

双转子涡旋冲击式粉碎机的刀具装置设计

罗远哲 赵化楠 刘威 闫鹿博

(北京中超伟业信息安全技术股份有限公司 北京 102200)

摘要:针对双转子涡旋冲击式粉碎机的刀具装置设计需求,基于粉碎机的刀具装置的工作原理,本文先对刀具的刀轴进行受力分析,然后对刀具的平衡状态进行计算,并通过有限元分析软件对刀具的刀片进行计算和分析,获得刀片的位移和应力图,为刀片材料的选择提供依据。

关键词:双转子;粉碎机;刀具装置;设计;有限元模型

0 引言

在我国汽车工业飞速发展的背景下,汽车的数量不断增加,使得报废汽车数量呈现出急剧增长的趋势,报废汽车作为再生资源领域中重要经济增长点,其前景相对较好。目前,国内对报废汽车的回收拆解仍处于探索阶段,难以实现报废汽车的有效回收与拆解,故出现了汽车预粉碎成套装备,为废旧汽车的回收与拆解提供了相应的解决方案^[1]。对于双转子粉碎机而言,其与传统的粉碎机具有一定的相似之处。双转子粉碎机转速相对较低,并且转矩相对较大,主要用于粉碎质地坚硬且体积大的物料,如金属、轮胎等,因此对粉碎机刀具的设计提出了更高要求^[2]。

本文基于粉碎机实际工作情况,对刀具的刀轴进行受力分析,得到刀轴工作时所受力矩,并通过有限元软件 ANSYS 对刀具刀片工作状态下的强度、刚度进行分析计算,为汽车粉碎机刀具材料的选择提供重要的依据。

1 双转子粉碎机工作原理与特点

1.1 双转子粉碎机工作原理

粉碎机主要采用双轴撕碎的原理进行设计,也就是通过两个刀具实现物料撕碎的功能。其中,一个刀具顺时针旋转,另一个刀具逆时针旋转,两刀具之间形成相对转动。在将物料装填进料头后,通过两刀具的相对转动,将物料撕扯、剪切,最终粉碎。在刀具转动过程中,若物料较为坚硬导致刀具无法转动,此时刀具便会改变转动方向,将物料推出撕

扯范围,然后再重新保持原有的转方向转动,直至将物料完全撕碎^[3]。

1.2 双转子粉碎机特点

对于双转子粉碎机而言,其刀具硬度与强度相对较高,具有较高的撕碎效率,刀具材料通常以合金钢为主,使用寿命相对较长^[4]。此外,粉碎机支架板的厚度较厚,并且具有较高的稳定性,可抵抗较大的转矩。对于粉碎机的控制系统,主要通过微电脑(PC)进行自动控制。因此,本次设计的设备需具备大转矩、噪声低、转速低等特点,并且粉尘颗粒的排放需符合国家排放标准。同时,需针对物料的特点选择相应的刀具材料,在提升撕碎效率的同时,也能保护刀具^[5]。

2 刀具结构设计与分析

对于刀具而言,其切削部分的几何参数对切削效率与加工质量的影响相对较大。因此,在刀具设计过程中,需对刀具切削部分的几何参数进行分析。基于此,本文先对刀具的刀轴进行受力分析,然后对刀具的平衡状态进行计算,进而确定刀具切削部分的几何参数,为刀具结构的设计提供参考^[6]。

2.1 刀轴受力分析

刀具剪切过程如图1所示。

假设切割板材厚度为 h ,咬入角为 θ ,此时刀刃所承受的作用力 F 可分为两个部分,可表示为:

$$F_1 + F_2 = F \quad (1)$$

式中: F_1 —剪切力(N);

