

声发射在日本木材工业中的应用

王金林

(中国林科院木材工业研究所)

声发射(AE, Acoustic Emission的缩写)在材料科学方面的应用引起了广泛的重视,同样在木材工业的应用也已成为热门课题,例如:利用声发射评价材料优劣、探讨木质材料和胶层的破坏机理,识别木材破坏、胶合不良及缺陷材的无损检测;预测木材人工干燥中的开裂,从而控制干燥工艺;检测木材切削中因刀刃磨损引起的切削状态的变化,研究木材的切削特性等。然而,声发射在木材工业方面的应用还仅仅是开始,有关声发射在木质材料中发生的机理和特性、无损检测和检测装置以及应用领域等问题都有待进一步研究。

一、声发射和声发射的研究背景

伴随着固体材料的变形和破坏,部分贮藏在固体内的变形能急速地释放出来而产生弹性波,称为声发射。声发射(AE)是由于材料分子在塑性范围内的位移、在应力集中处产生的开裂以及由于负荷引起的开裂发展等而产生的。观测AE的发生数、频度、振幅、波形和频率等,不仅能跟踪材料的变形和破坏过程,而且可以检测材料的缺陷、判断材料的强度、诊断结构的健全性等。利用声发射的检测方法称为AE法或AE试验。AE法具有加载时根据释放出的能量而检测材料开裂的发生和发展等的动态特征,相对于依靠对投入能量(声响、电磁波等)的吸收和反射而检测缺陷的静态、主动的无损检测方法而言,AE法是动静态、主被动结合的检测方法。AE的频率范围是从声波到超声波,为了去除杂音和振动干扰,通常利用超声波范围的AE。

在材料研究中最初引入AE的是五十年代的J. Kaiser。他观测了包括木材在内的各种材料的拉伸试验时发生的AE,发现在弹性极限内即使在低应力下也发生AE,AE的发生频度在塑性范围内急剧增加,在断裂点达到最大值,第一次加载发生AE后,去除载荷再次加载直到超过上次载荷引起的最大应力为止不再发生AE,这种不可逆现象(称为凯

泽效应)被用来判断材料经历过的最大应力。在六十年代,人们确立了超声波范围的AE测定方法。七十年代以来,AE逐渐被用于以金属为主,兼及陶瓷、岩石、混凝土及复合材料等材料研究,探测疲劳开裂、应力腐蚀开裂及焊接开裂的发生和发展,监视和诊断压力容器等在运转中的安全性。最近在切削工具的探伤、磨损的监视及胶合试验等方面也开展了AE应用的试验。

二、声发射的检测

声发射AE的计测是由AE波的检测和信号的变换、微弱信号的放大和去杂音的滤波、以及为了求得AE发生数和信号振幅的信号处理等组成的。

AE压电换能器(传感器)一般是压电晶体元件,以利用压电换能器(锆钛酸铅)共振特性(100KHZ~2MHZ)的较多,使用时将它紧贴在试件的表面,为了分析AE波的频率则使用具有平坦的频率特性的传感器。为了严密地解析AE的原波形,必须事先知道传感器与试验体的频率应答关系。

AE信号(传感器输出)波形分为类似于随机噪音的连续型AE和呈现衰减振动脉冲波形的突发型AE两种。前者能量低,一般伴随着塑性变形等而发生,后者能量高,伴随着微裂或开裂而发生。但是连续型AE也可以视为若干个振幅小的突发型AE重迭的结果,不能简单地将两者加以区分。

AE发生状况的表示方法之一是由试验开始后的累积发生数(总计数)或按其时间的微分(计数率)来表示。计数有两种方式:一种是相对于增幅放大后的AE信号设定一个阈值,统计超过这个阈值的AE信号次数,连续型AE的计测大都采用这种方法。而突发型是每一事件的计数值根据振幅加权,所以被称为加权计数法。另一种是把AE信号包络线滤波后,统计超过阈值的次数,用于突发型AE的计测,称为事件计数法。另外也有利用AE信号有效值

