

有机玻璃断口分析*

许风和 严子建

“断面分析”或称“断口分析”在金属材料中已成为性能研究、故障分析的一种重要手段,不少国家都有专著和图集出版。近年来高分子结构材料工作者也开始进行这方面的研究,亦有一些报导。本文为有机玻璃断口分析的一部分,对国产有机玻璃积累了一些典型静载断口照片,并就其特征与形成原因作了初步探讨。

一、前言

有机玻璃是用于制造飞机窗玻璃等的重要材料,且因其高度透明,容易观察,在研究高聚物材料的断裂特性和破坏机理中选用较多,其断口分析亦较其它高聚物材料研究得早。一九五四年F.Zandman曾对有机玻璃的断口特征、影响因素、破坏机理等方面作过研究^[1],他用镜面区、直线条纹、双曲线、肋状条纹来描述断口特征(图1)。镜面区是以裂纹源为中心(CENTER),裂纹缓慢发展时形成的光滑区域,一般处在材料边缘位置,在十分缓慢加载时可能在材料的内部。直线条纹出现在各种位置,按一定方式分布,如处在镜面区附近,呈辐射状分布。双曲线处在镜面区以外的雾状区以及肋状条纹之间,它是代表次级断裂,由次级裂纹的锋与主裂纹的锋面相互作用形成,围绕在裂纹源呈辐射状排列,头部指向裂纹源。有时它很小,呈辐射状或颗粒状,须经高倍放大后才明显。肋状条纹为同心圆弧,垂直于裂纹发展方向,随着加载速度等影响因素的不同,其数量、粗细、密集程度有多有少;十分缓慢地加载时(几个月),肋状条纹可能完全消失。

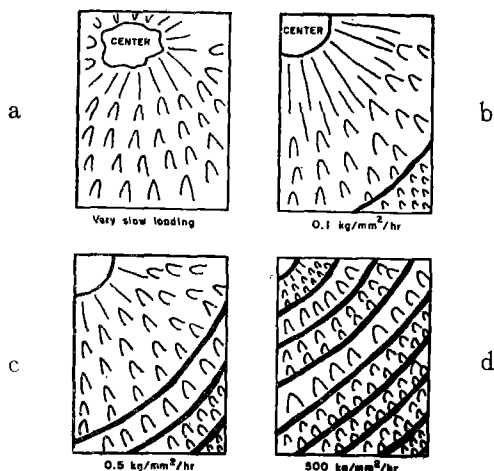


图1 不同拉伸速度下的断口特征示意图

a—十分缓慢加载; b—0.1公斤/毫米²/小时;
c—0.5公斤/毫米²/小时; d—500公斤/毫米²/小时。

S. B. Newman和Irvin Wolock曾研究了五种不同分子量(9万、12万、20万、49万、316万)的有机玻璃拉伸断口特征的变化^[2]。他们发现不同分子量的断口,各特征区域面积大小不一,显著的区别之一是肋状条纹的数量、粗细和密度。分子量9万的,肋状条纹细而密,分布在镜面区附近,但其雾状区不甚明显。随着分子量增加,肋状条纹的密度减小,条纹变宽,雾状区、镜面区和裂纹源亦显得更加清晰。分子量太高(316万),全部视区均为雾状区,肋状条纹消失。后来,他们两人为《固体聚合物的断裂过程》一书编写“断口形貌学”部份时汇集了很多有机玻璃断口照片,并综述了加载速度、分子量、温度、分子取向、加载形式、疲劳断裂等诸因素对有机玻璃断口特征的影响^[3]。

* 本文曾在1980年全国高分子学术年会上宣读。

R. P. Kusy等人从拉伸、弯曲、夹持、劈开、冲击等不同受载形式断口的对比中探讨了形成肋状条纹的原因，认为只有在裂纹前缘先存在拉伸应力场的情况下才产生肋状裂纹，肋状条纹系处在微裂纹的交叉位置上^[4]。

二、 试验结果

试验目的在于确定国产有机玻璃在不同的静加载形式、加载速度、温度和试样缺陷下对断裂特征的影响。试验采用了增塑和不增塑的国产有机玻璃，平均分子量为30万左右。拉伸、弯曲试验在ZDM万能试验机上进行，除注明的加载速度外，一般均采用10毫米/分的下夹头移动速度加载。断口用低倍照相机拍摄。

