进行分析，找出模具失效的具体原因，则可以采取相应的措施加以改进，以提高模具的使用寿命。

模具使用寿命（也称为模具正常寿命）是指模具在正常失效前生产出的合格产品的数目，若其在使用过程中经过多次修模，则模具的使用寿命为首次寿命与各次修模寿命的总和。模具寿命是在一定时期内模具材料性能、模具设计与制造、模具热处理工艺、模具使用与维护等各项指标的综合体现，在一定程度上反映了一个国家或地区的冶金、机械制造等工业水平。

第一节 模具的失效分析

要研究模具的失效问题，就要了解各类模具的服役条件和失效形式，以便分析其失效原因，合理地选择模具材料，改进模具的设计、加工和热处理工艺，提出预防或推迟失效的措施，不断提高模具的使用寿命。

一、模具的损伤与失效

模具在服役中产生过量塑性变形、表面损伤、开裂与断裂、冷热疲劳、腐蚀等损伤破坏后，将会失去原有功能，以致不能正常服役，这些现象均称为失效。如冷冲裁模刃口的过度磨损或崩刃；热挤压冲头的墩粗变形；热锻模出现冷热疲劳裂纹等。

模具的失效一般都存在一个变化过程，如断裂失效就可能经历表面产生缺陷、表面微裂纹、裂纹扩展、最后断裂的变化过程。模具在使用过程中，出现变形、微裂纹、腐蚀等现象但没有立即丧失服役能力的现象称为模具损伤。模具在工作时，不同部位承受不同的作用力和不同的温度变化，可能同时出现多种不同的损伤形式，各种损伤形式之间又会相互渗透、相互促进、不断累积。例如，磨



损伤沟痕可成为疲劳裂纹的萌生之处，加快疲劳裂纹的萌生速度，若磨损沟痕深而尖，则其本身可成为一次断裂的起裂点；在模具表面出现冷热疲劳裂纹后，表面粗糙度严重恶化，会进一步加剧模具的磨损；此外，在冷热疲劳裂纹的底部，会由于应力集中的出现而加速机械疲劳裂纹的萌生，加速疲劳断裂。显然，损伤是模具破坏的起源，损伤的累积可导致模具的失效。

模具的失效一般可分为非正常失效（也称早期失效）和正常失效两类。模具未达到一定工业技术水平公认的使用寿命而产生的失效称为非正常失效或早期失效，非正常失效发生在模具使用的初期，主要是由模具设计和制造过程中的缺陷引起的，失效出现的几率很高，且随着模具使用期限的延长而迅速降低。

模具使用一定期限后，由缓慢塑性变形、均匀的磨损或疲劳破坏而出现的失效称为正常失效。模具经过使用初期的考验后即进入正常的使用阶段。在理想的情况下，模具未达到正常使用寿命就不会发生失效。但由于工作条件的变化、操作者的使用水平、管理者的失误等原因而造成的某些损伤，也将导致模具的失效，但这种失效的几率很低。在模具经过了长期使用后，由于使用损伤的大量累积，致使模具发生失效，即达到了模具的使用寿命极限。在模具的使用过程中，注意做好经常性的检查、维护和保养工作，可有效地推迟正常失效的到来，有助于提高模具的使用寿命。

二、模具失效的分类

模具失效是模具在使用过程中所出现的一种正常现象，但由于人们研究模具失效的目的不同，对模具失效的分类方法也有所不同，除了前面已经提到的非正常失效和正常失效以外，还有以下常见的分类方法。

1. 过量变形失效 主要包括过量弹性变形失效、过量塑性变形（如局部塌陷、局部墩粗、型腔胀大等）失效、蠕变超限等。
2. 表面损伤失效 主要包括表面磨损（如粘着磨损、磨料磨损、氧化磨损、疲劳磨损等）失效、表面腐蚀（如点腐蚀、晶间腐蚀、冲刷腐蚀、应力腐蚀等）失效、接触疲劳失效等。
3. 断裂失效 主要有塑性断裂失效、脆性断裂失效、疲劳断裂失效、蠕变断裂失效、应力腐蚀断裂失效等。

三、模具的失效机理分析

实际生产中使用的模具种类繁多，工作状态差别很大，损伤形式和损伤部位各不相同，而失效机理也有差别。

（一）磨损失效

由于模具表面的相对运动，而从模具的接触表面逐渐失去物质的现象称为磨

损。模具在工作中会与坯料的成形表面相接触，产生相对运动而造成磨损，当这种磨损使模具的尺寸发生变化或使模具表面的状态发生改变而使其不能正常工作时，则称为磨损失效。

磨损有很多种类型，按磨损机理不同可分为磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损、气蚀和冲蚀磨损、腐蚀磨损等。