表示AE发生状况的,这种方法具有不受阈值影响的优点。

若设置几个AE传感器,测定AE波到达的时间差,就可以标定AE发生源的位置。相反,在一定的时间间隔计测到达各传感器的AE,去除夹具摩擦等杂音,也可以检测特定范围的AE。

三、声发射在木材工业中的应用

1964年A·W·Porter首先将AE用于木材科学研究,他用声波频率范围的AE研究了各种类型载荷下细微开裂的发展。但是直到七十年代AE法在木材工业方面的应用只不过二、三个实例。八十年代AE的应用得到了迅速的发展,其中一个重要方向是材料性质及材料缺陷检测的研究。利用材料试验中发生的AE,分析各种类型载荷下材料的变形和破坏过程,并根据因强度差异和缺陷的有无而发生的不同AE,进行材料的评价;利用AE与材料的刚度、破坏强度之间的关系预测材料的极限强度;考察AE的发生过程,解析AE的波形,研究木材及胶层的破坏机理。此外,对胶层的冲击强度与AE的关系、刨花板强度试验时发生的AE及利用指接试验的AE评价其强度等方面也进行了探讨。由于缺陷材从低载荷开始就发生大量的AE,因而可以利用AE进行木材压坏、含节材和初期腐朽材等的鉴别和选择。

关于上述研究方向,不少学者已经做了一些试验工作,这里简介部分研究内容。

1. 利用AE评价有节材的强度

声发射(AE)对于因节子、压坏等木材缺陷引起的应力集中反应敏感,所以能有效地检测木材的这一类缺陷,而且也可以用来评价木材强度。东京农工大学农学部佐藤敬一等人含节柳杉的静曲强度测试中研究了AE特性,探讨了强度评价方法。

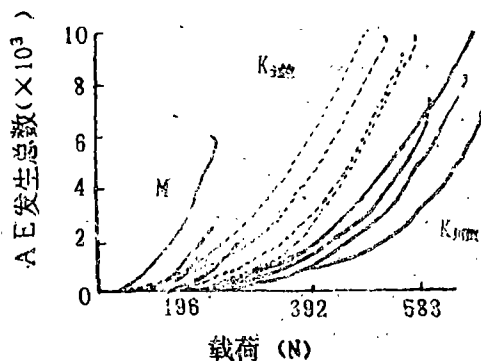


图1 剪切载荷与AE发生总数的关系

试件尺寸为 $20 \times 20 \times 320\text{mm}$,取材时使节子位于弦切面的跨距中央,静曲强度试验是在跨距 280mm 的径切面中央集中加载,同时计测AE。试验结果认为,单纯从弹性模量和静曲破坏强度之间存在相关关系评价材料并不充分。而把AE发生总数和载荷平方的回归系数作为AE变量时,它与破坏强度呈现出负相关性。弹性模量表示材料内的平均材质,AE表示材料局部的应力集中,两者结合起来评价材料的强度就具有高的可靠性。

2. 胶合板强度检测时发生的AE

目前AE在木材研究方面已经得到广泛应用,但是在胶合板中仅用于检测在制造中发生的胶合不良。为了扩大AE在胶合板工业中的应用,京都大学农学部大塚宽之等人对不同制造条件的合板进行剪切、静曲试验,观察AE发生过程,特别是对胶着力与AE发生的关系为中心进行了研究。

试验使用脲醛树脂胶,采用不同涂胶量和涂胶单板陈化时间制成的五合板。按日本农林标准JAS制作剪切和静曲强度试件,用热熔树脂胶将共振频率为 150KHz 的AE传感器固定在试件表面。AE是用全部事件计数法(空载时间1毫秒)进行计数。

