

搭接缝焊接头疲劳强度的断裂力学分析

南京航空航天大学 丁磊** 范引鹤

【摘要】 从线弹性断裂力学的角度出发, 用一个断裂力学参数 K_{θ} 来表征缝焊接头的疲劳强度, 并用有限元法对影响 K_{θ} 的各种因素进行了分析, 得出了计算 K_{θ} 的经验公式。通过疲劳试验, 得到两种材料(GH150 和 1Cr18Ni9Ti) 缝焊接头的 $\Delta K - N$ 曲线, 运用 $\Delta K - N$ 曲线可以更准确地估算各种复杂形式的缝焊接头的疲劳寿命。

主题词: 搭接焊 疲劳强度 线弹性断裂力学
分类号: O346

1 搭接缝焊接头的疲劳试验和 K 因子的计算

本文将结城良治^[1]运用线弹性断裂力学研究搭接点焊接头疲劳强度的方法推广到搭接缝焊接头上, 并对影响搭接缝焊接头等效力强度因子 K_{θ} 的各种因素进行了分析。

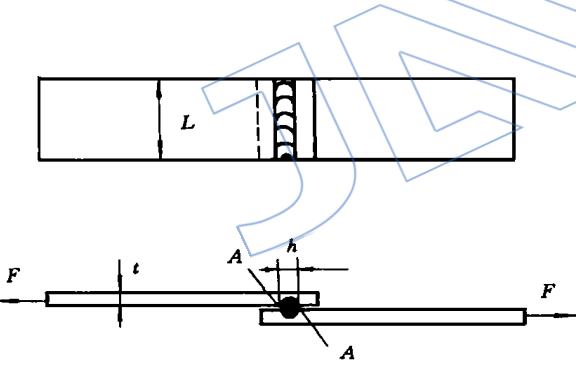


图 1 搭接缝焊试件(A 为裂纹出现位置)

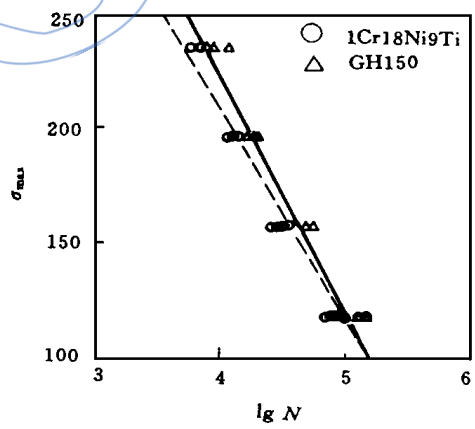


图 2 搭接缝焊接头疲劳试验结果

采用的搭接缝焊接头试件如图 1 所示, 材料分别为国产 GH150 高温合金钢和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。试件均取自 2 mm 厚的板材, 受力方向为轧制方向。两种材料的静态机械性能和焊接规范见表 1。试样焊好后, 进行两次热处理, 先经退火处理, 再进行最终固溶热处理, 以消除焊接引起的残余应变和残应力。试验设备采用 Instron 1341 型疲劳试验机。试验条件: 控制最大名义应力并轴向疲劳加载, 应力比 $R = 0.1$, 三角波形, 加载频率 $f = 5 \sim 20$ Hz, 室温, 空气介质下。试验得到应力与寿命的关系如图 2 所示。从图 2 可以看出, 尽管 GH150 材

料的屈服强度和强度极限均比 1Cr18Ni9Ti 材料的高,但两种材料搭接缝焊接头的应力—寿命曲线基本重合,这结果与文献[2]中所述的点焊接头的疲劳强度与其母材强度性能无关的结论相一致。

表 1 两种材料的机械性能和焊接规范

材料	$\sigma_{0.2}$ (M Pa)	σ_b (M Pa)	E (M Pa)	μ	电极直径 (mm)	焊接电流 (A)	电极压力 (N)
GH150	900	1326	201	0.281	4.0	5500~6200	4400~4900
1Cr18Ni9Ti	290	625	184	0.300	4.0	6500~7000	7400~7900

