



粉末冶金零件压制成形中 裂纹的成因与对策

韩凤麟*

(《粉末冶金技术》编辑部,北京 100078)

摘要: 分析了粉末冶金零件压制成形过程中裂纹产生的原因,提出了防止裂纹产生的对策。

关键词: 粉末冶金零件;压制成形;裂纹

1 前言

对于粉末冶金机械零件行业来说,压制成形过程中零件压坯中产生裂纹是一个长期没有解决的重大课题。迄今,关于这些裂纹是如何产生的以及在粉末的压制成形过程中如何避免,公开发表的资料甚少。鉴于我国越来越多的粉末冶金机械零件生产企业致力于开发和生产形状复杂的、多台面结构零件,诸如汽车变速器的齿毂、发动机中的齿型带轮等,迫切需要了解粉末冶金结构零件生产中裂纹的成因与对策,现予以评述分析,供有关业者探讨。

现在,粉末冶金结构零件基本上都是用单轴向刚性模具压制成形——烧结工艺生产的,只有极少量的在用粉末锻造或粉末注射成形法制造。因此,下面仅研讨利用单轴向刚性模具压制成形——烧结法生产结构零件时,裂纹的成因与对策。

粉末冶金零件中的裂纹基本上产生于烧结之前的压制成形和压坯运送阶段。混合粉的组成与储存,压机、模架及模具结构,压制成形过程中的装粉、粉末移送、压制速率,压

制终了后压坯的脱模、运送,以及烧结前的装盘(或装舟)等都可能产生裂纹。

粉末冶金零件压坯中的裂纹大体上可分为二类:

- 粉末颗粒间从未形成连接所致;
- 粉末颗粒间连接断裂所致。

在粉末的压制成形过程中,粉末颗粒间之所以不能相互连接,主要是由于它们之间的空隙大所致,如图1所示。另外,在粉末混合料中添加的润滑剂太多、添加的粘结剂、杂质以及混合粉中夹带的空气都对颗粒间连接的形成有不良影响。因此,粉末混合料的质量与组成和这类裂纹的形成密切相关。

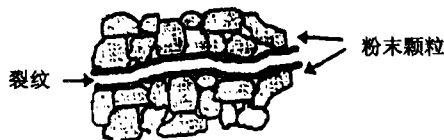


图1 粉末压坯中的裂纹示例

粉末颗粒间连接的断裂,是在压制成形过程中,已形成的颗粒间连接处由于受来自外部或内部的拉力或侧向剪切力或二者之合

* 韩凤麟,中国机械通用零部件工业协会粉末冶金分会顾问
收稿日期:1999-06-15

力的作用,颗粒间相互移动所致。

2 因粉末混合料质量与组成不当产生的裂纹

2.1 粉末混合料中润滑剂添加量过多^[1,2]

粉末混合料中润滑剂的添加量应根据零件压坯的形状与密度进行调整,对于铁基粉末冶金零件,润滑剂添加量一般为0.5%~1.0%。若润滑剂加石墨,当二者添加量之和太大时,压坯产生裂纹的趋向明显增强。这可能是混合不均匀(诸如团聚)或粉末混合料组成设计不当所致。在高浓度(润滑剂加石墨)区,由于它们阻碍颗粒间接触,可能无法形成正常的颗粒间连接。压制时,作用于润滑剂的压力可能产生一种液压压力,使润滑剂流向压坯内它的邻接区,在一些场合下,这会破坏颗粒间连接,见图2。在烧结过程中,烧除润滑剂时,裂纹表面可能残留有黑色残余物。



图2 润滑剂的高压力破坏颗粒间连接示例

2.2 粉末混合料污染^[2]

不管是金属粉末、添加剂还是杂质,只要对粉末冶金零件成品的性能有不良影响,就可认为其是污染物质。粉末混合料污染往往是管理不善造成的。污染物质的存在会阻碍粉末颗粒间接触,影响粉末颗粒间连接的形成。

粉末颗粒表面过度氧化也是一种污染。若颗粒表面的氧化物层在压制过程中不能被充分破坏,则会阻碍颗粒间正常连接。

只要粉末混合料遭受污染,成形的压坯中在污染存在处就有可能产生裂纹。

2.3 粉末混合料中夹带的空气^[2,1]

