

研究论文

空气涡轮制冷机在粉碎 EVA 技术中的应用

邢磊, 王屏, 刘思永, 方祥军

(北京航空航天大学能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 低温粉碎是塑料, 特别是低软化温度塑料超细粉碎的发展趋势。本文在深入研究了乙烯-醋酸乙烯共聚物 (EVA) 材料特性和粉碎机理的基础上, 将空气涡轮制冷低温粉碎技术应用于 EVA 低温细碎中, 有效地提高了 EVA 颗粒的超细粉碎效率; 同时指出了该粉碎流程的关键技术及影响粉碎效果的主要因素, 开辟了一条规模化、高质量、低能耗回收可再生塑料的新途径。此外, 从能量守恒的角度出发, 以工程应用为目标, 对粉碎过程中的核心环节——冷冻和粉碎, 初步进行了理论方面的计算分析。这些分析的结果有益于设备的完善及改进。

关键词: 空气涡轮制冷机; 低温粉碎; 塑料; 乙烯-醋酸乙烯共聚物

中图分类号: TQ 029⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 04-1037-07

Application of air turbine refrigerator to grinding EVA

XING Lei, WANG Ping, LIU Siyong, FANG Xiangjun

(School of Jet Propulsion, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Cryogenic grinding has been the development trend for ultrafine grinding of plastics, especially for plastics with low softening temperature. A kind of typical thermoplastic elastomer—ethylene vinyl acetate (EVA) was chosen as the study subject. Based on thorough studies of material properties and grinding mechanism of EVA, the authors used the air turbine cryogenic grinding system and accomplished experiments to grind EVA into fine powders, effectively enhancing the fine grinding efficiency of particles at low costs. And the key issues of the grinding process and effects were discussed in detail. A new way of recycling renewable plastics on a large scale with high quality and low energy consumption was created. An engineering approach to analyzing the core processes of refrigeration and grinding was introduced with the law of energy conservation to guide the improvement of equipment performance during experiments.

Key words: air turbine refrigerator; cryogenic grinding; plastics; EVA

引 言

废旧塑料资源被经济学家称为“放错了位置的资源”^[1]。目前我国每年废旧塑料的社会拥有量达 1500 万吨, 已经成为全球最大的废旧塑料市场和再生利用国。

根据我国国情, 回收利用 (包括熔融再生、复

合再生和热裂解等) 是废旧塑料处理现实、科学及经济的方式。无论是热裂解、熔融再生还是复合再生, 都需要进行废旧塑料的颗粒粉碎加工。塑料粉碎成粉末后, 不仅保持了塑料原有的性能, 而且增加或增强了可塑可成型性、可溶性、流平性等, 从而大大扩大了其应用领域。粉末回转成型、服装热熔胶^[2]及塑料改性对微细粉末的需求量正与日

2006-07-03 收到初稿, 2006-10-23 收到修改稿。

联系人及第一作者: 邢磊 (1982-), 男, 硕士研究生。

Received date: 2006-07-03.

Corresponding author: XING Lei. E-mail: xinglei@sjp.buaa.edu.cn

俱增。

塑料，尤其是热塑性塑料较低的软化、熔融温度和力学性能对冲击速率、温度的敏感性决定了在常温下难以达到理想的超细粉碎效果，必须采用低温粉碎。而液氮昂贵的价格大幅增加了生产成本^[3]，不适合我国国情；氟里昂、溴化锂、干冰等传统制冷方式若要达到深冷，则实际流程和系统设备将十分复杂，运行可靠性和经济性大幅降低，且设备维护工作量大。涡轮制冷机有着制冷温度低、效率高、制冷速度快、能耗低、工作可靠、自成体系等一系列优点，虽然应用于塑料的低温粉碎工程尚属起步阶段，但发展空间广阔。本文是与深圳某公司合作，该公司每月几十吨价格昂贵的绝缘材料 EVA 树脂边角料在前期生产已掺用添加剂，回收时不易加热熔化重复利用，需细碎到 104~89 μm 才可用。鉴于 EVA 是一类具有橡胶弹性的热塑性塑料，常温难以细碎，故本文开展了应用空气涡轮制冷机对 EVA 低温粉碎技术的研究工作。

