

无损检测模糊理论及其应用

北京航空航天大学 傅惠民* 刘登第

【摘要】 断裂力学在工程中的应用, 首先必须准确知道结构材料中的缺陷尺寸, 但是由于无损检测的模糊不确定性导致检测出的缺陷尺寸(检测尺寸)与缺陷真实尺寸之间存在较大误差。本文对此进行了研究, 建立了无损检测模糊理论, 提出了缺陷尺寸与其检测尺寸之间的数学关系式, 得到了在指定检测尺寸下的缺陷真实尺寸分布规律, 给出了缺陷尺寸模糊分布、模糊区间估计和超标缺陷的隶属度, 从而成功地解决了无损检测对材料缺陷进行有效的定量分析这一难题。基于该无损检测模糊理论, 还将形成更加切合工程实际的模糊寿命预测、模糊断裂准则、模糊损伤容限设计、压力容器的模糊评定等一系列新的理论和方法。

主题词: 无损检验 模糊性 可靠性 定量分析 信号分析

分类号: TB 114. 3 TP 274

1 引言

无损检测中存在两种类型的不确定性, 一种是随机的不确定性, 一种是模糊的不确定性。这两种不确定性都受材料、结构形状和尺寸、探伤设备、检测环境、缺陷位置和取向、检测人员的技术水平和心理状态等诸多因素的影响。随机的不确定性是造成缺陷漏检的主要原因, 无损检测可靠性着重研究解决这一问题, 其成果已广泛用于工程实际^[1~5]。而模糊的不确定性是造成无法准确测定结构材料中缺陷尺寸的主要原因, 导致缺陷真实尺寸与其检测尺寸之间存在较大误差。而且这还不能用传统的随机测量误差理论来解决, 因为无损检测的模糊性与随机测量误差有着本质的区别, 随机测量误差的一个显著特点是: 在测量仪器校准后, 对物体尺寸进行多次重复的独立测量, 其平均测量值与物体的真实尺寸一致。而在无损检测中, 即使检测仪器校准后, 对缺陷尺寸进行多次重复的独立检测, 其平均检测值与缺陷的真实尺寸并不相等, 这种现象是无损检测模糊性的一个显著特点。正因为如此, 对于随机的测量误差, 可以通过多次重复的独立测量取平均测量值而将真实值测得很准; 但是无损检测的模糊性就不那么容易解决, 它不能通过多次重复的独立检测, 简单地取平均检测值得到缺陷真实尺寸。而且在无损检测中随机测量误差和模糊性相比是很小的, 可以忽略不计^[1, 4]。因此, 无损检测的模糊性问题不解决将严重影响需要确切知道缺陷大小的断裂力学、损伤力学、疲劳、损伤容限设计等在工程实际中的应用。国际上曾对这一问题进行了大量研究, 但是, 由于一直无法通过试验求得在给定检测尺寸下的缺陷真实尺寸分布, 所以无损检测的模糊性问题始终没有得到解决, 从而导致无法对缺陷尺寸进行有效的定量分析^[1, 5]。经过多年努力, 本文成功地给出了指定检测尺寸

下的缺陷真实尺寸分布规律,提出了计算其隶属度的方法,建立了无损检测模糊理论,根据该项理论,可以通过无损检测对结构材料中的缺陷尺寸准确地进行定量分析。

2 给定检测尺寸下的缺陷真实尺寸分布

通过对大量无损检测数据的分析,我们发现缺陷尺寸 a 与其检测尺寸 a' 之间存在如下关系式

$$Q(a) = \lambda_0 + \lambda_1 Q(a') + \lambda_2 \Phi(a') + \cdots + \lambda_m \Phi(a') + \epsilon \quad \epsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

