DOI: 10.3901/JME.2013.10.045

浸水斜入射条件下黏接结构的透射特性研究*

吴斌 张婧 邱兆国 何存富

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124)

摘要: 建立浸水斜入射条件下三层黏接结构的声学模型, 利用声阻抗法和弹簧模型导出浸水斜入射条件下三层黏接结构的透射系数表达式; 并对浸水三层黏接结构进行数值计算, 分析入射角度、黏接层厚度、钢板厚度、基体材料等参数对黏接结构透射特性的影响; 同时, 分析刚度系数变化对弱黏接结构透射系数的影响。为验证理论推导的正确性, 对浸水钢-环氧树脂-钢三层黏接结构进行斜入射声学试验, 试验结果与数值计算吻合较好。结果表明, 对于浸水斜入射条件下三层黏接结构, 入射角度等参数变化会使谐振频率点或透射系数峰值发生变化; 当界面刚度系数很小, 黏接结构为弱黏接结构时, 透射系数存在“多峰”现象, 并随着刚度系数的增大, 首次出现“多峰”现象的频率值逐渐向高频方向漂移, 当界面为完全黏接时, “多峰”现象消失。

关键词: 斜入射 弹簧模型 刚度系数 透射系数

中图分类号: O327

Research on the Transmission Characteristics of Underwater Bonding Structure in Oblique Incidence

WU Bin ZHANG Jing QIU Zhaoguo HE Cunfu

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: The acoustic model of three-layer bonding structure in water when oblique incidence is established, the acoustic impedance method and spring model are used to derive the representation of transmission coefficient of three-layer bonding structure when oblique incidence; and the numerical simulation is done to analyze the influence of the incidence angle, the adhesive thickness, the steel plate thickness, the substrate materials on the transmission coefficient; at the same time, the influence of the change in stiffness coefficient on the transmission coefficient of the weak bonding structure is studied. To verify the theoretical derivation, the experiment on the three-layer bonding structure(steel-epoxy-steel) in water when oblique incidence is done, the test results are in good agreement with the theoretical results. The results show that, the changes in incidence angle and other parameters will cause the change of resonant frequency points or the peak of transmission coefficient; the bonding structure is weak bonding structure when the stiffness coefficient is small, there is more than one peak of transmission coefficient, and the phenomenon of more than one peak is disappeared when good adhesion.

Key words: Oblique incidence Spring model Stiffness coefficient Transmission coefficient

0 前言

黏接结构已被广泛应用于航空、航天和军工等重要部门。然而由于黏接界面脱黏或黏接强度不足而造成的灾难性事件时有发生。因此, 对黏接结构

的声学特性进行研究具有重要的学术价值和工程应用潜力^[1-4]。

目前国内外学者对多层结构的声学特性进行了较为广泛的研究。BREKHOVISHIKH 等^[5]利用阻抗法针对分层均匀介质的反射系数和透射系数进行了详细的推导。

THOMSON^[6]提出了多层传递理论模型, 在黏接层间利用斜入射的反射和透射模型进行了理论分

* 国家自然科学基金(11132002, 10972014, 11272021)和北京市优秀博士论文指导教师(YB20091000502)资助项目。20120705 收到初稿, 20121215 收到修改稿

析, 并得出了对应的反射系数和透射系数。CHRISTOPHE 等^[7]针对周期性层状各向异性介质提出了一种基于解决散射矩阵广义特征值问题的方法, 研究表明, 利用该方法将传递函数与板中超声波反射系数表达式相结合可以同时测量试件中超声波波速、衰减以及试件的密度和厚度。HOSTEN 等^[8]利用表面阻抗矩阵对多层介质中的超声波传播进行了建模, 研究表明, 利用表面阻抗矩阵可将速度场和应力场连结起来, 从而简化建模计算过程。TAN^[9]针对一般多层各向异性介质中的弹性波传播, 假设界面边界条件连续, 在计算总体和表面刚度矩阵时, 提出了一种可以提高计算效率的刚度矩阵的递推算法。DWYER-JOYCE 等^[10]将涂层与基底的连结简化为弹簧模型, 提出了一种用于测量柔软表面涂层弹性性质的超声技术。CASTELLO 等^[11]将层压板的黏接界面简化为弹簧模型, 研究了液体中层压板中有缺陷的黏接界面的声散射问题。