测试结果表明:对用标准条件制作的胶合板(K:涂胶量 $280\text{g}/\text{m}^2$,无陈放时间)和低胶着力的胶合板(M:涂胶量 $133\text{g}/\text{m}^2$,陈放5小时)进行强度检测时,AE发生的状况如图1和图2所示。在剪切试验中,用K条件制作的合板,若是中板的背面裂隙方向和载荷方向一致,载荷从 98N 左右开始发生AE,达到较高载荷以后急剧增加。然而背面裂隙方向和载荷方向相反时,在数十牛顿的低载荷下AE即开始发生并急剧增加。另一方面,用M条件制作的胶合板其最大极限载荷不到K的一半,剪切试验发现背面裂隙的方向和载荷方向的顺逆无关,而

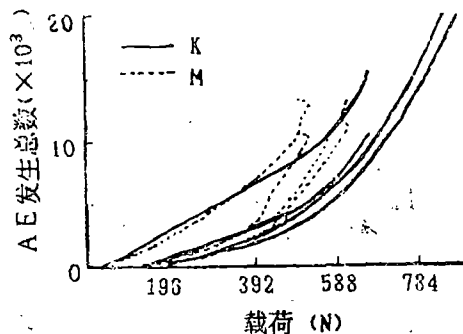


图2 静曲载荷与AE发生总数的关系

AE的发生与中板背面裂隙方向相反加载的K种合板情况一样,低载荷下开始并急剧增加。在静曲试验方面,用M条件制作的合板试件伴随着达到最大载荷为止发生的胶层剪切破坏;AE的发生有一时的急剧增加现象。但是看不出K和M之间开始发生AE的载荷及低载荷下AE发生数的明显差异。

从以上试验可以预料:中板背面裂隙方向和载荷方向一致的剪切试验,存在着根据AE发生状况评价合板胶着力的可能性。

3.应用AE对木质材料进行无损检测

利用木质材料的AE进行无损检测研究方面,东京农工大学佐藤敬一等人采用辊筒型AE传感器测定了合板试验机的有关数据,另外在试制的木材自动进料弯曲试验机中使用辊筒型传感器考察了靠AE检测节子的可能性,并就AE技术用于木质材料的联机无损检测装置的可行性进行了研讨。

试验用 $910 \times 1820 \times 5.5$ mm的三合板,在合板制作时有两处插入聚四氟乙烯薄膜,以 12cm/s 的速度将合板送入试验机,当胶合不良部位通过传感器时测出了许多AE波,如图3所示。另外,将 $30 \times 80 \times 2800$ mm的方材中央 1400 mm处的左右部分

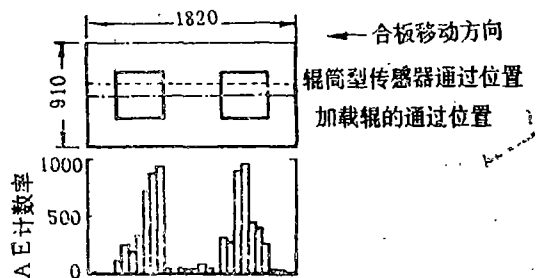


图3 合板中插入聚四氟乙烯的位置和AE计数率(0.5秒内AE发生数)

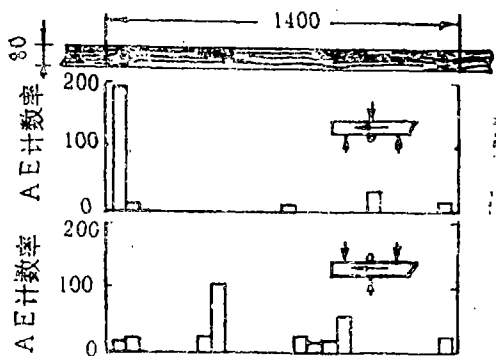


图4 木材缺陷位置和AE计数率(0.2秒内的AE数)

以 28cm/s 的进料速度通过间距为 1200mm 的三点式弯曲驱动加压辊,利用设置在跨距中央拉伸一侧的传感器计测AE,结果如图4所示。该试验发现节子和因节子造成的纤维切断部位发生了AE,从而说明利用AE进行无损检测的可能性。今后必须对AE特性和强度之间的关系、材料的评价方法进一步开展研究。