式中 $Q(\cdot)$ 为实函数; $\lambda_i, i = 0, 1, 2, \cdots, m$ 和 σ^2 均为待定参数,它们可由回归分析方法确定。这里缺陷尺寸是广义的,可以是缺陷的长度、宽度、高度、面积、体积以及它们的组合(当量尺寸)。式(1)的物理意义是对应于检测尺寸 a' , 缺陷尺寸的函数 $Q(a)$ 遵循均值为 $\mu(a') = \lambda_0 + \lambda_1 Q(a') + \lambda_2 \Phi(a') + \cdots + \lambda_m \Phi(a')$ 和方差为 σ^2 的正态分布,即

$$Q(a) \sim N(\mu(a'), \sigma^2) \quad (2)$$

也就是说,满足式(2)的缺陷 a 在无损检测中都有可能产生 a' 这个检测值。

在工程中,最常见的是 $Q(a) = \ln a, Q(a') = \ln a', m = 1$ 的情况,此时式(1)成为

$$\ln a = \lambda_0 + \lambda_1 \ln a' + \epsilon \quad \epsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (3)$$

为了便于叙述,下面仅对式(3)情况进行讨论,但所有理论和方法对式(1)情况均成立。

首先,确定待定参数 λ_0, λ_1 和 σ^2 。设对尺寸为 $a_1, a_2, \cdots, a_n$ 的 n 个缺陷进行独立无损检测,得到 n 个检测尺寸 $a'_1, a'_2, \cdots, a'_n$, 由回归分析可知, λ_0 和 λ_1 的估计量 $\hat{\lambda}_0$ 和 $\hat{\lambda}_1$ 由下面两式给出

$$\hat{\lambda}_0 = \overline{\ln a} - \hat{\lambda}_1 \overline{\ln a'} \quad (4)$$

$$\hat{\lambda}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (\ln a_i - \overline{\ln a})(\ln a'_i - \overline{\ln a'})}{\sum_{i=1}^n (\ln a'_i - \overline{\ln a'})^2} \quad (5)$$

式中

$$\overline{\ln a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln a_i \quad (6)$$

$$\overline{\ln a'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln a'_i \quad (7)$$

其回归方程

$$\ln \tilde{a} = \hat{\lambda}_0 + \hat{\lambda}_1 \ln a' \quad (8)$$

并且

$$\ln \tilde{a} = \hat{\lambda}_0 + \hat{\lambda}_1 \ln a' \sim N\left[\lambda_0 + \lambda_1 \ln a', \frac{1}{n} \sigma^2\right] \quad (9)$$

式中

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{n} + \frac{(\ln a' - \overline{\ln a'})^2}{\sum_{i=1}^n (\ln a'_i - \overline{\ln a'})^2} \quad (10)$$

方差 σ^2 的估计量 $\hat{\sigma}^2$ 由下式给出

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\ln a_i - \hat{\lambda}_0 - \hat{\lambda}_1 \ln a'_i)^2 \quad (11)$$

令 $\nu = n-2$, 则有

$$\frac{\nu \hat{\sigma}^2}{\sigma^2} \sim \chi^2(\nu) \quad (12)$$

3 缺陷隶属度和模糊区间估计

3.1 缺陷模糊分布

若对材料中某缺陷进行一次无损检测,得到检测尺寸 $\hat{a}$, 那么根据式(2)、式(8)和式(11)

可知该缺陷尺寸对区间 $(0, a)$ 的隶属度由下式给出

$$F(a|\hat{a}) = \Phi[(\ln a - \hat{\lambda}_0 - \hat{\lambda}_1 \ln \hat{a})/\hat{\sigma}] \quad (13)$$

而该缺陷尺寸对区间 $[a, +\infty)$ 的隶属度为

$$P(a|\hat{a}) = 1 - F(a|\hat{a}) \quad (14)$$

式中 $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; $F(a|\hat{a})$ 亦被定义为该缺陷尺寸在其检测尺寸为 $\hat{a}$ 时的模糊分布。

