

## 聚苯乙烯断面形貌特征参量对断裂能耗的影响\*

徐 涛 于 杰 罗 筑 王 丽

(贵州工业大学材料中心 贵阳 550003)

金志浩

(西安交通大学材料学院 西安 710049)

**摘 要** 对缺口聚苯乙烯试样进行了不同加载速率下的三点弯曲实验,通过对加载速率、断面特征区特征参量、断裂能耗三者间关系的分析,指出断裂表面特征形貌中的镜面区、肋状区的形成是能量消耗的主要过程.实验结果表明,随着加载速率增大,镜面区尺寸增大并逐渐趋于平缓,肋条宽度减小而肋区粗糙度增大.断裂能耗与加载速率间存在极小值现象,该极小值出现在2.5m/min的加载速率下,与断面形貌特征的变化正好对应;加载速率 $< 2.5\text{m/min}$ 时,断面主要由镜面区、最后断裂区组成,断裂能耗的变化取决于镜面区尺寸的变化;加载速率 $> 2.5\text{m/min}$ 时,断面由镜面区、肋区、最后断裂区组成,断裂能耗的变化主要和肋区粗糙度的变化有关.

**关键词** 加载速率,断面形态特征参量,断裂能,聚苯乙烯

以往的诸多报道中,对聚苯乙烯(PS)这种典型的无定形玻璃态脆性聚合物材料断裂机制及断裂过程有较详细的分析<sup>[1~4]</sup>.但是,对试验条件、断面特征参量、断裂能耗间的关系不十分清楚.本文通过对PS不同加载速率下三点弯曲试样断裂表面仔细观察分析及断面特征参量的定量测定,考察了加载速率对断面形貌特征的影响及断面形貌特征参量与断裂能耗的关系.

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

聚苯乙烯(PS)由日本ASAHI公司生产,品级666.

### 1.2 实验方法

**1.2.1 三点弯曲实验** 三点弯曲试样尺寸为 $100 \times 4 \times 10\text{mm}$ ,先将PS粒料注塑成长条,然后铣削加工到规定的尺寸,在试样中部沿厚度方向开一深1.5mm的V型缺口,再用锋利刀片在缺口根部划出尖锐切口,预制一尖锐裂纹,其长度大约在 $0.21 \pm 0.005\text{mm}$ 范围内.常温下在INSTRON8501材料试样机上用不同的加载速率进行三点弯曲实验至试样完全断裂.三点弯曲跨距70mm,加载速率范围为 $0.1 \sim 6\text{m/min}$ .

**1.2.2 断裂能耗G的确定** 用INSTRON8501材料试验机固有软件计算 $P-\Delta$ (载荷-位

\* 1997-12-02 收稿,1998-05-05 修稿;贵州省科学基金资助和贵州省跨世纪人才基金资助

移)曲线包围的面积即为断裂能耗值,即  $G = \int P \Delta d\Delta$

1.2.3 断面形貌的观察测量 试样断面先在光学显微镜下观察分析,然后选择有代表性的断口喷金后,用 KYKY-1000B 扫描电镜对断面形态及各种细观特征进行观察和拍照。

采用 15J 工具显微镜及 IAS4 图像分析系统对各种特征区尺寸进行测量.断面轮廓线粗糙度参数  $R_L$  被定义为断口剖面轮廓线真实长度与其在特定方向上投影长度的比值.断面粗糙度参量  $R_S$  (断面真实面积与其投影面积的比值)可据下式得到<sup>[5]</sup>

$$R_S = 4(R_L - 1)/\pi + 1$$

$R_L$  的测量在 IAS4 图像分析系统上进行(放大 1000 倍)。

利用 SPSS 统计软件包对各参数进行相关分析及数据回归处理。

## 2 实验结果和分析

### 2.1 断面形貌特征

PS 弯曲断口表面可分为图 1 所示三个区域,即镜面区、肋区、最后断裂区<sup>[6]</sup>,随加载速率的变化,三区的特征形态及尺寸将发生变化。

2.1.1 镜面区 不同加载速率下 PS 断面镜面区尺寸的测量结果表明随加载速率增大,镜面区尺寸呈下降趋势,并逐渐趋于平缓,如图 2 所示。

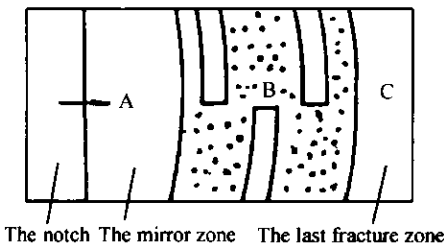


Fig. 1 The characteristic division on fracture surface of PS specimens

Note: B- The morphology of rib zone

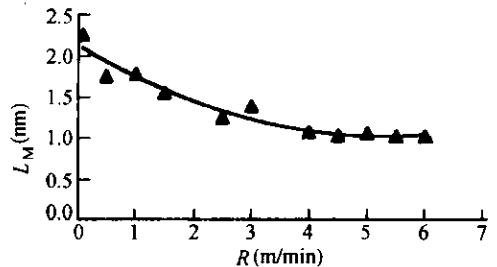


Fig. 2 The Relationship between loading rate  $R$  (m/min) and the size of mirror zone  $L_M$  (mm)

