

# 短切玻纤增强尼龙 6 的缺口拉伸性能<sup>\*</sup>

熊玉竹<sup>1,2,3</sup> 田瑶珠<sup>2</sup> 涂铭旌<sup>1</sup>

(1. 四川大学材料科学与工程学院, 成都 610065; 2. 贵州大学材料科学与冶金工程学院, 贵阳 550003;

3. 贵州省材料结构与强度重点实验室, 贵阳 550003)

**摘要** 研究了短切玻纤增强尼龙 6(PA6/SGF) 的缺口拉伸性能。结果表明,在实验速度范围(0.1~500 mm/min)内,PA6/SGF 的拉伸断裂功主要消耗在裂纹萌生过程。一旦裂纹源尺寸达到临界值,裂纹瞬间扩展。拉伸位移随着拉伸速度的增加而降低,最大力值随着拉伸速度的增加先提高后降低。当拉伸速度达到 300 mm/min 后,最大力值和拉伸位移急剧下降导致拉伸断裂功大幅度下降。PA6/SGF 的缺口拉伸断面主要分为裂纹萌生区及裂纹扩展区,基体的塑性变形主要集中在裂纹萌生区,剧烈的塑性变形可使基体上出现明显的孔洞。在裂纹扩展区,裂纹的快速扩展导致基体断面平坦,且由于 SGF 的阻碍作用,基体具有断裂分层现象。

**关键词** 短切玻纤增强尼龙 6 缺口拉伸实验 裂纹萌生区 裂纹扩展区

短切玻纤增强尼龙 6(PA6/SGF) 由于易加工、成本低及良好的力学性能而受到关注,并在电器、电子特别是汽车工业中得到越来越广泛的应用。纤维增强聚合物的断裂机理由于对材料设计及实际应用有着重要的理论指导意义而被广泛研究<sup>[1-6]</sup>。研究结果表明,基体的塑性变形和断裂、基体与纤维的界面破坏对纤维增强聚合物的断裂韧性有着重要影响。V. B. Gupta 等<sup>[2]</sup>认为良好的纤维/基体界面粘接质量可提高 SGF 增强聚合物复合材料的断裂功。笔者前期的研究<sup>[78]</sup>证明 PA6/SGF 的界面破坏对复合材料的断裂功有重要影响。张凯舟等<sup>[8]</sup>认为玻纤增强 PA6 复合材料的缺口冲击强度随断面粗糙度的提高而线性增加,且由于玻纤含量的增加,裂纹扩展时受到的阻碍增加导致断裂分层。

材料的缺口断裂行为受实验温度、实验速度等条件的影响较大。由于拉伸速度在拉伸实验中易于控制,有研究者选用单边缺口拉伸来研究实验速度对材料缺口断裂行为的影响<sup>[9-10]</sup>。为深入认识 PA6/SGF 缺口断裂时基体的变形及影响断裂功的因素,笔者研究了拉伸速度对 PA6/SGF 缺口拉伸断裂过程的影响,仔细分析了 PA6/SGF 宏观力学行为与微观断裂机制之间的关系,以期为深入认识 PA6/SGF 的缺口断裂行为提供有益的理论依据。

## 1 实验部分

### 1.1 原材料

PA6: 33400, 广东新会美达尼龙切片股份有限公司;

SGF: E 型,长度约 10  $\mu\text{m}$ ,泰山玻璃纤维股份有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

同向双螺杆挤出机: TSE-40A 型,南京瑞亚高聚物装备有限公司;

注塑机: CJ80MZ-NC II 型,震德塑料机械厂有限公司;

微机控制电子万能试验机: WDW-10C 型,上海华龙测试仪器公司;

扫描电子显微镜(SEM): KYKY-2800B 型,北京中科科仪技术发展有限责任公司。

### 1.3 试样制备

先用双螺杆挤出机将 PA6 和 SGF 按 65/35 的质量比混合挤出造粒,烘干后注塑成哑铃状的拉伸试样,试样中间部分的宽、厚与冲击试样相同。在试样的中部同样开出深度为 2 mm、根部曲率半径为 0.25 mm 的缺口。

