DOI: 10.3901/JME.2013.08.071

轻薄型回收金属破碎过程能耗研究*

李 军¹ 刘剑雄¹ 杨邦成² 侯 杰² 伞红军¹ 樊瑜瑾¹

(1. 昆明理工大学机电工程学院 昆明 650500;

2. 昆明理工大学建筑工程学院 昆明 650500)

摘要:为解决报废汽车的破碎及回收处理问题,由标准拉伸试验获得随机抽取报废汽车轻薄型回收金属材料的力学性能参数,将材料的本构关系简化为双线性模型;利用自制试验装置进行报废汽车轻薄型回收金属摆锤式破碎试验。通过试验过程分析,将破碎过程划分为初始、中间、终了三个阶段;在三个阶段中,轻薄型金属材料发生了局部凹陷、整体弯曲和局部折弯变形,在凹陷变形处失稳、扩展、贯穿的裂纹不断扩展,直至大块的轻薄型回收金属被从其母体上撕裂下来。能量分析表明:整个破碎工具的能量主要被回收金属的弹塑性变形和破碎所消耗;通过简化模型,计算得到三部分弯曲变形的弹塑性弯曲功和回收金属破碎功。结果表明报废汽车回收金属破碎过程中,破碎工具的能量仅有部分用于回收金属破碎。

关键词: 报废汽车 轻薄型回收金属 弯曲变形 弹塑性弯曲功 破碎功

中图分类号: X734

Research on Energy Consumption of Light Metal Scrap Shredding Process

LI Jun¹ LIU Jianxiong¹ YANG Bangcheng² HOU Jie² SAN Hongjun¹ FAN Yujin¹

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering,

Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500;

2. Faculty of Civil Engineering and Architecture,

Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

Abstract: To find solutions to shredding and recovery of end-of-life vehicles, by way of tensile test, the mechanical characteristics of the light metal scrap material from end-of-life vehicles are obtained, and the constitutive relations of materials are simplified as bilinear model; pendulum shredding impact test is completed by self-made testing equipment. Through analyzing the testing process, the shredding process is divided into the initial, intermediate, ending stages. At these stages, shredding tool leads to local sunken, overall bending and local bending deformation on light metal scrap, and the loss of stability, extension, connection, perforation happened on cracks tip of sunken deformation; after that single fragments are torn off from the large plate-shaped (sheet-like) of light metal scrap. The energy analysis shows that the energy is mainly consumed by elastic-plastic bending deformation and shredding of scrap material in the whole comminuting process. Through the simplified model, elastic-plastic power of bending deformation of three parts and shredding work are calculated. The results show the energy of shredding tool partially is used in light metal scrap shredding during the process of light metal scrap of end-of-life vehicles.

Key words: End-of-life vehicles Light metal scrap Bending deformation Elastic-plastic bending work Shredding work

0 前言

国家统计局最新数据显示:2011 年我国汽车产量突破 1 841.6 万辆^[1];当年进口汽车 103.89 万辆。若汽车报废年限按 15 年计,至 2027 年,我国平均

每月需要回收处理 162.1 万辆报废汽车。因此,如何高效低耗地回收处理报废汽车,实现其载能资源的有效循环利用具有极其重要的意义。

为解决轻薄型塑性金属材料的破碎问题,许多学者进行了积极探索。CASTRO 等^[2]研究认为,轻薄型金属材料破碎后的几何尺寸对其回收利用效果具有较大影响。SANDER 等^[3]研究指出,摆锤式破碎机更适合于报废汽车及家用电器等轻薄型回收金