1. 磨粒磨损 工件表面的硬突出物和外来硬质颗粒在加工时刮擦模具表面，引起模具表面材料脱落的现象称为磨粒磨损。磨粒磨损的机理如图 1-1 所示。

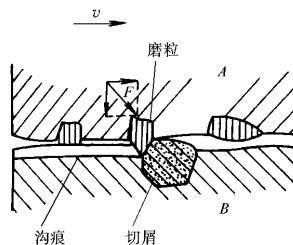


图 1-1 磨粒磨损机理示意图

当磨粒与工件和模具表面相接触时，作用在磨粒上的作用力可分为与模具表面平行和垂直的两个分力，垂直分力使磨粒压入金属表面，平行分力使磨粒与金属表面产生相对切向运动，从而构成了一个完整的磨粒磨损过程。采用模具成形时，通常模具硬度比工件高，则磨粒首先被压入工件内，当模具与工件产生相对运动时刮擦模具，从模具表面切下细小的碎片，形成磨粒磨损。当模具表面存在凹坑、沟槽等缺陷时，磨粒可能会嵌在其中或粘结在模具的表面上随模具一起运动，磨粒将会耕犁或犁皱工件表面，影响工件的加工质量。

影响磨粒磨损的因素主要有磨粒的形状和大小、磨粒硬度与模具材料硬度的比值、模具与工件的表面压力、工件厚度等。磨粒的外形越尖，则磨损量越大；磨粒的尺寸越大，模具的磨损量越大，但当磨粒的尺寸达到一定数值后，磨损量则会稳定在一定的范围内；磨粒硬度与模具材料硬度的比值小于 1 时，磨损量较小，比值增加到 1 以上时，磨损量急剧增加，而后逐渐保持在一定的范围内；随着模具与工件表面压力的增加，磨损量会不断增加，当压力达到一定数值后，由于磨粒的尖角变钝而使磨损量的增加得以减缓；工件厚度越大，磨粒嵌入工件的深度越深，对模具的磨损量减小。

通过上面的分析可知，提高模具材料的硬度，可以提高抵抗磨粒嵌入的能力，有利于减少模具的磨损量；对模具进行表面耐磨处理可以在保证模具具有一定韧性的条件下，提高其耐磨性能；在模具的使用过程中，及时清理模具和工件表面上的磨粒，可以减少磨粒侵入的几率，能有效地减少模具的磨损。

2. 粘着磨损 由于模具与工件表面的凹凸不平，使其在相对运动中造成粘着点发生断裂而使模具材料发生剥落的现象称为粘着磨损。粘着磨损的机理如图 1-2 所示。

由于模具和工件表面存在一定的不平度，其中只有少数微观凸起的部分相接触，峰顶承受的压力很大（有时会高达 5000MPa），因而导致模具局部表面的塑



性变形，并且由于塑性变形和摩擦而产生很高的热量，破坏了模具材料表层的润滑膜和氧化膜，造成新鲜模具材料表面的暴露，而与工件材料产生原子之间的相互吸引和相互渗透，造成材料之间的局部粘着。随着模具和工件之间相对运动的进行和接触部分的迅速冷却，峰顶金属相当于进行了一次局部淬火处理，粘着部分的金属强度与硬度迅速提高，并形成淬火裂纹，并在运动中造成撕裂和最后剥落，形成粘着磨损。

影响粘着磨损的主要因素有材料性质、材料硬度、表面压力等。根据金属的强度理论可知，塑性材料的破坏取决于切应力，脆性材料的破坏取决于正应力，而在表面接触中，最大正应力作用在表面上，最大切应力出现在离表面一定深度处。因而可知，材料的塑性越高，则粘着磨损越严重。相同的金属或者互溶性大的金属形成摩擦副时，粘着效应明显，易产生粘着磨损。从材料的组织结构来看，具有多相组织的金属材料，由于其强化效果而比单相金属材料具有更高的抗粘着磨损能力。模具材料与工件材料的硬度越接近，磨损越严重。随着表面压力的增大，粘着磨损量将不断增加，但达到某一范围后会逐渐趋缓。

通过以上讨论可知，选择与工件材料互溶性小的模具材料，可减少两材料之间的溶解性，降低粘着磨损量；合理选用润滑剂，形成润滑油膜，可以防止或减少两金属表面的直接接触，有效地提高其抗粘着磨损能力；采用多种表面热处理方法，改变金属摩擦表面的互溶性质和组织结构，尽量避免同种类金属相互摩擦，可降低粘着磨损。

3. 疲劳磨损 在循环应力作用下，两接触面相互运动时产生的表层金属疲劳剥落的现象称为疲劳磨损。在模具和工件的相对运动中，会承受一定的作用力，模具的表面和亚表面存在多变的接触压力和切应力，这些应力反复作用一定的周期后，模具表面就会产生局部的塑性变形和冷加工硬化现象。在那些相对薄弱的地方，会由于应力集中而形成裂纹源，并在外力的作用下扩展，当裂纹扩展