F_2 —板材对刀具的作用力,主要为板材在切开过程中弯曲所产生的力(N)。

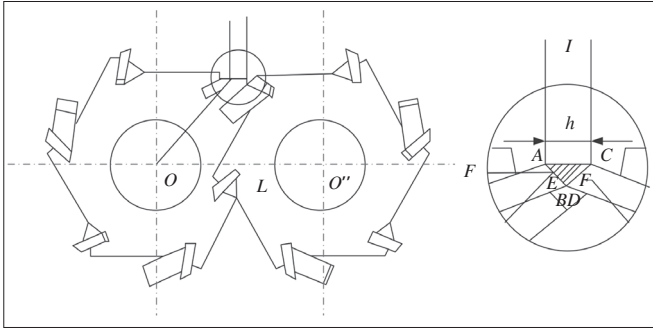


图 1 刀具剪切工况

其中, 剪切力 F_1 可表示为:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{h^2 W}{2 \tan \theta} \\ W = M_1 \sigma_b M_2 \varepsilon = \sigma_b \varepsilon \end{cases} \quad (M_1 M_2 = 1) \quad (2)$$

式中: W — 单位体积应变能;

M_1 、 M_2 — 换算系数;

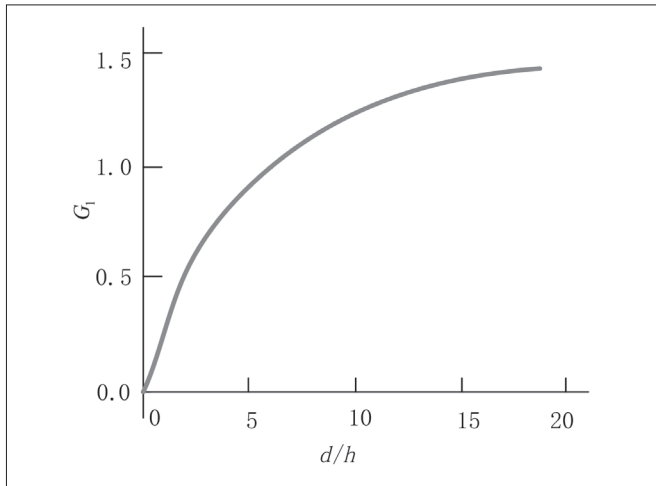
σ_b — 剪切板材强度极限;

ε — 相对延伸率。

板材对刀具的作用力 F_2 可表示为:

$$F_2 = \frac{F_1 G_1 \tan \theta}{\varepsilon} \quad (3)$$

式中: G_1 — 与刀具厚度和板材厚度比值 d/h 有关的系数, 如图 2 所示。

图 2 G_1 与 d/h 的比值

在 d/h 大于 15 的情况下, G_1 趋近于渐进线, 值为 1.4。假设刀具厚度为 d 为 135cm, 板材厚度为 8cm, 则 $d/h > 15$, 故 $G_1 = 1.4$ 。

此时刀具在转动过程中所承受总作用力可表示为:

$$F = F_1 + F_2 = \frac{h^2 \sigma_b \varepsilon}{2} \left(\frac{1}{\tan \theta} + \frac{G_1}{\varepsilon} \right) \quad (4)$$

若在剪切过程中两轴上的刀具处于对称剪切的状态, 即力 F 的作用点位于 AB 、 CD 的中点, 则咬入角 θ 可表示为:

$$\cos \theta = \frac{L' - EF}{2L} \quad (5)$$

式中: L — AB 、 CD 中点到轴心的距离;

L' — 刀具到轴心的距离。

若 ς 为相对剪切率, 此时 $BD = (1 - \varsigma)h$, $AC = h$, 则有:

$$EF = \frac{1}{2}(AC + BD) = \left(1 - \frac{\varsigma}{2}\right)h \quad (6)$$

此时, 刀具承受的总作用力 F 可表示为:

$$F = \frac{h^2 \sigma_b \varepsilon}{2} \left\{ \left[\left(\frac{2L}{L' - (1 - \varsigma/2)h} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{G_1}{\varepsilon} \right\} \quad (7)$$

公式 (7) 中, $h_{\max} = 8\text{cm}$, $L' = 720\text{mm}$, 板材抗拉强度为 600MPa。在通常情况下, 抗剪强度为抗拉强度的 0.8 倍, 则 $\sigma_b = 480\text{MPa}$ 。

不同剪切强度下, ε 与 ς 的对应详见表 1。此时可得 $\sigma_b = 480\text{MPa}$ 、 $\varepsilon = 0.315$, $\varsigma = 0.395$ 。