* 国家自然科学基金资助项目(50974068)。20120919 收到初稿,20130104 收到修改稿

属材料的破碎加工处理。KIRCHNER等^[4]研究了立式和卧式轻薄型回收金属破碎机的工作过程,并将其划分为四个连续阶段。刘剑雄等^[5]对报废汽车轻薄型回收金属材料的破碎模式进行了研究,结果表明,应力最为集中的轻薄型回收金属表面初始划痕和缺陷率先失稳、扩展、连片、贯穿,并形成弧形贯穿裂纹;弧形贯穿裂纹尖端的严重应力集中以及破碎工具的持续冲击作用,使大块轻薄型金属碎片(200 mm×200 mm)被从其母体上撕裂下来。邓莉等^[6]对报废汽车轻薄型金属反平面撕裂过程进行了试验研究,证实了轻薄型金属材料的拉伸断裂比功较相同试件的撕裂比功大一个数量级,研究表明撕裂更适合于报废汽车及家用电器的破碎加工处理。BAUER^[7]对1~5 mm厚的聚丙烯和AlMg₃板进行了破碎试验,揭示了破碎力随破碎速度变化的规律;解释了随破碎速度增加,材料会出现突然脆性断裂的现象;给出了刀具角度与撕裂力间、撕裂力与所需能量间的对应关系。WUSTENBERG等^[8]从能量和结构破坏角度出发,对聚丙烯和铝材在回转式切割机中的破碎过程进行了研究,结果表明合理选择工具的几何尺寸有利于提高破碎能量的利用率。WOLDT等^[9]利用轴隙式回转剪切机对铝合金板材进行了U形约束破碎试验,试验显示破碎碎片与破碎工具间的摩擦、碎片的卷曲变形都会导致能量的额外损耗,且以撕裂开始的破碎过程比以剪切开始的破碎过程需要消耗更多的能量;研究给出了铝合金板材的破碎机理及裂纹生长规律。

为更详尽地了解报废汽车轻薄型回收金属的破碎机理,本文在前人研究的基础上,对轻薄型回收金属的初始破碎过程进行了更为深入的研究,进一步揭示了轻薄型回收金属的破碎机理,为获得更加科学合理的报废汽车处理方法提供理论依据。

1 试验研究

为使研究更具普遍性,随机选取两类报废汽车不同部位的覆盖件作为试验研究对象,通过拉伸试验获取其力学性能参数,并根据摆锤式破碎机的工作原理,对相应试件进行了破碎试验研究。

1.1 力学性能参数测试

试验所得两类轻薄型回收金属材料的拉伸应力应变关系如图1a所示,将其简化为图1b所示的双线性模型,相应强化弹性模量 E' 及强化系数 λ 可表示为

$$E' = \frac{\sigma_b - \sigma_{0.2}}{\delta_s - \varepsilon_{0.2}} = \frac{\sigma_b - \sigma_{0.2}}{\delta_s E - \sigma_{0.2}} E \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{E'}{E} = \frac{\sigma_b - \sigma_{0.2}}{\delta_s E - \sigma_{0.2}} \quad (2)$$

式中, $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度, σ_b 为抗拉强度, δ_s 为断后伸长率, $\varepsilon_{0.2}$ 为屈服应变, E 为弹性模量。

图1 材料应力应变关系

利用所得大量试验数据和式(1)、(2)计算得到所选报废汽车轻薄型回收金属材料的力学性能参数如表1所示。

表1 材料力学性能参数

材料	弹性模量 E/MPa	强化弹性模量 E'/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_b/MPa	强化系数 λ	断后伸长率 $\delta_s(\%)$
1	100 363	6 629	200.73	287.56	0.07	0.43
2	80 552	4 043	161.10	267.21	0.05	0.39

1.2 破碎试验

根据报废汽车及家用电器轻薄型回收金属摆锤式破碎机的工作原理,构建图2a所示的破碎试验装置,试件的夹持方式如图2b所示。该装置可通过增减配重在一定范围内改变试验所需破碎功,试验破碎总功及相应参数的具体数值如表2所示。据此,破碎试验过程中的轻薄型回收金属可以简化为一端

刚性固定、另一端自由并承受破碎锤头冲击作用的悬臂梁。

(a) 试验装置

(b) 试件夹持方式

图 2 试验装置及试件夹持方式

表 2 不同数量配重锤体的破碎总功及其他参数

配重序号	锤体质量 m/kg	锤体落差 H/mm	破碎速度 $v/(\text{m/s})$	破碎总功 W/J
0	5.330	685.78	3.670	35.90
1	5.863	697.82	3.702	40.17
2	6.369	707.98	3.729	44.28
3	6.876	717.18	3.753	48.42
4	7.383	725.62	3.775	52.60
5	7.889	733.44	3.795	56.81
6	8.396	740.76	3.814	61.06
7	8.902	747.66	3.832	65.35