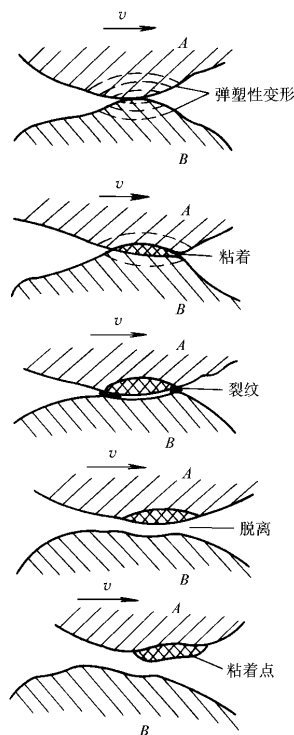


图 1-2 粘着磨损机理示意图

到金属表面或与纵向裂纹相交时,便形成磨损剥落。

影响疲劳磨损的因素主要有材料的冶金质量、材料硬度、表面粗糙度等。钢中的气体含量,非金属夹杂物的类型、大小、形状和分布等是影响疲劳磨损的重要因素,特别是脆性较大和带有棱角的非金属夹杂物的存在,破坏了基体的连续性,在循环应力的作用下,会在夹杂物的尖角处形成应力集中,并因塑性变形引起冷加工硬化形成疲劳裂纹。材料硬度的影响比较特殊,一般情况下硬度提高,可以增加模具表面的抗疲劳能力,但硬度过高时又会加快疲劳裂纹的扩展,加速疲劳磨损。材料的表面粗糙,会使接触应力作用在较小的面积上,形成很大的接触应力,加速疲劳磨损,因此降低模具表面粗糙度值可以提高模具的抗磨损能力。

为了更好地提高模具的抗疲劳能力,应选择合适的润滑剂,用以润滑模具与工件的表面,避免或减少模具与工件材料之间的直接接触,降低接触应力,减少疲劳磨损量。其次,可以在常温状态下,通过对模具表面进行喷丸、滚压等处理,使模具的工作表面因受压变形而产生一定的残余压应力,有利于提高模具的抗疲劳磨损的能力。

4. 其他磨损 除上述几种主要的磨损形式外,还有气蚀磨损、冲蚀磨损、腐蚀磨损等。

(1) 气蚀磨损:由于金属表面的气泡发生破裂,产生瞬间的高温 and 冲击,使模具表面形成微小的麻点和凹坑的现象称为气蚀磨损。

当模具表面与液体相接触产生相对运动时,在其表面上形成的气泡会流到高压区,当气泡承受的压力超过其内部压力时,便会发生破裂,并在瞬间产生极大的高温和冲击力,作用在模具的局部表面上,经过多次反复作用后,会在模具的浅表面处形成疲劳裂纹,扩展后会导致局部金属脱离模具表面或气化,形成泡沫海绵状空穴,即气蚀磨损。

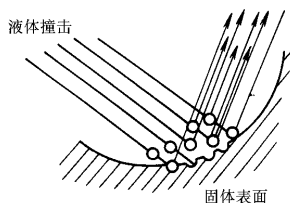


图 1-3 气蚀磨损机理示意图

气蚀磨损机理示意图如图 1-3 所示。

(2) 冲蚀磨损:固体和液体的微小颗粒以高速冲击的形式反复落到模具的表面上,使模具表面的局部材料受到损失而形成麻点或凹坑的现象称为冲蚀磨损。

高速冲击模具表面的液体微粒,落下时会产生很高的应力,一般可以超过金属材料的屈服强度或强度极限,使模具表面材料发生局部塑性变形或局部断裂。那些速度不高的液体微粒进行反复冲击后,也会使模具表面出现疲劳裂纹,因而形成麻点和凹坑,导致冲蚀磨损的出现。

(3) 腐蚀磨损:在工作过程中,模具表面与其周围的环境介质发生化学或电



化学反应,以及模具与工件之间的摩擦作用而引起模具表层材料脱落的现象称为腐蚀磨损。

当模具材料与工件材料在一定的环境中产生摩擦时,金属材料便与环境介质产生化学或电化学反应,并形成反应物。在随后的模具与工件之间的相对运动中被磨掉,即形成了腐蚀磨损。

(二) 断裂失效

模具在工作中出现较大裂纹或部分分离而丧失正常服役能力的现象称为断裂失效。模具断裂通常表现为产生局部碎块或整个模具断成几个部分,模具断裂形式如图 1-4 所示。对于模具来说,断裂是最严重的失效形式。断裂失效有很多种分类方法,按照断裂的性质可分为脆性断裂和韧性断裂;按照断裂路径可分为沿晶断裂、穿晶断裂、混晶断裂;按照断裂机理可分为一次性断裂和疲劳断裂等。由于模具材料多为中、高强度钢,塑性相对较差,断裂时没有或仅有少量的塑性变形发生,因而经常表现为脆性断裂。