1 材料性质

1.1 EVA 颗粒的物理性质

EVA 常态呈橡胶状，由于在分子链中引入了醋酸乙烯单体，降低了结晶度，从而具有热塑性弹性体的特点。EVA 的性能与醋酸乙烯 (VA) 含量关系极大^[4]。本文粉碎的用作电缆覆层的 EVA 颗粒 VA 含量为 6%，性能接近聚乙烯，但比聚乙烯柔软、耐冲击强度高、耐磨性好，其重要物理性质见表 1。

1.2 断裂特性

松弛模量描述了颗粒塑性变形不断扩大的应力松弛，由施加在颗粒上引起长度变形的应力来定义。高松弛模量是在颗粒中储存足够断裂能量的先决条件。

为提高 EVA 颗粒的松弛模量，一方面可以通过低温冷冻，限制 EVA 颗粒的分子弹性，将储存在弹性变形中的能量集中在更小的区域里，则应力的峰值更高，增加断裂发生的可能性；此外，冷冻

将减少颗粒的塑性变形，增加脆性断裂，更易于细碎。另一方面，通过缩短施加应力的周期。在较长应力周期内，分子链会发生相当程度上的构象重排松弛到低能态。而短时间的应力可以使分子间的距离发生畸变达到断裂强度、发生断裂来响应应力。

2 涡轮制冷原理及回冷系统

空气涡轮制冷机是压缩空气在压差作用下膨胀加速^[5]，将其压力位能转化为高速气流的动能，然后令高速气流推动涡轮叶轮转动，并对叶轮做功，得到低温气流。

本文采用带有回冷循环^[5]的空气涡轮制冷机，即把用冷装置排出的低温气流引至回冷热交换器，用来冷却从后冷却器出来的高压常温气流，以降低涡轮入口气流温度，使涡轮出口处获得更低温度的气流，周而复始，从而扩大了空气涡轮制冷机的实际工作温度范围。其原理流程图如图 1 所示。

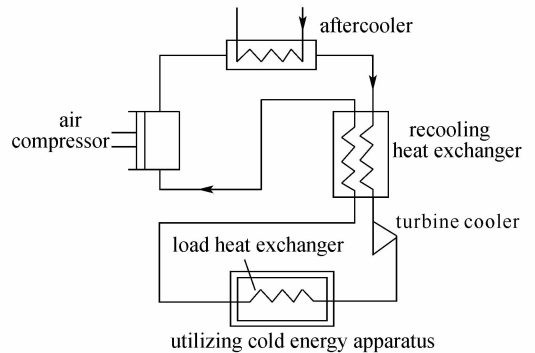


图 1 回冷涡轮制冷机原理流程图
Fig.1 Schematic diagram of air turbine refrigerator with recooling cycle

图 2 为回冷空气涡轮制冷机的理论循环图，1-2-3-4 为具有相同单位制冷量的无回冷空气涡轮制冷机理论循环，4-1-5-6-7-8 为回冷空气涡轮制冷机理论循环^[6]。在相同的工作压力范围内，回冷循环的单位制冷量明显大于无回冷循环。在获得相同的单位制冷量时，回冷循环的工作压力范围大幅减小，使压缩机和涡轮冷却器的功率都大幅减小，使实际回冷循环的制冷系数明显高于无回冷循环。

表 1 EVA(VA 含量为 6%)物理性质

Table 1 Physical properties of EVA(with 6%VA)

Item	Melt flow rate /g · min ⁻¹	Relative density /kg · m ⁻³	Elongation at break/%	Embrittlement temperature/°C	Softening temperature/°C	Hardness
performance data	5.5	930	700	<-75	111	49
(testing method)	(JISK6924-2)	(JISK7112)	(JISK6924-2)	(JISK7216)	(JISK7206)	(JISK7216)