AE的另一个应用研究方向是把AE作为宏观破坏的前兆现象,木材人工干燥中的开裂预测就是一个范例。虽然目前还没有达到准确预报一般板材的干燥裂开,但是就光叶榉木圆盘的干燥而言,控制干燥条件的原则是保持AE发生在一定水平以下。目前正在开发一种既防止开裂又能提高干燥效率的自动控制装置。

有关在木材干燥技术研究方面的应用,举二例加以介绍。

1.木材干燥过程中AE的发生

在已往的研究中发现,AE仅在生材干燥过程中显著发生,至纤维饱和点以下即使反复吸湿和干燥亦几乎不再发生AE。若将试件在水中浸渍后再行干燥,又重新发生多量的AE。在圆盘干燥的试验中发现,即使在试件径向开个切口,AE发生状况也几乎没有变化。基于上述结果,京都大学农学部奥村正悟等人就木材干燥和吸水的循环试验时发生的AE、抑制收缩下进行干燥时的AE和AE发生源的位置等开展了试验研究。

试验1选用柞木、日本榉和柳杉的生材试件① $50(\text{R}) \times 50(\text{T}) \times 5(\text{L})$ 和② $5(\text{R}) \times 50(\text{T}) \times 50(\text{L})$ mm两种,进行10个周期的干燥(60°C , 40% , $5 \sim 18$ 小时)和吸水(真空下水中浸渍 $12 \sim 30$ 小时)循环试验,在1~5及第10次干燥时将传感器设置在试件中央测定AE。试验2是对在试件②两端各加工一个切口,或者用铝合金片抑制弦向收缩的两组试件进行干燥(60°C , 40%),用两个传感器检测AE,标定AE发生源一维位置并观测AE信号的波形。

试验结果发现:在试验1中,第1和第2个循环以后的干燥AE发生率的时效变化有若干的差异,试件②的AE发生总数随着干燥次数增多有减少的趋势,但从总体来看AE发生的基本图形不因干燥次数而变化。试验2中,在木材干缩受抑制的情况下,AE几乎是发生在停止干燥的终期,这被认为与宏观开裂有关的AE是从试件中部发生的。然而在干燥中测出的大部分AE同有无抑制收缩无关,推测它是从试件

整体上发生的。

2.木材干燥过程中发生的AE波形解析 对木材干燥条件的控制,东京农工大学定成政宪等人检测了四个树种木材干燥中发生的AE波形,根据各种波形的均方根值、有效值等特性数值及测得的频率波谱,探明AE和开裂等缺陷之间的关系。

试验选用白栎、光叶榉、柳杉和扁柏的弦切板(宽100×长280×厚20mm)和白栎横截板(宽80×长80×厚20mm)为试材,干燥条件是:干球温度80℃、相对湿度22%。AE波形的频谱是利用波记忆的数字输入机能,把干燥中磁盘上储存的波形数据在时间轴上放大50倍,利用快速傅立叶变换(FFT)波谱分析仪求出400微秒的图形。另外就各种波形计算出AE波形的有效值、均方根值、平均值、增长时间及最大振幅。

试验结果表明,不同树种的AE发生峰值也不同,阔叶树材达到峰值所需干燥时间比针叶树材的短,干燥中发生的AE波形按照频率波谱可以分为4种类型。试验检测了试件端裂引起的AE信号波,从这个波形的纵波和横波到达的时间差计算出的传感器至AE发生源的距离同传感器至试件端面的实际距离一致。另外,用各种特性值研讨干燥中测出的AE波形时发现,为了区别微观开裂引起的AE波形和宏观开裂引起的AE波形,使用均方根值是有效的。从AE波形的频率分布来看,AE传感器的共振特性值选择在300KHz为宜。