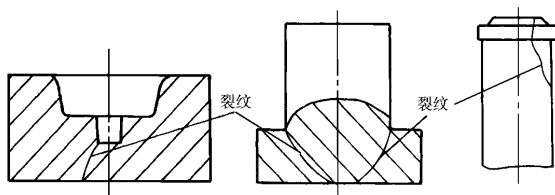


图 1-4

1. 一次性断裂 模具在承受很大变形力或在冲击载荷的作用下,产生裂纹并迅速扩展所形成的脆性断裂称为一次性断裂。一次性断裂的断口呈结晶状,根据裂纹扩展路径的走向不同,可将其分为沿晶断裂和穿晶断裂两种。

(1) 沿晶断裂:是指裂纹沿晶界扩展而造成材料脆性断裂的现象。一般情况下晶界处的键合力高于晶内,只有在晶界被弱化时才会产生沿晶断裂。而造成晶界弱化的基本原因有两个,一是材料的性质,二是环境介质或高温的促进作用。晶界是易形成析出相的地方,晶界上的析出相是不连续的,通常呈块状、球状、棒状或树枝状分布,在析出相周围存在微孔,这些微孔在力的作用下经扩展、连通而形成裂纹;杂质元素的原子经常存在于晶界上,降低晶界的键合能,当晶界上的杂质元素含量达到某一数值时,便会引起沿晶断裂。

一般来说,晶界强度与晶内强度都随温度发生变化,如图 1-5 所示。在某一温度时,晶界强度与晶内强度相等,这一温度称为等强温度。材料温度高于等强温度时易产生沿晶断裂,材料温度低于等强温度时易产生穿晶断裂。

(2) 穿晶断裂:是指因拉应力作用而引起的沿特定晶面的断裂,也称为解理



断裂。当模具材料的韧性较差、存在表面缺陷、承受高的冲击载荷时，易产生穿晶断裂。

材料在应力作用下产生局部变形时，某一滑移面上的位错源开始启动，形成一系列的位错，并在切向应力的作用下沿滑移面的某一晶向移动，当遇到晶界、孪晶界、第二相时，便发生位错堆积，引起应力集中并导致裂纹的萌生。如图 1-6 所示。

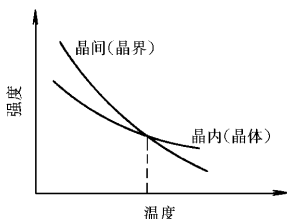


图 1-5 晶界强度、晶内强度与温度的关系

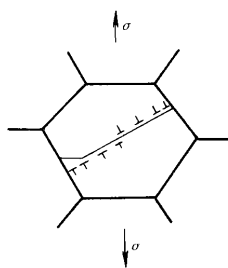


图 1-6 位错堆积示意图

应该指出，材料温度较高时，原子的能量高、活动能力强，位错源容易被启动而释放位错。因此，位错堆积后产生的应力集中，易被临近位错源的启动而松弛或抵消，不易产生穿晶裂纹。在低温下，原子的能量低、活动能力弱，位错堆积后产生的应力集中，难以通过临近位错源的启动而松弛或抵消，易形成穿晶断裂。

2. 疲劳断裂 疲劳断裂是指在较低的循环载荷作用下，工作一段时间后，由裂纹缓慢扩展，最后发生断裂的现象。疲劳裂纹总是在应力最高、强度最弱的部位上形成，模具的疲劳裂纹萌生于外表面或次表面，但其形成方式各有不同。当模具内部受力不均时，就会在局部范围内出现较大的应力集中，在循环载荷的作用下，裂纹便会在应力集中处最先出现，而在裂纹的前沿形成尖锐的缺口，造成新的应力集中区，并在以后的模具工作过程中，使裂纹不断扩展直到模具发生破坏。

(i) 裂纹的萌生：疲劳裂纹常常在表面不均匀处、晶界、夹杂物和第二相处形成。

模具上的尺寸过渡处、加工刀痕、磨损沟痕等易产生应力集中，在循环应力作用下易产生滑移变形，而出现的变形台阶极易成为疲劳裂纹源。高温下金属材料的晶界强度低于晶内强度，在循环应力作用下，晶界将先产生变形而形成位错堆积，造成晶界处的应力集中，当应力超过材料的强度极限时，便在晶界处产生



开裂形成微裂纹。若在模具材料内存在夹杂物和第二相，则在循环应力作用下，易在其与基体的界面处产生脱开现象，形成疲劳裂纹。

(2) 裂纹的扩展：在循环应力的作用下，已形成的裂纹便沿着主滑移面向模具材料内部扩展，此时与拉应力轴呈约 45° 的角度，当遇到晶界时其裂纹扩展位向会稍有改变；当扩展的裂纹遇到夹杂物或第二相这样的障碍物时，就会转向与拉应力轴相垂直的方向扩展。

影响模具断裂失效的因素主要是模具结构和模具材料。一方面，由于模具成形结构工艺性的要求，在模具零件上会存在截面突变、凹槽、尖角、圆角半径等，正是这些部位容易产生应力集中，形成裂纹并导致断裂失效，所以，适当增大模具零件中的圆角半径、减小凹模深度、减少尖角数量、尽量避免截面突变等，均能减少模具零件中的应力集中，降低断裂失效倾向。另一方面，模具材料的冶金质量和加工质量也对模具的断裂失效有较大影响，模具材料的断裂韧度越高，则越有利于防止裂纹的萌生及扩展，从而减少模具的断裂失效。