由于 λ_0 , λ_1 和 σ 的估计量 $\hat{\lambda}_0$, $\hat{\lambda}_1$ 和 $\hat{\sigma}$ 是通过样本求得的, 所以计算隶属度时还必须引入置信度。下面将对此进行讨论。

3.2 缺陷隶属度估计

若将上述缺陷的检测尺寸 $\hat{a}$ 代入式(8)和式(11), 可分别求得其对数均值和对数标准差的估计量 $\ln \tilde{a} = \hat{\lambda}_0 + \hat{\lambda}_1 \ln \hat{a}$ 和 $\hat{\sigma}$, 那么根据文献[6]可知, 该缺陷对区间 $(0, a_0)$ 隶属度的置信度为 γ 的单侧置信下限 $F_L(a_0|\hat{a}) = \Phi(u_{PL})$ 和上限 $F_U(a_0|\hat{a}) = \Phi(u_{PU})$ 分别为

$$u_{PL} = \frac{\ln a_0 - \ln \tilde{a}}{\hat{\sigma}} \sqrt{\frac{2\nu-2}{2\nu-1}} - u_\gamma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\ln a_0 - \ln \tilde{a})^2 (2\nu-2)}{\hat{\sigma}_w^2 (2\nu-1)}} \quad (15)$$

$$u_{PU} = \frac{\ln a_0 - \ln \tilde{a}}{\hat{\sigma}} \sqrt{\frac{2\nu-2}{2\nu-1}} + u_\gamma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\ln a_0 - \ln \tilde{a})^2 (2\nu-2)}{\hat{\sigma}_w^2 (2\nu-1)}} \quad (16)$$

$$w = 2 \left[\nu + u_\gamma - c - \frac{1}{\sqrt{\nu + u_\gamma - c}} \right] \quad (17)$$

式中 c 值可由文献[6]查得。由于当 $\nu \geq 8$ 时, c 值对 u_{PU} 和 u_{PL} 的影响已很小, 所以, 此时对于 u_{PU} (或 u_{PL}) ≤ 0 , 可取 $c = 0.64$; 对于 u_{PU} (或 u_{PL}) > 0 , 可取 $c = 1.24u_\gamma$ 。

由式(17)可知, 式(16)和式(15)中 w 与 c 有关, 而 c 与 u_{PU} 和 u_{PL} 有关, 所以, 根据式(16)或式(15)计算 u_{PU} (或 u_{PL}) 时, 需经过迭代。具体步骤如下: ①首先取 $c = 0.64$, 由式(16)或式(15)求得 u_{PU} (或 u_{PL}) 的估计值 u_{PU} (或 u_{PL}); ②再将 u_{PU} (或 u_{PL}) 相对应的 c 值代入式(16)或式(15), 即可求得 u_{PU} (或 u_{PL})。

同理, 该缺陷对区间 $[a_0, +\infty)$ 隶属度的置信度为 γ 的单侧置信上、下限分别为

$$P_U(a_0|\hat{a}) = 1 - \Phi(u_{PL}) \quad (18)$$

$$P_L(a_0|\hat{a}) = 1 - \Phi(u_{PU}) \quad (19)$$

式中 u_{PL} 和 u_{PU} 由式(15)和式(16)给出。当 a_0 取为临界缺陷尺寸时, 则式(18)和式(19)将分别给出该缺陷属于超标缺陷隶属度的单侧置信上、下限。

在工程上, 采用 $F_L(a_0|\hat{a})$ 和 $P_U(a_0|\hat{a})$ 可以有效地避免将超标缺陷误判为非超标缺陷; 而采用 $F_U(a_0|\hat{a})$ 和 $P_L(a_0|\hat{a})$ 则可以防止将非超标缺陷误判为超标缺陷。如果要两者兼有, 则必须在回归分析求 λ_0 , λ_1 和 σ 时, 通过增加对各缺陷的独立检测次数来加大样本量 n , 这样可以明显减小置信区间长度 $F_U(a_0|\hat{a}) - F_L(a_0|\hat{a})$ 和 $P_U(a_0|\hat{a}) - P_L(a_0|\hat{a})$ 。