表 1 σ_b 、 ε 、 ς 对应值

σ_b/MPa	ε	ς
400	0.33	0.41
500	0.31	0.39
600	0.25	0.32
650	0.24	0.31
700	0.22	0.26
750	0.18	0.24
800	0.17	0.22

通过计算得知, 刀刃所承受的作用力 $F = 37489\text{N}$ 。

在实际剪切过程中, 破碎材料产生的力矩为:

$$\begin{cases} M = F \times R \\ R = L \sin \theta \end{cases} \quad (8)$$

式中: R — 作用力 F 到转动轴的力臂。

其中一个刀轴上承受的力矩可表示为:

$$M = 2nFL \sin \theta \quad (9)$$

一般情况下, 一个刀轴上的刀片数 $n=8$, 则通过计算得到 $M=67868\text{Nm}$, 假设刀轴的安全系数为 3, 可得一个刀轴的转矩 $M'=203604\text{Nm}$ 。

2.2 刀具平衡计算

对于双转子粉碎机而言, 其主要是通过转子带动刀具旋转, 进而达到撕碎物料的目的, 故需确保转

子的静平衡与动平衡^[7]。在转子静不平衡的情况下，转子中心线便会与其几何中心线偏离，导致机械在运作过程中产生较大的惯性力与力矩，严重影响其使用寿命。通常情况下，转子零件的制造精度需满足相关设计要求，并且需进行相应的平衡计算，确保机械正常运行。

在刀具悬挂有误的情况下，双转子粉碎机难以实现静、动平衡，即便是达到平衡，切削过程中也会对主轴产生冲击力。因此，为确保粉碎机在工作过程不产生冲击力，需安装相应的冲击平衡刀具，使刀具在切削过程中不会对粉碎机的主轴造成冲击^[8]。因此，在设计刀具过程中，需对刀具的几何形状进行冲击平衡计算。

粉碎机工作过程主要通过刀具的刀刃撕碎物料，要想实现刀具的平衡，需确定悬挂销轴孔的位置。冲击中心到刀具悬挂中心的距离可表示为：

$$L = \frac{I_o}{SC} \quad (10)$$

式中： C —刀具悬挂中心距刀距重心的长度（cm）；

L —刀具悬挂中心距刀距冲击中心的长度（cm）；

S —表面有孔刀具的截面积（ cm^2 ）；

I_o —有孔刀具对悬挂中心 O 的极惯性矩（ cm^4 ）。

设刀具长度与宽度分别为 $a\text{cm}$ 、 $b\text{cm}$ ，此时 L 可表示为：

$$L = a - xC \quad (11)$$

式中： x —刀具悬挂中心所在位置距刀具最左边的长度。

表面有孔刀具的面积 S 可表示为：

$$S = ab - \frac{\pi r^2}{4} \quad (12)$$

式中： r —有孔刀具孔半径。

根据距离公式得：

$$x = \frac{1}{2}a + C \left(\frac{\pi r^2}{4ab} - L \right) \quad (13)$$

则有：

$$\begin{cases} I_{FQ'} = I_{FZ} + I_{FX} \\ I_{FO} = I_{FQ'} + S'e^2 \\ I_{FO} + I_R = I_{FQ'} + S'e^2 \end{cases} \quad (14)$$

式中： I_{FO} —无孔刀具对悬挂中心 O 的极惯性矩；

S' —无孔刀具的截面积；

$I_{FQ'}$ —无孔刀具对重心 Q' 的极惯性矩；

I_R —销轴孔对其悬挂中心的极惯性矩；

I_{FX} —无孔刀具对水平对称轴 X 轴的极惯性矩；

I_{FZ} —无孔刀具对 Z 轴的极惯性矩；

e —无孔刀具的重心 Q' 距悬挂中心 O 的距离。

通过整合公式（11）～公式（14），得：

$$x = \frac{1}{3}a - \frac{b^2}{ab} + \frac{\pi r^2}{16a^2b} \quad (15)$$

在代入具体参数后，得 $x=55\text{mm}$ ，则 $C=50\text{mm}$ 。

在粉碎机正常工作过程中，刀具销轴通常不受冲击力作用，故在计算过程中需假设刀具主要是通过刀刃撕碎物料。但是在实际运作过程中，物料粒径大小不同，使得物料撕碎过程中既有刀刃作用也有刀具冲击作用，导致刀具在工作过程中或多或少会出现磨损。除此之外，在刀具安装过程中，通常存在少许误差，在销轴孔及刀刃发生磨损后，其冲击平衡条件将会受到影响^[9]。因此，需对刀具悬挂中心位置进行调整，最终确定为 $x=50\text{mm}$ 。