采用有限元法对搭接缝焊接头进行线弹性分析。由于试件的宽度 L 相对于厚度要很大

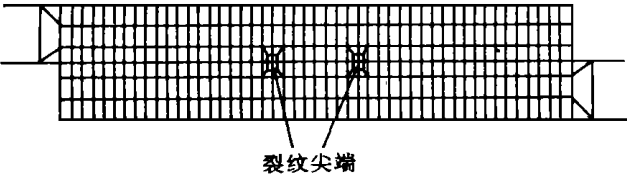


图 3 缝焊接头的有限元网格

多,因此该结构可看作平面应变问题,采用二维四节点平面应变单元进行有限元离散后如图 3 所示。文献[3]认为,取裂纹内表面上节点($\theta = \pi$)的位移值(U, V),由如下公式计算出各节点处的表观应力强度因子:

$$K_{\text{I}}^* = 2GV \sqrt{\frac{2\pi}{r}} / (k + 1)$$

和

$$K_{\text{II}}^* = 2GU \sqrt{\frac{2\pi}{r}} / (k + 1)$$

式中: r 为节点至裂纹尖端的距离, $k = 3 - 4\mu$, μ 为泊松比。

对于裂纹尖端附近区域,裂纹内表面各点的表观应力强度因子与 r 近似地有线性关系(如图 4 所示),则图 4 中直线与纵坐标交点的纵向坐标值即为所求裂纹尖端应力强度因子 K_{I} 和 K_{II} 的取值。

2 经验公式的提出

对于如图 1 所示的搭接缝焊接头,可以作为单边裂纹来处理。薄板搭板接缝焊接头主要受剪切作用,因此 K_{II} 是主要的应力强度因子分量;另外,由于接合部有垂直于板面方向的位移,相应地就有 K_{I} 分量。因此,搭接缝焊接头可以近似处理为 I - II 型复合裂纹问题。

Chang 和 Mukai^[4] 提出计算胶接点焊接头应力强度因子的经验公式,类似于本文建立了搭接缝焊接头 K 因子的计算公式:

$$K_{\text{I}} = \lambda_1 \sigma_n t \sqrt{\frac{2\pi}{h}} \quad \text{和} \quad K_{\text{II}} = \lambda_2 \sigma_n t \sqrt{\frac{2\pi}{h}} \tag{1}$$

式中: $\sigma_n = F / (tL)$ 为搭接缝焊接头处的名义应力; t 为板厚; h 为焊缝宽; L 为试件宽。

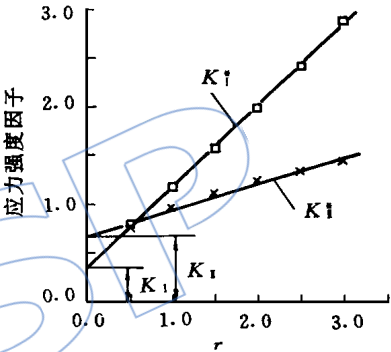


图 4 外推法求解 K 因子

影响形状因子可能的因素有比值 $\alpha = h/t$ 和板厚 t 。本文对不同 t 和 α 的搭接缝焊接头进行了有限元计算,并代入(1)式分别得到缝焊接头的 K_I , K_{II} 和 λ_1 , λ_2 计算结果列于表 2 和表 3。从中可看出,当 $\alpha =$ 常数时, λ_1 , λ_2 几乎与 t 无关;而当 α 增加时 λ_1 , λ_2 也单调地增加, λ_1 , λ_2 与 α 的拟合公式如下:

$$\lambda_1 = 0.3706 + 0.0505\alpha + 0.0022\alpha^2 \quad (2)$$

$$\lambda_2 = 0.4237 + 0.2280\alpha - 0.0114\alpha^2 \quad (3)$$

将(2), (3)式代入(1)式即得到计算缝焊接头应力强度因子 K_I 和 K_{II} 的经验表达式。

公式(2), (3) 是对材料 1Cr18Ni9Ti 模型推导出来的。对于 GH150 材料本文计算了其搭

接缝焊接头在不同的比值 α 时的应力强度因子 K_I 和 K_{II} , 计算结果列于表 3。从表 3 可以看出, 对于 GH150 材料的搭接缝焊接头, 只要其所受载荷和几何尺寸与 1Cr18Ni9Ti 材料相同, 它们的应力强度因子也相同。因此, 公式(2) 和 (3) 对于 GH150 材料的搭接缝焊接头也是适用的。

