

疲劳缺口系数 K_f 与理论应力集中系数 K_t 之间的关系

Relationship Between Fatigue Notch Factor K_f and Stress Concentration Factor K_t

胡本润, 刘建中, 陈剑峰(北京航空材料研究院, 北京 100095)

HU Ben-run, LIU Jian-zhong, CHEN Jian-feng
(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 疲劳缺口系数 K_f 是表征缺口部位疲劳强度降低程度的参量, 这一系数在结构抗疲劳设计中经常被使用。一般认为 K_f 与理论应力集中系数 K_t 呈线性关系, 线性的斜率与不同材料类别(铝合金、钛合金和钢)有关。通过对大量不同材料、不同应力比和不同缺口试样形式的高周疲劳极限的系统分析, 发现大多数情况下 K_f 与 K_t 的呈线性关系, 但有些情况下二者不服从线性关系。 K_f 与 K_t 的关系除与材料类别有关外还与实验的应力比有关。

关键词: 缺口试样; 疲劳; 疲劳缺口系数 K_f ; 理论应力集中系数 K_t

中图分类号: V215.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)07-0070-04

Abstract: Fatigue notch factor K_f is usually used to express the reduction in fatigue strength of the component notch. The factor of K_f is very useful in fatigue design. In this paper analysis for many fatigue limit of aluminum alloy, titanium alloy and steel with stress ratio of 0.5, 0.06, -1 showed that the relation between most of K_t and K_f is linear except some case. The relation of K_f and K_t not only depends on the kinds of material but also on the stress ratios.

Key words: notched specimen; fatigue; fatigue notch factor K_f ; stress concentration factor K_t

影响材料或结构疲劳强度的因素很多, 其中结构设计上的缺口、圆角或由于外来物损伤等引起的应力集中对疲劳强度有显著的影响。应力集中使得材料局部的峰值应力超出名义应力, 峰值应力由应力集中点向外降低得很快, 使缺口处形成很大的应力梯度。为了正确地评价缺口处的疲劳强度, 必须对缺口处的峰值应力做定量性地描述。一般用缺口最大峰值应力与净截面平均应力的比值作为评价缺口应力集中程度的大小。

为了研究应力集中对材料或结构疲劳强度的影响, 一般在测定材料的高周疲劳强度时都根据工程结构的应力集中的状况, 测定不同应力集中系数 K_t 下的 $S-N$ 曲线, 以便于设计上的使用。工程中常见的各种几何形状和受载类型的理论应力集中系数可由专门的资料查找, 在相同实验条件下, K_t 值增加得越大, 疲劳强度下降得越低。

但是应力集中对疲劳强度的影响程度并不直接由理论应力集中系数 K_t 所决定, 而是由“疲劳强度降低系数” K_f 决定的。研究认为影响 K_t 与 K_f 关系的因素较多, 如材料的类型、材料的极限强度、缺口根部半径等。确定 K_f 值最直接的方法是以大量缺口试件的疲

劳实验结果为依据, 用统计分析方法回归整理出具有较高置信度的拟合公式, 并确定公式中的参数取值, 然后把这种拟合公式作为通用计算公式用于计算一般应力-应变情况下的缺口疲劳强度降低系数。该方法的特点是利用了理论应力集中系数, 有较坚实的理论基础, 并且避免了针对特定材料和结构形式的耗资费时的疲劳实验^[1-5]。目前设计中常使用比较简洁的线性拟合公式^[1,2]。

本工作以大量实测的高周疲劳实验数据为依据, 将这些数据分别按铝合金、钛合金和钢分别整理拟合 K_f 与 K_t 的关系。拟合结果发现, K_f-K_t 的关系除了与材料的种类有关外还与实验应力比有一定的关系。大多数情况下试样的 K_f 与 K_t 的关系基本符合线性关系, 但有些情况却不满足线性关系, 如仍采用线性拟合公式会造成较大误差。