为获得较为理想的破碎效果，试验选择渗碳轴承钢 G20CrNiMo 作为锤头材料，淬火后锤尖硬度可达 HRC48。将前述两类报废汽车不同部位轻薄型回收金属覆盖件加工成 $60\text{ mm} \times (300\text{ mm} \sim 500\text{ mm})$ 的窄条，其中第一类报废汽车覆盖件的厚度为 1.30 mm ，第二类报废汽车覆盖件的厚度为 0.99 mm ，并分别将它们定义为 1 类试样和 2 类试样。

1.3 试验结果

通过对上述两类报废汽车多组试件的破碎试验可知，完整的破碎试验过程通常由初始、中间和终了三个阶段组成。初始破碎阶段，由于刚度和惯性，试件有保持原有形状和静止状态的趋势；锤头的冲击作用，导致试件在锤尖作用区产生了与锤尖形状一致的局部凹陷变形，如图 3a 所示；随着锤尖局部凹陷变形不断加剧，在锤尖作用区远离锤头转动中心一侧的试件表面缺陷和初始加工划痕率先失稳、扩展并贯穿。中间破碎阶段，随着锤头的持续冲击作用，试件悬臂部分开始出现沿宽度方向的整体弯曲变形和上大下小沿高度方向的局部折弯变形，这种整体弯曲变形和局部折弯变形使得待破碎轻薄型回收金属产生了对破碎锤头的避让，这在一

定程度上降低了破碎的效果，如图 3b 所示。破碎终了阶段，由于约束和锤头的持续冲击作用，即使存在轻薄型回收金属对破碎锤头的避让效应，只要锤头具有足够能量，仍然可以导致前述局部凹陷变形处失稳、扩展、贯穿的裂纹不断扩展，直至大块的轻薄型回收金属被从其母体上撕裂下来，如图 3c 所示。

(a) 初始阶段

(b) 中间阶段

(c) 终了阶段

图 3 轻薄型回收金属试件破碎效果图

2 分析研究

通过以上分析可知，报废汽车轻薄型回收金属破碎过程中，金属试件的变形主要由局部凹陷、整体弯曲和局部折弯三个部分组成。在忽略摩擦及热量耗散的情况下，根据能量守恒定律，锤头具有的能量与试件弹塑性变形、撕裂破碎能量间存在如下关系

$$W = W' + W'' + W''' + W_s \quad (3)$$

式中 W' ——锤击点局部凹陷变形的弹塑性变形功

W'' ——沿试件高度方向的弹塑性折弯功

W''' ——沿试件宽度方向的弹塑性弯曲功

W_s ——回收金属破碎功

除总功可由试验确定外，各弹塑性弯曲功可通过以下计算获得。考虑到报废汽车及家用电器轻薄型金属材料壁厚较薄，即使在产生严重非线性弹塑性变形情况下，平面假设仍然成立^[10-11]，因此距中性层 z 处材料纵向组织应变 ε 与弯曲曲率半径 R' 的关系为

$$\varepsilon_z = \frac{z}{R'} \quad (4)$$

图 1b 所示为两类报废汽车轻薄型回收金属材料的双线性模型，其本构关系为

$$\begin{cases} \sigma = E \varepsilon_z & \varepsilon_z \leq \varepsilon_{0.2} \\ \sigma = \sigma_{0.2} + E'(\varepsilon_z - \varepsilon_{0.2}) & \varepsilon_z > \varepsilon_{0.2} \end{cases} \quad (5)$$

2.1 局部凹陷变形弹塑性变形功

锤击区试件产生了与锤尖形状一致的局部凹

陷变形, 因此试件局部凹陷变形区域应该是半径为 R 的球的一部分, 该球与轻薄型回收金属板面相交处为一半径为 b 的圆, 如图 4a 所示; 因此计算模型可以简化为图 4b 所示的周边固定铰支, 中心受锤尖作用的圆板。如前所述, 与报废汽车轻薄型回收金属相比, 所选破碎锤材料的硬度较大, 在分析计算中可将其视作刚体^[12-13]。据此局部凹陷变形的弯曲功可计算如下, 图 4b 所示载荷可表达为

$$\sigma = \sigma_{0.2} + E'r_1 \quad (6)$$

图 4 局部凹陷变形

在 σ 作用下, 试件沿 z 方向的位移

$$\omega' = \int_0^{r_1} \frac{1}{r_1} \int_0^{r_1} \int_0^{r_1} \frac{1}{r_1} \int_0^{r_1} \frac{\sigma r_1}{k} dr_1^4 + \frac{1}{4} B r_1^2 + H \quad (7)$$