综上所述, 国内外对多层结构声学特性的研究, 多针对垂直入射和理想黏接与脱粘问题, 但对于斜入射下黏接结构尤其是弱黏接结构的透射特性的研究还鲜见文献报道。本文基于文献[12-21]的工作, 假设黏接界面具有弹簧模型连接条件, 利用阻抗法研究了浸水斜入射条件下三层黏接结构的透射特性, 分析了弱黏接结构中界面刚度系数的改变对透射特性的影响, 并进行了试验验证。

1 理论分析

如图 1 所示的声学模型, 超声波以 θ_1 角入射, 整个模型分为 5 层, 其中 1 层和 5 层为水层, 2 层和 4 层为钢, 3 层为黏接层。1 层与 2 层之间的界面标识为 I, 2 层与 3 层之间的界面标识为 II, 并以此类推。各层介质均为各向同性, 钢层无衰减。

图 1 浸水斜入射条件下粘接结构的声学模型

根据文献[5], 多层结构的透射系数表达式为

$$D = \prod_{m=1}^j \frac{z_i^{(j)} + z_j}{z_i^{(j)} + z_{j+1}} \exp(ik_{jz} d_n) \quad (1)$$

式中, $z_i^{(j)}$ 为各层的输入阻抗, z_j 为各层中平面波的阻抗, k_{jz} 是波数 k_j 的模沿 z 轴的分量, $k_{jz} = k_j \cos \theta_j$, $k_j = \omega / c_j$, c_j 为各层介质中的波速, θ_j 是超声波入射到各界面的入射角, $j = 1, 2, 3, 4$ 。

考虑黏接层的衰减

$$k_{3z} = k_3 \cos \theta_3 + i(0.1k_3 \cos \theta_3)$$

由式(1)可以看出, 要确定透射系数, 只需要求出模型中各个层间的输入阻抗。一般情况下, 界面连接条件是位移和应力连续, 根据文献[5], 输入阻抗可由式(2)求出

$$z_i^n = \frac{z_i^{(n-1)} - iz_n \tan(k_{nz} d_n)}{z_{n+1} - iz_i^{(n-1)} \tan(k_{nz} d_n)} z_n \quad (2)$$

式中, d_n 为第 n 层介质的厚度, 由式(2)求得第 2 层的输入阻抗表达式为

$$z_i^{(2)} = \frac{z_1 - iz_2 \tan(k_{2z} d_2)}{z_2 - iz_1 \tan(k_{2z} d_2)} z_2 \quad (3)$$

由阻抗连续, 可得到求解输入阻抗的表达式

$$z_i^{(3)} = -\frac{R_2 + 1 + (R_2 - 1)i \tan(k_{3z} d_3)}{R_2 - 1 + (R_2 + 1)i \tan(k_{3z} d_3)} z_3 \quad (4)$$

当界面 II 的连接条件简化为弹簧模型时, 其反射系数表达式为^[10, 20]

$$R_2 = \frac{z_i^{(2)} - z_3 + i\omega(z_i^{(2)} z_3 / K_L)}{z_i^{(2)} + z_3 + i\omega(z_i^{(2)} z_3 / K_L)} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可得到 II 界面上的输入阻抗表达式为

$$z_i^{(3)} = \frac{z_i^{(2)} + i\omega \frac{z_i^{(2)} z_3}{K_L} - z_3 i \tan(k_{3z} d_3)}{z_3 - \left(z_i^{(2)} + i\omega \frac{z_i^{(2)} z_3}{K_L} \right) i \tan(k_{3z} d_3)} z_3 \quad (6)$$