1. 各种静加载形式下的断口特征

拉伸试验所得典型断口见图2，其裂纹源所在的镜面区在左下部，周围是雾状的双曲线区，其外可见数条半圆形的肋状条纹，图中大部分是凸凹不平的粗糙区。这是分子量较高的有机玻璃的典型拉伸断口。粗糙的断口对应着较大的能量损耗。



图 2 典型拉伸断口
(10×10毫米)

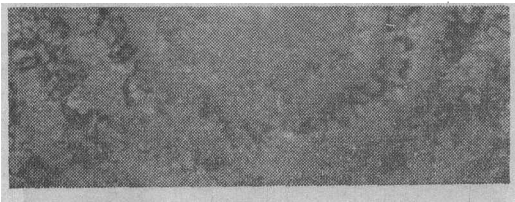


图 3 肋状条纹的特征
(15×4毫米)

典型的肋状条纹见图3，裂纹源所在的镜面区在上中部，周围是雾状区，其外清晰可见数条半圆形的肋状条纹，肋状条纹之间亦为凸凹不平的粗糙区。

典型弯曲断口如图4所示，其下部受拉应力，呈现拉伸断口的特征，即有光滑区、雾状双曲线区和肋状条纹。上部受压应力，呈现高低不等的光滑条纹。拉伸与压缩区之间有撕裂的雨状条纹。图5为侧面开孔的弯曲断口，开孔使弯曲强度下降，压缩区域光滑条纹没有图4明显。图中裂纹源在左下侧开孔处，由于试样较长，可以清楚地看出肋状条纹呈圆弧状沿下侧拉伸面扩展，而不贯穿整个断面。



图 4 典型的弯曲断口(10×20毫米)

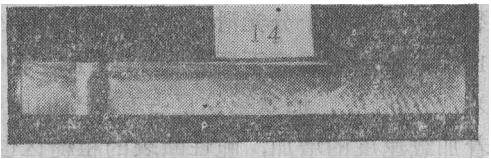


图 5 侧面开孔的弯曲断口(70×10毫米)

采用断裂力学中张开型试样，在两侧中间用锯条锯开一道槽并控制裂纹发展方向，试样撕裂后断口如图6。裂纹发展初期有波纹生成，当裂口张开一定角度后呈现明显的雨状条纹。只要两侧面槽开得适当，雨状条纹能延续到试样的末端。

矩形试样的一端用锯条锯开1毫米深的槽，塞进一个楔子，用锤子敲击楔子使试样劈开，其断口如图7所示。裂纹发展呈波浪形，波浪线形状没有肋状条纹规则，这与敲击力的大小

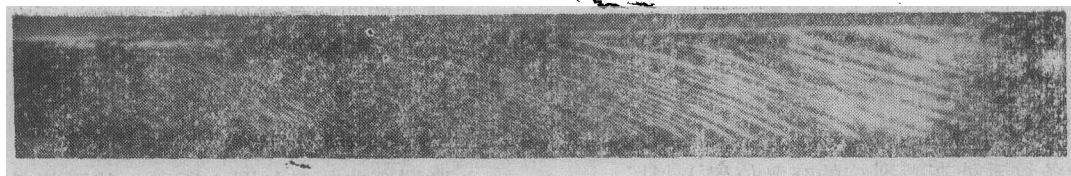


图 6 张开型试样的撕裂断口(80×10毫米)

和方向有关。一般说来随着离初始裂纹距离的增加,波浪线间的距离亦增大。劈开断口的末端有一小部分粗糙断面,它是有机玻璃最后被分开受压缩时形成的。

冲击试验在摆锤式简支梁冲击试验机上进行,试样承受弯曲冲击力,摆锤冲击速度为3.5米/秒。试样断口较为复杂,基本上有两种类型:一种与弯曲断口相似(图8),可清楚地分辨拉伸区的肋状条纹和压缩区的光滑条纹;另一种断口如图9所示,从开裂点起(图中下部)呈一贝壳状斜面,其上分布辐射状条纹。这类断口的试样冲击强度一般较前者为高。

扭转断裂在扭转试验机上进行,断口如图10所示。它不是一个平整的断口,呈不规则的锥形,顶角接近45°,与上述其它加载形式的断口很容易区别。

2. 加载速度的影响

试样在蠕变或相当低的速度(几个月)下断裂,断口可能十分光滑,没有肋状条纹产生。图11为两种加载速度下所得断口照片。在0.1毫米/分速度下,肋状条纹区占有相当的面积,随着加载速度的增加,脆性断裂的粗糙区也更大,在200毫米/分的速度下粗糙区面积约占全部断口的3/4。