粉末混合料实际上是一种由粉末材料与空气组成的复合材料。

压制成形时,当位于模具型腔中的粉末混合料的容积被压缩时,存在于粉末颗粒孔隙间的空气的容积也相应地减小。鉴于阴模型腔与芯棒及上、下模冲间的工作间隙很小(最大值通常为 $5.1 \sim 7.6 \mu\text{m}$),并且在很短时间内,压制压力就从1大气压(0.1MPa)增高到500~700MPa,因此,困陷于模具型腔中的粉末混合料内夹带的空气一时就很难逸出。因困陷空气流产生的反压可能阻碍空气从粉末体中逸出,甚至将部分截面封闭,致使空气困陷于压坯之内,见图3。根据文献[1],当压坯全部位于模具内时,困陷于压坯内的空气最终压力可高达50MPa。这远远超过了一般粉末系统的生坯强度10~30MPa。在压制大型零件压坯时,由于有较多空气必须通过粉末体移动较长距离,因此,在压制的最后阶段,就可能产生断裂与裂纹。

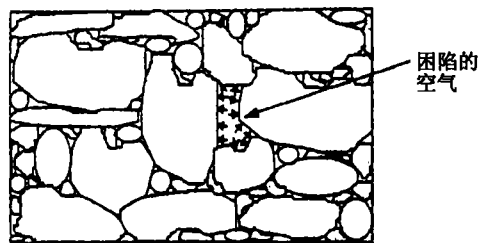


图3 高的空气压力可破坏颗粒间连接示例

在某些情况下,困陷于压坯内孔隙中的空气不会立即造成缺陷。烧结时,因温度升高,困陷空气的压力与相关应力可能会导致缺陷产生。当温度升高到润滑剂与粘结剂被排出的温度时,空气压力可由润滑剂与粘结剂的排出通道出口释放。倘若,在任何时间,空气压力导致的应力超过了颗粒间连接强度,就可能产生裂纹。

为在压制成形时排出困陷于模具中粉末混合料内的空气,文献[5]提出,往往在上模

冲上钻一“通气孔”,以便于经上模冲与芯棒间的间隙将困陷于压坯内的空气排出,同时,用于排出在上模冲与芯棒的间隙中聚集的粉末。这个“通气孔”一般直径约为 3mm 或略小些。“通气孔”的位置一般设计在压制成形终了时刚刚露出阴模上端面处的上模冲上,同时,“通气孔”的轴线应垂直上模冲与芯棒的间隙孔。

3 压制成形过程中,粉末颗粒侧向移动造成的裂纹

压制成形沿压制轴线方向有不等高台面的零件压坯时,诸如齿毂、齿型带轮等,可将台面高度不同的部分看作独立的直立粉体柱。压制这类粉末压坯时,必须遵守的基本准则^[3]是:

- 各粉体柱的粉末充填系数(或装料比)必须相同或相近;
- 各粉体柱的压缩比必须相同或相近;
- 各粉体柱的压制速率相同。

否则,压制成形的粉末压坯内就可能因密度变化大而产生裂纹。

3.1 粉末充填系数(或装料比)不同^[2]

例如,图 4 所示双毂零件压坯,若装粉时,未能将足够数量的粉末移送到上部毂的适当部位,使毂部与凸缘部的装料比相同或相近,则开始压制时,因毂部粉体柱密度较低,凸缘部粉体柱的粉末体将在邻接处横向

移向毂部,而在压制终了时,毂部邻接处由于密度高又反向挤压凸缘部,致使二者邻接处产生一剪切带,从而形成图 4 所示裂纹。严重时,毂部与凸缘部会发生断裂。

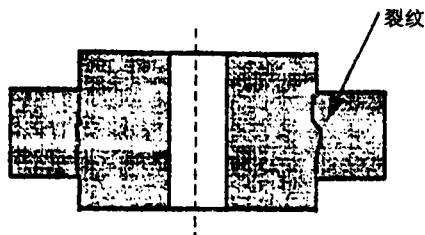


图 4 在双毂零件压坯中因粉末移送不足产生的裂纹示例

3.2 非同时压制^[2]