式中, k 为薄板弯曲刚度, $k = \frac{2E\delta^3}{3(1-\nu^2)}$; ν 为横向变形系数。

由(6)、(7)可得

$$\omega' = \frac{1}{k} \left(\frac{E'r_1^5}{225} + \frac{r_1^4 \sigma_{0.2}}{64} \right) + \frac{1}{4} B r_1^2 + H \quad (8)$$

在 $b \leq r_1 \leq a$ 区域, 其位移

$$\omega'_1 = A_1 \left(\frac{r_1}{b} \right)^2 \ln \frac{r_1}{b} + \frac{1}{2} B_1 \left[\left(\frac{r_1}{b} \right)^2 - 1 \right] + C_1 \ln \frac{r_1}{b} + H_1 \quad (9)$$

当 $r_1 = a$ 时, 圆板简支周边上的边界条件为

$$\begin{cases} M_{r_1} = -k \left(\frac{d^2 \omega_1}{dr_1^2} + \frac{\nu}{r_1} \frac{d\omega_1}{dr_1} \right) = 0 \\ \omega'_1 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

由式(8)~(10)可得积分常数 B 、 H 、 A_1 、 B_1 、 C_1 、 H_1

$$\begin{aligned} B = & \left[\left(1 + \frac{a\nu}{b} \right) \frac{\ln \frac{a}{b}}{2k} (0.1E'b^3 + 0.25b^2\sigma_{0.2} + 0.8E'b + \right. \\ & \sigma_{0.2}) + \frac{3b+10a\nu}{12\Delta b} (0.3E'b^3 + 0.75b^2\sigma_{0.2} + \\ & 0.6E'b + 0.78\sigma_{0.2}) - \frac{a\nu}{\Delta b} (0.1E'b + 0.13\sigma_{0.2}) + \\ & \left. \left(1 + \frac{a\nu}{b} \right) \frac{1}{\Delta a^2} (0.1E'b^5 + 0.13b^4\sigma_{0.2} - 0.2E'b^3 - \right. \\ & \left. 0.26b^2\sigma_{0.2}) \right] \times \left\{ \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{b^2} \left(2 - \frac{b^2-4}{4} a\nu \right) \right] \ln \frac{b}{a} + \right. \\ & \left. \frac{1}{2b^2} \left(2a\nu \frac{b^2-4}{4} - 5 \right) - \frac{b^2-4}{4} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{\nu}{ab} \right) + \frac{3}{4} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} H = & - \left\{ A_1 \left(\frac{a}{b} \right)^2 \ln \frac{a}{b} + \frac{1}{2} B_1 \left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1 \right] + C_1 \ln \frac{a}{b} + \right. \\ & \left. \frac{1}{k} \left(\frac{E'b^5}{225} + \frac{b^4\sigma_{0.2}}{64} \right) + \frac{1}{4} B b^2 \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

分析可知, 在凹陷变形过程中只有弯矩 M_{r_1} 和载荷 σ_{r_1} 做功, 所以凹陷部分外力所做功

$$W' = 2(W'_1 + W'_2) \quad (13)$$

式中 W'_1 ——弯矩 M_{r_1} 所做功

W'_2 ——载荷 σ_{r_1} 所做功

$$M_{r_1} = -k \left(\frac{d^2 \omega'}{dr_1^2} + \frac{\nu}{r_1} \frac{d\omega'}{dr_1} \right) \quad (14)$$

由式(8)、(14)可得

$$\begin{aligned} M_{r_1} = & - \left[E'r_1^3 \left(0.1 + \frac{\nu}{45} \right) + \sigma_{0.2} r_1^2 \left(0.2 + \frac{\nu}{16} \right) + \right. \\ & \left. \frac{Bk}{2} (1 + \nu) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

