

临界折射纵波(L_{CR} 波)传播机理的研究

李勇攀, 王寅观, 陈振宇, 刘蕊

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘要: 文章旨在用有限元法模拟 L_{CR} 波的传播过程, 初步探讨 L_{CR} 波的传播机理。作者用有限元法模拟了 L_{CR} 波在钢轨中传播的声场分布, 并且对钢轨中 L_{CR} 波的传播作了实验。用有限元法得到的接收楔块斜面所接收到的能量对时间的曲线与实验中接收楔块接收到的信号有较一致的结果: 波形曲线趋势相同, 在第一个波峰后都有第二个峰值。从有限元分析和实验结果得出结论: L_{CR} 波是纵波以第一临界角入射时产生的特殊模式, 是一种特殊的头波, 这与激发超声波的换能器和被测材料是有限尺寸的介质而不是无限大介质有关。

关键词: 临界折射纵波; 换能器; 有限元建模

中图分类号: TB551 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2004)03-0141-05

Study on mechanism of transmission of L_{CR} waves

LI Yong-pan, WANG Yin-guan, CHEN Zhen-yu, LIU Rui

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The purpose of this article is to simulate the process of transmission of L_{CR} waves and carry out a preliminary study on the mechanism of transmission by finite-element method. The field distribution of an L_{CR} wave transmitted in rails is simulated, and experiments of L_{CR} wave transmission are conducted. It is found that the energy-time curve on an oblique plane of the receiving block obtained with finite-element method is similar to the signals measured in experiments. Their waveforms show the same tendency: the second peak coming after the first one. From both the finite-element analysis and the experiments, it can be concluded that the L_{CR} wave is a special head wave formed when a longitudinal wave is incident at the first critical angle. It is related to the finite-dimension rather than infinite-dimension of the media of the transducer generating ultrasonic waves as well as the material being measured.

Key words: L_{CR} wave; transducer; finite-element modeling

1 引言

利用纵波沿着铁轨传播的特性来检测应力的方法, 通常用于新铁轨的残余应力的估计。图 1 是临界折射纵波的测量图。

纵向临界折射纵波 (Critically refracted longitudinal wave, 简称 L_{CR} 波) 是纵波以第一临界角入射时产生的特殊模式。 L_{CR} 波是一种特殊的头波, 这与超声波激发源是有限尺寸的换能器, 而不是无限大的介质有关。

临界折射纵波 (L_{CR} 波) 技术的优点是测量应力

的灵敏度高, 能测量超声脉冲传播小距离的时间。但是, 由于 L_{CR} 波衰减较快, 无法测量超声脉冲传播较长时间。此外, 沿着轨顶侧传播的纵波速度除了受应力影响外还受到许多其它因素的影响, 这些因素包括残余应力、材料的化学组成、材料的温

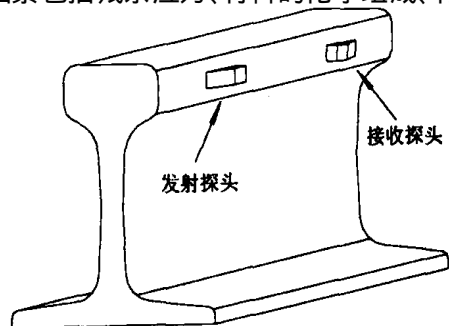


图 1 纵向临界折射纵波的测量图

收稿日期: 2003-06-25; 修回日期: 2003-09-30

作者简介: 李勇攀(1978), 男, 福建龙岩人, 在读硕士研究生, 研究方向: 检测声学。

度等。

文献[1]描述了利用头波确定应力的方法。文中指出产生头波的方法,具体的实施手段,文中还分析了残余应力和材质对纵向应力检测的影响。

文献[2~5]把文献[1]中的头波命名为 L_{CR} 波,讲述了 L_{CR} 波在测量应力中的各种应用,指出 L_{CR} 波是一种体波,恰好在材料的表面下传播,传播的速度接近纵波。还指出与横波相比, L_{CR} 波对应力有更高的灵敏度,受材质的影响更小。

文献[6]从理论上说明了次表面纵波的性质。文中用弹性动力有限综合技术(elastodynamic finite integration technique, EFIT)预测次表面纵波的性质,然后采用空间 Fourier 逆变换运用几种分析及分析数值综合过程估计斜入射平面波谱。最后得到的结论指出斜探头的特殊波阵面不能以单一的均匀和非均匀平面波来解释,而是由探头的有限尺度激发到弹性半空间所形成的。