对于在压制轴线方向有不等高台面的零件压坯,为使整个压坯内密度分布均匀,除各粉体柱的装料比相同或相近外,还必须采用多模冲系统,对压坯各台面以同一速率同时进行双向压制,否则,就可能产生裂纹。

例如,图 5 所示零件压坯,若在压制过程初期,毂或外凸缘比腹板部先被压制,则毂或外凸缘部粉体柱就将横向移向后受压的邻接腹板部,从而使邻接处腹板部一侧的密度增高。压制终了时,邻接处腹板部一侧的高密度区又反向挤压毂或外凸缘部,从而在邻接处产生剪切裂纹。通常,这种裂纹起始于邻接模冲交会的角处,并在压制方向继续扩展。

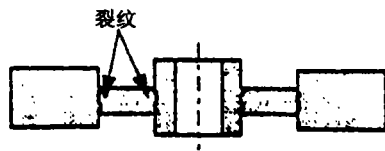
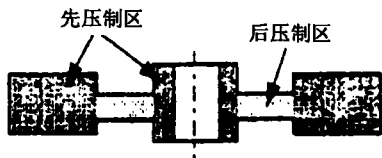


图 5 非同时压制造成的裂纹示例

3.3 模冲反向支撑力过大或过小^[4]

压制具有不等高台面的零件压坯时,若各粉体柱的装料比相同,压制也是以同一速

率双向进行的,可是,若有的模冲反向支撑力过大(图 6a)或过小(图 6b),也会导致压坯中产生裂纹。这是因为它们会使压制初期粉末

体从一个粉体柱横向移向邻接的密度较低的粉体柱,而在压制终了时,因压坯内部密度不均衡,粉末体又由起始的低密度区反向挤压其原来的邻接粉体柱,致使二个粉体柱邻接界面上产生挤压剪切裂纹。这种裂纹呈弯曲状,起始于压坯内角处,沿“流动线”向反向支撑力大的区域扩展。裂纹一般是光滑的,由于颗粒相互滑动时的移动或摩擦,裂纹外观往往是光亮的。

解决办法是减小或增大相应模冲的反向

支撑力,在一些场合,可采用强制阴模浮动。

3.4 压坯局部密度太低^[4]

如图 7 所示 H 型零件压坯,若模冲 E-F 间的粉体柱下部密度太低,则对这一部分压坯施加的压制力就较小。因此,在压制终了与压力消除阶段,下模冲 B 与 D 的弹性伸长就会比下模冲 F 大,从而在下模冲 F 上就产生一小空隙。由于摩擦作用,压坯紧抱在芯棒上,当阴模拉下脱模时,就发生了图 7 所示弯曲断裂。