同理, 可求得界面 III 的输入阻抗表达式为

$$z_i^{(4)} = \frac{z_i^{(3)} + i\omega \frac{z_i^{(3)} z_4}{K_L} - z_4 i \tan(k_{4z} d_4)}{z_4 - \left(z_i^{(3)} + i\omega \frac{z_i^{(3)} z_4}{K_L} \right) i \tan(k_{4z} d_4)} z_4 \quad (7)$$

将式(3)、(6)、(7)代入式(1), 即可求出浸液黏接结构的透射系数, 如式(8)所示。

$$\begin{aligned}
D_t = & \frac{z_i^{(4)} + z_4}{z_i^{(4)} + z_5} \frac{z_i^{(3)} + z_3}{z_i^{(3)} + z_4} \frac{z_i^{(2)} + z_2}{z_i^{(2)} + z_3} \frac{2z_1}{z_1 + z_2} \exp(ik_{2z}d_2 + ik_{3z}d_3 + ik_{4z}d_4) = \\
& \frac{z_i^{(3)} + i\omega \frac{z_i^{(3)}z_4}{K_L} - z_4 i \tan(k_{4z}d_4)}{z_4 - \left(z_i^{(3)} + i\omega \frac{z_i^{(3)}z_4}{K_L} \right) i \tan(k_{4z}d_4)} \frac{z_i^{(2)} + i\omega \frac{z_i^{(2)}z_3}{K_L} - z_3 i \tan(k_{3z}d_3)}{z_3 - \left(z_i^{(2)} + i\omega \frac{z_i^{(2)}z_3}{K_L} \right) i \tan(k_{3z}d_3)} \times \\
& \frac{z_i^{(3)} + i\omega \frac{z_i^{(3)}z_4}{K_L} - z_4 i \tan(k_{4z}d_4)}{z_4 - \left(z_i^{(3)} + i\omega \frac{z_i^{(3)}z_4}{K_L} \right) i \tan(k_{4z}d_4)} \frac{z_i^{(2)} + i\omega \frac{z_i^{(2)}z_3}{K_L} - z_3 i \tan(k_{3z}d_3)}{z_3 - \left(z_i^{(2)} + i\omega \frac{z_i^{(2)}z_3}{K_L} \right) i \tan(k_{3z}d_3)} \times \\
& \frac{z_1 - iz_2 \tan(k_{2z}d_2)}{z_2 - iz_1 \tan(k_{2z}d_2)} \frac{z_2 + z_2}{z_1 + z_2} \exp(ik_{2z}d_2 + ik_{3z}d_3 + ik_{4z}d_4) \quad (8)
\end{aligned}$$

式中, $z_j = \frac{\rho_j c_j}{\cos \theta_j}$ $j=(1,2,3,4)$ 代表各层的阻抗, ρ_j 和 c_j 分别代表各层的密度和波速, θ_j 是超声波入射到各界面的入射角, $k_{2z} = k_2 \cos \theta_2$, $k_{4z} = k_4 \cos \theta_4$ 是波数 k_2 和 k_4 的模沿 z 轴的分量, $k_2 = \omega c_2$, $k_4 = \omega c_4$ 。

2 数值计算和结果分析

以上述理论为基础, 数值计算时, 入射频率设为 1 MHz, 黏接层厚度为 0.5 mm, 钢板厚 4 mm。钢的密度为 7 800 kg/m³, 纵波波速为 5 850 m/s, 横波波速为 3 230 m/s; 环氧树脂的密度为 1 300 kg/m³, 纵波波速为 2 800 m/s, 横波波速为 1 100 m/s^[22]。