2 L_{CR} 波的激发和传播

钢轨的纵向应力检测必须通过沿着钢轨纵向传播的超声波进行。超声波在钢轨的外面被激发,斜入射到钢轨中。

由压电晶片产生的纵波从一种材料(介质 I)斜入射到被检测材料(介质 II)中,在介质 II 中产生纵波和横波,它们的角度关系就是著名的斯涅耳定律^[7]:

$$\frac{C_{d1}}{\sin \theta} = \frac{C_{d2}}{\sin \theta'} = \frac{C_{s1}}{\sin \theta''} = \frac{C_{s2}}{\sin \theta'''} \quad (1)$$

其中 C_{d1} 、 C_{s1} 分别是介质 I 中的纵波波速和横波波速, C_{d2} 、 C_{s2} 分别是介质 II 中的纵波波速和横波波速。 θ 和 θ' 分别是入射纵波的角度和折射纵波的角度, θ'' 和 θ''' 分别是反射横波的角度和折射横波的角度。当介质 II 中的纵波波速 C_{d2} 大于介质 I 中的纵波波速 C_{d1} 时, 折射纵波的角度 θ' 大于入射纵波的角度 θ 。折射纵波的角度 θ' 随入射纵波的角度 θ 的增大而增大。当 θ 等于 90° 时, 称为倾斜入射的第一临界角。若介质 I 为有机玻璃楔块, 介质 II 为钢轨, 在有机玻璃楔块和钢轨中的纵波波速分别是 2720m/s 和 5978m/s , 则由式(1)可计算出第一临界角为 27° (如图 2 所示)。

介质一般不是无限大的, 无限大只是相对于所关心的空间范围讲的。一种介质中传播的声波,

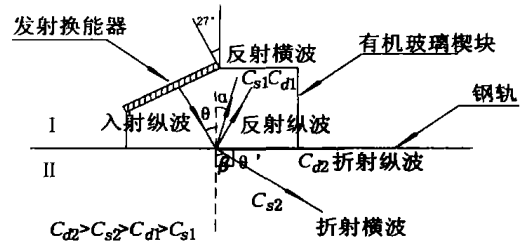


图 2 纵波倾斜入射传播

在一般情况, 终将遇到另一种介质, 这第二种介质可能是半无限大的, 也可能是体积有限的位于原来介质 I 内的一个物体, 它由另一种材料(介质 II)组成。声波遇到这个物体时, 将在传播到的界面元上发生反射和折射, 但所发生的可以不止这些, 特别是当物体的尺寸和波长可比拟时。入射声波所受到干扰的总效应, 称为散射(为此, 有人把平界面的反射和折射, 也叫做散射)。入射波受散射体干扰后, 介质 II 中所形成的声波总体(总的声波), 减去原来的入射波, 定义为散射波。当入射波是平面波时, 散射后声波的总体常不保持平面波或其它简单波的形式, 而具有较复杂的空间分布, 即复杂的声场^[7]。 L_{CR} 波就是在这种情况下产生的。有限尺寸的换能器激发出超声波, 由于换能器的尺寸有限, 激发出的超声波首先不可能是纯平面波。这种超声波传播到两种介质的界面时产生一种复杂的超声波, 因为这种超声波是在以临界角入射时产生的, 所以它被定义为临界折射纵波(L_{CR} 波)。 L_{CR} 波的产生与换能器和被测材料的尺寸有限有关。

L_{CR} 波是由有限尺寸换能器在第一临界角发射到材料中所形成的。在这种特殊的边界条件下, 解析解难以求出, 所以难以进行深入研究。有限元方法可以在这种条件下求出声波在整个过程的传播情况, 帮助研究人员更好地了解 L_{CR} 波。

3 L_{CR} 波的有限元模型

在此采用有限元方法是为了分析 L_{CR} 波在钢轨里的声场分布。如图 3 所示, 在有限元模型中, 楔块 EFGH 和 IJKL 的底边均为 2cm , 高为 0.77cm , 斜面与底面的角度为 27° , 它们分别用于模拟发射换能器和接收换能器, 它们的密度、泊松系数、弹性模量与有机玻璃相同。因为实验中用有机玻璃形成斜发射, 楔块的角度 27° 能够产生 L_{CR} 波的第一临界角。长方形 ABCD 长 10cm , 高 7cm , 用来模拟钢轨的一

段,其密度、泊松系数、弹性模量与 60# 钢轨相同。在用 ANSYS6.0 进行有限元计算时,设置两个楔块和长方形的应力和应变连续,以模拟实际中换能器和钢轨的应力和应变连续。在楔块 EFGH 的 EH 面加压强 $P(t)$:

$$\begin{cases} P(t) = -\sin(2 \cdot 0.72 \cdot 10^6 t) & 0 \leq t \leq 1.4 \text{ s} \\ P(t) = 0 & t > 1.4 \text{ s} \end{cases}$$