3. 温度的影响

材料在使用中总是经受温度、湿度等环境条件,这些因素影响着材料的使用性能,同时也影响材料的断口特征。图12为不同温度下有机玻璃的拉伸断口。从图中看出,随着温度的升高,分子的柔性增加,形变速度加快,断口中脆性断裂的粗糙区域减少,肋状条纹和雾状区则相应显得明显。80℃时肋状条纹离裂纹源距离较远,在接近玻璃化温度下拉伸断口肋状

条纹将完全消失。有机玻璃中增塑剂含量增加

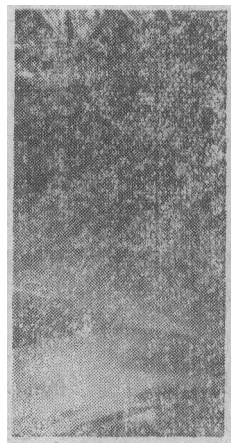


图 7 劈开试样的断口(10×20毫米)

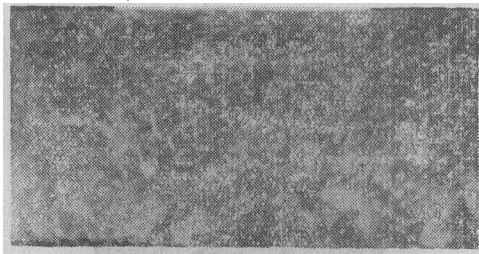


图 8 与弯曲断口相似的冲击断口(10×20毫米)

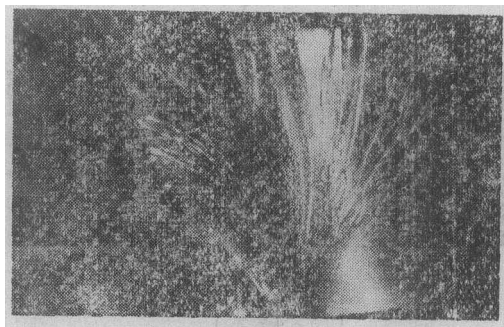


图 9 贝壳状的冲击断口(10×30毫米)

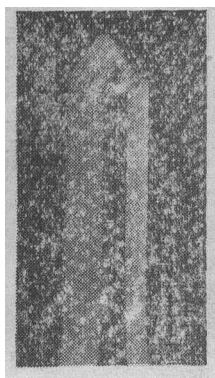


图 10 扭转断裂的断口(10×10毫米)

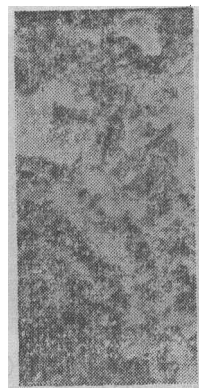
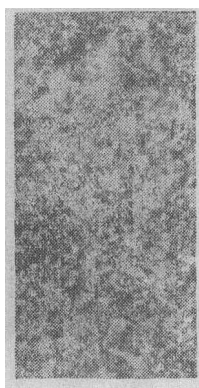


图 11 两种加载速度下的拉伸断口(10×20毫米)
左: 0.1毫米/分; 右: 200毫米/分。

时, 断口亦有类似的变化。本文因篇幅关系, 这类断口变化的资料从略。

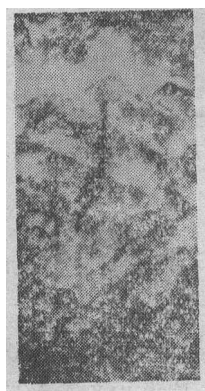
4. 试样中的缺陷对断口特征的影响

材料的破坏一般开始于材料中最薄弱的部份。高聚物在制造中可能夹有杂质、低分子物, 成型加工时往往会留下加工缺陷和局部的应力集中, 使用过程中也会受到划伤, 产生银纹、裂纹等。这些缺陷的存在可能导致零件或构件破坏裂纹的始发, 因此研究材料存在缺陷情况下的断裂特征, 更有实际价值。

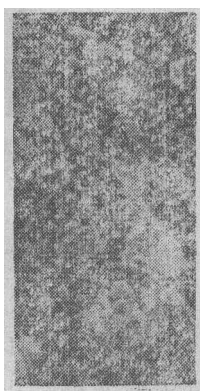
图13为带有1毫米深的裂纹的增塑有机玻璃拉伸断口。此试样取自已使用十年的飞机座

舱盖, 裂纹是在使用中产生的。试样的拉伸强度比同块玻璃上取下的不带裂纹试样的强度降低50%。断口中颗粒状的雾状区占绝大部份, 仅在右上部隐约出现三条肋状条纹, 同时没有观察到普通脆性断裂的粗糙区。图下部黑色圆形部分为原使用中产生的裂纹。