1 K_t 与 K_f 的定义

K_t 为理论应力集中系数, 它被定义为在缺口或其它应力集中处的局部最大应力 σ_{\max} 与名义应力 σ_{nom} 的比值, 即: $K_t = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{nom}}$ 。名义应力的定义有多种

方式，在这里指试样所受到的轴向载荷除以缺口净截面积得到的平均正应力。理论上当光滑疲劳试样承受疲劳缺口处最大应力时的疲劳寿命应该与缺口处的疲劳寿命相同，因为疲劳裂纹往往萌生于试样的自由表面处，自由表面处裂纹萌生的时间应该受最大应力的控制。但实际的实验结果表明，按理论应力集中系数估算的疲劳寿命往往不同于实验结果，大多数情况下估算的结果与实验结果相比过于保守，这主要由于应力集中在提高局部应力的同时，也使最大应力处的应力梯度增大，并且将裂纹起始位置限制在材料最大应力点附近的较小范围，这些因素都会提高疲劳强度。因此，造成了实际结果与理论分析结果的不一致^[1-5]。

在对缺口疲劳强度的研究中引入了疲劳缺口系数 K_f 。 K_f 值是指不同应力集中系数试样在相同寿命下所对应的疲劳强度与光滑试样的疲劳强度的比值，即： $K_f = \text{光滑试样的疲劳强度} / \text{缺口试样的疲劳强度}$ 。理论应力集中系数 K_t 与疲劳缺口系数 K_f 的意义完全不同， K_t 代表缺口处峰值应力提高的程度， K_f 代表缺口处疲劳强度降低的倍数^[2]。

理论应力集中系数 K_t 只与试样或部件的几何形状有关，不受材料和其它因素的影响。 K_t 值可以通过理论计算或其它方法获得。疲劳缺口系数 K_f 的影响因素较多，它与材料的性质、缺口的曲率半径等都有关系^[1-3]。 K_t - K_f 关系式在飞机结构设计中经常被使用到，确定 K_f 的方法目前主要以缺口试件的疲劳实验结果为依据，通过统计分析回归整理出具有较高置信度的拟合公式，然后把这种拟合公式作为通用计算公式用于疲劳强度的计算。国内外这方面的拟合公式较多，设计上为使用方便经常采用线性拟合的公式。

2 不同材料的 K_t 与 K_f 的拟合关系

本工作选择了 150 余条铝合金、钛合金和钢棒形试样的疲劳 $S-N$ 曲线数据，根据这些曲线实测疲劳极限的结果对不同材料、不同应力比下，不同缺口应力集中系数试样所对应的疲劳缺口系数关系（即 K_t - K_f 的关系）进行了比较系统的分析研究。

实验中铝合金多为高强铝合金，如 7B04 等，钛合金多为高强钛合金如 TA15，钢主要为结构钢和不锈钢。实验应力比 $R = 0.5, 0.06, -1$ 。实验所采用的光滑和缺口试样形式如图 1, 2 所示， $K_t = 2, 3, 5$ 试样的缺口尺寸具体见表 1。所有缺口试样均采用 V 字形缺口，缺口角度为 60° 。疲劳极限的测定按升降法测定，数据满足中值寿命 95% 置信度^[6]。

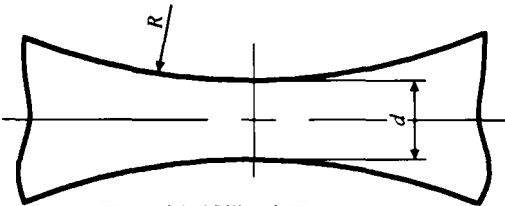


图 1 光滑试样示意图, $K_t = 1$
Fig. 1 Smooth specimen

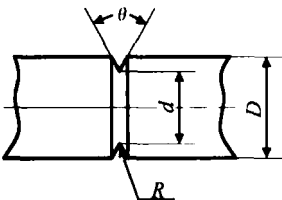


图 2 缺口试样示意图, $K_t = 3, 5$
Fig. 2 Notched specimen

表 1 不同应力集中系数试样的缺口尺寸
Table 1 Dimensions for the smooth and V-notched specimens with different stress concentration factors