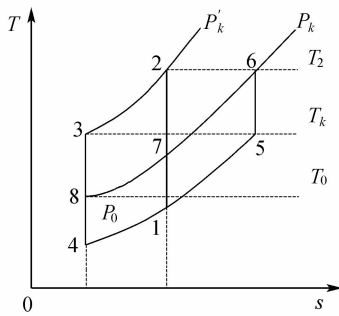


图2 回冷涡轮制冷机理论循环

Fig. 2 Theoretical cycle of recooling turbine refrigerator

3 低温粉碎 EVA 工艺流程

如图3所示,来自空气涡轮制冷机负荷压气机的空气经过冷却后进入空气压缩机增压到0.8 MPa左右,经后冷却器降温到30℃,再进入除油干燥装置净化,要求空气的露点温度达-60℃,含油量低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,然后经板翅式回冷换热器降温,一般情况下,回冷换热器出口温度可达-25℃以下,接着空气在涡轮膨胀机中膨胀制冷,使空气压力降至0.1 MPa,温度降至-80℃以下,将此低温空气送入颗粒预冷室对颗粒进行预冷,继而进入沸腾式颗粒冷冻室及低温粉碎机,对EVA颗粒深冷并在低温下将其细碎。与此同时,经涡轮膨胀机膨胀后的部分冷气引入板翅式换热器,作为冷源来冷却即将进入涡轮膨胀机的空气,使系统温降能力大大提高,形成良性循环,最后空气进入负荷压气机。

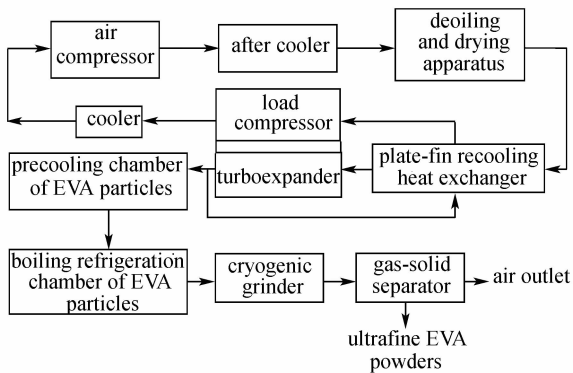


图3 涡轮制冷低温粉碎 EVA 工艺流程图

Fig. 3 Process of cryogenic grinding of EVA particles

4 关键技术及设备

4.1 涡轮膨胀机

涡轮膨胀机由涡轮叶轮、压气机叶轮、喷嘴

环、转轴、轴承和壳体等部件组成。由于转速每分钟高达数万转,故轴承是影响使用寿命的关键部件。实际应用较多的有空气轴承和油轴承两种。本文采用油轴承涡轮膨胀机。

4.2 回冷换热器

回冷换热器采用紧凑型换热器中紧凑度和传热效率高的板翅式热交换器。由于地面使用,设计时体积可适当取大些,流动方式采用冷却效果好的逆流式。总传热面积为 45 m^2 ,传热面积密度为 $1600 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$,设计工况下,传热表面功率因子为0.16。

4.3 EVA 颗粒预冷室和冷冻室

预冷室和冷冻室的优化设计是保证粉碎效果的重要手段。应合理地进行结构设计,适当地调配冷量,增大颗粒的分散度,在争取最佳的冷冻效果的前提下,解决颗粒的输送及结拱堆积等问题。

4.4 低温粉碎机

4.4.1 结构及原理 低温下粉碎最有效的是冲击力场。综合考虑原料性质及状态、粉碎方式、处理能力、能源消耗等多方面因素,本文采用涡流磨作为低温粉碎设备。

涡轮磨的旋转体是由四级叶片组和叶片侧面连接的隔板形成的多个小室组成,机罩里面装有许多带有沟槽的衬板,叶片与外壳间隙可调。

由于多级反复粉碎,不仅有高速旋转的叶片对EVA颗粒实施的冲击和剪切力的作用,还有颗粒与衬板间的高速碰撞作用;同时,通过无数的超音速涡流^[7]所产生的颗粒之间的相互碰撞以及由高频振动产生的压碎等复杂的机理,使物料得到粉碎,排出的粉碎产品粒度分布较窄。