(三) 塑性变形失效

模具在使用过程中由于发生塑性变形而不能通过修复继续服役的现象称为塑性变形失效。塑性变形失效的主要形式有塌陷、镦粗、弯曲等，如图 1-7 所示。

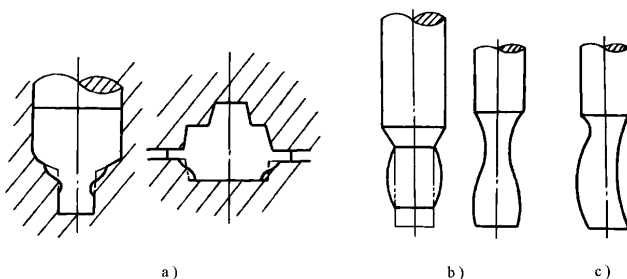


图 1-7 模具塑性变形失效的常见形式

a) 塌陷 b) 镦粗 c) 弯曲

模具在工作时一般承受很大的不均匀应力，当模具的某些部位所承受的应力超过工作温度下模具材料的屈服强度时，就会产生塑性变形而造成模具的失效。在不同温度下工作的模具是否会产生塑性变形失效，主要取决于不同温度下模具材料的强度。在室温下工作的模具是否会产生塑性变形失效，主要取决于模具的载荷与室温屈服强度；而在高温下工作的模具是否会产生塑性变形失效，主要取决于模具的工作温度和模具材料的高温强度。

由于模具的受力复杂，工作条件苛刻，在使用过程中可能同时出现多种损伤形式，各种损伤交互作用，最后形成了一种主要的失效形式。例如，磨损沟痕可



能成为裂纹的发源地，由磨损形成的裂纹在应力作用下发生扩展就会产生断裂；模具产生局部磨损后，便会使其承载能力下降，将造成另一部分承受过大的应力而产生塑性变形；局部塑性变形会改变模具零件之间的正常配合关系，均匀的承载状况被打破，将会造成模具的不均匀磨损，也可能由于应力集中的出现而产生裂纹，造成模具的过早断裂。

四、模具的失效分析过程

为了提高模具的使用寿命，应对已失效的模具进行分析。了解模具的主要失效形式，寻找其失效的具体原因和主要影响因素，掌握各种失效形式所占的比例以及各种失效模具的使用寿命，并从理论上加以分析与综合，以便为合理的选择模具材料、优化模具结构设计、正确制定模具制造工艺以及为新型模具材料的研制和新工艺的开发等提供指导性数据，并且可据此预测模具在特定工作条件下的使用寿命。

（一）模具失效分析的主要任务

模具失效分析的任务就是要正确判断模具失效的性质、分析模具失效的原因、提出防止模具失效的具体措施。模具失效性质的判断主要依据失效模具的形貌特征、应力状态、材料强度和环境影响因素等，而模具失效原因的分析和防止模具失效措施的提出，主要从以下几个方面考虑。

1. 合理选择模具材料 根据模具的实际工作条件和可能出现的失效形式，提出相应的模具材料的各项性能指标，并由此选择合适的模具材料、热处理工艺和表面处理工艺，以满足模具的使用性能要求。

2. 合理设计模具结构 在设计模具结构时，应力求使模具各部分受载均匀，使应力流线分布均匀，并尽量平滑过渡，减少应力集中分布，并强化模具上的薄弱环节。

3. 保证加工和装配质量 应选择合适的模具加工与装配工艺方案，保证模具的表面加工质量，尽量减少造成应力集中的可能性，达到模具的设计性能要求。

4. 严格模具的质量控制 做到严格控制模具材料的冶金质量、锻造质量、冷加工质量和热处理质量，尽量减少模具加工制作过程中的各种内外缺陷，有效防止和减少模具的非正常失效，提高模具的使用寿命。

5. 进行模具的表面强化 在对模具进行整体强化的同时，还应采取各种手段对模具的表面进行强化和改性，使模具的表面得到有效的保护，提高模具的使用寿命。

6. 合理地使用、维护和保养模具 应严格按照操作规程正确地安装模具，使用中注意正确的使用方法，并在使用后加强对模具的维护和保养，防止模具的



过早失效。

(二) 模具失效分析的方法和步骤

由于模具的材料种类、结构形状、尺寸大小、受载情况、失效形式等各不相同,则模具的失效分析方法也各不相同。模具失效分析的一般方法与步骤为:

1. 现场调查与处理 进行模具失效的现场调查,主要包括对模具现场的保护、观察模具失效的形式与部位、了解生产设备的使用状况和制作工艺、询问具体操作情况和模具失效过程、统计模具的寿命、收集并保存失效的模具等,以供失效分析用。若模具为断裂失效,应注意收集齐全模具的所有断裂碎块,以便进行断口分析。在收集模具的断裂碎块时,要保证断口的洁净和新鲜。