Material	Stress concentration factor	Dimensions of the notch			
		θ	R/mm	D/mm	d/mm
Aluminum alloy	$K_t = 1$	—	60	—	7
	$K_t = 3$	60°	0.5	11	8.5
	$K_t = 5$	60°	0.12	11	8.5
Titanium alloy and steel	$K_t = 1$	—	50	—	5
	$K_t = 2$	—	1.5	11.9	8.5
	$K_t = 3$	60°	0.34	7.5	5
	$K_t = 5$	60°	0.1	10	5.5

将 150 余条曲线数据首先按材料分为铝合金、钛合金和钢三类，再按不同应力比 ($R = 0.5, 0.06, -1$) 分别整理得到每种材料在三个应力比下的平均 K_t - K_f 数据见表 2， K_t - K_f 关系曲线如图 3-6 所示，对数据点进行线性或二次多项式拟合，拟合曲线如图 3-6 所示，拟合方程系数见表 3。

3 分析与讨论

3.1 不同材料 K_t - K_f 的关系

按线性关系对 K_f 与 K_t 进行拟合时，一般铝合金、钛合金和钢的线性拟合系数有所不同，在相同 K_t 水平下 K_f 的值越大表明材料的缺口敏感性越高。从本文的统计结果看，对于 $K_t \leq 5$ 的棒形试样，铝合金材料的 K_t - K_f 关系满足线性关系。钛合金在应力比

表 2 三种材料在不同应力比下的平均 K_I - K_{II} 数据

Table 2 Average K_I - K_{II} data of three materials at different stress ratios

Material	Stress concentration factor	Dimensions of the notch		
		$R=0.5$	$R=0.06$	$R=-1$
Aluminum alloy	$K_I=3$	2.412	2.297	2.494
	$K_I=5$	3.720	3.697	3.943
Titanium alloy	$K_I=3$	2.147	2.354	2.828
	$K_I=5$	3.687	4.867	4.943
Steel	$K_I=2$	1.636	1.608	1.590
	$K_I=3$	1.959	2.108	2.176
	$K_I=5$	3.294	3.696	4.111

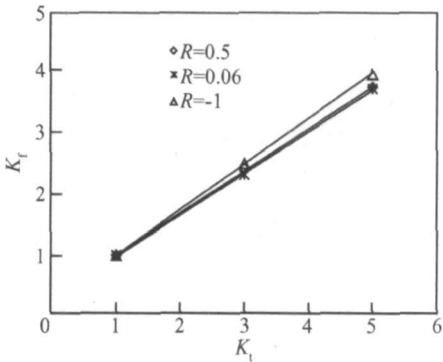


图 3 铝合金试样 K_I - K_{II} 关系曲线
Fig. 3 Relation between K_I and K_{II} of aluminum alloy specimen

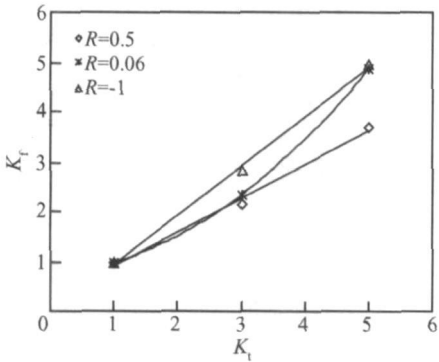


图 4 钛合金试样 K_I - K_{II} 关系曲线
Fig. 4 Relation between K_I and K_{II} of titanium alloy specimen