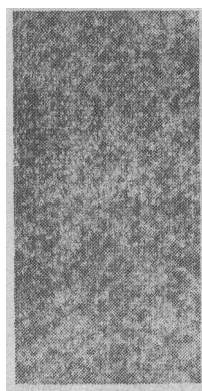
利用人为开槽或与MIL—P—25690相似的方法引发裂纹, 可用以比较缺陷对断口特征的影响。图14为没有开槽、槽深1毫米和槽深3毫米试样的断口。开槽结果使断口中雾状区增大, 粗糙区缩小, 肋状条纹远离裂纹源。



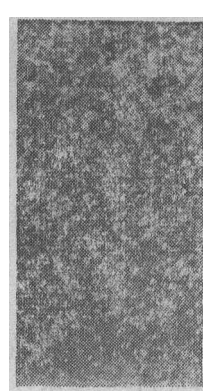
-30°C



室 温



60°C



80°C

图 12 不同温度下拉伸断口的比较(10×20毫米)

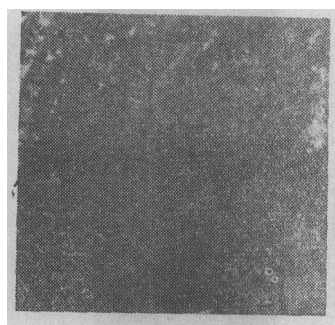
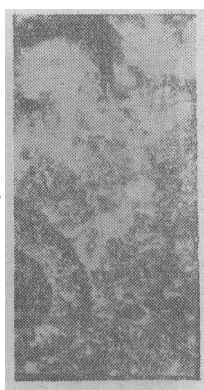
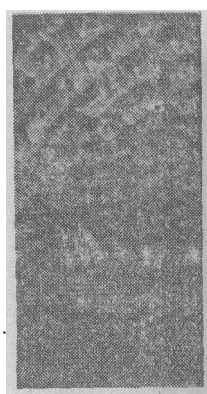


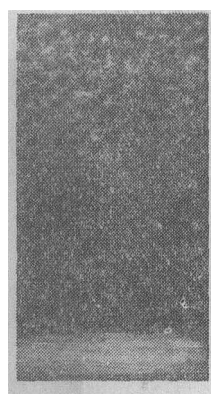
图 13 有裂纹的拉伸断口(裂纹深1毫米)(10×10毫米)



没开槽



槽深1毫米



槽深3毫米

图 14 槽深对拉伸断口的影响

人为引发裂纹，因为裂纹锋面锐度对强度极限影响大，断口特征的变化比开槽(锋面钝)更为明显。图15为开槽1.5毫米后引发裂纹的拉伸断口，断口中大部分为辐射排列颗粒状的雾状区；在引发裂纹浅(2.5毫米)的断口上部，有少许肋状条纹；在引发裂纹深(4毫米)的断口上，肋状条纹消失。

在弯曲试样的拉伸面上开槽对断口特征影

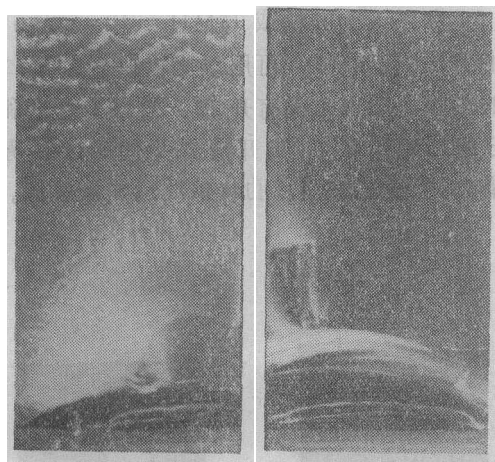


图 15 引发裂纹对拉伸断口的影响(开槽1.5毫米后,引发裂纹)

左: 裂纹深2.5毫米; 右: 裂纹深4毫米。

三、 讨 论

试验中观察到拉伸断口及弯曲断口中的拉应力区内在一定条件下呈现肋状条纹，而撕裂及弯曲断口的压应力区内则无肋状条纹生成，证实了肋状条纹只是在裂纹前缘先存在拉应力

响更大。图16为试样截面20×10毫米，开有1毫米深的槽的弯曲断口(三点弯曲)。虽然断口仍保持弯曲断口的基本特征，即同时存在拉应力和压应力断口形貌，但在拉应力区中，雾状区增大，呈颗粒状，肋状条纹变小，远离裂纹源。同时压应力区中高低不平的光滑条纹也显得不明显，并且呈细纹状。