### 1.4 性能测试与表征

用微机控制电子万能试验机以不同拉伸速度进行缺口拉伸实验,拉伸间距为 50 mm。所有试样均在 23℃ 下放置于干燥皿中 48 h 后进行实验。通过对缺口拉伸时力-位移曲线的积分计算出拉伸断裂功。另外,在裂纹源前沿均匀取 6 个点并测量出它们距缺口根部的距离,取平均值后乘以试样宽度,计算出裂纹萌生区的面积。

用 SEM 观察试样的断面形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 拉伸速度对 PA6/SGF 拉伸断裂功的影响

拉伸断裂功分为缺口拉伸裂纹萌生功和缺口拉

<sup>\*</sup> 贵州省自然科学基金项目(20023079)

收稿日期: 2009-02-12

伸裂纹扩展功两部分。拉伸裂纹萌生功表示从拉伸开始到最大力值期间试样所吸收的能量;拉伸裂纹扩展功则表示从最大力值到完全断裂期间试样所吸收的能量。图1示出拉伸速度对PA6/SGF拉伸断裂功的影响。

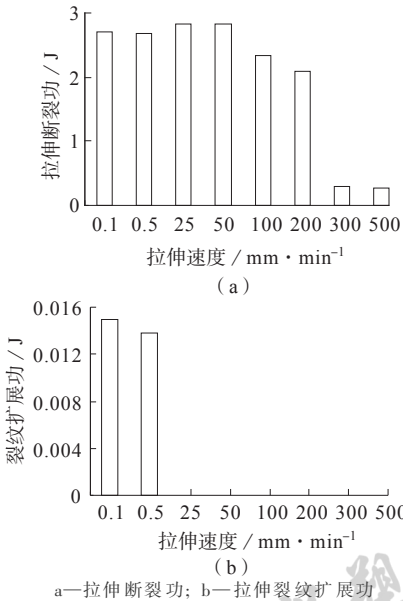


图1 拉伸速度对PA6/SGF拉伸断裂功的影响

由图1a可看出,拉伸速度较低时,随着拉伸速度的增加,拉伸断裂功略有增加,至50 mm/min时达到最大值。拉伸速度大于50 mm/min后,随着拉伸速度的增加,拉伸断裂功降低。当拉伸速度达到300 mm/min以上时,拉伸断裂功急剧下降,仅为拉伸速度50 mm/min时的1/9左右。

由图1b可看出,拉伸速度为0.1 mm/min和0.5 mm/min时,PA6/SGF的缺口拉伸断裂显示出很小的裂纹扩展功,约为0.015 J;当拉伸速度超过25 mm/min后,PA6/SGF的裂纹扩展功几乎可以忽略。这说明在拉伸速度范围(0.1~500 mm/min)内PA6/SGF的拉伸断裂功主要消耗在裂纹萌生过程,一旦裂纹源尺寸达到临界值,裂纹快速扩展。

## 2.2 拉伸速度对PA6/SGF缺口拉伸特征值的影响

在PA6/SGF的缺口拉伸实验中,缺口应力集中效应使形成裂纹源所需力值明显降低。实验结果显示,在拉伸速度为50 mm/min的条件下,PA6/SGF缺口拉伸的最大力值约为无缺口拉伸时的50%(2503 N/5 200 N)。由于断裂功是对缺口拉伸实验的力-位移曲线的积分,所以研究拉伸速度对最大力值和拉伸位移的影响十分重要。图2为拉伸速度对PA6/SGF缺口拉伸特征值的影响。