3.3 双侧模糊区间估计

$$\text{若令:} \quad \ln a_L = \ln \tilde{a} - k\hat{\sigma} \quad (20)$$

$$\ln a_U = \ln \tilde{a} + k\hat{\sigma} \quad (21)$$

式中 $\ln \tilde{a} = \hat{\lambda}_0 + \hat{\lambda}_1 \ln \hat{a}$; k 为二维双侧容限系数, 当 $\nu \geq 2$ 时, 可由下式计算^[6]

$$k = u_{(1+p)/2} \left(1 - \frac{2}{9w} - u_y \sqrt{\frac{2}{9w}} \right)^{-3/2} \sqrt{1 + \frac{1}{n' + u_{(1+p)/2} - \frac{2}{5}u_p - 1}} \quad (22)$$

$$w = v + \frac{1}{2}u_y - 2\gamma + \frac{3}{5} + \frac{1}{\sqrt{v + \frac{1}{2}u_y - 2\gamma + \frac{3}{5}}} \quad (23)$$

则在置信度 γ 下, 该缺陷对区间 $[a_L, a_U]$ 的隶属度为 P 。

4 多个无损检测源的模糊数据融合方法

4.1 两个无损检测源数据的模糊分布融合

若对同一缺陷进行了两次独立的无损检测, 测得其尺寸分别为 $\hat{a}_1$ 和 $\hat{a}_2$, 代入式(13)可分别求得该缺陷尺寸的模糊分布 $F(a|\hat{a}_1)$ 和 $F(a|\hat{a}_2)$ 为

$$F(a|\hat{a}_1) = \Phi[(\ln a - \hat{\lambda}_0 - \hat{\lambda}_1 \ln \hat{a}_1)/\hat{\sigma}] \quad (24)$$

$$F(a|\hat{a}_2) = \Phi[(\ln a - \hat{\lambda}_0 - \hat{\lambda}_1 \ln \hat{a}_2)/\hat{\sigma}] \quad (25)$$

那么根据 Dempster-Shafer 数据融合方法^[7,8] (简称 D-S 法)可知, 将 $F(a|\hat{a}_1)$ 和 $F(a|\hat{a}_2)$ 融合后, 可以得到该缺陷对区间 $(0, a)$ 的隶属度为

$$F(a|\hat{a}_1, \hat{a}_2) = \frac{F(a|\hat{a}_1)F(a|\hat{a}_2)}{1 - F(a|\hat{a}_1) - F(a|\hat{a}_2) + 2F(a|\hat{a}_1)F(a|\hat{a}_2)} \quad (26)$$

如果 $F(a|\hat{a}_1)$ 和 $F(a|\hat{a}_2)$ 是来自不同类型的无损检测仪器的检测结果, 那么式(26)仍然成立, 不过计算 $F(a|\hat{a}_1)$ 和 $F(a|\hat{a}_2)$ 时所用的 $\hat{\lambda}_0$, $\hat{\lambda}_1$ 和 $\hat{\sigma}$ 将与各自的无损检测仪器有关。

4.2 两个无损检测源数据的隶属度融合

条件与 4.1 相同, 首先将检测尺寸 $\hat{a}_1$ 和 $\hat{a}_2$ 代入式(15), 可分别求得 $F_L(a_0|\hat{a}_1)$ 和 $F_L(a_0|\hat{a}_2)$, 然后通过 D-S 融合方法即可求得该缺陷对区间 $(0, a_0)$ 隶属度的单侧置信下限为

$$F_L(a_0|\hat{a}_1, \hat{a}_2) = \frac{F_L(a_0|\hat{a}_1)F_L(a_0|\hat{a}_2)}{1 - F_L(a_0|\hat{a}_1) - F_L(a_0|\hat{a}_2) + 2F_L(a_0|\hat{a}_1)F_L(a_0|\hat{a}_2)} \quad (27)$$