4.4.2 涡流磨的改进

(1) 由涡流磨的粉碎机理可知,颗粒与叶片、衬板的相互碰撞是涡流磨的主要粉碎方式。因此,在EVA的粉碎过程中,希望尽可能增大颗粒与叶片及衬板的碰撞机会。但若颗粒的自由程^[8]太短,进入粉碎机的物料首先与叶片间的物料相互碰撞,这样,将在一定程度上减弱了进料颗粒与叶片、衬板的相互冲击作用。因此,可通过适当增加每一级叶片的数目,来相对增加颗粒的平均自由程,从而提高颗粒粉碎效果。

(2) 作为涡流磨的主要粉碎方式之一,适当减小转子和衬板的间隙,可以增加颗粒和衬板的碰撞几率,实现更多的有效粉碎。

表 2 实验参数值

Table 2 Values of experimental parameters

Average feeding size / μm	Air turboexpander			Vortex mill					Laboratory temperature / $^{\circ}\text{C}$	Refrigeration chamber temperature / $^{\circ}\text{C}$	Output / $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
	Inlet pressure /MPa	Outlet pressure /MPa	Outlet temperature / $^{\circ}\text{C}$	Rated power /kW	Operating current /A	Rotating speed / $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	Clearance between impellers and lining/mm	Exhaust temperature / $^{\circ}\text{C}$			
420	0.31	0	-86	55	60-80	5000	5	33	16	-30	200

Note: Inlet and outlet pressures are both gauge pressure.

(3) 对于在各个涡流小室内的颗粒群, 根据 Sommerfeld 等建立的任何一对颗粒间碰撞概率的计算公式^[9]

$$p = [\pi(R_1 + R_2)^2 N \Delta t |v_t|] / V \quad (1)$$

可通过提高相对速度 v_t 和粉碎时间 Δt 来提高颗粒间的碰撞概率。针对涡流磨, 可以提高电机功率, 增加叶片的切线速度, 一方面增加了颗粒相互碰撞的速度, 另一方面则产生更大的高能旋转的涡流场, 增加了颗粒在涡流磨中的粉碎时间, 从而提高了颗粒间的碰撞概率。

实践证明, 上述 3 个方面的措施取得了良好的粉碎效果。

5 EVA 颗粒粉碎实验

5.1 实验参数

实验参数详见表 2。

5.2 实验结果分析

(1) 粉碎效果综合指标 K_i 定义式为

$$K_i = M_i / P_{ave} \quad (2)$$

式中 M 为涡流磨的小时产量; i 为真实破碎比, 这里采用质量中位径 D_{50} 作为计算标准; P_{ave} 为粉碎过程消耗的平均功率^[10]。

表 3 为 EVA 颗粒分别在常温 (使用某一常温塑料粉碎机) 和低温下粉碎的 K_i 值对比表。

(2) 粉碎后产品粒径质量分布如图 4 所示。

5.3 影响粉碎效果的主要因素

通过实验分析, 发现影响粉碎效果的因素主要

表 3 EVA 在常温和低温下粉碎的 K_i 值对比表

Table 3 Contrast values of K_i

Pulverizer	Refrigeration equipment	M / $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	i	P_{ave} /kW	K_i / $\text{kg} \cdot (\text{kW})^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
plastics pulverizer	none	40	4.1	22	7.45
vortex mill	turbine refrigerator	200	4.3	38	22.63

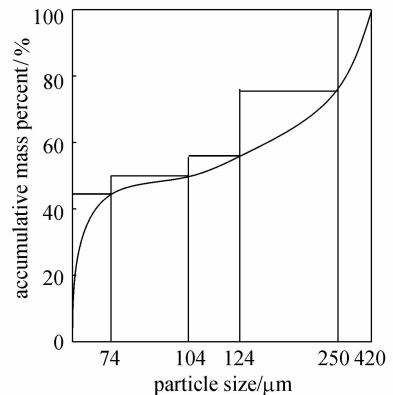


图 4 EVA 颗粒粒径的质量累积分布
Fig. 4 Accumulative mass percentage of EVA particle size

有以下 5 个方面:

(1) 原料性质: 原料的力学性质和软化、熔融温度直接决定了粉碎的方法及效果。

(2) 原料粒度: 这是一个重要工艺参数。一般粒度要细些, 颗粒太大容易逃逸出湍流场, 无法粉碎; 但根据 Griffith 强度理论^[11], 相对粒度太小虽增大了换热表面积, 却存在强度尺寸效应^[12], 抗破坏能力提高, 降低粉碎质量。对于 EVA 原料, 以 420 μm 为宜。

(3) 原料冷冻温度: 理论上认为, 如果 EVA、橡胶等热塑性颗粒被冷冻到脆化状态, 则颗粒就会发生脆性断裂而易于粉碎。但实验结果发现, 脆化后的粉碎产品与常温状态下的粉碎产品相比, 虽然产品的形状有明显的差异, 但粒度未必更细。因此, 在 EVA 颗粒低温粉碎过程中, 无须将原料冷冻至脆化状态再进行粉碎。空气涡轮制冷机所提供的冷量, 一方面用来提高 EVA 物料的松弛模量; 但更为重要的是用来抵消粉碎过程中产生的大量粉碎热, 使粉碎后的 EVA 颗粒保持在允许的温度下。这样做既保证了粉碎质量和产量, 又大幅节省

了能量。问题的关键是要针对粉碎对象寻找到制冷温度的平衡点。本文原料的冷冻温度为 -30°C ，经粉碎后产品的温度不超过 40°C 。

(4) 涡流磨叶片与衬板的间隙：图 5 表示了 3 次实验中，采用不同间隙（分别为 2、3、5 mm）时，产品的粒径质量累积分布。对比可以看出，间隙越小时粒径尺寸越小，分布范围更窄，但相应的细碎过程发热量增大很多，产量大幅下降，难以长期工作，故最终间隙确定为 5 mm。

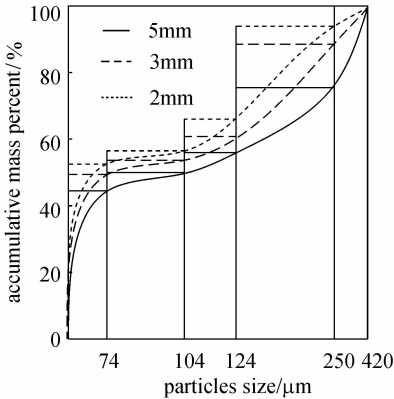


图 5 不同间隙下的粒径质量累积分布对比图
Fig. 5 Graph of accumulative mass percentage of particle sizes at different gaps

(5) 撞击速度：涡流磨转速越高，则叶片的切线速度越大，对 EVA 颗粒的撞击速率增加，相应的发生碎裂的概率增大。但转子的转速受限于轴承负荷、转子组件的强度及加工精度，因此可以适当增加转子的转速，提高粉碎效率。本实验涡流磨叶片的切线速度选定为 $105\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

6 理论计算及分析

本文针对空气涡轮制冷低温粉碎流程的两个核心环节——冷冻和粉碎，从能量守恒出发，以面向工程应用为目标，初步进行了理论方面的计算，并做了相应的结果分析。

6.1 颗粒预冷室的气固换热计算

该室为螺旋推进结构。

6.1.1 计算中的假设

- (1) 颗粒是球形；
- (2) 在横向螺旋推进器流动时，颗粒和冷空气的流量、定压比热容和界面传热系数均保持不变；
- (3) 由于颗粒粒径较小，认为单一颗粒内部的温度分布是均一的；