式中, $r_1 = R \sin \alpha_1$ 。所以弯矩所做功

$$W'_1 = \int_0^{\alpha_0} M_{r_1} d\alpha_1 \quad (16)$$

由式(15)、(16)可得弯矩所做功

$$\begin{aligned} W'_1 = & R^3 E' \left(\frac{\cos^3 \alpha_0 + 2}{3} - \cos \alpha_0 \right) \left(0.1 + \frac{\nu}{45} \right) + R^2 \sigma_{0.2} \times \\ & \left(\frac{\alpha_0}{2} - \frac{\sin 2\alpha_0}{4} \right) \left(0.2 + \frac{\nu}{16} \right) + \frac{1}{2} B k \alpha_0 (1 + \nu) \end{aligned} \quad (17)$$

有效应力分量

$$\sigma_{r_1} = -k \frac{d}{d_{r_1}} (\nabla^2 \omega') \quad (18)$$

由式(8)、(18)可得

$$\sigma_{r_1} = -(0.3E'r_1^2 + 0.5r_1\sigma_{0.2}) \quad (19)$$

由式(19)可得作用力

$$F_z = -1.2\delta E'r_1^3 - r_1^2 (2\delta\sigma_{0.2} + 1.2\delta^2 E') - 2\delta^2 r_1\sigma_{0.2} \quad (20)$$

且由几何关系可得

$$z = R \cos \alpha_1 - g_1 \quad (21)$$

式中, g_1 为常数。

所以由式(18)、(19)可得 σ_z 所做的功

$$\begin{aligned} W_2' &= \int_0^{\alpha_0} F_z d\alpha_1 = 1.2\delta E'R^4 \times \\ &\left(-\frac{\sin^3 \alpha_0 \cos \alpha_0}{4} + \frac{2\alpha_0 - \sin \alpha_0}{16} \right) + \\ &R^3 \left(\frac{2 + \cos^3 \alpha_0}{3} - \cos \alpha_0 \right) (2\delta\sigma_{0.2} + 1.2\delta^2 E') + \\ &\delta^2 R^2 \sigma_{0.2} \left(\alpha_0 - \frac{\sin 2\alpha_0}{2} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

将式(17)、(22)代入式(13)即可求出凹陷部分外力所做的总功。

2.2 沿试件高度方向的弹塑性折弯功

建立如图 5a 所示空间直角坐标系, 选取 y 方向上任一微段 dy , 图 5b 为该微段的截面图。由于沿试件高度方向的折弯关于 y 轴对称, 因此选 dy 微段上 x 的正半部分为研究对象, 其弯曲功计算方式如下。

图 5 沿试件高度方向折弯简化图

通过破碎后所获取的试件几何形状参数, 建立图 5b 所示曲线的函数关系式为

$$f(x) = \begin{cases} B_2 x^2 + C_2 x - D_2 & 0 \leq x \leq x_0'' \\ \sqrt{r_2''^2 - \left(x - \frac{L}{2}\right)^2} - r_2'' & x_0'' \leq x \leq \frac{L}{2} \end{cases} \quad (23)$$

因此轻薄型金属试件沿高度方向的弹塑性折弯功

$$W'' = W_1'' + W_2'' \quad (24)$$

式中 W_1'' ——曲线一对应的弹塑性弯曲功

W_2'' ——曲线二对应的弹塑性弯曲功

由式(4)可得

$$\varepsilon_z = k'z \quad (25)$$

式中, k' 为曲线的曲率。

弯曲变形的弯矩

$$M = \int_0^S \sigma z dS = 2b' \int_0^\delta z \sigma dz \quad (26)$$

式中 S ——弯曲部分的横截面积

b' ——弯曲部分的宽度

δ ——1/2 试件厚度

将式(5)、(25)式代入式(26)可得 dy 微段上的弯矩

$$\begin{aligned} dM &= 2dy \left\{ \int_0^\delta E \varepsilon_z z dz + \int_0^\delta [\sigma_{0.2} + E'(\varepsilon_z - \varepsilon_{0.2})] z dz \right\} = \\ &2dy \left\{ \frac{E\delta^3 k_2}{3} + \left[\frac{\sigma_{0.2}\delta^2}{2} + E' \left(\frac{\delta^3 k_2}{3} - \frac{\varepsilon_{0.2}\delta^2}{2} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