3 刀具结构仿真分析

通常情况下，刀片上的 6 个刀具仅有一个工作；在极端的工作条件下，实际受力的单元刀具数量将大于 1。因此，在仿真过程中，需考虑 6 个刀具均受力的情况。首先，在有限元软件 ANSYS 中建立刀片的三维模型，然后将计算的转矩与刀具平衡参数输入软件中，分析刀具在工作状态下的强度、刚度。

3.1 结果分析

仿真结果如图 3 所示。

通过分析得知，刀体无明显位移情况，最大位移位于刀刃的交点处，如图 3（a）所示。前钩最大位移位于刀刃上，如图 3（b）所示。此外，刀体最大应力位于刀刃的交点处，为 180MPa，如图 3（c）所示。前钩最大应力位于刀刃处，为 352MPa，如图 3（d）所示。由此得知，一般材料无法承受此种载荷。

3.2 材料选取

目前常见的硬度较高的金属化合物为硬质合金，其硬度、耐磨度高于高速钢，韧性高于超硬材料，在刀具行业中应用较为广泛^[10]。钨钢与莱氏体高碳高铬钢作为常见的硬质合金，其焊接性能较好，可有效满足破碎刀具的使用需求。但是钨钢价格校对较高，故选择莱氏体高碳高铬钢作为刀片的制作材料。