$R=0.5, -1$ 下, 钢试样在 $R=0.5$ 应力比下也基本满足线性关系。当只对钢棒形试样 $K_I=1, 2, 3$ 三点进行拟合, 可以看出 $K_I \leq 3$ 下钢棒形试样在三个应力比下的 K_I - K_{II} 呈非常好的线性关系, 如图 6 所示。但在 $K_I=5$ 点上 K_I - K_{II} 的关系走势发生了明显变化, K_{II} 值提高较大, 如图 5 所示。这说明随着应力集中系

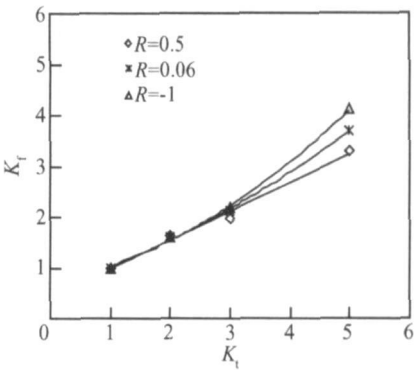


图 5 钢试样 K_I - K_{II} 关系曲线
Fig. 5 Relation between K_I and K_{II} of steel specimen

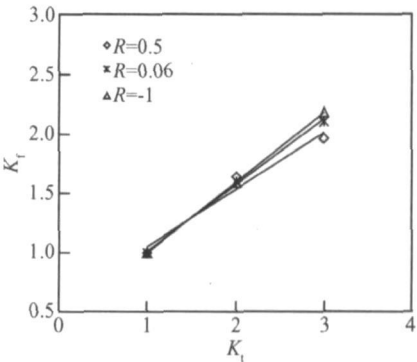


图 6 钢 $K_I \leq 3$ 试样 K_I - K_{II} 关系曲线
Fig. 6 Relation between K_I and K_{II} of steel specimen with $K_I \leq 3$

数的增加钢的缺口敏感性迅速提高。钛合金在应力比 $R=0.06$ 下完全不满足线性关系。

表 3 K_I - K_{II} 拟合曲线系数

Table 3 The coefficients of K_I - K_{II} fitting curve

Material	Stress Ratio	$K_{II} = A1K_I^2 + A2K_I + A3$			Linear relative coefficient, γ
		A1	A2	A3	
Aluminum alloy	0.5	-	0.6196	0.415	0.99975
	0.06	-	0.6743	0.3083	0.99975
	-1	-	0.7359	0.2717	0.99996
Titanium alloy	0.5	-	0.6718	0.2626	0.99644
	0.06	0.1449	0.0973	0.7578	0.98535
	-1	-	0.9857	-0.0334	0.99912
Steel	0.5	-	0.5627	0.4249	0.993885
	0.06	0.0497	0.3676	0.6075	0.995165
	-1	0.086	0.2544	0.6806	0.990942

3.2 K_I - K_{II} 的变化与不同应力比的关系

从图 3- 图 6 可以看出, 不同应力比下 K_I - K_{II} 的拟合线并不相同。在相同的 K_I 水平下, 应力比 $R=-1$ 下的 K_{II} 值最大, $R=0.5$ 下的 K_{II} 值最小。铝合金

试样 $K_t \leq 5$ 下, $R = 0.06, -1$ 应力比下的两条 $K_f - K_t$ 拟合线基本重合, 如图 3 所示。钢试样在 $K_t \leq 3$ 下也出现了与铝合金相同的现象, 如图 6 所示。这表明缺口试样在 0.5 下的疲劳强度降低较小, 疲劳缺口敏感性较低。这是由于在 $R = 0.5$ 下材料受到的拉伸载荷较大, 缺口处局部最大应力远远超过了材料的屈服强度, 使得缺口根部发生了塑性变形, V 形缺口的角度和尖端半径变大, 使得缺口的实际应力集中系数 K_t 降低, 疲劳强度提高。在应力比 $R = -1$ 下材料受到拉压对称载荷的作用, 缺口的形状在压载荷作用下很可能更加尖锐使得试样的实际应力集中系数提高, 疲劳强度进一步降低。