同理, 由式(18)分别求得 $P_U(a_0|\hat{a}_1)$ 和 $P_U(a_0|\hat{a}_2)$, 再通过 D-S 融合方法可求得该缺陷对区间 $[a_0, +\infty)$ 隶属度的单侧置信上限为

$$P_U(a_0|\hat{a}_1, \hat{a}_2) = \frac{P_U(a_0|\hat{a}_1)P_U(a_0|\hat{a}_2)}{1 - P_U(a_0|\hat{a}_1) - P_U(a_0|\hat{a}_2) + 2P_U(a_0|\hat{a}_1)P_U(a_0|\hat{a}_2)} \quad (28)$$

如果 $F_L(a_0|\hat{a}_1)$ 和 $F_L(a_0|\hat{a}_2)$ [或 $P_U(a_0|\hat{a}_1)$ 和 $P_U(a_0|\hat{a}_2)$] 是来自不同类型的无损检测仪器的检测结果, 那么式(27)或式(28)仍然成立, 但计算 $F_L(a_0|\hat{a}_1)$ 和 $F_L(a_0|\hat{a}_2)$ [或 $P_U(a_0|\hat{a}_1)$ 和 $P_U(a_0|\hat{a}_2)$] 时应分别采用与各自无损检测仪器相关的式(8)和式(11)。

对于来自三个或三个以上无损检测源的数据, 可以按照上述 4.1 和 4.2 方法逐个进行模糊数据融合。

5 实例分析

实例 1 文献[4]对某焊缝进行了 X 射线检测, 测得各裂纹长度 a_i' , 再解剖试件后用金相法测出这些裂纹的真实长度 a_i , $i = 1, 2, \dots, 18$ 。并将它们列于表 1。

表 1 焊缝 X 射线检测与金相法测量结果(单位: mm)

序号 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
裂纹真实长度 a_i	0.250	0.280	0.375	0.395	0.412	0.500	0.587	0.628	0.692
裂纹检测长度 a_i'	0.23	0.25	0.25	0.31	0.66	0.44	0.34	0.52	0.50

序号 i	10	11	12	13	14	15	16	17	18
裂纹真实长度 a_i	0.797	0.859	0.921	0.922	1.021	1.296	1.406	1.790	3.343
裂纹检测长度 a_i'	0.67	0.51	0.72	0.75	0.86	1.00	1.30	1.05	2.50

根据表 1 中数据,由本文方法可求得裂纹真实长度和其检测长度之间的回归方程

$$\ln \tilde{a} = 0.2190 + 0.9896 \ln a' \quad (29)$$

和标准差估计量 $\hat{\sigma} = 0.2358$ 。

设某一同类型焊缝上有 q 条裂纹,记为 $l_i, i = 1, 2, \cdots, q$, 它们组成了论域 U 。若采用 X 射线检测得到各裂纹的长度为 $a_i, i = 1, 2, \cdots, q$, 那么根据式(14)可以求得它们对区间 $[a_0, +\infty)$ 的隶属度分别为

$$P_i(a_0 | \hat{a}_i) = 1 - \Phi[(\ln a_0 - 0.2190 - 0.9896 \ln \hat{a}_i) / 0.2358] \quad i = 1, 2, \cdots, q \quad (30)$$

如果 a_0 取为临界裂纹长度,并设 $\hat{A}$ 为超标缺陷集合,则有

$$\hat{A} = \left\{ P_1(a_0 | \hat{a}_1) / l_1 + P_2(a_0 | \hat{a}_2) / l_2 + \cdots + P_q(a_0 | \hat{a}_q) / l_q \right\} \quad (31)$$