其中 t 是时间,用压强 $P(t)$ 模拟频率为 0.72MHz 的压电晶片的振动,一个振动周期约为 1.4 s。1.4 s 以后的压强为零,对应于 L_{CR} 波在钢轨的传播过程。网格的尺度小于 10^{-3} ,使网格的尺度小于频率为 0.72MHz 的波长,这是有限元法计算波动所必须具备的条件。模型中设阻尼为 10^{-8} kg s_0 。

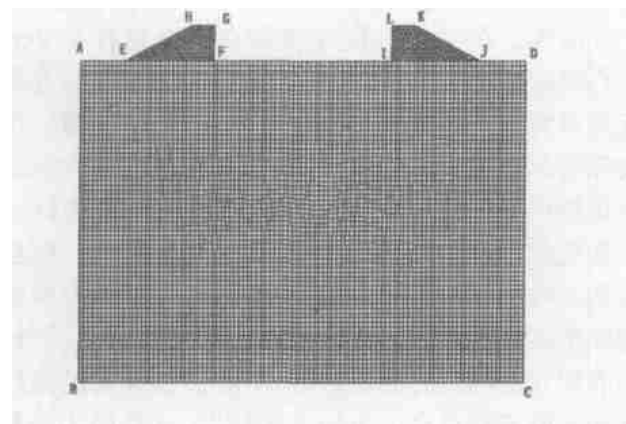
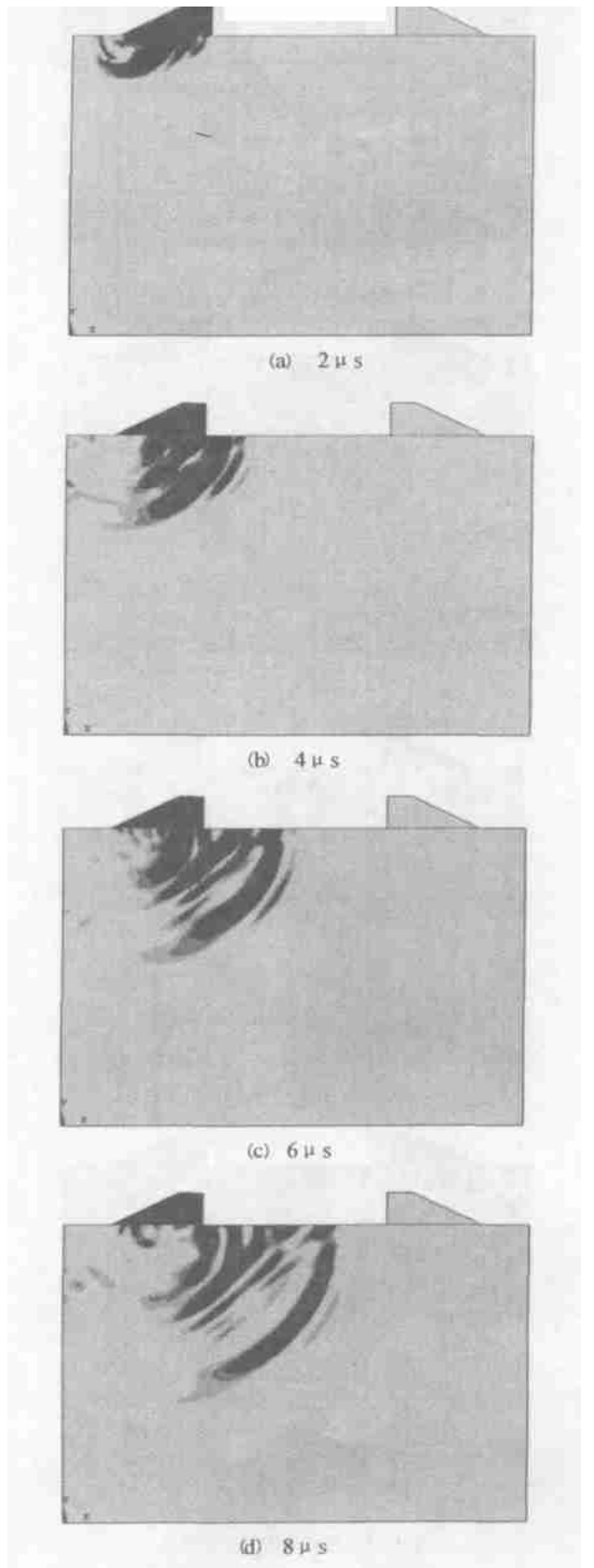