2.1 入射角度对透射特性的影响

图 2 给出了浸水钢-环氧树脂-钢黏接结构在不同入射角度下的透射系数, 分别选取入射角度为 0°、8°、12°和 17°进行数值计算。

图2 不同入射角度下水浸粘接结构的透射系数

从图 2 中可以看出, 黏接结构透射系数随频率呈周期变化较大, 说明声波通过结构时存在明显的

谐振, 这与层状结构声传播理论相符合。在 4 种入射角度下, 透射系数曲线的极小值均为 0, 而极大值有所不同。当入射角度为 0°时, 一阶谐振频率最小为 0.725 MHz, 当入射角度变为 12°时, 一阶谐振频率增大为 1.275 MHz, 而当入射角度大于第一临界角以后, 将不再出现谐振频率点, 即随着入射角度的增大, 谐振频率向高频移动, 透射系数的变化周期逐渐增大, 这是由于随着入射角度的增大, 结构中的纵波和横波透射角的模量增大, 使得共振相位角滞后。

2.2 黏接层厚度对透射特性的影响

图 3 给出了浸水钢-环氧树脂-钢黏接结构在不同黏接层厚度下的透射系数, 黏接层厚度分别取 0.01 mm、0.10 mm、0.50 mm 和 1 mm, 其中入射角度 10°。从图 3 中可以看出, 黏接层厚度变化时, 谐振频率点不变, 一阶谐振频率均为 1 MHz, 且透射系数的极小值均为 0, 极大值有所不同。当黏接层厚度很薄时, 例如厚度为 0.01 mm, 透射系数的极大值基本稳定。当黏接层厚度增加时, 透射系数的极大值有随频率增大而减小的趋势, 并且黏接层厚度越大, 透射系数的幅值衰减越快, 这是由于黏接层对超声波衰减的影响。

2.3 钢板厚度对透射特性的影响

图 4 给出了不同钢板厚度下的透射系数, 其中黏接层厚度为 0.5 mm, 分别选取钢板厚度为 3 mm、6 mm 和 9 mm, 其中入射角度 10°。

从图 4 中可以看出, 随着钢板厚度的增大, 谐振频率发生漂移, 并且透射系数的极小值均为 0, 而位于谐振频率处的极大值有所不同。当钢板厚度分别为 3 mm、6 mm 和 9 mm 时, 对应的一阶谐振频率分别为 1.335 MHz、0.665 MHz 和 0.445 MHz。

图3 不同黏接层厚度下水浸黏接结构的透射系数

图4 不同钢板厚度下水浸黏接结构的透射系数

即随着钢板厚度的增大,谐振频率向低频方向漂移,透射系数变化的周期减小。

2.4 基体材料对透射特性的影响

理论分析中,忽略检测介质对超声波的衰减作用,只研究两侧基体材料变化对透射系数的影响,其中黏接层为环氧树脂层,厚度为 0.5 mm,两侧介质分别选取钢、铝和铜,厚度为 4 mm。图 5a 所示,上层介质为钢,下层介质分别为钢、铝和铜时的透射系数。从图 5a 中可以看出,上层基体材料不变,改变下层基体材料时,谐振频率基本不变,但三种情况下的透射系数极大值不同。从图 5a 中可以看出,对于钢-环氧树脂-钢结构和钢-环氧树脂-铝结构,在谐振频率点处透射系数出现极大值,而对于钢-环氧树脂-铜结构则出现了峰值分裂现象,这是与两侧介质的特性参数,如密度、波速密切相关的。

图 5b 所示,下层材料为钢,上层材料分别为钢、铝和铜时的透射系数曲线。从图 5b 中可以看出,上层材料为铜时一阶谐振频率最小,上层材料为钢和铝时的一阶谐振频率次之,但是对于铝-环氧树脂-钢结构,透射系数的频响出现了波动现象。因而,从图 5b 中可以看出,上层材料的特性参数对谐振频率的影响很大。