4 结论

- (1) 三种材料的 $K_f - K_t$ 关系大多数满足线性关系, 不同材料的 $K_f - K_t$ 关系系数不同。
- (2) $K_f - K_t$ 关系与实验的应力比有关, 在应力比 R

$= 0.5$ 下材料的缺口敏感性最低, 在应力比 $R = -1$ 下材料的缺口敏感性最高。

参考文献

[1] 赵名洋. 应力疲劳分析手册[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 8.
[2] 赵少沛. 抗疲劳设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. 1.
[3] 吴学仁. 飞机结构金属材料力学性能手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996. 6.
[4] MAKKONEN M. Notch size effects in the fatigue limit of steel International[J] Journal of Fatigue, 2003, 25: 17- 26.
[5] GEORGE K HARITOS, THEODORE NICHOLAS, DAVID B LANNING. Notch size effects in HCF behavior of Ti-6Al-4V I [J]. Journal of Fatigue, 1999, 21: 643- 652.
[6] HB5287- 96, 金属材料轴向加载疲劳实验方法[S].

收稿日期: 2006-04-11; 修订日期: 2006-08-12
作者简介: 胡本润(1972-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事金属材料的疲劳、断裂研究, 联系地址: 北京 81 信箱 23 分箱(100095)。

日本最新高技术陶瓷战略研发动向

日本名古屋工业技术研究所是其国家级的研发机构, 它的研发很大程度上带有试验性和前瞻性。该所在高技术陶瓷研究的动向是: 具有协同结构的陶瓷材料; 具有纳米晶粒的超级金属, 具有清洁环境减少污染的陶瓷材料; 生物陶瓷; 具有超塑性的陶瓷; 电子工业应用的氧化物陶瓷; 与能源相关的陶瓷; 轻质材料等。生物陶瓷方面, 该所研究开发的重点方向之一是人工合成陶瓷关节材料。由于陶瓷与人类的骨头组织具有一定的亲和性, 与金属人工关节相比, 陶瓷人工关节具有更大的市场前景。

为解决陶瓷材料的脆性问题, 该所开发出陶瓷与钛合金的复合技术, 通过技术处理, 在钛合金内植入羟基磷灰石陶瓷, 实现二种材料的复合, 其工业化实验正在进行之中。环境陶瓷的研究是目前特种陶瓷研究的一个主要方向, 该所正在开发的另一种新型材料是通过多孔结构及表面物理性能的调整, 可实现空气湿度的调控, 作为一种智能建筑材料, 有可能在未来的所谓智能房屋中得到应用。

日本发展高技术陶瓷的战略步骤, 首先是用来制造日常生活品和某些发热元件, 然后再转变为大量发展高技术陶瓷产品及精密元件。

如日立公司最初采用陶瓷薄膜磁头, 既降低产品成本, 又提高了磁头的录音、演奏与消磁性能。紧接着正式向市场投放陶瓷光盘, 产品成功打入东南亚、西欧与美国市场。日本生产的陶瓷剪刀、米酒加热器、陶瓷手术刀、人造陶瓷关节及陶瓷滚珠圆珠笔等, 在印尼、泰国、新加坡与马来西亚很受欢迎。日本京都陶瓷公司还开始采用高技术陶瓷研制汽车用陶瓷发动机、内燃机零件。采用陶瓷粉末涂敷的汽车零件已大批走入市场, 大大提高了汽车的工作性能。

除发展高温结构陶瓷材料外, 日本非常重视研制表面薄膜陶瓷材料, 除应用于机械、化工领域外, 也成功生产出覆盖陶瓷薄膜的金属工艺品。

日本陶瓷工业之所以能形成如此强大的优势, 是与以下因素分不开: 其一, 日本有很多从事材料的生产和研究的大公司, 这些公司的中心研究所拥有先进的实验设备和一大批优秀的技术力量; 其二, 日本的其他工业技术发达, 国内新型陶瓷材料的需求市场较大; 其三, 日本政府多年来启动了不少大型陶瓷应用开发科研项目。