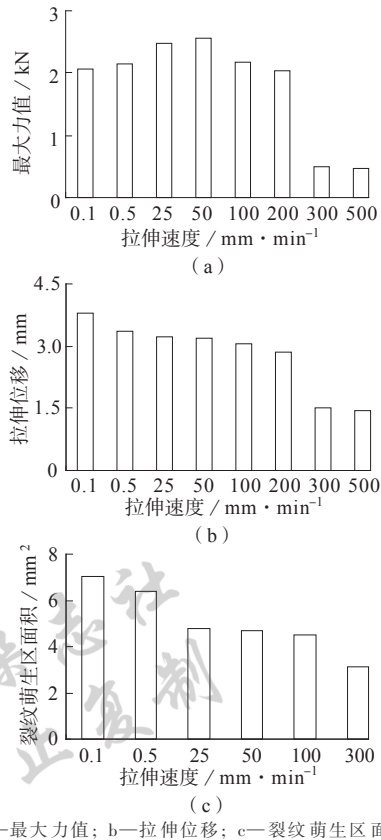


图2 拉伸速度对PA6/SGF缺口拉伸特征值的影响

由图2a可看出,拉伸速度低于50 mm/min时,随着拉伸速度的增加,缺口拉伸时的最大力值提高;拉伸速度高于50 mm/min之后,随着拉伸速度的增加,最大力值降低。当拉伸速度增加至300 mm/min后,最大力值急剧下降。由图2b可看出,随着拉伸速度的增加,拉伸位移始终呈下降趋势。在PA6/SGF的缺口拉伸实验过程中,基体的塑性变形主要集中在裂纹萌生区。拉伸速度对临界裂纹萌生区面积的影响十分明显,由图2c可看出,随着拉伸速度的增加,裂纹萌生区面积减小,所以导致基体的塑性变形面积减小。

拉伸速度小于50 mm/min时,较低拉伸速度下的最大力值虽然较低,但相应的具有塑性变形的裂纹萌生区面积较大;而较高拉伸速度下的最大力值虽然较高,但相应的具有塑性变形的裂纹萌生区面积较小,所以PA6/SGF在拉伸速度小于50 mm/min实验条件下的拉伸断裂功相近。当拉伸速度超过50 mm/min后,最大力值下降,拉伸位移也下降,所以拉伸断裂功呈现下降趋势。尤其当拉伸速度达到300 mm/min后,最大力值和拉伸位移的急剧下降导致拉伸断裂功大幅度下降。

### 2.3 PA6/SGF 缺口拉伸断面的形貌

图 3 为拉伸速度 25 mm/min 下 PA6/SGF 缺口拉伸断面的形貌。

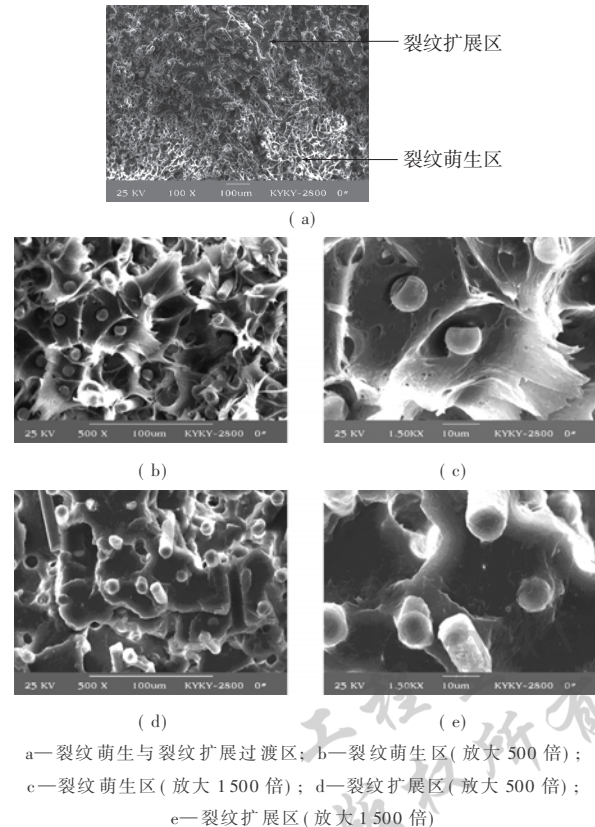


图 3 裂纹萌生区和裂纹扩展区的断面形貌

由图 3 可以看出, PA6/SGF 的缺口拉伸断面主要分为裂纹萌生区及裂纹扩展区(见图 3a)。在裂纹萌生区, 基体具有强烈的局部塑性变形, 表现为韧性断裂方式(见图 3b), 剧烈的塑性变形使基体上出现明显的孔洞缺陷(见图 3c)。在裂纹扩展区, 裂纹的快速扩展导致基体断面平坦, 且由于 SGF 的阻碍作用, 基体具有断裂分层现象, 基体表现为脆性断裂方式(见图 3d、图 3e)。本研究的 PA6/SGF 缺口拉伸实验中, 裂纹源一旦达到临界尺寸即快速扩展, 扩展区的基体均呈现平坦的脆性断裂形貌。

