

# 声阻探伤指示“异常”的等效梁动变位原理\*

The Principle of Equivalent Beam Dynamic Deflection Used  
for Explaining “Abnormal Indication” of Acaoustic Impedance Inspection

南京燃气轮机研究所 仲维畅

Zhong Weichang (Nanjing Gas Turbine Research Institute)

**[摘要]** 引入声阻探伤的等效梁概念,推导出工件的等效弹簧常数不仅是胶接结构几何尺寸和材料性质的函数,而且还是声阻探伤激励频率的函数,由此阐明了金属胶接蜂窝结构面板上小凹坑处声阻探伤“异常指示”的原因,以及遇到这种情况时改变激励频率有可能辨别是否脱粘的理论依据。

**关键词:** 声阻探伤 声阻探伤的等效梁 工件等效弹簧常数 动变位解释 金属胶接蜂窝结构

**[Abstract]** This paper introduces the conception of equivalent beam for acoustic impedance inspection (AII). It has been derived that the Equivalent Spring Constant (ESC) of adhesive bonding structure. The ESC is not only a function of geometric dimensions, but it is also a function of exciting frequency of AII rod. On the basis of it, the reason of “abnormal indication” of AII in small pit areas on the surface of metal honeycomb adhesive bonding structure has been explained and the theoretical basis, which may distinguish whether the bonding areas have degummed by means of changing the exciting frequency of AII rod, has been indicated.

**Keywords:** acoustic impedance inspection (AII) equivalent beam for AII equivalent spring constant (ESC) dynamic deflection explanation metal honeycomb adhesive bonding structure

由于引入了声阻探伤“等效圆板”新概念<sup>[1]</sup>,并根据声阻探伤的初级定性解释<sup>[2]</sup>和圆板的静变位理论<sup>[3~5]</sup>,阐明了金属胶接蜂窝结构面板上小凹坑处出现声阻探伤“指示异常”的原因。建议遇到这种情况时,首先应改变声阻探杆的激励频率 $\omega$ ,以便可能区分出小凹坑处蒙皮-蜂窝夹芯间的胶接质量是否良好。但仅根据该理论尚无法解释改变频率 $\omega$ 何以可能做到这一点,故必须再作进一步的探讨,以便从理论上回答这个问题。

在文献[1]中,将声阻探杆对工件的“影响区”置于以接触点为圆心的一个小范围以内,而将被探工件看作集中力 $P$ 作用下的一块圆板,边界条件介于固定边与铰支边之间,且 $P$ 的作用点即在等效圆板的圆心之上(见文献[1]图3)。

因圆板呈中心对称,故可将构成圆板的基素——等效圆板的直径当作梁去处理,这根梁就是声阻探伤的“等效梁”(见文献[1]图2)。

由机械振动理论<sup>[6]</sup>知:在脉动力 $P_0 \sin \omega t$  ( $P_0$ 为力幅, $\omega$ 为圆频率, $t$ 为时间)作用下,两端铰支梁的动态“等效弹簧常数”为:

$$K_{1\text{梁}} = \frac{A\gamma L}{2g} \left[ \sum_{j=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{j\pi}{2}}{p_j^2 - \omega^2} \left( 1 - \frac{\omega \sin p_j t}{p_j \sin \omega t} \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

$$p_j = \frac{j^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EJg}{A\gamma}} \quad (2)$$

其中: $A$ 是梁的横截面积;

$EJ$ 是梁的抗弯刚度( $E$ 是梁材的杨氏弹性模量);

$\gamma$ 是梁单位体积的重量;

$g$ 是重力加速度;

$p_j$ 是两端铰支梁的 $j$ 阶自由振动固有频率。

两端固定梁的“动态”等效弹簧常数为<sup>[6,7]</sup>:

$$K_{1\text{固}} = \frac{A\gamma L}{g} \left\{ \sum_{j=1,2,3,\dots}^{\infty} \frac{[(X1)_{x=L/2}]^2}{(a^2 K_j^4 - \omega^2)} \left[ 1 - \frac{\omega \sin(a K_j^2 t)}{a K_j^2 \sin \omega t} \right] \right\}^{-1} \quad (3)$$

其中:

\* 国家自然科学基金资助项目

$$(X_1)_{x=L/2} = \cosh \frac{K_1 L}{2} - \cos \frac{K_1 L}{2} - \alpha_1 \left( \sinh \frac{K_1 L}{2} - \sin \frac{K_1 L}{2} \right) \quad (4)$$

$$\alpha_1 = 0.9825, \alpha_2 = 1.0008, \alpha_3 \approx 1, \alpha_4 \approx 1 \dots \dots$$

$$a^2 = \frac{EJg}{A\gamma} \quad (5)$$

$$p_i = aK_i^2 \quad (6)$$

$p_i$  是两端固定梁的  $i$  阶自振动固有频率;  $K_i$  为方程 (7) 的  $i$  个根:

$$\cos K_i L \cdot \cosh K_i L = 1 \quad (7)$$

实际操作中, 声阻探伤时工件的“动态”等效弹簧常数  $K_i$  应满足:

$$K_{i\text{接}} < K_i < K_{i\text{固}} \quad (8)$$

而由 (1) 式和 (3) 式知:

$$K_i = \mathcal{K}(A, L, J, \gamma, E, \omega) \quad (9)$$

显然, 胶接良好区和脱粘缺陷区的  $A$ 、 $L$ 、 $J$ 、 $\gamma$ 、 $E$  一般都不相同, 故能根据  $K_i$  决定的声阻接收讯号辨别胶接质量的优劣。若用脚标  $b$ 、 $c$  分别表示工件中有小凹坑和脱粘缺陷两种情况下的相应量值, 那么当:

$$\begin{aligned} \mathcal{K}(A_b, L_b, J_b, \gamma_b, E_b, \omega) \\ = \mathcal{K}(A_c, L_c, J_c, \gamma_c, E_c, \omega) \end{aligned}$$

时, 即:  $K_{ib} = K_{ic}$  时, 必然就会出现声阻探伤指示“异常”的现象, 这时当然无法用这个频率的声阻探伤法来判断二者的区别。但由 (1)、(3) 和 (9) 各式可看出, 决定声阻探伤的工件等效弹簧常数  $K_i$  还是探杆激励频率  $\omega$  的函数。很明显, 如果  $\mathcal{K}(A_b, L_b, J_b, \gamma_b, E_b, \omega_1) = \mathcal{K}(A_c, L_c, J_c, \gamma_c, E_c, \omega_1)$ , 那么,  $\mathcal{K}(A_b, L_b, J_b, \gamma_b, E_b, \omega_2) \neq \mathcal{K}(A_c, L_c, J_c, \gamma_c, E_c, \omega_2)$ 。所以, 遇到胶接蜂窝结构面板上小凹坑区出现声阻探伤“低指示”时, 首先就应该改变探杆的激励频率  $\omega$  进行试验, 如果仍然无法区分, 只得选用其他方法试验, 如“换能器谐振探伤法”<sup>[8,9]</sup>等。

## 参考文献

1. 仲维畅. 材料工程, 1994, 3: 42~44
2. 仲维畅. 声阻探伤原理(论文集). 国营伟建机器厂, 1977
3. S. Timoshenko and S. Woinowsky. Theory of Plates and Shells. McGraw-Hill, N. Y. 1959
4. Д. В. Вайнберг, Е. Д. Вайнберг. Пластины Диски Балки-Стенки (Прочность, Устойчивость и Колебания). Киев Госстройиздат УССР, 1959

5. 仲维畅. 声阻探伤原理(论文集). 国营伟建机器厂, 1978.
6. 提摩盛科. 机械振动学. 翁心桐, 徐华舫译. 北京: 机械工业出版社, 1958. 7
7. 仲维畅. 第二届全国无损检测新技术学术会议论文集. 1993. 122~124
8. 国营伟建机器厂超声探伤组. 航空材料, 1977, 1: 61~63
9. 仲维畅. 材料工程, 1992, 3: 37~40

\* \* \* \* \*

## 新型树脂干燥机

成形用的塑料如果含有水分, 在成形加工时水分就会变成加压蒸气, 在成形品表面, 形成银条状, 特别是成形强度或外观要求高的工程塑料等时, 为了防止这一缺陷, 干燥机是不可缺少的设备。

日本高木产业株式会社是生产住宅用气体机器的综合工厂。这次开发出了塑料成形不可缺少的“真空连续式脱湿干燥机”。上置型和下置型 2 种机型开始销售。

过去的树脂干燥机, 大致分为 2 种。一种是在大气压下, 采用水分吸着剂, 使热风循环的除湿干燥机, 和仅输送热风的料斗干燥机。另一种是在真空状态加热干燥的间歇式真空干燥机。第一种干燥机时间长, 生产成本低, 随着时间的推移, 干燥能力下降。后一种, 虽然缩短了干燥时间, 但不能向成形机连续供给。

真空连续式脱湿干燥机, 解决了这些课题。该机采用燃烧器具培养的热应用技术与陶瓷技术及真空技术, 每小时可干燥 5 公斤的树脂, 可以全自动连续供给。

例如, 尼龙 6 的干燥时间, 从含水率 0.19% 干燥到可供成形的含水率 0.1% 以下约需 1 小时, 约是目前市场上销售的除湿干燥机的 1/3。这是该公司独特的真空加热干燥方式, 它的主要原理是 PTC 陶瓷加热器在真空中运转的方式。另外, 这种方式因为是真空, 所以, 成形材料很少因氧化而变成黄色。而且实现了只需很少热量便可干燥的生产环境。

该机器的工艺规程, 是用管吸引成形材料, 输送到主体上部的料斗罐内, 罐装满后, 真空泵开始工作。然后在所定的时间里进行干燥, 干燥完毕后输送到备料罐内。

最后, 干燥好的树脂, 上置型的自然落下到成形机, 下置型的用螺旋桨输送到安装在成形机内的料斗罐内。

(杨变英)