(4) 由于将冷空气先于物料通入螺旋推进器，计算时认为冷空气与螺旋、圆筒壁已达到热平衡，同时认为圆筒壁面的热损失忽略不计，这里只考虑冷空气与颗粒间的热量交换。

6.1.2 气固换热计算 在上述假设下，可将颗粒和冷空气间的热交换做相应的简化，计算简图如图 6，将横向螺旋推进器按螺旋数分为 n 级。

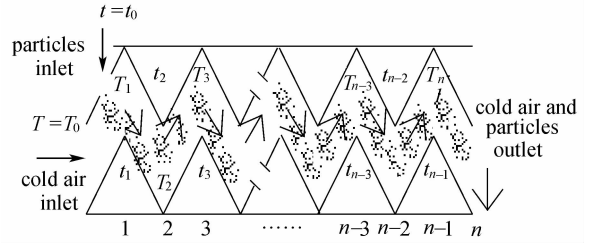


图 6 横螺气固换热计算简图

Fig. 6 Calculation scheme of gas-solid heat transfer in lateral spiral propeller
 t —particles temperature; T —cold-air temperature; 0, 1, 2, 3, ..., n —stage number

在第 1 级螺旋中，以单位时间内流过的颗粒为研究对象，则与冷空气间的气固换热量为

$$Q = h\Delta t_m S \tag{3}$$

其中，考虑到颗粒与冷空气相互掺混，共同在螺旋推进器内流动，换热较为充分，这里取整个换热面积上的对数平均温差^[13]为

$$\Delta t_m = \frac{(t_0 - T_0) - (t_1 - T_1)}{\ln \frac{t_0 - T_0}{t_1 - T_1}} \tag{4}$$

从颗粒的热平衡得

$$Q = W_p c_{p,p} (t_1 - t_0) \tag{5}$$

从气体的热平衡得

$$Q = W_g c_{p,g} (T_1 - T_0) \tag{6}$$

将式 (3) ~ 式 (5) 代入式 (2) 并整理得

$$\frac{t_1 - T_1}{t_0 - T_0} = \exp\left[-hS\left(\frac{1}{W_g c_{p,g}} + \frac{1}{W_p c_{p,p}}\right)\right] \tag{7}$$

为了简化，把式 (7) 左边的项用 ϕ 表示

$$\frac{t_1 - T_1}{t_0 - T_0} = \phi \tag{8}$$

从左至右，对于 2, 3, ..., n 级螺旋进行同样的计算，得到式 (9)

$$\frac{t_1 - T_1}{t_0 - T_0} = \frac{t_2 - T_2}{t_1 - T_1} = \dots = \frac{|t_n - T_n|}{|t_{n-1} - T_{n-1}|} = \phi \tag{9}$$

因此

$$\frac{|t_n - T_n|}{t_0 - T_0} = \phi^n \tag{10}$$

即

$$n = \ln \left[\frac{t_n - T_n}{t_0 - T_0} \right] / \left[hS \left(\frac{1}{W_{p,g} c_{p,g}} + \frac{1}{W_{p,p} c_{p,p}} \right) \right] \quad (11)$$