2. 模具材料、制造工艺和工作情况调查 采用化学成分分析、力学性能测定、金相组织分析、无损探伤等方法,复查模具材料的化学成分和冶金质量。通过翻阅有关技术资料和检测报告、检查同批原材料、询问生产人员等方式,详细了解模具的材质状况、锻造质量、机械加工质量、热处理和表面处理质量、装配质量等情况,核实各个环节是否符合有关标准规定以及模具设计和工艺上的技术要求。查阅模具工作记录、检修与维护记录,了解生产设备的工作状况及被加工坯料的实际情况,调查有关模具的使用条件和具体使用状况,了解模具按操作规程操作时有无异常现象等。

3. 模具的工作条件分析 模具的工作条件包括模具的受载状况、工作温度、环境介质、组织状态等。受载状况包括载荷性质、载荷类型、应力分布、应力集中状况、是否存在最大应力以及最大应力的分布等;模具的工作温度包括工作温度的高低、工作温度的变化幅度、热应力的分布等;环境介质包括介质的种类、含量、均匀性以及是否带有腐蚀性等;组织状态包括模具的组织类型、组织的稳定性、组织应力的分布等。

4. 模具失效的综合分析 对失效的模具进行损伤处的外观分析、断口分析、金相分析、无损探伤等,了解模具损伤的种类,寻找模具损伤的根源,观察损伤部位的表面形貌和几何形状、断口的特征、模具的内部缺陷、金相组织的组成及特征,结合各部分的分析结果,综合判断模具的失效原因以及影响模具失效过程的各种因素。

模具失效的原因一般有模具的工作环境、模具质量、操作人员的水平和经验、生产管理制度等,其中最主要的是模具质量。因此,在分析模具失效原因时,应将重点放在主要影响模具质量的制造过程方面,制造过程方面的原因主要有模具材料的选择与冶金质量问题、模具结构设计的不合理、毛坯锻造质量差、存在机械加工缺陷、热处理工艺选择不当、模具装配精度不高和维护不良等。

在实际生产中,模具的工作条件和工作环境往往比较复杂,因而其失效形式以及引起模具失效的原因也是多种多样的,对其进行失效分析的具体方法和步骤

也各不相同。但只要掌握了模具失效分析的一般规律,充分利用已有的技术资料和分析手段对失效模具进行综合分析,就能准确找出其失效原因。

5. 提出防护措施 通过对失效模具进行综合分析,找出引起模具失效的原因,有针对性地提出防护措施,避免或减少该种失效的重复发生。但是,同一模具可能有不同的损伤出现,而最终先导致模具失效的形式可能是其中的一种。当我们采取相应的措施防止了该种形式的失效以后,则另外一种失效形式又可能成为主要的失效形式,又需要我们采取另外的措施去解决新出现的失效问题,直到获得满意的程度。

第二节 典型模具的服役条件及失效形式

一、冷作模具的服役条件及失效形式

冷作模具是指在常温下对材料进行压力加工或其他加工所使用的模具。典型的冷作模具主要有冷冲裁模、冷拉深模、冷挤压模、冷镦模等。各类冷作模具都是在常温下对工件材料施力,使其产生变形或分离,从而获得一定形状、尺寸和性能的成品件。由于各类冷作模具的具体服役条件不同,则其失效形式也有各自不同的特点。

1. 冷冲裁模 冷冲裁模的工作对象是钢板、有色金属板材或其他板材,依靠冷冲裁模的刃口完成冷冲压加工中的分离工序,主要是对各种板料进行冲切成形,金属板料的冲裁过程如图 1-8 所示。

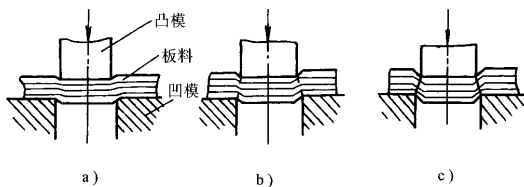


图 1-8 金属板料的冲裁过程

a) 弹性变形 b) 塑性变形 c) 分离

冷冲裁模的主要工作部位是凸模(冲头)和凹模的刃口,靠它们对金属板料施加压力,使其产生弹性变形、塑性变形和分离的过程。在弹性变形阶段,凸模端面的中间部分与板料脱离,压力都集中在刃口附近的狭小范围内。在塑性变形和分离阶段,凸模切入板料,同时金属板料被挤入凹模洞口,使模具的刃口端面和侧面产生挤压和摩擦。凸模的压力通常大于凹模,在冲裁软质薄板时,凸模承受的压力并不大;在冲裁中、厚钢板,尤其是在厚钢板上冲裁小孔时,凸模所承受的单位压力很大,同时,还要承受冲击力、剪切力和弯曲力的作用。