图 5c 所示,上下层材料相同,分别为钢-环氧树脂-钢、铝-环氧树脂-铝和铜-环氧树脂-铜时的透射系数曲线。从图 5c 中可以看出,同时改变上下层

材料时,谐振频率发生明显的漂移。铜-环氧树脂-铜的一阶谐振频率最小,钢-环氧树脂-钢的一阶谐振频率次之,铝-环氧树脂-铝的一阶谐振频率最大,并且一阶谐振频率处透射系数的极大值也逐渐减小,由 Snell 定理求得水-铜的第一临界角为 18.52° ,水-钢的第一临界角是 14.66° ,水-铝的第一临界角为 13.69° ,可以看出,第一临界角大的一阶谐振频率反而小,这说明一阶谐振频率的大小与材料密切相关。从图 5c 中还可以看出,透射系数都是在谐振点处出现极大值,并且透射系数的极大值随着频率的增大整体出现减小的趋势。

(a)

(b)

(c)

图5 不同基体材料下浸水粘接结构的透射系数

2.5 刚度系数对透射特性的影响

为了分析界面刚度系数变化对透射特性的影响,数值计算时设入射角度为 10° ,黏接层厚度为 0.5 mm,观察界面刚度系数分别为 3×10^{14} 、 6×10^{14} 和 8×10^{15} 时的透射系数^[19-20],如图 6 所示。

图6 不同刚度系数下浸水粘接结构的透射系数

从图6中可以看出,不同刚度系数下的谐振频率点不变,而随着刚度系数的增大,透射系数的极大值也有变大的趋势。对于钢-环氧树脂-钢粘接结构,界面刚度系数为 3×10^{14} 和 6×10^{14} 时,粘接结构为弱粘接结构^[19-20],由图6可知,谐振频率存在“多峰”现象,并随着刚度系数的增大,首次出现“多峰”现象的谐振频率也有所增大。当刚度系数为 8×10^{15} 时,粘接界面为理想粘接^[19-20],谐振频率的“多峰”现象消失,并由于粘接层的衰减作用透射系数峰值有随频率增大而减小的趋势。

3 试验验证

浸水粘接结构透射系数测量试验系统如图7所示。试验系统包括超声脉冲激励接收仪(Panametrics-5800),传感器,水箱和数字示波器(Tektronics-DPO4054)组成,传感器为水浸超声探头,超声探头固定在水箱中,被测试件固定于水箱内的转盘上,通过转动转盘可实现入射角度的改变。探头直径为26 mm,中心频率为1 MHz,两探头之间的距离为90 mm,试样放置于换能器的中间位置,当入射角度为 0° 时,试样垂直于换能器的轴心连线。

试验中对浸水钢-环氧树脂-钢粘接试件的透射系数进行了检测。根据材料特性的不同,钢板分为1号和2号,各种试验材料参数和几何参数如下表所示,两种粘接试件的粘接层厚度均为0.75 mm。

根据透射系数的定义,可将透射信号频谱与参考信号频谱相比得到透射系数曲线,试验中选取两换能器之间不放置试样时直接接收到的透射信号为参考信号。图8a是参考信号的时域信号及其频谱

图7 透射系数超声测量系统示意图

表 试验材料特性参数

材料	密度 /(kg/m^3)	纵波波速 /(m/s)	横波波速 /(m/s)	厚度/mm
1号钢板	7 700	5 892	2 700	10
2号钢板	7 800	6 230	3 230	3.72
水	1 000	1 480	—	—
环氧树脂	1 300	2 800	1 100	0.75

图,图8b是入射角为 0° 时1号钢板粘接试件的时域信号及其频谱图。从图8a中可以看出,虽然所选用的传感器的中心频率为1 MHz,但系统的中心频率大约在0.6 MHz处,这是由于传感器之间的水层对超声波的影响,使中心频率发生了偏移。为了避免求比值过程中误差的放大,根据参考信号-6 dB频带范围,研究中重点关注0.466~0.767 MHz的透射系数。