当对各裂纹重复进行多次独立检测时,则根据本文模糊数据融合方法可以准确地知道各裂纹是否属于超标缺陷。

实例 2 表 2 给出了某种不锈钢配件超声波检测结果,其中裂纹的真实高度是通过解剖试件后测得的^[5]。

表 2 不锈钢配件超声波检测结果(单位: mm)

序号 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
裂纹真实高度 a_i	7.6	2.9	9.0	1.6	9.2	2.1	6.6	1.9	1.8	1.8	1.3	2.9
裂纹检测高度 a_i'	9.0	1.5	10.0	1.0	8.0	1.5	6.0	1.5	1.5	2.0	1.0	1.0

根据本文方法对表 2 数据进行处理,可以得到裂纹真实高度和检测高度之间的回归方程

$$\ln \tilde{a} = 0.4841 + 0.7434 \ln a' \quad (32)$$

和标准差估计量 $\hat{\sigma} = 0.2728$ 。

在此基础上,本文对同种类型不锈钢试件中一裂纹进行了 3 次独立的超声波检测(为了保证独立性,由 3 人分别进行检测,事先互不交流检测结果)。第一次测得裂纹高度为 $\hat{a} = 4.8$ mm,根据式(18)在 95%置信度下,求得该裂纹高度 $a \geq 5$ mm 的隶属度为 $P_U(a_0 = 5 | \hat{a} = 4.8) = 77.34\%$;第二次测得裂纹高度为 $\hat{a}_2 = 4.2$ mm,在 95%置信度下求得的隶属度为 $P_U(a_0 = 5 | \hat{a} = 4.2) = 63.87\%$;第三次测得裂纹高度为 $\hat{a}_3 = 4.9$ mm,求得的隶属度为 $P_U(a_0 = 5 | \hat{a} = 4.9) = 79.10\%$ 。然后根据式(28)对这三次结果进行模糊数据融合,最终求得该裂纹高度 $a \geq 5$ mm 的隶属度为 $P_U(a_0 = 5 | \hat{a} = 4.8, 4.2, 4.9) = 95.80\%$,也就是说,从这三次检测结果综合来看,有 95.77%的把握断定该裂纹高度大于等于 5 mm (如果 5 mm 为临界裂纹高度,那么就有 95.77%的把握断定该裂纹属于超标缺陷;按传统方法则认为该裂纹高度小于 5 mm,不属于超标

缺陷)。而该不锈钢试件解剖后测得的裂纹真实高度为 5.3 mm。由此可见, 本文方法得到的结果与实际情况完全一致, 有关结果列于表 3。

表 3 不锈钢试件中同一裂纹 3 次独立超声波检测结果与分析(置信度 $\gamma=95\%$)

	裂纹检测高度 $\hat{a}_i$ (mm)	裂纹高度 $a \geq 5$ mm 的隶属度	模糊数据融合后裂纹高度 $a \geq 5$ mm 的隶属度	裂纹真实高度 a (mm)
第一次检测结果	4.8	77.34%		
第二次检测结果	4.2	63.87%	95.80%	5.3
第三次检测结果	4.9	79.10%		

6 结 论

(1) 本文通过对大量无损检测数据的分析, 提出了缺陷真实尺寸与其检测尺寸之间的数学关系式(1)和式(3)。

(2) 对于给定的真实缺陷尺寸, 其检测尺寸的分布可以通过成组试验法得到; 但是反过来, 对于给定的检测尺寸, 所有可能产生该检测尺寸的缺陷的真实尺寸分布则一直无法通过成组试验法求得, 这是无损检测模糊性问题长期得不到解决的根本原因。本文采用回归分析方法成功地求出了给定检测尺寸下的缺陷真实尺寸的分布。

(3) 隶属度的确定是解决无损检测模糊性问题的核心。本文通过给定检测尺寸下的缺陷真实尺寸分布, 给出了材料中缺陷的隶属度、模糊分布和模糊区间估计, 从而可以对缺陷尺寸进行有效的定量分析。