### 3 结论

(1) 在 0.1 ~ 500 mm/min 拉伸速度范围的缺口拉伸实验中, PA6/SGF 的拉伸断裂功主要消耗在裂纹萌生过程, 一旦裂纹源尺寸达到临界值, 裂纹即快

速扩展。缺口拉伸时, 缺口应力集中效应使形成裂纹源所需的最大力值与无缺口拉伸相比明显降低。

(2) 拉伸断裂功主要受基体塑性变形能力和拉伸力值的综合影响。随着拉伸速度增加, 最大力值先提高后降低, 而拉伸位移则始终呈下降趋势。当拉伸速度达到 300 mm/min 以后, 最大力值和拉伸位移的急剧下降导致拉伸断裂功大幅度下降。

(3) PA6/SGF 的缺口拉伸断面主要分为裂纹萌生区及裂纹扩展区。基体的塑性变形主要集中在裂纹萌生区。剧烈的塑性变形可使萌生区基体上出现明显的孔洞缺陷。在裂纹扩展区, 裂纹的快速扩展导致基体断面平坦, 且由于 SGF 的阻碍作用, 基体具有断裂分层现象。

### 参考文献

- [1] Hashemi S. Fracture mechanics of short glass fibre-reinforced nylon composite[J]. Journal of Material Science, 1993, 28: 3 983 - 3 990.
- [2] Gupta V B. Some studies on glass fiber-reinforced polypropylene, Part II: Mechanical properties and their dependence on fiber length, interfacial adhesion, and fiber dispersion[J]. Polymer Composites, 1989, 10: 16 - 27.
- [3] Spahr D E. Microstructure and fracture behaviour of short and long fibre-reinforced polypropylene composites[J]. Journal of Material Science, 1990, 25: 4 427 - 4 439.
- [4] Chang L, Zhang Z, Breidt C. Impact resistance of short fibre/particle reinforced epoxy[J]. Applied Composite Materials, 2004 (11): 1 - 15.
- [5] Fu Shaoyun. Fracture resistance of unfilled and calcite-particle-filled ABS composites reinforced by short glass fibers(SGF) under impact load[J]. Composite: Part A, 1998, 29A: 631 - 641.
- [6] Dwivedi S K, Espinosa H D. Modeling dynamic crack propagation in fiber reinforced composites including frictional effects[J]. Mechanics of Materials, 2003, 35: 481 - 509.
- [7] 熊玉竹, 王超先, 刘滢, 等. 短玻璃纤维增强尼龙 6 的无缺口冲击性能[J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31(3): 22 - 26.
- [8] 张凯舟, 于杰, 罗筑, 等. 玻纤增强尼龙 6 的断裂研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2007, 23(2): 161 - 165.
- [9] Van Der Wal A, Nijhof R. Polypropylene-rubber blends: 2. The effect of the rubber content on the deformation and impact behaviour[J]. Polymer, 1999, 40: 6 031 - 6 044.
- [10] Van Der Wal A, Verheul A J J. Polypropylene-rubber blends: 4. The effect of the rubber particle size on the fracture behaviour at low and high test speed[J]. Polymer, 1999, 40: 6 057 - 6 065.

## NOTCHED TENSILE PROPERTY OF SHORT GLASS FIBER REINFORCED PA6

Xiong Yuzhu<sup>1,2,3</sup>, Tian Yaozhu<sup>2</sup>, Tu Mingjing<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Materials Science and Metallurgy Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China;

3. Key Laboratory for Material Strength and Structure of Guizhou Province, Guiyang 550003, China)

**ABSTRACT** The notched tensile property of short glass fiber reinforced PA6( PA6/SGF) was studied. The results showed that the fracture work was mainly consumed in crack initiation process in tensile velocity range 0.1 – 500 mm/min. Crack quickly propagated as soon as the crack origin achieved critical value. The tensile displacement decreased with tensile velocity increasing. The maximum force firstly increased, and then decreased with tensile velocity increasing. After tensile velocity achieving 300mm/min, the rapid decreasing of maximum force and tensile displacement resulted in the fracture work violently decreasing. The fracture surface was divided into crack initiation region and crack propagation region. The violent plastic deformation of matrix mainly occurred in crack initiation region, which resulted in the holes in matrix. The crack propagation surface was smooth and processed fracture layers because of the obstruction of glass fibers.