AE在木材切削加工中的应用主要是用输入的程序监视刀刃的磨损状态及由此引起的切削机理的变化。

1.木材切削的AE特性——木材含水率及树种对AE的影响

日本九州大学农学部村瀬安英等人研究指出,利用木材切削过程中发生的AE提供了用输入程序检测刀刃磨损状态和被切削木材撕裂纹理缺陷的可能性。同时指出了AE法对认识切屑生成形态的作用。为了进一步积累基础资料,该研究探讨了木材含水率、树种密度等主要因子在顺纹、横纹及端面切削时AE的影响。试验是在刀具夹具的侧面涂布油脂,用磁铁夹具固定AE传感器,切削中测出的信号先用前置放大器增幅20分贝,再在鉴频器中增幅10~30分贝,同时为除去外界的振动和噪音等杂音而通过100KHz~1MKHz的带通滤波器进行处理。对AE信号的波形观测、水平测定及频率解析,首先是将上述AE信号在声波存储器中予以记忆,随后

用记录器或FFT分析器读出并加以处理。采用加权计数法计测AE计数率(每秒的次数)。试验使用高速钢刀具,切削条件是:主切角40°、后角10°、进刀量0.1mm、切削速度1.2米/秒。在含水率的影响方面,将美国云杉试件按绝干、气干、纤维饱和点和湿材四种状态调湿处理,然后按径切面的顺纹和横纹及端面进行切削。在树种的影响方面,选择了桐木、红柳安、贵索婆罗双、青桐、美国花旗松、山毛榉、白栎和阿必栋等,将它们调整至气干和湿材状态在径切面上按顺、横纹切削。

试验结果:美国云杉顺纹切削的AE信号均方根电压与含水率的关系如图5所示,AE信号水平随着含水率的增加而减少。均方根电压与试材树种气干密度的关系如图6所示。它们几乎都表现为直线关系,而且树种密度越大,AE信号水平也就越高。

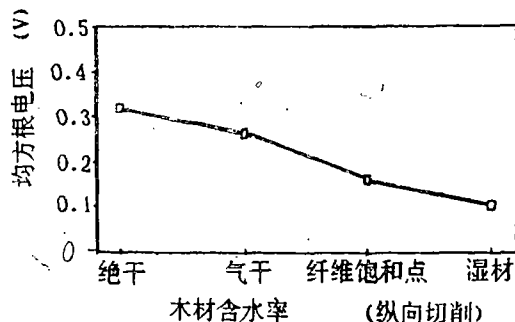


图5 AE信号的均方根电压与木材含水率的关系

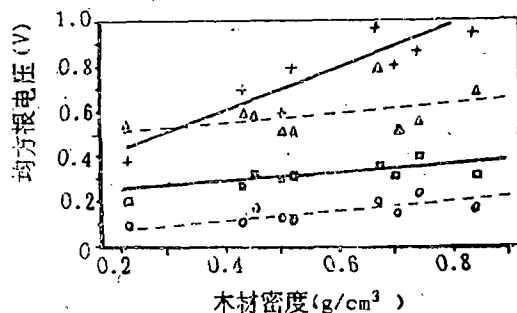


图6 均方根电压与木材气干密度的关系

□气干(纵向切削) +气干(横向切削)
○湿材(纵向切削) △湿材(横向切削)

2.柳杉切削中的AE与切削状态的关系

木材的切削状态,特别是切屑的形成过程与AE的发生情况是非常对应的。在此基础上,东京农工大学定成政宪、喜多山繁等人分别在刀具和工件上分别安装AE传感器,同时测定两个传感器的信号,用照片连续记录下木材切削过程,研究了不同纤维

倾斜角的切削状态与两传感器的AE信号之间的关系。

试验用柳杉气干材(含水率11%)和湿材(含水率270%),按顺纹方向从0°到90°每隔15°固定一次进行切削加工试验,这时在刀具和试材两方面发生的AE,是将两个传感器的触发器独立开来同时测出每0.1秒的AE发生率、总数及AE信号波形。从传感器出来的AE输出信号是增幅80dB、经100KHz~1MHz的带通滤波器处理作为信号的波形而检测的,AE发生数是把 $V_h = 250$ 、 $V_l = 25$ mV为阈值按信号转换法计数。此外,同时进行每秒钟切削状态的摄影和切削阻力的测定。采用的切削条件是:一次切削长度50mm、切削速度3mm/s、切削量分别为0.3、0.5、1.0mm。刀具研磨角20°、切削后角5°。