(4) 采用 Dempster-Shafer 证据合成理论, 给出了能够综合利用来自不同检测人员和不同探伤仪器的无损检测数据, 有效地提高定量分析精度的模糊数据融合方法。从实例 2 中可以看到, 该方法效果非常显著。

(5) 本文给出的缺陷尺寸的模糊分布, 为建立模糊寿命预测、模糊断裂准则、模糊损伤容限设计、压力容器的模糊评定等新的理论和方法奠定了基础。

(6) 本文建立的无损检测模糊理论还可以推广到医学、军事、地质等领域中采用无损检测方法对所关心对象(如病灶、目标等)进行的定量分析。

参 考 文 献

- 1 Berns A P, Hovey P W. Flaw Detection Criteria AFWAL-TR-84-4022, 1984
- 2 Provan J W. Probability Fracture Mechanics and Reliability. Martinus Nijhoff Publishers, 1987
- 3 傅惠民, 钱若力. 无损检测可靠性与寿命控制方法. 航空动力学报. 1994, 9(3): 227-232
- 4 Chang C M, Chen I K, et al. X-Ray Inspection Reliability for Welded Joints. Structural Safety and Reliability, Schueller, Shinozuka, Yao, eds, Rotterdam: Balkema, 1994: 991-996
- 5 Kaisa Simola, Urho Pulkkinen. Models for Nondestructive Inspection Data. Reliability Engineering & System Safety. 1998, 60: 1-12
- 6 傅惠民. 正态分布百分位值和百分率的置信限和容忍限公式. 航空学报, 1994, 15(1): 94-101
- 7 Linas J, Waltz E. Multi-Sensor Data Fusion. Artech House, Norwood, Massachusetts, 1990
- 8 汪培庄, 李洪兴. 模糊系统理论与模糊计算机. 北京: 科学出版社, 1996: 244-255

(责任编辑 王震华)

FULL - LENGTH PAPERS

FUZZY THEORY OF NONDESTRUCTIVE TESTING AND ITS APPLICATION

Fu Huimin and Liu Dengdi

(Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT The uncertainty in the flaw size determination and the flaw detection has been studied, and a fuzzy theory of nondestructive testing (NDT) is established. The mathematical relations between the measured flaw sizes by NDT and the actual flaw sizes is presented. The distribution of true flaw sizes is obtained at a given measured flaw size. Fuzzy interval evaluation and membership degree of the flaws exceeding the specified size are given. Thus a quantitative method for determining the actual flaw size is successfully developed to make full use of the measured flaw sizes from different NDT sources. The new concepts of fuzzy life estimation, fuzzy fracture criterions, fuzzy damage tolerance design, fuzzy assessment of the pressure vessel integrity should be put forward on the basis of the fuzzy theory of NDT.

Key Words Nondestructive testing Fuzziness Reliability Quantitative analysis
Signal analysis

EFFECT OF ARRANGEMENT OF STAGGERED PIN FINS ON HEAT TRANSFER OF ROTATING RECTANGULAR DUCTS

Ji Honghu and Wang Baoguan

(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Wang Daijun and Deng Huayu

(Department of Power Engineering, Xindu 610500)

ABSTRACT An experimental research was conducted to investigate the effect of the arrangement of staggered pin fins on convective heat transfer of rotating rectangular ducts. Six test models were used in this experiment, which cover a parameter range of $S_n/d = 5.0, 6.5$ and 8.0 , $S_p/S_n = 1.2, 1.6$ and 2.0 , where d is the diameter of the pin fin, S_n and S_p are the transverse space and twice the axial space between pin fins respectively. The results in the experimental range show that, the axial parameter, S_p/S_n between 1.2 and 1.6 will give the best result; in the transverse direction $S_n/d = 5.0$ gives the highest heat transfer coefficient, but the pressure drop caused by this arrangement should be considered.

Key Words Pin fin Rotating Rectangular duct Heat transfer Experiment