模具刃口在压力和摩擦力的作用下,最常见的失效形式是磨损失效。从磨损机理上看,主要是粘着磨损,同时也伴随有磨粒磨损和疲劳磨损;从磨损的部位考虑,则可细分为刃口磨损、端面磨损和侧面磨损三种。由于凸模的受力较大,且在一次冲裁过程中经受两次摩擦过程(进入和离开各一次),磨损较快。磨损会使刃口变钝,棱角变圆,甚至会产生模具表面层的脱落,使冲压件表面产生毛刺、尺寸超差等。当冲压件厚度大或具有较强的磨粒磨损作用(如硅钢片等)或有较大的咬合倾向(如奥氏体钢等)时,则会加速模具的磨损。

被冲板料的厚度对模具载荷的影响较大,所以常把冲裁模分为薄板冲裁模(冲裁厚度 $t \leq 1.5\text{mm}$)和厚板冲裁模(冲裁厚度 $t > 1.5\text{mm}$)。薄板冲裁模受载荷较小,其失效形式主要是磨损,只有在热处理不当或操作失误的情况下,才可能出现脆性断裂失效;而厚板冲裁模则受载荷较大,其失效形式除了磨损以外,还可能发生塑性变形、断裂或崩刃等失效。

2. 冷拉深模 冷拉深模是将板材进行延伸使之成为一定尺寸、形状产品的模具。冷拉深模的工作对象是钢板、有色金属板材或其他板材,依靠模具使金属坯料产生塑性变形而获得所需的形状。冷拉深模的凸模、凹模和压边圈的工作部位均无锋利的尖角,模具零件的受力不像冷冲裁模那样限定在较小的范围内,凸模和凹模之间的间隙一般比板材厚度大,模具较少出现应力集中。模具在工作时不易产生偏载,所承受的冲击力很小,凸模承受压力和摩擦力,凹模承受径向张力和摩擦力。其中,模具受到的摩擦力十分强烈,因而模具的主要失效形式是磨粒磨损和粘着磨损,有时还会产生咬合、擦伤、变形等失效形式。从失效部位上看,在凹模和压边圈的端面、凸模和凹模的圆角半径处,特别是在压边圈口部和凹模端面圆角半径以外的区域产生粘着磨损的情况最为严重。

在模具的工作过程中,在其工作表面上的某些局部位置,所受到的载荷较重,承受的挤压力较大,受摩擦后模具的表面温度升高。在高温和高压的共同作用下,模具表面可与金属坯料产生“焊合”现象,脱落下来的小块金属坯料会粘附在模具的表面,从而在加工中造成工件表面的划痕或擦伤,降低拉深件的表面质量。

3. 冷镦模 冷镦模是在冲击力的作用下将金属棒状坯料镦成一定形状和尺寸产品的冷作模具。在冷镦加工过程中,冲击频率高(60~120次/min),冲击力度大,金属坯料受到强烈地镦击,同时,模具也同样受到短周期冲击载荷的作用。由于是在室温条件下工作的,塑性变形抗力大,工作环境差,凸模承受巨大的冲击压力和摩擦力,凹模承受冲胀力和摩擦力,产生强烈地摩擦,因而冷镦模最常见的失效形式是磨损失效和疲劳断裂失效。其中,磨损失效可能有磨粒磨损、表面损伤、冲击磨损等多种失效形式,特别是凸模在冲击力的作用下,表面会产生剥落而出现麻坑,而由磨损所造成的表面损伤、麻坑、擦伤痕等,均可能

成为疲劳裂纹源，导致模具的疲劳断裂。除此之外，还可能产生凸模的塑性变形和折断；引起凹模的模口胀大、棱角堆塌、腔壁胀裂等损伤，而出现模具的失效。

4. 冷挤压模 冷挤压模是使金属坯料在强大而均匀的近似于静挤压力的作用下，产生塑性变形流动而形成产品的模具。根据金属坯料的流动方向与凸模运动方向之间的关系，可将冷挤压分为正向挤压、反向挤压、复合挤压和径向挤压四种类型，如图 1-9 所示。

在进行冷挤压加工时，金属坯料承受强烈的三向压应力。在模具的作用下，金属坯料沿凸、凹模间隙或凹模模口产生剧烈流动，变形位移大。而模具承受强大的挤压力（来自金属坯料的反作用力），同时产生很大的摩擦力。一般在挤压钢材时，正挤压力约为 $2000 \sim 2500 \text{ MPa}$ ，反挤压力为 $3000 \sim 32500 \text{ MPa}$ ；在挤压有色金属材料时，其挤压力也会达到 1000 MPa 。在挤压时形成的摩擦功和变形能会转化为热能，产生挤压中的热效应，导致模具的局部表面产生 400°C 以上的高温。此外，由于金属坯料端面不平整、凸模与凹模之间的间隙不均匀和中心线不一致等因素，还会使凸模在挤压时承受很大的偏载或横向弯曲载荷。因此，冷挤压模的失效形式主要有塑性变形失效、磨损失效、凸模折断失效、疲劳断裂失效及纵向开裂失效等，对于冷挤压凹模有时还会产生胀裂失效。