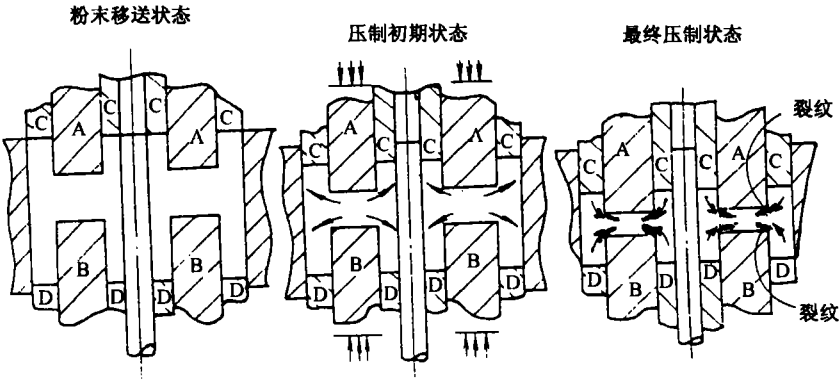


图 6a 因下模冲反向压力太大,压制初期形成的裂纹示例

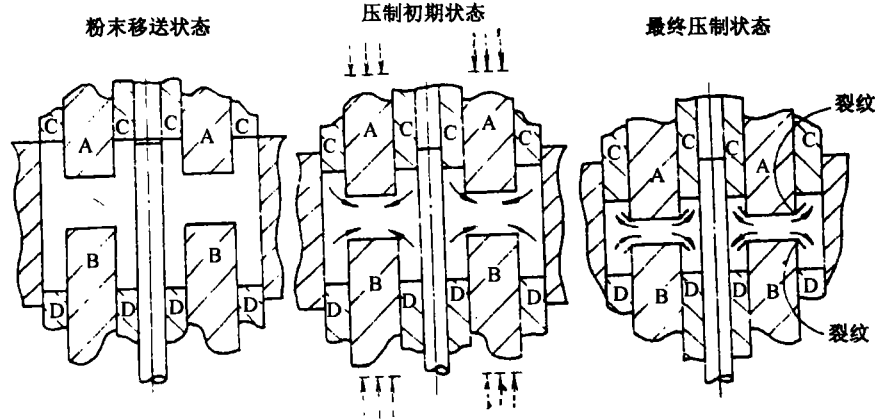


图 6b 因下模冲反向压力太小,压制初期形成的裂纹示例

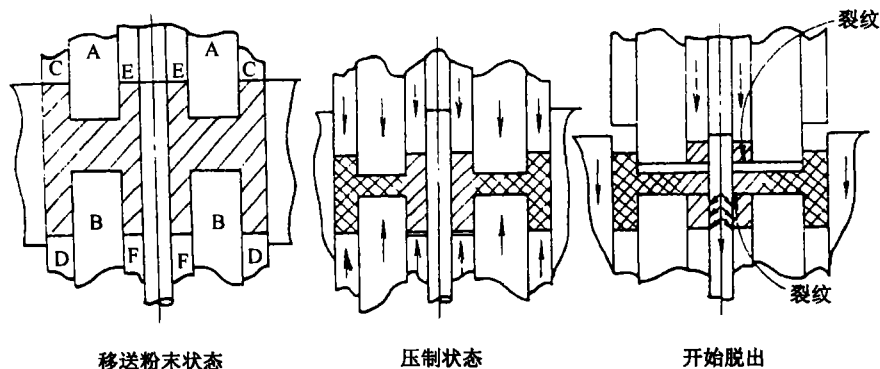


图7 局部密度太低引发的裂纹示例

对于这种缺陷,可用增高压坯相应部位密度或采用液压“滞后”,即下模冲 B 的可控延迟来解决。

3.5 因弹性应力不平衡致使芯棒挠曲^[1]

在不同径向位置处有孔或凹槽的零件压坯,诸如减震器活塞,在芯棒最后脱出时易发生碎裂。这种情况通常是因和密度分布不均一相关的应力不平衡或芯棒周围的弹性应力造成的,如图 8 所示。芯棒脱出时,不均一的应力使之偏离高密度区或偏向弹性张应力释放的方向。当芯棒即将脱出时,使之挠曲的力将减到接近零,这时贮存在挠曲芯棒中的能量可能超过了生坯强度。当芯棒矫直时,可能将孔或凹槽高密度侧的边缘崩碎。

3.6 压坯径向胀大^[1]

在形状复杂的、不同台面处水平横截面积变化大的零件压坯中,经常产生这类裂纹。一种典型情况示于图 9。当压坯从阴模型腔中脱出时,因内部弹性应变释放,在水平方向产生胀大。当主腹板部从阴模端面脱出时,来自主腹板部的释放力可能使箍紧在模具中的外下裙部与主腹板部之间的粉末颗粒连接断裂。密度越高,这个问题发生的频率就越大。这种裂纹在水平方向扩展,在某些情况下,可能会从压坯主体上剪掉一部分。