图 3 单元划分

4 计算的结果

结果如图 4 所示,纵波在楔块表面被激发,以楔块斜面的角度 27° 向钢轨传播。图中颜色越深,表示振幅越大。2 s 时在换能器 EFGH 下就出现了波纹,这些波纹是由 EH 产生的超声波在 E 点发生散射造成的。在 4 s 时出现圆形波纹,这是在钢轨中传播的纵波。6 s 时在纵波后面出现近似斜线的波纹,这是头波,即用于检测应力的 L_{CR} 波。8 s 时在头波后面出现另一个圆形的波纹,这是速度较慢的横波,可以清楚地看出头波与横波相切。10 s 时 L_{CR} 波开始到达接收的楔块。在 12 s 时明显看到从钢轨传播到楔块的与楔块平行的波纹。该波在楔块中逐渐传播,直到 13.2 s 到达接收楔块的斜面。从图 4 可以看出,纵波沿表面传播在分界面不断发生模式转换产生横波,在不同距离产生的横波包络面形成了所谓的头波,这是 L_{CR} 波形成的因素之一。

图 5 是接收换能器 IJKL 的 JK 面所接收到的能量与时间的曲线,该能量通过在接收换能器 IJKL 中的 JK 面的所有结点的位移横坐标的平方值和位移



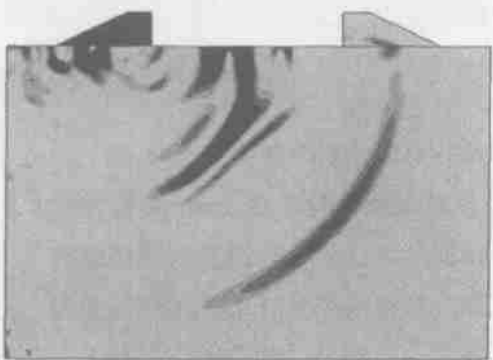
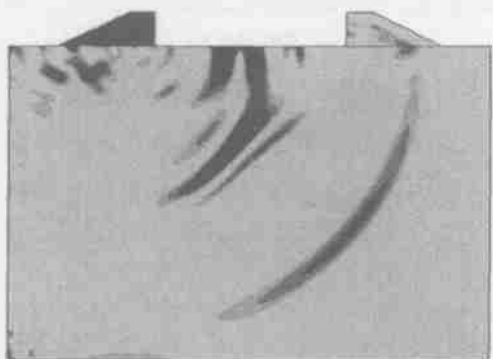
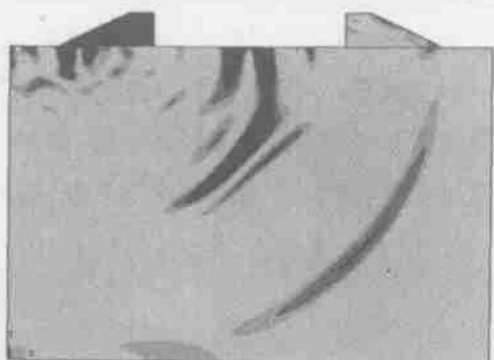
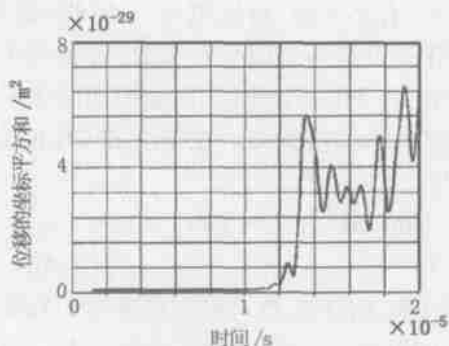
(e) 10 μ s(f) 12 μ s(g) 12.5 μ s(h) 13.2 μ s图4 L_{OI} 波的有限元分析结果

图5 用有限元法得到的接收模块斜面所接收到的能量对时间的曲线

纵坐标的平方值的和计算。与图4相对应,声波到达的时间是12.5 μ s左右。

图6是在实验中接收楔块在离发射探头4cm左右接收到的信号,实验装置见图7所示。与有限元法得到的能量曲线(图5)对比,两曲线在第一个波峰后都有第二个峰值,这表明实际情况和有限元模拟得到的结果一致,即在钢轨中存在多层波这一复杂现象,包括有反射波和折射波等多种波。但接收到波峰的时间不同,这是用有限元法模拟的换能器模型的尺寸与真实的尺寸有所不同的缘故,另外,与有限元法模拟的能量曲线不同的是,真实的曲线在接收到波前没有一个向上的跳跃,这是因为采集系统的电容产生隔直流的作用。