式中, $k_2 = 1/r_2'$ 。

试件折弯过程中, 在任意 dy 截面上的曲率上限

$$k_0'' = 1/0.47y \quad (28)$$

由式(27)、(28)可得外力所做的弯曲微功

$$\begin{aligned} dW'' &= 2dy dx \left\{ \int_0^{\varepsilon_{0.2}} \frac{E\delta^3 k_2}{3} dk_2 + \right. \\ &\left. \int_{\varepsilon_{0.2}}^{k_0''} \left[\frac{\sigma_{0.2}\delta^2}{2} + E' \left(\frac{\delta^3 k_2}{3} - \frac{\varepsilon_{0.2}\delta^2}{2} \right) \right] dk_2 \right\} = \\ &2x_0'' dy \left[\frac{E\delta^2 \varepsilon_{0.2}^2}{6} + \left(\frac{\sigma_{0.2}\delta^2}{2} - E' \frac{\varepsilon_{0.2}\delta^2}{2} \right) \times \right. \\ &\left. \left(\frac{1}{0.47y} - \frac{\varepsilon_{0.2}}{\delta} \right) + \frac{E'\delta^3}{6} \left(\frac{1}{0.47^2 y^2} - \frac{\varepsilon_{0.2}^2}{\delta^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (29)$$

式中, x_0'' 为曲线相切分界点。

由式(29)可得曲线一对应部分的弹塑性弯曲功

$$U_1'' = 4x_0'' \int_c^{s'} \left[\frac{E\delta\varepsilon_{0.2}^2}{6} + \left(\frac{\sigma_{0.2}\delta^2}{2} - E'\frac{\varepsilon_{0.2}\delta^2}{2} \right) \times \left(\frac{1}{0.47y} - \frac{\varepsilon_{0.2}}{\delta} \right) + \frac{E'\delta^3}{6} \left(\frac{1}{0.47^2 y^2} - \frac{\varepsilon_{0.2}^2}{\delta^2} \right) \right] = 4x_0'' \left[\frac{E\delta\varepsilon_{0.2}^2}{6} (s' - c) + \left(\frac{\sigma_{0.2}\delta^2}{2} - E'\frac{\varepsilon_{0.2}\delta^2}{2} \right) \times \left(\frac{1}{0.47} \ln \frac{s'}{c} - \frac{\varepsilon_{0.2}}{\delta} s' \right) + \frac{E'\delta^3}{6} \left(\frac{1}{0.47^2} \left(\frac{1}{c} - \frac{1}{s'} \right) - (s' - c) \frac{\varepsilon_{0.2}^2}{\delta^2} \right) \right] \quad (30)$$

同理, 可得曲线二对应部分的弹塑性弯曲功

$$W_2'' = 4 \left(\frac{L}{2} - x_0'' \right) (s' - c) \left[\frac{E\delta\varepsilon_{0.2}^2}{6} + \left(\frac{\sigma_{0.2}\delta^2}{2} - E'\frac{\varepsilon_{0.2}\delta^2}{2} \right) \times \left(\frac{1}{r_2''} - \frac{\varepsilon_{0.2}}{\delta} \right) + \frac{E'\delta^3}{6} \left(\frac{1}{r_2''^2} - \frac{\varepsilon_{0.2}^2}{\delta^2} \right) \right] \quad (31)$$

将式(30)、(31)代入式(24)即可求得沿试件高度方向的弹塑性折弯功。

2.3 沿试件宽度方向的整体弯曲功

为计算沿试件宽度方向弯曲的弯曲功, 将其简化为如图6a所示的形式, 在宽度方向上只发生曲率为 $1/r_3$ 的弯曲变形, 其弯曲距离为固定端至锤击点的距离 e , p 为外力。选取 dy 微段进行分析计算, 其弯曲功计算方式如下。将式(5)、(25)代入式(26)可得其微段上的弯矩

$$dM = 2L \left\{ \int_0^{\delta} E\varepsilon_z z dz + \int_0^{\delta} \left[\sigma_{0.2} + E'(\varepsilon_z - \varepsilon_{0.2}) \right] z dz \right\} = 2L \left\{ \frac{E\delta^3 k_3}{3} + \left[\frac{\sigma_{0.2}\delta^2}{2} + E' \left(\frac{\delta^3 k_3}{3} - \frac{\varepsilon_{0.2}\delta^2}{2} \right) \right] \right\} \quad (32)$$