图9给出了入射角度为 0° 和 5° 时,1号和2号两种不同钢板粘接试件的理论值和试验值。从图9a中可以看出,对于1号钢板的粘接试件,试验结果和理论曲线的变化趋势比较一致。入射角度为 0° 时谐振频率点吻合较好,但是试验结果中透射系数曲线的峰值大小与理论结果有所差别,这与试验条件以及实际粘接状况相关。当入射角度变为 5° 时,从图9中可以看出,当频率在0.466~0.767 MHz时,试验结果与理论结果比较一致,当频率大于1 MHz时,试验结果出现明显的波动,这既与参考信号的选择有关,也说明实际检测时频率范围选择至关重要。

4 结论

本文假设粘接界面具有弹簧模型连接,利用声阻抗法分析了浸水斜入射条件下三层粘接结构的透射特性,通过改变刚度系数研究了弱粘接结构的透射特性,并通过试验验证了理论模型的正确性,具体结论如下。

(a) 参考信号的时域信号及其频谱图

(b) 1号钢板黏接试件的时域信号及其频谱图

图 8 试验信号的时域图和频谱图

(a) 1号钢板黏接试样

(b) 2号钢板黏接试样

图 9 水中黏接试样的透射系数曲线

(1) 提出了利用输入阻抗法研究入射角度与透射系数之间的关系, 理论分析表明, 通过界面刚度系数变化能够研究弱黏接结构斜入射的波动特性。

(2) 随着入射角度的增大, 透射系数变化的周期逐渐增大, 谐振频率向高频方向漂移。

(3) 当黏接层厚度变化时, 谐振频率保持不变;

当黏接层厚度较薄时, 透射系数极大值较为稳定; 随着黏接层厚度的增加, 透射系数的极大值随频率的增大而减小, 并且黏接层厚度越大, 透射系数的幅值衰减越快。

(4) 随着钢层厚度的增大, 透射系数变化的周期逐渐减小, 谐振频率向低频漂移; 不同固体材料进行黏接时, 谐振频率将会产生明显的漂移现象; 弱黏接时, 谐振频率存在“多峰”现象, 并随着刚度系数的增大, 首次出现“多峰”现象的频率值逐渐向高频方向漂移; 当黏接界面为完全黏接时, “多峰”现象消失。

(5) 本文对输入声阻抗法进行了详细的理论分析和试验验证, 并且利用水浸斜入射法进行了不同角度的试验研究, 结果表明: 钢板厚度变化时, 谐振频率向高频方向漂移, 这一现象验证了理论推导的正确性。