根据式 (11), 将 t_n 设定为所需冷冻值, 通过进一步的数值计算, 可以得到将颗粒冷冻到设定温度所需的螺旋级数 n , 从而完成颗粒的预冷室设计。

6.2 涡流磨热平衡计算

以涡流磨为研究对象, 颗粒粉碎过程中的各部分能量消耗如图 7 所示。

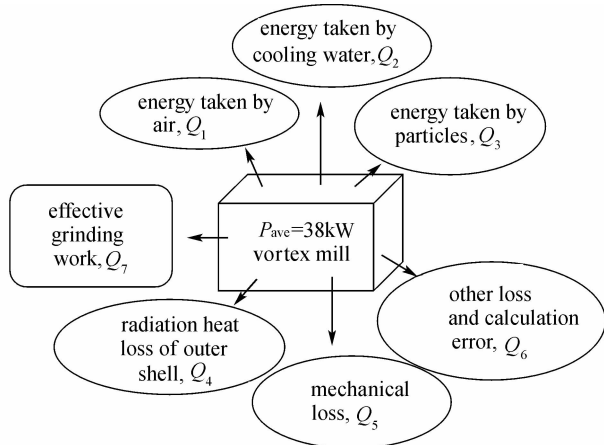


图 7 涡流磨各部分能量消耗

Fig. 7 Full list of energy consumers of vortex mill

由能量守恒定律可列出涡流磨的热平衡方程

$$P_{ave} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 \quad (12)$$

由热量方程 $Q = Gc_p \Delta T$ 可计算得到 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 。 $Q_1 = 16.61 \text{ kW}$, 占涡流磨平均消耗功率 P_{ave} 的 43.7%, 即在沸腾式冷冻室中完成对物料冷冻后的冷空气仍然具有较低的温度, 随物料进入涡流磨, 和由涡流磨抽吸而来的常温空气一起抵消了大部分的粉碎热。 $Q_2 = 3.5 \text{ kW}$, 占平均消耗功率的 9.2%。 $Q_3 = 9.95 \text{ kW}$, 占平均消耗功率的 26.2%。 Q_4 由辐射换热公式^[14] 计算为 0.24 kW , 占平均消耗功率的 0.63%, 仅是常温下磨体辐射热量的 1/10。可见涡轮制冷低温粉碎技术很好地控制了产品的温升, 使生产可以大批量连续进行。而 Q_5 和 Q_6 按照经验值分别取为平均消耗功率的 12.3% 和 5%^[15], 其中还考虑了整体计算中的误差。

在得知了 $Q_1 \sim Q_6$ 所占的比例后, 根据式 (12) 可知有效粉碎功 Q_7 占平均消耗功率的 2.97%。常温下 EVA 颗粒具有类似橡胶的弹性, 粉碎过程中, 传递到各个颗粒上的力由于 EVA 颗粒较大的弹塑性变形而达不到断裂强度极限, 只是

作为固体应力蓄藏在粒子的弹塑性应变区域, 一旦恢复原状便作为热而散发, 因此常温下有效粉碎功一般仅占 0.6%^[15]。可见经过低温冷冻后, EVA 颗粒的松弛模量大大提高, 弹塑性变形减少, 储藏在弹塑性变形中作为热散发的能量大幅减少, 使得有效粉碎功提高了数倍, 相应地大幅提高了产品产量。这一点在实验中也得到了验证。

7 结 论

(1) 实践证明, 采用空气涡轮制冷低温粉碎方法加工超细 EVA 粉是可行的。它比采用液氮的冷冻成本低, 而如采用氟里昂、氨等制冷方法难以达到深冷, 且设备复杂; 与常温粉碎相比, 它的粉碎效果综合指标 K_i 值约是后者的 3 倍, 且生产的安全性高, 无粉末超温、粉尘爆炸等隐患。除低温粉碎 EVA 外, 本技术通过调整相关参数, 可作为低温粉碎多种其他塑料的一种通用技术, 具有较大的商业推广价值, 开辟了一条规模化、高质量、低能耗回收利用可再生塑料的新途径。

(2) 原料性质和粒度、冷冻温度、撞击速度等是影响粉碎效果的主要因素。对冷冻温度的选择原则是使物料在粉碎过程中保持在合理的低温状态下, 而无须达脆化温度, 投入的冷量主要是为了抵消粉碎热, 确保粉碎过程能高质量、低能耗、大批量地进行。

(3) 以涡流磨为研究对象, 从粉碎过程中的能量守恒角度出发, 初步进行了理论方面的分析。这些分析结果较好地验证了实验结果, 有益于设备的改进设计及多种相关参数的评估。

符 号 说 明

- c_p ——比定压热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- $c_{p,g}$ ——冷空气的比定压热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- $c_{p,p}$ ——颗粒的比定压热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- G ——质量流量, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
- h ——颗粒与冷空气间的界面传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- i ——粉碎比
- K_i ——粉碎效果综合指标, $\text{kg} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
- M ——单位时间内的粉碎产量, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
- N ——颗粒数
- P_{ave} ——涡流磨在粉碎过程中的平均消耗功率, kW
- P_k ——6-7-8 (带回冷循环的气流等压冷却过程) 的工作压力, Pa