式中, $k_3 = 1/r_3$ 。

(a) 试件弯曲侧面图

(b) 计算模型

图6 试件整体弯曲计算模型

因此沿试件宽度方向的弹塑性弯曲微功

$$dW''' = 2L dy \left\{ \int_0^{\varepsilon_{0.2}} \frac{E\delta^3 k_1}{3} dk_3 + \int_{\frac{\varepsilon_{0.2}}{\delta}}^{\frac{1}{r_3}} \left[\frac{\sigma_{0.2}\delta^2}{2} + E' \left(\frac{\delta^3 k_2}{3} - \frac{\varepsilon_{0.2}\delta^2}{2} \right) \right] dk_2 \right\} = 2L dy \left[\frac{E\delta\varepsilon_{0.2}^2}{6} + \left(\frac{\sigma_{0.2}\delta^2}{2} - E'\frac{\varepsilon_{0.2}\delta^2}{2} \right) \times \left(\frac{1}{r_3} - \frac{\varepsilon_{0.2}}{\delta} \right) + \frac{E'\delta^3}{6} \left(\frac{1}{r_3^2} - \frac{\varepsilon_{0.2}^2}{\delta^2} \right) \right] \quad (33)$$

可得沿试件宽度方向的弹塑性弯曲功

$$W''' = 2L \int_c^e \left[\frac{E\delta\varepsilon_{0.2}^2}{6} + \left(\frac{\sigma_{0.2}\delta^2}{2} - E'\frac{\varepsilon_{0.2}\delta^2}{2} \right) \times \left(\frac{1}{r_3} - \frac{\varepsilon_{0.2}}{\delta} \right) + \frac{E'\delta^3}{6} \left(\frac{1}{r_3^2} - \frac{\varepsilon_{0.2}^2}{\delta^2} \right) \right] dy = 2L(e - c) \left[\frac{E\delta\varepsilon_{0.2}^2}{6} + \left(\frac{\sigma_{0.2}\delta^2}{2} - E'\frac{\varepsilon_{0.2}\delta^2}{2} \right) \times \left(\frac{1}{r_3} - \frac{\varepsilon_{0.2}}{\delta} \right) + \frac{E'\delta^3}{6} \left(\frac{1}{r_3^2} - \frac{\varepsilon_{0.2}^2}{\delta^2} \right) \right] \quad (34)$$

由于回收金属破碎功不易直接获得, 但它却是研究回收金属破碎的重要参数。因此, 可通过式(3)间接获取其数值。

通过式(3)、(13)、(24)、(34)可计算得到报废汽车轻薄型回收金属试件锤击点局部凹陷变形的弹塑性变形功 W' 、沿试件高度方向的弹塑性折弯功 W'' 、沿试件宽度方向的弹塑性弯曲功 W''' 。据此可计算得到报废汽车轻薄型回收金属的破碎功 W_s 。利用大量1类试样、2类试样所有试件的具体试验数据及其相关性能参数, 计算得出的相应结果和参数如表3所示。

表3 几何参数及弹塑性弯曲功

参数	1类试样	2类试样
试件横向弯曲的宽度/mm	100	100
试件厚度/mm	1.3	0.99
夹持点距锤击点的距离/mm	57	57
锤击点局部凹陷变形弹塑性变形功均值/J	8.6	10.2
沿试件高度方向弹塑性折弯功均值/J	33.75	16.91
沿试件宽度方向弹塑性弯曲功均值/J	1.01	1.70
破碎总功均值/J	52.60	35.90
回收金属破碎功均值/J	9.24	7.09

由以上计算结果可知, 报废汽车轻薄型回收金属的 1 类试样、2 类试样在摆锤破碎过程, 各部分变形的能耗关系为 $W''' > W''$, $W''' > W_s$, $W''' > W'''$ 。研究表明, 沿试件高度方向的弹塑性折弯功消耗了破碎工具的绝大部分能量。