借助于减小下模冲 D 与 F 上粉体柱的密度,可避免产生这种裂纹。但是,采用这种

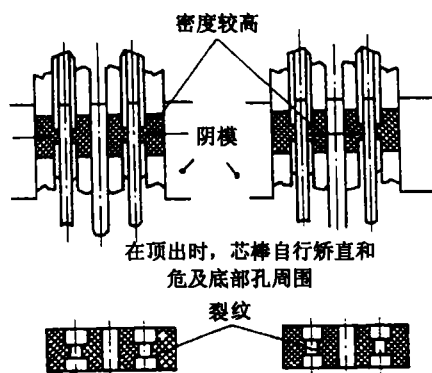


图8 因密度分布不均一和对芯棒的不均衡侧向推移引发的裂纹示例

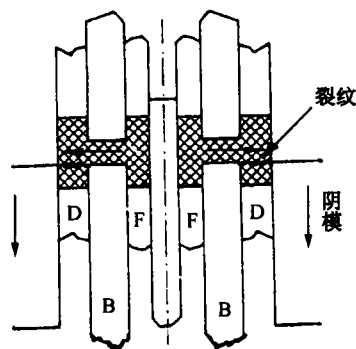


图9 脱出阴模时,因压坯径向胀大而产生的裂纹示例

措施时,成形压坯的密度必须处于允许的范围之内,否则,必须进行复压,以提高下模冲 D 与 F 上粉体柱的密度。另外一个办法,是

将阴模出口端作成带锥度的,以缓解脱模时压坯的弹性应变释放。

4 压制终了后,脱模过程中引发的裂纹

在粉末的压制成形过程中,模具零件、压机零件及模架系统在压缩载荷作用下都会产生弹性变形,同时,被压缩的粉末颗粒经受弹性与塑性变形。压制终了与压缩载荷消除后,模具零件、压机零件、模架零件以及粉末压坯都将释放弹性应变。因此,在模具设计时,必须考虑到模具与压坯的弹性恢复,否则,就有可能在压坯内引发裂纹。

4.1 阴模缺陷^[4,6]

倘若阴模的压制成形区(图 10C - C 位置)被磨损,从而形成图 10 示之鼓形状,这种鼓形状量只要达到百分之几毫米就可能使脱模压坯产生挠曲,在其上表面产生裂纹。在表面积大的扁平零件压坯中,这是一种常见缺陷,如图 11 所示。对于这种缺陷,只要在脱模时,使上模冲以一定压力一直压紧压坯,直到压坯全部从阴模中脱出为止,就能予以消除。

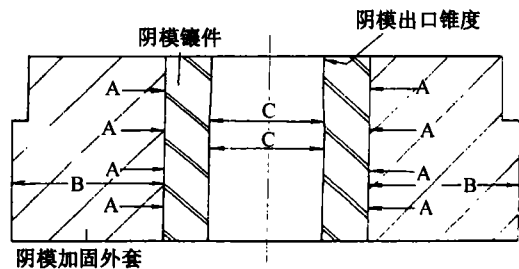


图 10 粉末冶金成形阴模示意图

假若图 10 示 A - A 位置阴模的预应力加固外套对阴模镶件的公盈量不够大,并且在 B - B 处加固外套的厚度不够大,在压坯脱模时,其外表面都可能产生层裂。

加固外套箍紧阴模镶件的方法有两种,一为热装,一为冷压配合。不论采用哪一种方式,镶件与加固外套之间都必须采用

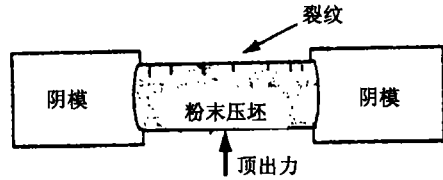


图 11 因阴模型腔磨损而产生的裂纹示例

过盈配合。若镶件为合金钢制品时,对于配合直径为 $\Phi 75 \sim 150\text{mm}$ 者,冷压配合的过盈量一般为直径的 $0.1\% \sim 0.25\%$,以选用 $(0.20 \sim 0.25)\%$ 直径的过盈量配合较合适。硬质合金的刚度比合金钢大,故对硬质合金镶嵌件进行热装时,过盈量只要有镶嵌件外径的 0.1% 左右就可以了。关于过盈量的计算方法可参见文献[6]。

关于加固外套与阴模镶嵌件的外径尺寸,一般可按下式计算:

$$d_{\text{外}}/d_{\text{内}} = 1.73$$

$$D_{\text{外}}/d_{\text{内}} = 4$$

式中 $d_{\text{内}}$ —— 阴模镶嵌件内径,mm;
 $d_{\text{外}}$ —— 阴模镶嵌件外径,mm;
 $D_{\text{外}}$ —— 加固外套外径,mm。