表 2 不同板厚 t 下搭接缝焊接头的形状因子

板厚 t	K_I	λ_1	K_{II}	λ_2
0.5	0.1756	0.4431	0.3215	0.8112
1.0	0.2401	0.4302	0.4655	0.8305
1.5	0.3204	0.4667	0.5750	0.8376
2.0	0.3838	0.4842	0.6605	0.8333
2.5	0.4278	0.4827	0.7122	0.8036
3.0	0.4563	0.4700	0.7963	0.8203
3.5	0.4761	0.4541	0.8499	0.8105

注: 名义应力 $\sigma_n = 10 \text{ MPa}$, $\alpha = 2.0$, 板厚单位: mm

应力强度因子单位: $\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$

表 3 不同比值 α 时搭接缝焊接头的 K 因子和形状因子

$\alpha = \frac{h}{t}$	材料: 1Cr18Ni9Ti				材料: GH150	
	K_I	λ_1	K_{II}	λ_2	K_I	K_{II}
2.0	0.384	0.484	0.661	0.833	0.385	0.663
2.5	0.358	0.505	0.654	0.922	0.358	0.649
3.0	0.356	0.550	0.651	1.006	0.357	0.650
3.5	0.335	0.559	0.649	1.083	0.335	0.647
4.0	0.352	0.627	0.647	1.154	0.353	0.645
4.5	0.332	0.628	0.642	1.215	0.333	0.642
5.0	0.346	0.690	0.640	1.277	0.346	0.639
6.0	0.344	0.752	0.632	1.381	0.343	0.631

3 断裂力学分析和 $\Delta K - N$ 曲线

对于 I - II 复合型裂纹, 根据最大周向应力理论^[3], 裂纹扩展方向由下式确定:

$$K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) = 0 \quad (4)$$

由(1)式有 $K_I / K_{II} = \lambda_1 / \lambda_2$, 则由(4)式即可解出 θ , 在(4)式确定的方向上, 周向应力达到最大值 $\sigma_{\theta \max}$:

$$\sigma_{\theta \max} = [K_I \cos^3(\theta/2) - 1.5 K_{II} \sin \theta \cos(\theta/2)] / \sqrt{2\pi r} \quad (5)$$

如果记 $\sigma_{\theta \max} = K_{\theta} / \sqrt{2\pi r}$, 则有 $K_{\theta} = K_I \cos^3(\theta/2) - 1.5 K_{II} \sin \theta \cos(\theta/2)$, 写成增量形式:

$$\Delta K = \Delta K_I \cos^3(\theta/2) - 1.5 \Delta K_{II} \sin \theta \cos(\theta/2) \quad (6)$$

K_{θ} 的意义是: 在(4)式确定的裂纹扩展方向上, 与 I 型变形对应的应力强度因子。由于搭接缝焊接头的疲劳寿命取决于焊缝内表面疲劳裂纹的生成和扩展, 所以 K_{θ} 是控制搭接缝焊接头疲劳寿命的重要参数。用 S - N 曲线来整理实验结果时, 载荷 - 寿命关系将随试件厚度、焊缝宽等参数的改变而发生变化。而 K_{θ} 综合了载荷、试件厚度和焊缝宽等因素的作用, 只要材料和焊接条件相同, 则各种形状搭接缝焊接头的疲劳强度可以通过 $\Delta K - N$ 关系进行统一评价。

对本文两种试件有 $\alpha = 2.0$, $K_I / K_{II} = \lambda_1 / \lambda_2 = 0.5760$, 则由(4)式可求出 $\theta = -60.02^\circ$ 代

入(6)式得:

$$\Delta K = 0.649 \Delta K_{\text{I}} + 1.125 \Delta K_{\text{II}} \quad (7)$$

按(7)式整理本文的试验结果,用最小二乘法拟合分别得到 1Cr18Ni9Ti 和 GH150 两种材料的 $\Delta K - N$ 关系:

$$\Delta K = 55.836 - 9.171 \lg N \quad (8)$$

$$\Delta K = 54.873 - 8.938 \lg N \quad (9)$$

至此,对于 GH150 和 1Cr18Ni9Ti 两种材料只要求出其搭接缝焊接头相应的 ΔK ,即可由(8)和(9)式来预测其疲劳寿命。

4 结 论

(1) 本文所研究的两种材料虽然它们的极限强度相差很大,但它们的搭接缝焊接头的疲劳强度却非常接近。这可解释为搭接缝焊接头的结构形式所引起的应力或应变集中非常严重,以致于掩盖了材料缺陷等其它因素对其疲劳强度的影响。