镜面区是裂纹沿一个或少数几个银纹扩展破裂形成的,银纹的长大取决于边界上高分子从无规线团向银纹质中间的取向态转变的过程,较小的加载速率使银纹长大成熟的时间较为充分,因此总是对应着较大尺寸的镜面区.镜面区的形成是一能耗过程。

2.1.2 肋区 不同的加载速率下,肋区特征形貌不同,当加载速率在  $< 2.5 \text{ m/min}$  时,PS 断面主要由镜面区和最后断裂区组成;超过  $2.5 \text{ m/min}$  时,PS 断面由镜面区、肋区和最后断裂区组成.随加载速率增大,镜面区尺寸下降并逐渐趋于平缓,肋区由不连续条带形貌转变为连续条带形貌,且肋条间距逐渐减少。

断口观察表明一条完整的肋条形态由粗糙带和光滑带交替构成,粗糙带在前,光滑带在后;粗糙带由众多高低不平的小平面组成,光滑带上通常可观察到银纹剥离花样.研究表明<sup>[1]</sup>,PS 连续肋状形态的形成是在一定实验条件下,裂纹以高于银纹长大的速度沿一

个或少数几个银纹/基体界面快速剥离扩展,当裂纹扩展到银纹尖端的瞬间,在银纹尖端产生很大的应力集中,导致裂尖材料脆性解理破裂,消耗大量能量.此时,剩余弹性应变能不足以导致材料继续快速断裂,而是积累能量并诱发银纹重新形成,当银纹长大到临界尺寸,裂纹又沿银纹快速扩展并产生应力集中而诱发脆性解理断裂,如此重复便形成了肋状形态.随加载速率增加,积累能量的过程加快,产生快速剥离扩展所需的银纹临界尺寸减少,宏观上表现为肋条宽度减小(肋条宽度是最靠近镜面区三条肋条宽的平均值),如图3和图4所示.从肋区的形成过程来看,它是消耗能量的过程.

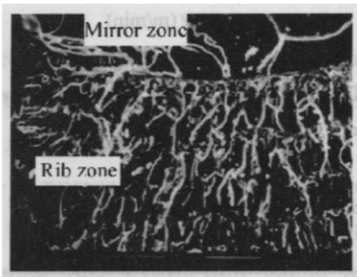


Fig. 3 The SEM photomicrographs of notched bending fracture surface for PS(The loading rate is 6m/min)

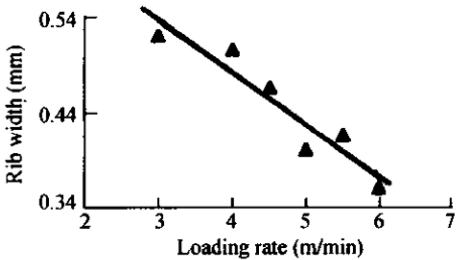


Fig. 4 Variation of rib width (mm) with different loading rate (m/min)

加载速率对肋条中粗糙带尺寸的影响如图5所示,不同加载速率下肋区形貌中的粗糙带尺寸为一恒值,肋区宽度随加载速率增大而减小的原因是肋区中的光滑带附加载速率上升而减小所致.由此可以推断,随加载速率上升,肋区中的粗糙带形貌所占比例增大导致肋区粗糙度增大,实验结果证实了这一点,如图6、图7所示.

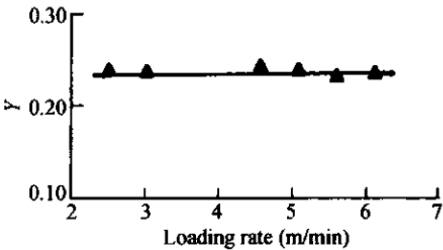


Fig. 5 Variation of the size of coarse band on rib zone with different loading rate (m/min)  
Y—the size of coarse band on rib zone (mm)

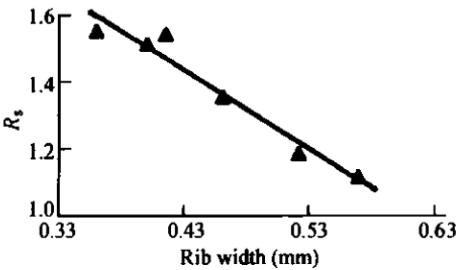


Fig. 6 Variation of rib roughness parameter  $R_s$  with the rib width (mm)

2.1.3 最后断裂区 随裂纹扩展至肋区边缘,此时裂尖应力场强度足以使材料快速失稳扩展,裂纹迅速扩展直至最后断裂.