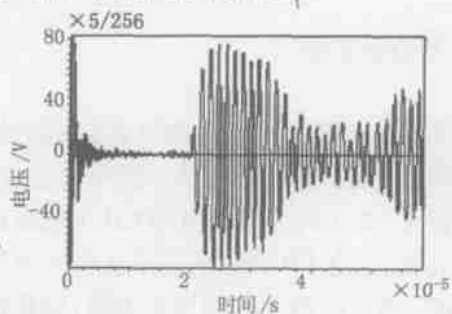


图6 接收楔块在离发射探头4cm左右接收到的信号



图7 实验装置图

5 结 论

本文介绍了临界折射纵波(L_{CR}波), 建立了模拟 L_{CR}波在钢轨传播的模型, 用有限元方法模拟 L_{CR}波激发、传播、接收的整个过程, 初步探讨了临界折射纵波的传播机理。对这一过程的初步探讨将有助于对 L_{CR}波的进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Bray D E , Leon-Salamanca T. Zero-force travel time parameters for ultrasonic head-waves in railroad rail[J]. Materials Evaluation, 1985, **43**(7): 854-858, 863.
- [2] Bray D E , Junghans P. Application of the L_{CR} ultrasonic tech-

nique for evaluation of post-weld heat treatment in steel plates [J]. NDT & International, 1995, **8**(4): 235-242.

- [3] Leon-Salamanca T , Bray D E. Residual stress measurement in steel plates and welds using critically refracted longitudinal (L_{CR}) waves [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1996, **7**(4): 169-184.
- [4] Bray D E. Current directions of ultrasonic stress measurement techniques[J/OL]. Roma 2000 15th WCNDT, <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn647/idn647.htm>, 2000
- [5] Bray D E. Ultrasonic stress measurement with the L_{CR} technique[EB/OL]. <http://brayengr.com/lcrproc2.html>, 1998.
- [6] Langenberg K J , Fellingner P, Marklein R. On the nature of the so-called subsurface longitudinal wave and/ or the surface longitudinal creeping wave[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1990, (2): 59-81.
- [7] 应崇福. 超声学[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 56-70

(上接第 140 页)

参 考 文 献

- [1] 喻明, 兰从庆, 许克克. Lamb 波 CT 成像的实验研究[J], 声学技术, 1995, **14**(4): 162-164.
- [2] 张海燕, 吕东辉, 袁瀚贝. 超声 Lamb 波层析成像在无损检测中的应用[J], 声学技术, 2003, : 294-296.
- [3] ZHANG Haiyan, LIU Zhenqing. Propagation of Lamb waves in adhesively bonded multilayered media [J]. Technical Acoustics, 2003, : 40-43.
- [4] 刘镇清, 他得安. 用二维傅里叶变换识别兰姆波模式的研究[J]. 声学技术, 2000, **19**(4): 212-216.
- [5] 张海燕, 谢远遐, 刘镇清. 粘性粘接的层状固体媒质中兰姆波的传播[J]. 声学技术, 2000, **19**(3): 163-165.
- [6] 刘镇清, 张海燕. 固-液-固三层结构板中超声兰姆波的频散特性[J]. 声学技术, 2001, **0**(2): 89-91.
- [7] Hutchins D A, Jansen D P, Edwards. Lamb wave tomography

using non-contact transduction[J]. Ultrasonics, 1993, **31**(2): 97-103.

- [8] Jansen D P, Hutchins D A, Mottram J T. Lamb wave tomography of advanced composite laminates containing damage [J]. Ultrasonics, 1994, **3**(2): 83-89.
- [9] McKeon J C P, Hinders M K. Parallel projection and crosshole contact scanning Lamb wave tomography [J]. J Acoust Soc Am, 1999, **106**(15): 2568-2577.
- [10] Malyarenko, Hinders M K. Fan beam and double crosshole lamb wave tomography for mapping flaws aging aircraft structures [J]. J Acoust Soc Am, 2000, **108**(4): 1631-1639.
- [11] Malyarenko E V, Hinders M K. Ultrasonic Lamb wave diffraction tomography[J]. Ultrasonics, 2001, **39**: 269-281.
- [12] Leonard K R, Malyarenko E V, Hinders M K, Ultrasonic Lamb tomography [J]. Inverse Problems, 2002, **18**: 1795-1808.
- [13] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. 22-25.

欢迎订阅 欢迎赐稿

欢迎刊登广告