参 考 文 献

- [1] 张建生, 李明轩. 多层黏接结构中脱粘界面的人工神经网络余弦变换谱特征识别[J]. 声学学报, 2001, 26(4): 349-354.
ZHANG Jiansheng, LI Mingxuan. Classification of de-bond in multi-layered steel-rubber adhesive structure with character of DCT spectra by artificial neural networks[J]. Acta Acustica, 2001, 26(4): 349-354.
- [2] 杨宾峰, 罗飞路, 张玉华, 等. 飞机多层结构中裂纹的定量检测及分类识别[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 63-67.
YANG Binfeng, LUO Feilu, ZHANG Yuhua, et al. Quantification and classification of cracks in aircraft multi-layered structure[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(2): 63-67.
- [3] 徐猛. 多层金属黏接结构黏接质量的超声检测[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2007.
XU Meng. Ultrasonic testing on bonding qualities of multi-layered metal-metal[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2007.
- [4] 安志武, 王小民, 毛捷, 等. 黏接界面的非线性弹簧模型及实验验证[J]. 声学学报, 2010, 35(5): 481-487.
AN Zhiwu, WANG Xiaomin, MAO Jie, et al. Theoretical and experimental research on nonlinear spring models of a bonding interface[J]. Acta Acustica, 2010, 35(5): 481-487.
- [5] BREKHOVISKIKH L, GODIN O. Acoustics of layered media[M]. Berlin: Springer Verlag, 1990.
- [6] THOMSON W. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium[J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21(2): 89-93.
- [7] CHRISTOPHE G, BERMARD H. Simultaneous measurement of speed, attenuation, thickness and density with reflected ultrasonic waves in plates[C]//Ultrasonics Symposium, 1994: 1219-1222.
- [8] HOSTEN B, CASTAINGS M. Surface impedance matrices to model the propagation in multilayered media[J]. Ultrasonics, 2003, 41(7): 501-507.
- [9] TAN E. Stiffness matrix method with improved efficiency for elastic wave propagation in layered anisotropic media[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 118(6): 3400-3403.
- [10] DWYER-JOYCE R, HANKINSON N. An ultrasonic technique for the measurement of elastic properties of soft surface coatings[J]. Tribology International, 2006, 39(4): 326-331.
- [11] CASTELLO D, LEIDERMAN R. Calculating the scattering from defective adhesion interfaces using minimization techniques[C]//International Conference on Engineering Optimization, June 1-5, Brazil, 2008: 1-8.
- [12] TATTERSALL H. The ultrasonic pulse-echo technique as applied to adhesion testing[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1973, 6(7): 819-832.
- [13] AKKER S, ARMAN J. Ultrasonic investigation on plane interfaces between polymers[J]. Ultrasonics, 1997, 35(4): 287-295.
- [14] KUSHIBIKI J, ARAKAWA M. Diffraction effects on bulk-wave ultrasonic velocity and attenuation measurements[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 108(2): 564-573.
- [15] CASTAINGS M, HOSTEN B, KUNDU T. Inversion of ultrasonic, plane-wave transmission data in composite plates to infer viscoelastic material properties[J]. NDT&E International, 2000, 33(6): 377-392.
- [16] LEIDERMAN R, BRAGA A, BARBONE P. Scattering of ultrasonic waves by defective adhesion interfaces in submerged laminated plates[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 118(4): 2154-2166.
- [17] TAN E. Generalized eigenproblem for acoustic wave propagation in periodically layered anisotropic media[J]. Journal of Computational Acoustics, 2008, 16(1): 1-10.
- [18] NORRIS A, SHUVALOV A. Wave impedance matrices for cylindrically anisotropic radially inhomogeneous

- elastic solids[J]. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 2010, 63(1): 1-39.
- [19] 吴斌, 邱兆国, 何存富. 基于弱黏接结构中谐振频率的研究[J]. 应用力学学报, 2011, 28(4): 412-415.
- WU Bin, QIU Zhaoguo, HE Cunfu. Research on the resonance frequency in weak bonded structures[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011, 28(4): 412-415.
- [20] QIU Zhaoguo, WU Bin, HE Cunfu. Research on adhesive layer depth and frequency in weak interface of bonded structures[J]. Insight, 2011, 53(6): 302-306.
- [21] QIU Zhaoguo, WU Bin, HE Cunfu. Ultrasonic beam steering using Neumann boundary condition in multi-physics[J]. Acta Mechanica Sinica, 2012, 28(1): 146-150.
- [22] ROSE J L. 固体中的超声波[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- 作者简介: 吴斌(通信作者), 男, 1962 年出生, 教授。主要研究方向为工程波动力学及无损检测新技术。
- E-mail: wb@bjut.edu.cn

第 2 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

碳热还原合成晶须增韧复合陶瓷刀具及磨损破损行为研究

作者: 崇学文

毕业学校: 山东大学

指导教师: 黄传真

针对研制高速切削加工钢件材料匹配陶瓷刀具的研究目的, 采用碳热还原合成晶须增韧复合陶瓷刀具材料的研究方法, 研制成功了 $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_{1-x})$ 系晶须粉末和 LTW 系列刀具材料。提出碳热还原合成晶须增韧复合陶瓷刀具材料的设计思想, 从碳热还原合成晶须、晶须生长机理、材料力学性能与显微结构、增韧补强机理、磨损破损机理等方面进行了深入系统的研究。为 $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_{1-x})$ 系晶须和 LTW 系列刀具的进一步开发与应用奠定了基础。

系统提出碳热还原合成晶须增韧复合陶瓷刀具材料的设计思想。从碳热还原合成碳氮化钛系晶须、复合陶瓷刀具材料体系、刀具材料粉末、刀具材料的设计等方面, 提出碳热还原合成晶须增韧复合陶瓷刀具材料的设计方案, 并根据 $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_{1-x})$ ($0 < x < 1$) 连续固溶体的特性, 首次提出碳热还原合成 $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_{1-x})$ 系晶须的设计方案。

研制成功了碳热还原合成 $\text{TiC}_{0.3}\text{N}_{0.7}$ 、 $\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$ 和 $\text{TiC}_{0.7}\text{N}_{0.3}$ 三种晶须粉末, 优化了晶须生长的助溶剂、催化剂和工艺参数。合成晶须原料的 C/Ti 比值与拟合成 $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_{1-x})$ 晶须的 x 值基本对应, 即 C/Ti 比值为 2.3/2.5/2.7 时, 所合成晶须分别为 $\text{TiC}_{0.3}\text{N}_{0.7}$ / $\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$ / $\text{TiC}_{0.7}\text{N}_{0.3}$ 。同时研究晶须杂质去除、晶须分散和复合材料粉末混料等工艺, 为碳氮化钛系晶须增韧复合陶瓷刀具材料粉末的制备奠定了基础。

系统研究碳热还原合成碳氮化钛系晶须的生长机理与理论。从晶须生长的基本过程、热力学原理、动力学原理、生长机理以及影响晶须生长品质的因素等方面, 建立和完善了碳热还原合成晶须的理论。首次提出碳氮化钛晶须的气-固生长机理, 分析碳热还原合成碳氮化钛晶须的气-液-固(VLS)与气-固(VS)生长机理。并从 NaCl 颗粒吸附、Ni-C 融滴结合、 TiO_2 逐级还原反应、二维晶核或基元形成以及 $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_{1-x})$ 晶须的生长与终止等阶段, 第一次建立碳氮化钛晶须的气-液-固、气-固微观生长机理模型。

研制成功了碳热还原合成晶须增韧复合陶瓷刀具材料 LTW310 ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})_p/\text{Ti}(\text{C}_{0.3}\text{N}_{0.7})_w$), 其力学性能为抗弯强度 752.5 MPa, 断裂韧性 8.83 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 硬度 21.9 GPa; 研制成功了碳热还原合成晶须增韧复合陶瓷刀具材料 LTW510 ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})_p/\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})_w$), 其力学性能为抗弯强度 812.9 MPa, 断裂韧性 7.64 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 硬度 20.0 GPa; 研制成功了碳热还原合成晶须增韧复合陶瓷刀具材料 LTW710 ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})_p/\text{Ti}(\text{C}_{0.7}\text{N}_{0.3})_w$), 其力学性能为抗弯强度 753.8 MPa, 断裂韧性 8.12 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 硬度 20.2 GPa。并研究了 LTW 系列复合陶瓷刀具的力学性能与显微结构之间关系。

研究碳热还原合成晶须增韧陶瓷刀具材料的增韧补强机理。研究表明, $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_{1-x})_w$ 与 $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_{1-x})_p$ 协同增韧补强为主要机制, $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_{1-x})_w$ 与 $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_{1-x})_p$ 单相增韧补强、纳米颗粒增韧补强以及其他形式的增韧补强等为辅助机制。从断裂能角度, 建立 $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_{1-x})_w$ 和 $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_{1-x})_p$ 协同增韧物理模型。

切削试验表明, 连续切削淬硬 40Cr 合金钢的切削速度达到 600 m/min, 断续切削淬硬 45 钢的切削速度达到 300 m/min。LTW 系列刀具与 LT55 刀具的磨损破损性能良好且相当。刀具磨损以前刀面月牙洼磨损和后刀面犁沟状磨损为主, 其破损以前刀面贝壳状剥落和刀刃碎断为主要失效形式。