P'_k ——2-3 (无回冷循环的气流等压冷却过程) 的工作压力, Pa
 P_0 ——4-1-5 (气流等压吸热过程) 的工作压力, Pa
 p ——任何一对颗粒间碰撞概率
 Q ——热量, kW
 Q_1 ——冷空气和常温空气带走的热量, kW
 Q_2 ——涡流磨中冷却水带走的热量, kW
 Q_3 ——EVA 颗粒带走的热量, kW
 Q_4 ——涡流磨壳体辐射换热, kW
 Q_5 ——轴承、齿轮等造成的机械损失, kW
 Q_6 ——噪声、振动、水份蒸发等引起的损失以及在整体计算中的误差, kW
 Q_7 ——有效粉碎功, kW
 R_1, R_2 ——相碰撞颗粒的半径, m
 S ——每一级螺旋内颗粒的表面积, m^2
 T_k ——空气在后冷却器出口温度, $^{\circ}C$
 T_0 ——空气在回冷换热器的出口温度, $^{\circ}C$
 T_2 ——压缩机排气温度, $^{\circ}C$
 ΔT ——温差, K
 Δt ——粉碎时间, s
 V ——体积, m^3
 v_i ——任一对碰撞颗粒的相对速度, $m \cdot s^{-1}$
 W_g ——冷空气的质量流量, $kg \cdot h^{-1}$
 W_p ——EVA 颗粒的质量流量, $kg \cdot h^{-1}$

- 105-106
 [5] Qin Gang (秦钢), Li Min (李敏), Cheng Erxi (程尔玺), Jiang Limin (蒋丽敏). Air Turbine Refrigerator (空气制冷机). Beijing: National Defence Industry Press, 1983: 43-106
 [6] Liu S Y, Wang P, Yan S P. A process for the manufacture of cold, clean, dry air at temperatures down to 173 K and its application in the forced cooling of high-pressure rubber hose prior to wire braiding. *Proc. Instn. Mech. Engrs., Part E: J. Process Mechanical Engineering*, 1997, **211** (3): 425-434
 [7] Li Hui (李慧), Ma Zhengxian (马正先). Crush of waste plastics. *China Plastics* (中国塑料), 2001, **15** (4): 86-90
 [8] Li Fengsheng (李凤生). The Technology of Ultrafine Powder (超细粉体技术). Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 43-50
 [9] Gong Jun (龚俊), Li Chuanmin (李传民), Hou Yunfeng (侯运丰). Superfine comminution of thermoplastics with turbulence mill under normal temperature. *China Powder Science and Technology* (中国粉体技术), 2004 (5): 26-28
 [10] Zou Liang (邹亮), Bai Qingzhong (白庆中), Li Jinhui (李金惠). Research on cryogenic comminution of discarded printed wiring boards. *Journal of China University of Mining & Technology* (中国矿业大学学报), 2005, **35** (2): 220-224
 [11] Liang S B, Hao Y C. A novel cryogenic grinding system for recycling scrap tire peels. *Advanced Power Technology*, 2000, **11** (2): 187-197
 [12] Lu Hougen (陆厚根). Introduction to Powder Technology (粉体技术导论). 2nd ed. Shanghai: Tongji University Press, 1998: 132-134
 [13] Yang Shiming (杨世铭), Tao Wenquan (陶文铨). Heat Transfer (传热学). 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1998: 324-326
 [14] Robert Siegel, John R Howell. Thermal Radiation Heat Transfer (辐射传热学). Cao Yuzhang (曹玉璋), trans. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1990: 160-170
 [15] Lu Shouci (卢寿慈). Powder Processing Technology (粉体加工技术). Beijing: China Light Industry Press, 1999: 134-165

References

- [1] Ren Shengxin (任生心). Reclamation and recycle of waste plastics for pollution reducing, energy saving and consumption lowering [N]. *Guangming Daily*, 2007-5-17 (2)
 [2] Li Zhengren (李正仁), Li Rui (李锐). Development of plastics powder pulverize. *China Plastics Industry* (塑料工业), 2000, **28** (1): 45-47
 [3] Michael Wilczek, Jurgen Bertling, Damian Hintemann. Optimised technologies for cryogenic grinding. *International Journal of Mineral Processing*, 2004, **74**: 425-434
 [4] Holden G, Legge N R, Schroeder H E, Quirk R P. Thermoplastic Elastomers (热塑性弹性体). Fu Zhifeng (傅志峰), trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: