

声振动无损检测材料强度的方法及其检测机理

南京燃气轮机研究所 仲维畅

本文简介了几种声振动无损检测材料强度的方法,阐明它们所检测的物理量实际上都是材料的弹性模量,并引用硅橡胶实验予以验证,进而推论:对于 σ_0 和E之间呈“正比”或“单调”关系的材料都可用声振动法(或其他测E方法)来无损检测其强度。

关键词: 声振动, 无损检测, 材料强度

Acoustic Vibration Methods for Non-Destructive Testing of Material's Strength and their Testing Mechanism

Zhong Weichang

(Nanjing Gas Turbine Research Institute)

This paper introduces briefly several types of acoustic vibration methods for NDT of material's strength. It explains that all physical quantities examined by these methods are in fact the Young's modulus of material. It quotes the experimental result of silicone rubber to verify this idea, and it further deduces that for material appearing "proportional" or "monotonic" relationship between σ_0 and E, it is available to non-destructively test its strength by acoustic vibration methods (or other techniques for testing E).

Keywords: acoustic vibration, non-destructive testing, material's strength

方法与问题

材料强度乃工程设计、施工、检验、运行、保养的依据,对机器、结构长期使用的可靠性与超龄服役的可能性意义就更加重大。但材料强度一向以破坏试样来测定,这对运行中的零部件、受过冲击的零部件、超载运行过的机器、结构等均无法进行,因而影响到它们的安全使用和经济效益,故必须研究、发展材料强度的无损检测新方法。另外还有一些材料的强度取决于它们在具体机件、结构中的成形工艺条件和自然时效环境,因而实验室中试件的破坏性试验并不能反映具体工件、结构中材料的真实强度,所以也必须发展能在工件、结构上进行材料无损检测的新方法。近几十年来世界各国在这方面进行了大量的试验研究,取得了不少可喜的进展,最令人瞩目的首推声振动检测法,其中包括声阻抗法、声谐振法和声传播法等。

为了探测金属胶接结构中的“零强度”区(胶层中的气泡、缺胶、脱粘等),前苏联于1959~1960年间发展了“声阻抗探伤法”^[1]。我们1964年亦研制出了“松花江—Ⅱ型声阻探伤仪”和“松花江—Ⅳ型声阻探伤仪”^[2]。

荷兰Fokker(弗克)皇家飞机工厂60年代初研制出了用换能器谐振法的“Fokker胶接检验仪”,可以无损检测金属胶接结构中胶层的“内聚强度”^[3]。1966年我们即

研制出了类似的设备——“松花江—Ⅹ型胶接质量检查仪”^[4],从1972年起6年间无损检测了7个型号飞机、直升机上60余种粘接结构中4万多个胶接件,取得了良好的效果。

各国轮机行业中普遍使用的“叶片测频检验法”就是一种声振动“工件谐振”技术,用以判定叶片上有无疲劳裂纹——局部“零强度区”,60年代初此方法已运用到无损测定球墨铸铁件的强度上。

此外用“声传播法”测定材料的声速时,发现材料中声速与其强度有紧密的对应关系。

虽然上述各种方法都可无损检测材料的强度,有的还获得了巨大的工程实效,但总的看来仍未能尽如人意:检测的精度不够高,适用的材料尚不普遍,进展的速度更不够快。造成这个局面的原因虽然很多,而最主要的还在于对声振动无损检测材料强度的物理机制缺乏应有的认识,因在所有上列各种方法的文献、资料中均未说出检测的到底是什么物理量。既然尚未搞清楚检测的物理本质,要想提高检测的精度、拓宽应用的范围显然是比较困难的。

理论的探索

1966年作者在研究“换能器谐振法”原理时发现:

“Fokker 胶接检验仪”检测的是“换能器—工件”系统的等效弹性模量^[5]；对于作用力很大、持续时间又极短的强度试验来说，固化胶层的破坏呈脆性，即断裂应变 ϵ_b 极小、且与强度极限 σ_b 成正比（图 1）：

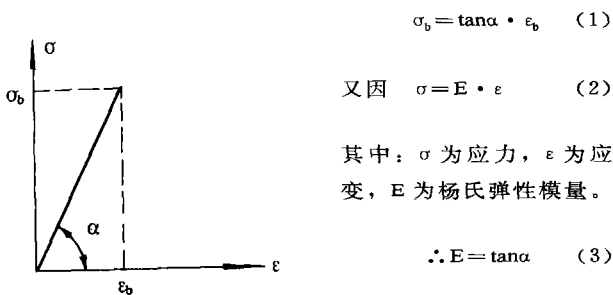


图1 脆性材料（弹性体）的应力-应变图

同种胶层的断裂应变 ϵ_b 大致相同，如图 2 所示：
 $\epsilon_{b1} \approx \epsilon_{b2}$

$$\therefore \epsilon_{b1} = \sigma_{b1} / E_1, \epsilon_{b2} = \sigma_{b2} / E_2$$

$$\therefore \sigma_b \propto E$$
 (4)

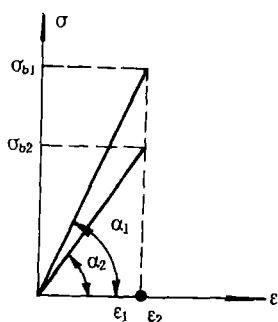


图2 同种胶层的断裂应变

即同种胶粘剂固化后的强度极限与其弹性模量成正比。这一论断已为 14 年后（1980 年）作者看到的 A. M. Bueche 和 J. P. Berry 硅橡胶实验所证明（图 3—转引自文献 [6]，图 12.28）。

为了探索声振动法无损检测一般工程材料的可能性，1975 年作者考察了部分轻合金的高温力学性能^[7]，发现铝合金可分为三类：

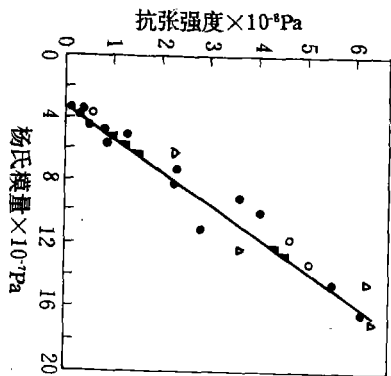


图3 加有各种填料的一系列硅橡胶的抗张强度与杨氏模量的关系（引自 Bueche 和 Berry）
○氧化硅；●燃烧法氧化硅；△经处理后的氧化硅；■商品填料 Carrara

（1）强度极限 σ_b 与弹性模量 E （或屈服极限 $\sigma_{0.2}$ ）成正比，如图 4 所示。

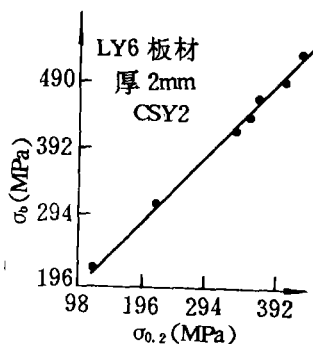


图4 第1类材料的力学性能

（2） σ_b 与 E （或 $\sigma_{0.2}$ ）呈单调函数关系，如图 5 所示。

（3） σ_b 与 $\sigma_{0.2}$ （或 $\sigma_{0.2}$ 与 E ）间呈多值函数关系，如图 6 所示。

从而可以推知：只要材料的 σ_b 与 E 间具有单调关系（成正比为其特例），就可使用“换能器谐振法”来无损检测其强度，且检测的方法也不仅限于“换能器谐振法”这一种，理论上任何测 E 方法都可使用。这个推论也已为十余年后作者才看到的“声速法”和“工件谐振法”无损检测球墨铸铁强度所证实。

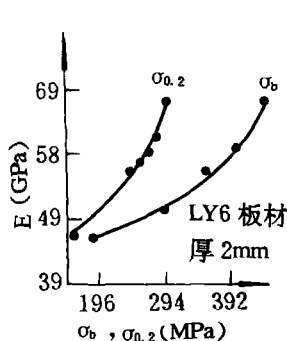


图5 第2类材料的力学性能

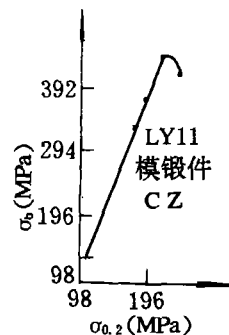


图6 第3类材料的力学性能

几点新认识

1. 材料按 σ_b - E 关系分类的理论依据

由现代材料科学可知，各种材料根据其应力-应变曲线可分为下列五种^[8]：

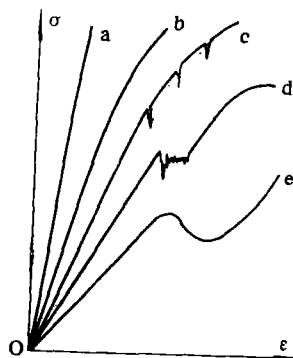


图7 五种不同材料的 σ - ϵ 图

I 弹性体：真实应力-应变曲线为一直线（图 7a），即上述第 1 类材料。

II 弹性-均匀塑性体（图 7b）：由于同种材料的断裂应变 ϵ_b 相差不大，故弹性模量 E （ $= \tan \alpha$ ）高者其极限强度 σ_b 也相应较大（图 8），反之亦然，所以 σ_b 与 E 呈单调函数关系，此即上述第 2 类材料。

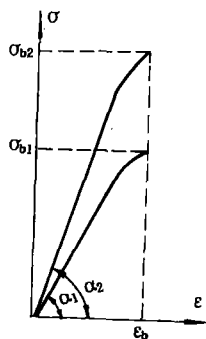


图8 弹性-均匀塑性体的应力-应变曲线

Ⅲ 弹性-不均匀塑性体：在弹性变形之后的是不均匀的塑性流动（图7c）。

Ⅳ 弹性-不均匀塑性-均匀塑性体：在初始的弹性段和最后的均匀塑性流动之间有一窄段不均匀的塑性流动（图7d）。

Ⅴ 弹性-不均匀塑性-均匀塑性体：某些结晶态的聚合物会呈现出图7e所示曲线。显而易见，第Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ种材料的 σ_0 与 E 之间都会出现多值函数关系，亦即它们都对应于上述第3类材料。

2. 同一材料具有不同的 σ_0 - E 关系

近来作者发现，美国镍基高温合金^[9]的 σ_0 与 E 间关系不仅随其合金成分（牌号）而异，且同一牌号的合金

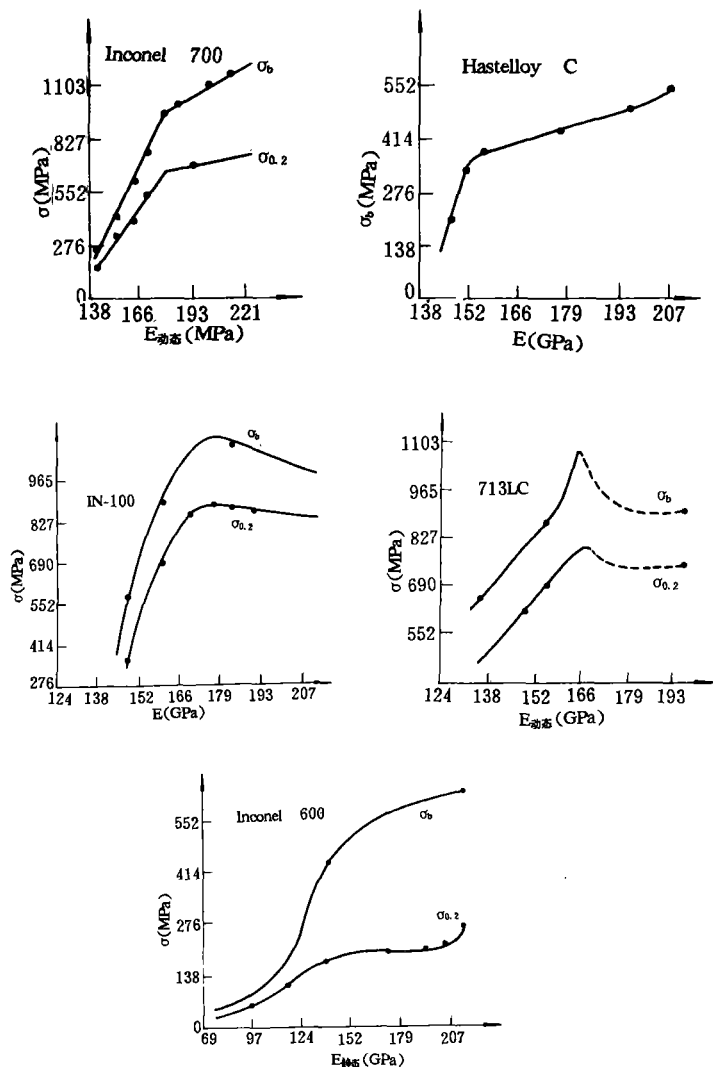


图9 几种典型镍基高温合金的 σ_0 - E 曲线 (σ_0 —拉伸强度; $\sigma_{0.2}$ —拉伸屈服强度)

注：a、b...下面是合金牌号

在不同的温度范围内还会呈现出不同的正比关系和单调关系，如图9所示。从而可以肯定，对这类金属也可由 E 的测定来推知其 σ_0 （除9c、d外），而对于 E 的测量则早已具备了很多种现成的声振动方法。

3. 由 E 判断 σ_0 困难的一种解决办法——“声速法”的理论依据

因 E 取决于原子间和晶粒间的作用力，且随原子和晶粒间结合键的形式而异，对微观结构的变化相对说来并不敏感，故热处理和合金元素的微量增加会使合金钢的强度大幅度增加，但其弹性模量却并没有多大的改变。这就给由 E 测 σ_0 带来了技术上的困难，即 σ_0 - E 图上的实验点都密集于 E 的极小范围之内（图10）。为了克服这一困难，可用 \sqrt{E} 来代替 E ，从而将 σ_0 - E 图中的 E “拉开”（图11）。众所周知，材料的声速 v 恰与 \sqrt{E} 成正比：

$$v_D = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

$$v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (6)$$

$$v_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (7)$$

其中 v_D 为杆状介质中的拉伸波速；

v_l 为无限介质中的纯纵波速；

v_t 为无限介质中的纯横波速；

ρ 为介质材料的密度；

μ 为介质材料的泊松比。

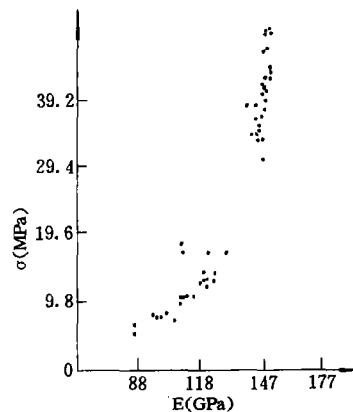


图10 球墨铸铁的 σ_0 - E 关系图

所以图11中的横坐标也可以是声速，这就是“声速法”无损检测材料强度的理论依据和“声速法”在这个领域内最先被人们发现和最早被推广使用的原因。

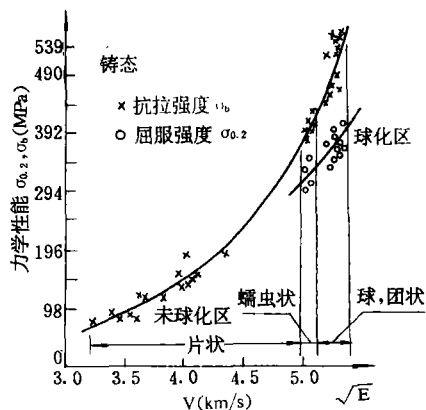


图 11 球墨铸铁的强度-声速
(\sqrt{E}) 关系图 (引自文献 [10])

1. 材料泊松比与弹(刚)性模量之间的关系

作者近来发现美国镍基高温合金的泊松比与弹(刚)性模量间有着一定的关系(图 12)[9], 而同一材料不同热处理后的密度变化并不大, 所以由式(5)~(7)知: “声速法”检测的物理量实质上仍然是弹性模量。

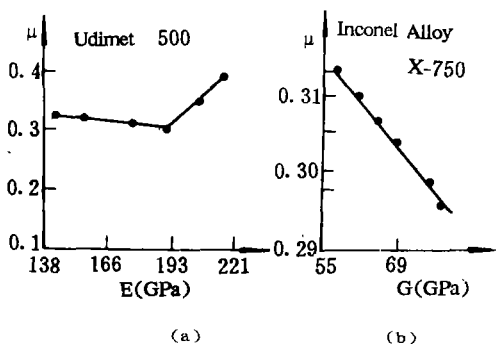


图 12 镍基高温合金的弹(刚)性模量和泊松比

5. 克服由 \$E\$ 判断 \$\sigma_0\$ 困难的工程方法

虽然 \$E\$ 对 \$\sigma_0\$ 的变化不够敏感, 但幸运的是工程实践中最重要的还是想知道工件或结构的强度是否已接近危险的临界值, 而对强度本身的具体数值并不太在意, 所以只要能无损地预测出 \$E\$ (或 \$v\$) 在某个“门槛值”之上也就放心了, 这却不难做到, 如文献 [10] 中的球墨铸铁, 声速在 5000m/s 以上者即为合格 (图 11)。

6. 实验值离散的原因和避免

由于胶层的成分和性质受固化温度、压力影响的随机性, 所以由测量胶层等效弹性模量而推得的强度极限值会有较大的起伏 (图 13)[4]; 同样, 用弹性模量的观点也极易解释无损检测混凝土强度值的离散原因。从而可以由原理上设法避免检测的误差, 以提高预估的准确性。

总之, 随着对声振动检测法物理本质认识的深化以及材料弹性模量检测手段和方法的改进, 声振动法必定能够无损检测更多工程材料的强度, 达到更高的预估精

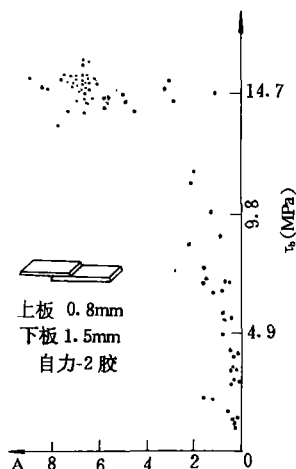


图 13 “松花江—K 型胶接质量检测仪”测得的“自力-胶”抗剪强度

确度, 从而节约大量的材料、劳力、工时、能源, 并提高产品的质量、效能和寿命。例如作者从理论上纠正了 Fokker 胶检仪的校零方法后, 使“松花法—K 型胶接质量检测仪”的预测精度大为提高 [4,5]。

参考文献

1. Ю. В. Ланге, Заводская лаборатория, 1959. 7, СТР. 833
2. 国营伟建机器厂中心试验室超声探伤组, 声阻探伤方法的试验与声阻探伤仪的试制, 1964. 12
3. Aircraft Production, №. 2 1960, P75
4. 国营伟建机器厂超声探伤组, 航空材料, №. 1, 1977, P61
5. 国营伟建机器厂, 胶粘强度无损检测原理 (论文集) (一) 1973. 8. (二) 1976. 12. (三) 1977. 10
6. [英] I. M. Ward 著, 中国科学院化学研究所高聚物力学性能组译, 固体高聚物的力学性能, 科学出版社, 1980. 2
7. 航空材料手册编写组, 航空材料手册 (上), 国防工业出版社, 1975. 2
8. [美] R. W. 赫次伯格著, 王克仁等译: 工程材料的变形与断裂力学, 机械工业出版社, 1982. 9
9. 冶军编, 美国镍基高温合金, 科学出版社, 1978. 4
10. 夏仁凯等, 无损检测, №. 2, 1983, P16

铝合金铸件的热等静压处理

这种“高温气体静压”处理是将铝合金铸件放置在气体加压箱内加热至接近固相线温度和向气体压力箱内泵入惰性气体 (氩) 而全向压缩。这时气体压力超过材料屈服极限数倍。对 AL19 和 AL119 铝合金铸件在原始状态 (T7) 和高温气体静压+T7 状态组织的对比研究表明, 经过处理后 AL19 合金中的疏松全部消失, 这是因为贯通至表面的氧化膜和气孔被除掉。铸造组织中的金属间化合物成分产生球化, 剩余相部分溶解而使枝晶凝聚, 形成部分或完全再结晶和更完善的晶内亚结构。

AL119 合金铸件经处理后虽然也消除了孤立气孔, 但与表面显微裂纹贯通的显微疏松并未消失。这可能与气孔中充有氢气有关。在批量研究的基础上制订的处理规范为 $t=500^{\circ}\text{C}$, $P=60\text{MPa}$, $\tau=120\text{min}$ 和 $t=500^{\circ}\text{C}$, $P=150\text{MPa}$, $\tau=20\text{min}$ 。处理前原始铸件的气孔率按 ВИАМ 标准评级图为 3~4 级, 处理后气孔全部消失, 两种规范等效。

(郝应其)