4 结语

对于双转子粉碎机而言，其工作过程中刀具的受力情况较为复杂，故在刀具设计过程中材料的选用尤为

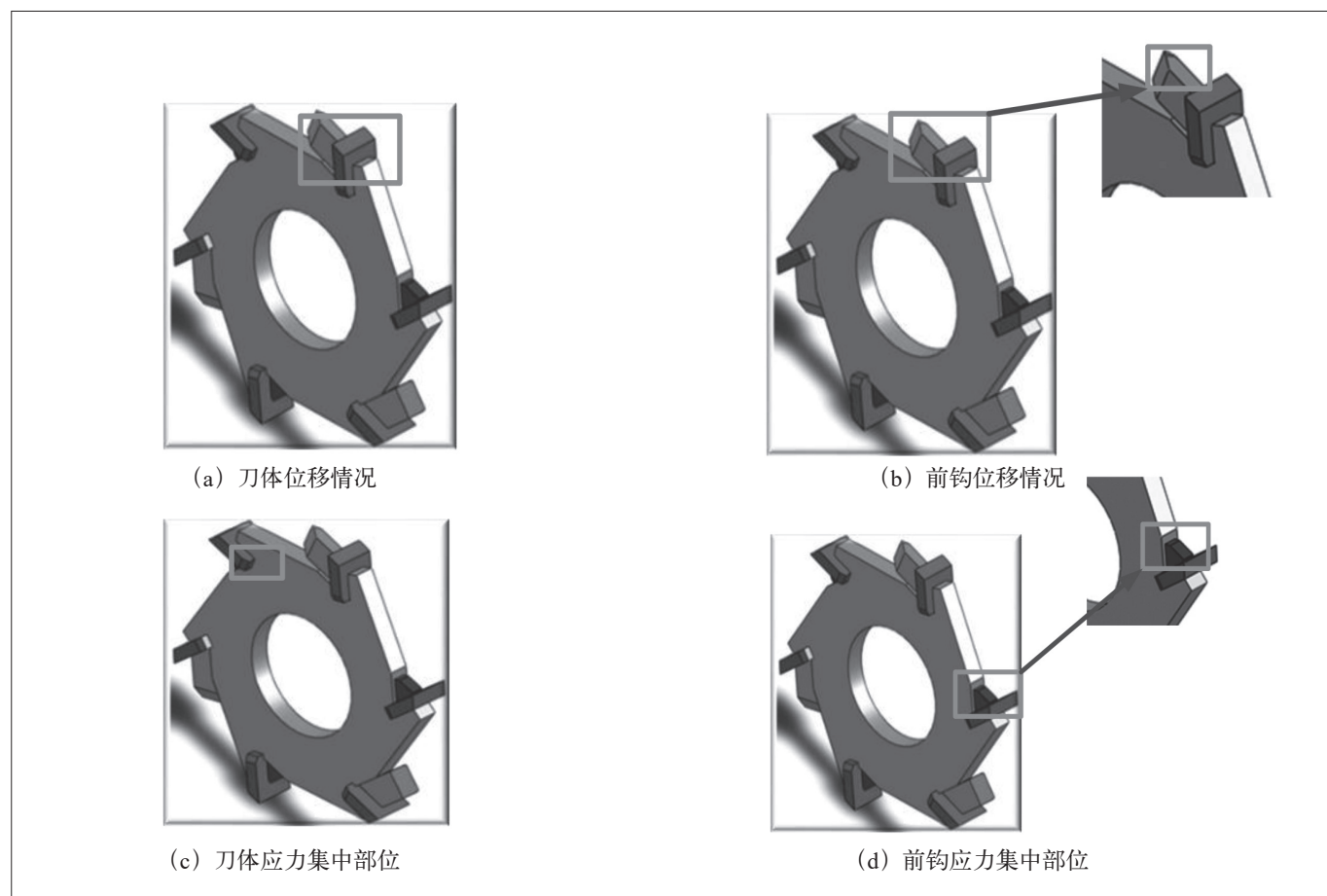


图3 刀具仿真结果

重要。为确保设计刀具的强度、耐磨性等满足工作要求,本文对刀具的刀轴进行受力分析,然后对刀具的平衡状态进行计算,进而确定刀具切削部分的几何参数,并通过有限元软件对刀具工作过程中的位移情况与受力情况进行分析,为刀具材料的选择提供参考。

参考文献:

- [1] 王珊,郑欣敦,刘洪萍,等.基于响应曲面的树枝粉碎装置设计与试验[J].农机化研究,2023,45(1):168-175.
- [2] 税加坤,廖凯,杨蹈宇,等.木桩粉碎机关键部件设计与工艺参数分析[J].机械强度,2021,43(6):1402-1408.
- [3] 米强,刘江,张航,等.牵引式红枣残枝粉碎机的设计与试验[J].农机化研究,2021,43(1):101-108.
- [4] 潘峰,罗昕,胡斌,等.机收棉秆切割装置的设计与试验[J].农机化研究,2022,44(5):147-151.
- [5] 洪培瑶,林斯乐,张腾敏,等.巨菌草茎秆粉碎机的设计研究[J].新疆农机化,2021(5):11-13.
- [6] 孙树强,王维革.新型锤片式双轴粉碎机筛分效率探讨[J].中国设备工程,2020(11):118-119.
- [7] 于志恒,黄风立,王殿梁,等.基于动态特性分析的SG-90200大型粉碎机刀架轴设计与研究[J].机床与液压,2020,48(9):89-94.
- [8] 王宁波,张威,陈美玲.一种粉碎机自动负荷调节系统设计研究[J].自动化应用,2021(12):32-35.
- [9] 王涛,柳国光,楼婷婷,等.丘陵山区果树枝条粉碎机的研制与试验[J].中国农机化学报,2019,40(3):88-94.
- [10] 韩梦龙,齐自成,王振伟,等.基于Arduino与Nrf24101无线轴承润滑油智能温度监控系统设计[J].中国农机化学报,2019,40(5):167-171+200.

作者简介: 罗远哲(1974.06-),男,汉族,山东郓城人,博士研究生,教授级高级工程师,研究方向:信息安全技术、物联网大数据安全、数据安全和电磁安全;赵化楠(1993.10-),男,汉族,山东济南人,本科,工程师,研究方向:刀具研发设计;刘威(1997.09-),男,汉族,河北张家口人,本科,工程师,研究方向:刀具研发设计;闫鹿博(1993.03-),男,汉族,河南周口人,本科,工程师,研究方向:数据安全。