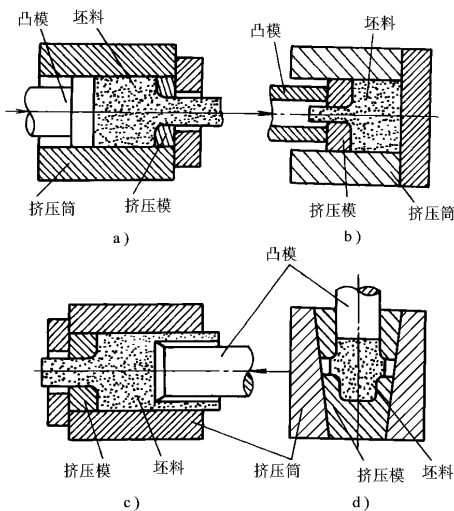


图 1-9 金属挤压类型示意图

a) 正挤压 b) 反挤压 c) 复合挤压 d) 径向挤压

二、热作模具的服役条件及失效形式

热作模具是指将金属坯料加热到再结晶温度以上进行压力加工的模具，典型的热作模具具有锤锻模、压力机锻模、热挤压模、热冲裁模、压铸模等。各种热作模具在工作时既承受机械载荷，又承受热载荷，且在循环状态下工作。由于被加工材料的不同和使用的成形设备不同，模具的工作条件有较大差别，因此，热作模具的失效形式也就各不相同。



1. 锤锻模 锤锻模是在模锻锤上使用的热作模具，在其服役时不仅要承受冲击力和摩擦力的作用，还要承受很大的压应力、拉应力和弯曲应力的作用，同时也受到交替的加热和冷却作用。如在锻造钢件时，金属坯料的温度一般为 $1000\sim 1200^{\circ}\text{C}$ ，被加热的模具型腔表面一般可达到 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ ，有时会高达 750°C 以上。如此的高温会造成模具材料的塑性变形抗力和耐磨性的下降，同时也会造成模具型腔腔壁的塌陷及加剧磨损等。

锤锻模模块尾部呈燕尾状，易形成应力集中，会在燕尾的凹槽底部形成裂纹而造成开裂现象。在模具的工作过程中，由于热载荷的循环作用，在反复地加热和冷却的交替作用下，将会产生热疲劳裂纹，导致模具的失效。若锤锻模在机械载荷与热载荷的共同作用下，会在其型腔表面形成复杂地磨损过程，其中包括粘着磨损、热疲劳磨损、氧化磨损等。另外，当锻件的氧化皮未清除或未很好清除时，也会产生磨粒磨损。因此，锤锻模的主要失效形式为磨损失效、断裂失效、热疲劳开裂失效及塑性变形失效等。从模具的失效部位来看，型腔中的水平面和台阶易产生塑性变形失效，侧面易产生磨损失效，型腔深处和燕尾的凹角半径处因易萌生裂纹而产生断裂失效。

2. 压力机锻模 压力机锻模在服役时，承受巨大的压力，当模具在曲柄压力机和水压机上工作时，所承受的压力主要是静压力，而冲击力较小。与锤锻模相比，炽热的金属坯料在型腔中停留的时间较长，因此，压力机锻模的型腔温度明显比锤锻模要高，受热更严重。所以，压力机锻模中的热应力及其变化幅度均大于锤锻模，同时，模具型腔表面所经受的氧化腐蚀也较严重。

压力机锻模的失效形式主要有脆性断裂失效、冷热疲劳失效、塑性变形失效、磨损失效以及模具型腔的表面氧化腐蚀失效等。

3. 热挤压模 热挤压模是使被加热的金属坯料在高温压应力状态下成形的一种模具，挤压时承受压缩应力和弯曲应力，脱模时承受一定的拉应力作用，模具和金属坯料的接触时间长，受热温度比热锻模高。在挤压铜合金和结构钢时，模具的型腔温度可达到 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ ；若挤压不锈钢或耐热钢坯料，则模具的型腔温度会更高。为防止模具的温度升高，影响加工质量和模具寿命，需要对模具（特别是凸模）进行冷却，工件脱模后，每次用润滑剂和冷却介质涂抹模具的工作表面，而使挤压模具经常受到急冷、急热的交替作用。

与锤锻模相比，热挤压模承受的冲击载荷很小，而承受的静载荷很大，凸模承受巨大的压力，且由于金属坯料的偏斜等原因，使模具还承受很大的附加弯矩，在凸模脱模时还要承受一定的拉应力，凹模型腔表面承受变形坯料很大的接触压力，沿模壁存在很大的切向拉应力，而且大都分布不均匀，再加上热应力的作用，使凹模的受力极为复杂。由于热挤压变形时的变形率较大，金属坯料塑性变形时的金属流动，对模具型腔表面产生的摩擦比锤锻模剧烈得多，且由于硬颗