(2) 搭接缝焊接头可以看作 I - II 型复合裂纹来处理,其应力强度因子可由(2)式计算得出。形状因子只与比值 $\alpha = h/t$ 有关,并且均满足式(3)、(4)关系,而与材料性能无关。

(3) 应力强度因子 K_{σ} 综合了载荷、几何尺寸等因素的影响,因此, $\Delta K - N$ 曲线比 $S - N$ 曲线更能统一地求解搭接缝焊接头的疲劳强度。本文得到了国产 GH150 和 1Cr18Ni9Ti 两种材料的 $\Delta K - N$ 曲线,只要焊接条件相同,即可用来评价复杂形式缝焊结构的疲劳强度。

参 考 文 献

- 1 结城良治, 大平寿昭, 中务晴启, et al. スポット溶接継手の疲労強度の破壊力学的解析評価. 日本機械学会論文集 A, 1985, 51(467): 1772- 1778
- 2 Radai D 著, 郑朝云, 张式程译. 焊接结构疲劳强度. 北京: 机械工业出版社, 1994: 158- 160
- 3 高庆主编. 工程断裂力学. 重庆大学出版社, 1986: 46- 48, 83- 85
- 4 Chang D J, Muki R. Stress Distribution in a Lap Joints under Tension- Shear. Int.J. Solids Structure, 1974, 10: 503- 517

(责任编辑 杨再荣)

programming special attention was paid to the addition of artificial viscosity, so that the solution could not be polluted. Baldwin–Lomax Turbulence model is applied to programming. The program has been verified by plate laminar flow, plate turbulent flow and Goldman Turbine vane flow. Firstly, the calculation of the plate laminar flow coincided with Blasius similarity solution; Secondly, the result of the plate turbulent flow was confirmed well with empirical formula and the calculation of Wilcox; Finally, with respect to the Goldman turbine vane flow field, the comparison was made between calculated results and experimental data of pressure distribution over blade profile. It indicated their consistency except fluctuations of the calculated results at leading and trail edge of vane blade. The source of the fluctuations lied in simple H type grid which could not describe the true blade profile and caused so big shear that the calculation scheme was deteriorated. The calculated Mach contour lines agreed to the simulation results of China. All of those indicated that the program suits to designing system of turbomachinery.

Key Words Cascade flow Three dimensional flow Numerical computation

FRACTURE MECHANICS ANALYSIS OF FATIGUE STRENGTH OF LAP- WELDED JOINTS

Ding Lei and Fan Yinhe

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

ABSTRACT According to the elastic fracture mechanics, a parameter of lap stress intensity K_0 was used to describe the fatigue strength of lap- welded joints. Various influential factors of the K_0 have been analysed by finite element method. Therefore an empirical formula for K_0 was deduced. From fatigue experiments of the lap- welded joints specimens made by two kinds of material (GH150 and 1Cr18Ni9Ti), two $\Delta K - N$ curves were obtained. The fatigue life of various complicated lap- welded joints can be estimated more accurately with the $\Delta K - N$ curves presented in this paper.

Key Words Lap welding Fatigue strength Linear elastic fracture mechanics

FAULT DIAGNOSIS OF ROTATING MACHINERY USING BACK PROPAGATION NEURAL NETWORK

Liu Zhansheng, Wu Xinhua, Xia Songbo

(Power Engineering Dept. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

ABSTRACT The faults of rub between rotor and stator, misalignment test rig of the shafting, and unbalance of the rotor are simulated at a compressor test rig. The normal vibration signals of the rotor and the signals of the various emerging faults are registered and sampled by an automatic signal processor. Then a new- developed back propagation neural network is employed to learn the fault diagnosis from the sampled faults and a new method for accelerating the learning speed has been proposed in this paper.

Key Words Rotor Neural networks Fault diagnosis