3 结论

通过对报废汽车轻薄型回收金属材料破碎过程的试验研究及理论分析, 得出以下结论。

(1) 轻薄型回收金属摆锤式破碎过程中, 试件主要发生了局部凹陷、整体弯曲和局部折弯三部分变形, 通过计算获取了各部分弯曲变形能, 从破碎总能量中去除上述弯曲变形能, 即可获得轻薄型回收金属破碎性能的重要参数——轻薄型回收金属破碎功。

(2) 研究表明, 回收金属的支撑方式、锤尖几何尺寸、运行轨迹和速度等对轻薄型回收金属破碎过程的影响较大。

(3) 分析可知, 用于轻薄型回收金属的破碎功仅占破碎工具总能量的一小部分, 因此要提高破碎效率, 必须尽可能降低破碎过程中轻薄型回收金属的各种弹塑性变形。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 统计公报 [EB/OL]. [2012-02-22]. <http://www.stats.gov.cn/tjgb/>. National Bureau of Statistics of China. Statistical Bulletin [EB/OL]. [2012-02-22]. <http://www.stats.gov.cn/tjgb/>.
- [2] CASTRO M B, REMMERSWAAL J A M, BREZET J C. A simulation model of the comminution-liberation of recycling streams relationships between product design and the liberation of materials during recycling[J]. Int. J. Miner. Process, 2005, 75: 255-281.
- [3] SANDER S, SCHUBERT G, JACKEL H G. The fundamentals of the comminution of metals in shredders of the swing-hammer type[J]. Int. J. Miner. Process, 2004, 74(Suppl.): 385-393.
- [4] KIRCHNER J, TIMMEL G, SCHUBERT G. Comminution of metals in shredders with horizontally and vertically mounted rotors-microprocesses and parameters[J]. Power Technology, 1999, 105: 274-281.
- [5] 刘剑雄, 杨邦成, 李自良, 等. 轻薄型金属材料破碎模式研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 48-55.
- LIU Jianxiong, YANG Bangcheng, LI Ziliang, et al. The study on shredding modes of light metal scrap[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 48-55.
- [6] 邓莉, 刘剑雄, 刘俊秀, 等. 轻薄型金属反平面撕裂破碎试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 109-114.
- DENG Li, LIU Jianxiong, LIU Junxiu, et al. Experimental investigation of light metal on out-of-plane tearing and shredding test[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 109-114.
- [7] BAUER W. Untersuchungen des Einzelzerkleinerungsvorgangs in Schneidmuhlen am Beispiel von Polypropylen[J]. VDI Fortschritt-Berichte Reihe, 2001, 3: 694.
- BAUER W. Investigation on the comminuting process of polypropylene[J]. The Research Report of Association of German Engineers, 2001, 3: 694.
- [8] WUSTENBERG D, KASPER J. Required energy and structural breakdown at the process of dynamic cutting-comminution of polypropylene and aluminium[J]. Int. J. Miner. Process, 2004, 74(Suppl.): 417-424.
- [9] WOLDT D, SCHUBERT G, JACKEL H G. Low speed rotor shears and shredders in size reduction of waste and scrap metal[C/CD]//Proceedings, Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing, Lulea, Sweden, 2002.
- [10] 余同希, 章亮炽. 塑性弯曲理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- YU Tongxi, ZHANG Liangchi. The theory and application of plastic bending[J]. Beijing: Science Press, 1992.
- [11] 戴杰涛, 张清东. 冷轧薄板中浪板形缺陷的屈曲及后屈曲理论与轧制试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 44-50.
- DAI Jietao, ZHANG Qingdong. Analysis and experimental on central buckling and post buckling of thin cold-rolled sheet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(2): 44-50.
- [12] 王爱华, 彭云, 肖红军, 等. 690MPa 级低合金高强度钢熔敷金属冲击断裂行为研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 73-80.
- WANG Aihua, PENG Yun, XIAO Hongjun, et al. Impact fracture behavior of deposited metal of 690 MPa level high strength low alloy steel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 73-80.

(下转第 83 页)