4.2 阴模出口端锥度失当^[2,5]

在压制成形过程中,粉末颗粒经受弹性与塑性变形,阴模、模冲等产生弹性变形。脱模以前,粉末压坯在径向箍紧在阴模型腔或某些结构的模冲内。脱模时,随着压坯从模具中脱出,径向的限制逐渐消失。这时,压坯发生“回弹”或胀大,以消除压制过程中产生的弹性变形。在粉末压坯刚开始脱出时,生坯强度还足以抑制径向胀大。可是,当粉末压坯继续脱出时,应力增大,若应力超过了生坯强度,就将产生滑移或剪切裂纹。之后,在压坯脱出过程中,这个过程可能再次开始和重复发生。若阴模出口端锥度小与应力集中时,这种情况经常发生。这种裂纹是一种浅薄的表面缺陷,且垂直于压制方向,见图 12。在阴模出口端加工一 $(5' \sim 10')$ 的锥度或圆

角,将有助于应力分布和将产生这种裂纹的可能性减小到最低程度。需要注意的是,锥度不宜过大。否则,会造成压坯尺寸超差,压坯上出现毛边。

4.3 带台肩模具系统^[2]

为减低模具制造费用,有时用带台肩的阴模、模冲或芯棒成形压坯中的相应台面,如

图 13 所示。脱模时,由于压坯对阴模壁的摩擦,在压坯无支撑处就会产生一种力,造成图 13 所示裂纹。在这种场合,需将阴模台肩部做成带 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 锥度状,以减小脱模时压坯对阴模壁的摩擦力。

用带台肩的模冲或芯棒压制成形时,也会产生类似的缺陷。

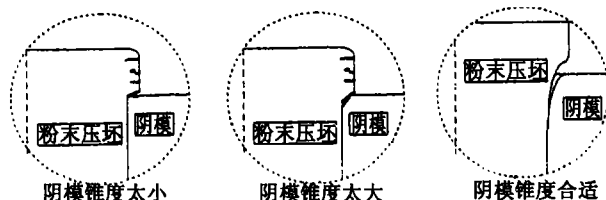


图 12 弹性应变释放引发的分层裂纹示例

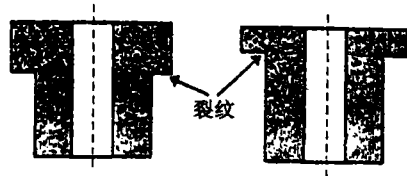
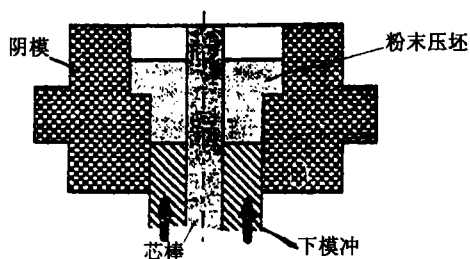


图 13 带台肩模具成形的粉末压坯一般产生的裂纹示例

4.4 压制成形后随即产生的阴模动作失控^[1]

为保持粉末压坯的完整性,达到压制终点时,重要的是,要使阴模在很短时间内落在一固定挡块上,使之不产生移动或向上跳动。

在压机设计中必须采取特殊措施,施加力于阴模,以抑制阴模支撑机构的弹性应变释放,否则将损坏压坯。如图 14 所示,当压坯仍有一部分箍紧在一模冲中时,由于压坯不能随着阴模向上移动而自由移动,从而在压坯转角处撕裂。

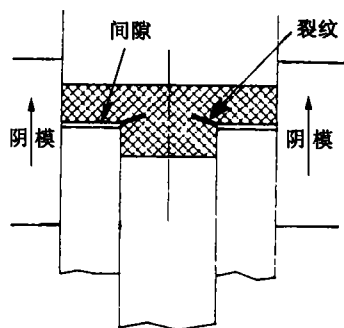


图 14 因压制后随即产生的阴模动作失控引发的裂纹示例

(未完待续)