2.2 断裂能耗分析

断裂能耗与加速速率的关系,如图8所示,存在着极小值现象.该极小值大约出现在2.5m/min的加载速率下,与断面形貌特征出现的变化正好相对应.断裂能与断面各特征区尺寸的相关性系数如表1所示.从表中结果可以看出加载速率在2.5m/min以下时,镜

面区尺寸对断裂能的影响最大;加载速率在 2.5m/min 以上时,肋区尺寸对断裂能的影响最大。

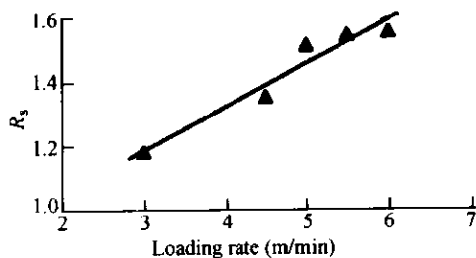


Fig. 7 Variation of rib roughness parameter  $R_s$  with different loading rates

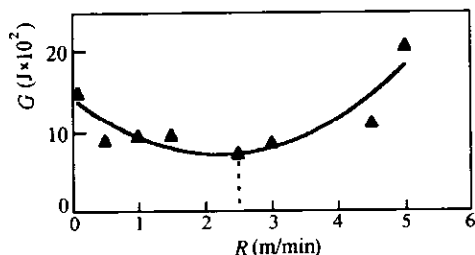


Fig. 8 The relationship between the loading rate  $R$  and break energy  $G$

**Table 1** The correlation coefficient between break energy ( $G$ ) and the size of mirror area ( $L_M$ ), the size of rib area ( $L_S$ ), the size of final break area ( $D_S$ )

|     | Loading rate $R < 2.5 \text{ m/min}$ |        |        | Loading rate $> 2.5 \text{ m/min}$ |        |        |
|-----|--------------------------------------|--------|--------|------------------------------------|--------|--------|
|     | $L_M$                                | $L_S$  | $D_S$  | $L_M$                              | $L_S$  | $D_S$  |
| $G$ | 0.8086                               | 0.2255 | 0.0208 | 0.5234                             | 0.8253 | 0.1476 |

以上分析指出, PS 断面特征形貌中的镜面区、肋区的形成过程是能量消耗的主要过程。加载速率在 2.5m/min 以下时, 断面不形成肋状形态或肋状形态为不连续条带分布, 此时, 断裂能主要消耗在镜面区的形成上, 同时, 在该速率段下, 随加载速率增大, 镜面区尺寸的下降趋势较大(图 2), 导致断裂能耗随加载速率的增大呈下降趋势; 当加载速率超过 2.5m/min 时, 断面形成连续肋状形态, 且随加载速率继续上升, 镜面区尺寸的下降趋势趋于平缓(图 2)。因此, 在这个速率段下, 镜面区尺寸对断裂能耗变化的影响较小。而随加载速率上升, 肋区粗糙度增大, 断裂能耗增多, 导致该速率段下 PS 断裂能耗随加载速率进一步上升而增大。体现出图 8 所示的断裂能耗与加载速率的关系存在极小值现象。

## REFERENCES

- 1 Yu Jie(于杰), Jin Zhihao(金志浩), Zhou Huijiu(周惠久). J Microscopy(电子显微学报), 1993, (4): 324~329
- 2 Lu Xichi(吕锡慈). Strength and Failure of Polymer Materials(高分子材料的强度与破坏), Si Chuan: Education Press, 1988. 290~304
- 3 Stalder B. J Mater Sci, 1985(20): 2873~2881
- 4 Kinloch A J, Young R J. Fracture Behaviour of Polymer. London and New York: Applied Science Publishers Ltd, 1983. 268~272
- 5 Yu Jie(于杰). A Study of Fracture Mechanisms In Polymer Materials (聚合物材料断裂规律及机理研究), Xian: XianJiaotong University, Ph D Thesis, 1994. 78~79
- 6 Luo Zhu(罗筑), Yu Jie(于杰), Liu Qibin(刘其斌). J GIT(贵州工学院学报), 1996, (4): 71~76

## THE INFLUENCE OF THE FRACTURE MORPHOLOGICAL PARAMETERS ON BENDING BREAK ENERGY OF POLYSTYRENE

XU Tao, YU Jie, LUO Zhu, WANG Li

(*Materials Center, Guizhou University of Technology, Guiyang 550003*)

JIN Zhihao

(*The School of Materials, Xianjiaotong University, Xian 710049*)

**Abstract** The PS specimens were subjected to three-point bending under different loading rate. Through the analysis of experimental results, the forming process of the mirror zone and the rib zone is the principal process of energy consumption. With the increase of loading rate, the size of mirror zone decreases and tends towards constant progressively. At the same time, the rib width decreases while the roughness of rib zone increases. A minimum appearing at the loading rate 2.5m/min exists in the relationships between energy consumption and loading rate. When loading rate below 2.5m/min, the fracture surfaces were chiefly made up by the mirror zone and the last fracture zone. The change of break energy is mainly decided by the change of the size of mirror zone. When the loading rate beyond 2.5m/min, the fracture surfaces were composed of the mirror zone, the rib zone and the last fracture zone. The change of energy consumption is primarily decided by the roughness of rib zone.

**Key words** Loading rate, Characteristic parameter of fracture morphology, Break energy, PS