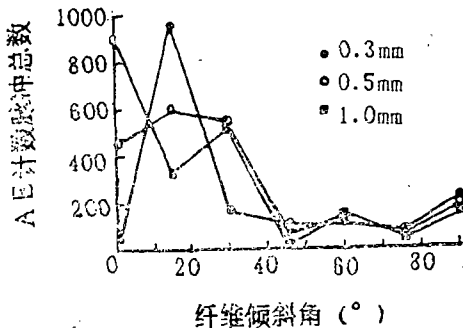


图7 在刀具上测出的饱和和木材纤维倾斜角和AE发生总数的关系

试验结果表明,气干材在刀具上发生的AE总数不管切削量如何都随着纤维倾斜角的增大而增加。相反,湿材却呈现出如图7所示的减少趋向。另外,在工件上发生的AE不管切削量大小,当纤维倾斜角0°时为最大值,然后减少,接着再次增加。对于高含水材则是呈现出不规则的变化。纤维倾斜角不同时,切屑形成的过程与AE发生率之间的关系与含水率无关,与刀具一方相比,工件一方测出的AE同切屑形态更相对应,特别是带状切屑和断屑型切屑的形成过程与AE发生率有着密切的关系。将同时测出的AE信号波形加以比较,发现刀具一方比工件一方存在较多的频率成分高、振幅大的波形。

四、存在问题和今后的展望

在实际工作中要把AE法作为检测的一种手段

加以利用,首先要弄清AE发生的机理,也就是伴随着AE发生的微小变形和破坏是在材料的何处,是怎样发生的。由于木材中发生的AE能量是相当大的,检测并不困难,但是AE波传导过程中的衰减也是相当大的,衰减最显著的是生材,在纤维方向上甚至只有几厘米的传送距离检测也会发生困难,因此使用AE法检测大尺寸材料时必须充分考虑传感器的配置位置。另外,由于木材中AE波传导速度有明显的异向性,所以AE源的位置标定并不简单。

AE法的缺点是AE传感器必须与试件表面紧贴,不能进行非接触式测定;尽管试件有缺陷,除非加载发生应力否则就不发生AE;由于到目前为止还没有确立从AE信号定量地求出AE的振幅和能量等参数的方法,所以与破坏能等量的对应是困难的;此外,AE的计数值因传感器的灵敏度、安装方法和阈值而变化;在利用计数值预测材料的强度、预报开裂的时候也常出现问题。

声发射在木材工业方面的应用仅仅是开始,尚待不断探索,只有通过应用实例的积累和对AE发生机理的研究,才能逐渐明确AE法的适用界限和可能应用的领域。目前,AE法除了在材料蠕变、应力松弛过程、干燥机理、纸张撕裂及强度显示机理等基础研究方面应用以外,还用于胶合板和胶合木等胶合不良的检测、应力分等、载荷下的木结构部件结合部健全性的诊断,以至于伴随细胞壁的膨润和收缩的浸注或浸渍处理过程的监视等。另外,AE法优点之一的AE发生源位置标定机能至今还没有太被重视和利用,应力集中区域的确定、开裂发展的监视、缺陷检测等更应该进一步发挥AE的特殊功能。

(责任编辑 袁东岩)

参考文献

- (1) 岸 辉雄, 1983, (日)材料科学, NO.19.
- (2) 奥村正悟, 1987, Acoustic Emission (AE) (日)木材工業, 42 (10).
- (3) 日本木材学会, 1988, 第38回日本木材学会大会研究発表要旨集.
- (4) 日本木材学会, 1989, 第39回日本木材学会大会研究発表要旨集.