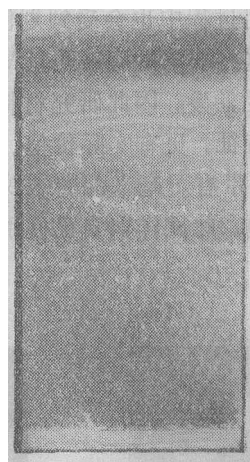


图 16 开槽对弯曲断口的影响(槽深1毫米)(20×10毫米)

场的情况下才能生成，不造成这种情况的加载条件不生成肋状条纹。

肋状条纹的存在说明断裂过程中的裂纹扩展速度是不均匀的。R.P.Kusy 等人^[4]曾提出一种假说，认为肋状条纹处在微裂纹的交叉位置，如图17所示，从侧面看肋状条纹位于一

系列被称作“断裂雨”的微裂纹的交叉点上。肋状条纹与雾区的交替出现,说明断裂时裂纹“跳跃”式的发展过程。这个假设后来被用光弹法测得破坏时应力的波动所证实。

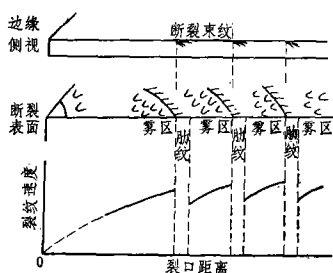


图 17 肋状条纹产生机理的示意图

试验中肋状条纹明显与否,即其数量、宽度、密集程度等随材料的成份、分子量、加载速度、温度、缺陷和局部应力集中等诸因素的影响而有规则地变化。这种性质和变化也是高聚物材料力学行为中粘弹性特征的反映。由于断口特征受众多因素的影响,以及在实际使用中真实受力状态的复杂,这就造成聚合物材料断口分析研究中的困难,但是只要不断地积累资料,正如金属断口分析一样,会逐渐成为一种分析手段。

在开孔、开槽和引发裂纹的断口上,光滑区域范围较大,并且常常可以看到红、绿相间的彩色条带,犹如水面上的油膜。分析其起因,估计高聚物在较慢速断裂区域内,链段形变跟不上材料的应力值的增加,分子被拉伸取向随后断裂,在表面形成一薄层的取向层,此薄层的光学性能不同于基体材料而呈现薄膜干涉色。这种虹彩色在断裂初期最鲜艳,随着放置时间增长而逐渐消退,估计为取向分子的逐渐消向使两者光学性能趋于一致。这也是高聚物粘弹性所造成的。

四、结束语

1. 断口是材料断裂过程的历史记载,它

可提供分析材料破坏的起始点,受力形式以及裂纹发展方向等情况。积累起各种典型断口照片及其影响因素,有助于分析复杂条件下发生断裂的情况。

2. 断口中的镜面区是裂纹缓慢发展阶段生成的,在使用中断裂的零件或构件,断口中的镜面区可能由几个月、几年时间发展形成,其范围较大。裂纹源在镜面区内,确定裂纹源的位置及状况对分析断裂的起因及其初期情况有很大意义。

3. 肋状条纹只有在裂纹前缘先存在拉伸应力场时才产生,特征明显,观察方便,最适合于用它判别受载形式和裂纹发展方向,并结合其它断口特征及可能存在的影响因素,推断裂纹发展情况。

4. 高聚物的断口特征易受各种因素的影响,与高聚物力学行为的粘弹特性有关。

(本文得到沈嗣唐高级工程师的大力帮助,在此致谢。)

参 考 资 料

- [1] Zandman, F., Etudes de la Deformation et de la Rupture des Mat. Plast., Paris, 1954.
- [2] Newman, S.B. and Wolock, I., J. of Appl. Phys., V.29, No1, 1958, 49-52.
- [3] Rosen, B., Fracture Processes in Polymeric Solids, New York, 1964, 235-290.
- [4] Kusy, R.P., See, H.B. and Turner, D.T., J. of Mat. Sci., V.11, No1, 1976, 118-124.



补 正

本刊1981年第5期“氟橡胶与金属通用胶粘剂 FXY-3”一文作者为谭光志、张洪雁。

更 正

本刊1981年第5期第48页右栏倒数第11行中“美国APK”应为“英国APK”。