**KEYWORDS** short glass fiber reinforced PA6, notched tensile test, crack initiation region, crack propagation region

欢迎订阅 2009 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘  
邮发代号 24 – 42, 24 – 138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志社订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘,请注明  
订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物,月刊,大 16 开本,每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊,是中国工程塑料工业协会会刊,荣获首届、第二届、第三届国家期刊奖等 23 项国家、省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘( CA) 千种表。2009 年定价 12 元/期,全年 144 元。1986 年以来的期刊价目见表 1。欢迎读者来函(附名片)免费索取样刊。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物,双月刊,大 16 开本,单月 20 日出版。本刊荣获 5 项省部级优秀期刊奖,被美国化学文摘( CA) 收录。2009 年定价 12 元/期,全年 72 元。创刊号以来的期刊价目见表 2。欢迎读者来函(附名片)免费索取样刊。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 我社已将《工程塑料应用》自创刊号( 1973 年) 至 2008 年底共 36 卷 230 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售;同时也将《化学分析计量》自创刊号( 1992 年) 至 2008 年底共 17 卷 65 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售。分别利用这两种合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文,又可根据读者自定义的关键词进行全文检索,非常方便、实用。

《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 500 元;《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 150 元。

邮局汇款:  
收款单位: 山东省济南市 108 信箱杂志社  
邮编: 250031 传真: ( 0531) 85947355 85878057  
电话: ( 0531) 85878057 85878223 85878278  
银行汇款:  
户 名: 中国兵器工业集团第五三研究所  
开户银行: 济南市工商银行经十一路支行  
帐 号: 1602001229014425546

表 1 《工程塑料应用》单册期刊、合订本价格表

| 年 份        | 期 数 | 每册单价 / 元 | 全年定价 / 元 | 合订本 / 元   |
|------------|-----|----------|----------|-----------|
| 1986 ~1989 | 16  | 0. 825   | 13. 2    | 19        |
| 1990 ~1992 | 12  | 1. 4     | 16. 8    | 23        |
| 1993、1994  | 10  | 2. 4     | 24       | 30        |
| 1995       | 6   | 2. 8     | 16. 8    | 23        |
| 1996       | 6   | 3        | 18       | 24        |
| 1997       | 6   | 3. 5     | 21       | 27        |
| 1998       | 12  | 3. 5     | 42       | 48        |
| 1999       | 12  | 4        | 48       | 54        |
| 2000       | 12  | 5        | 60       | 66        |
| 2001       | 12  | 5. 5     | 66       | 78( 两本)   |
| 2002       | 12  | 6        | 72       | 84( 两本)   |
| 2003       | 12  | 6. 5     | 78       | 90( 两本)   |
| 2004       | 12  | 7        | 84       | 96( 两本)   |
| 2005       | 12  | 7. 5     | 90       | 102( 两本)  |
| 2006       | 13  | 8        | 104      | 116( 两本)  |
| 2007       | 12  | 9        | 108      | 120( 两本)  |
| 2008       | 12  | 10       | 120      | 132( 两本)  |
| 2009       | 12  | 12       | 144      | 144( 单册)  |
| 合 计        | 201 |          | 900( 优惠) | 1000( 优惠) |

表 2 《化学分析计量》单册期刊、合订本价格表

| 年 份       | 期 数 | 每册单价 / 元 | 全年定价 / 元 | 合订本 / 元  |
|-----------|-----|----------|----------|----------|
| 创刊号 ~1998 | 9   | 3        | 27       | 33       |
| 1999      | 4   | 3. 5     | 14       | 60       |
| 2000      | 4   | 4        | 16       |          |
| 2001      | 6   | 4        | 24       |          |
| 2002      | 6   | 5        | 30       | 72       |
| 2003      | 6   | 6        | 36       |          |
| 2004      | 6   | 7        | 42       | 93       |
| 2005      | 6   | 7. 5     | 45       |          |
| 2006      | 6   | 8        | 48       | 108      |
| 2007      | 6   | 9        | 54       |          |
| 2008      | 6   | 10       | 60       | 66       |
| 2009      | 6   | 12       | 72       | 72( 单册)  |
| 合 计       | 71  |          | 400( 优惠) | 450( 优惠) |