

应力集中和表面状态对疲劳强度影响的研究

中国科学院力学研究所 曾春华

一、引言

在变应力幅值下的疲劳破坏过程是十分复杂的，它受很多因素的影响，而应力集中和表面状态是最重要的因素。几十年来，国内外对这问题进行过广泛的研究^[1-5]。本文通过大量试件的疲劳试验，探讨了表面光洁度、表面划伤、缺口、加工工艺、螺纹牙型圆弧半径、晶间腐蚀等对疲劳强度的影响，得出了一些初步的结果。

二、试样及试验设备

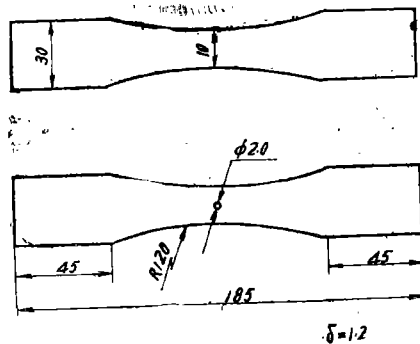
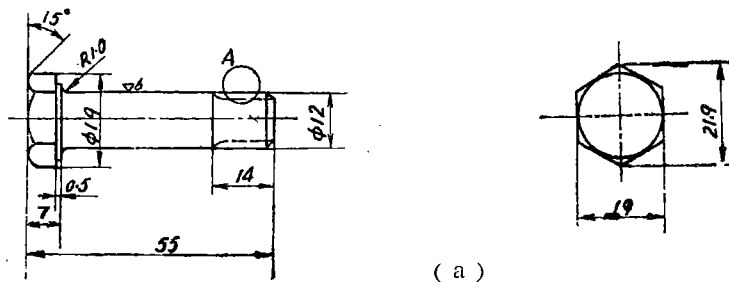


图1. 表面光洁度、表面划伤、中心孔疲劳试件(单位:毫米)

考虑表面光洁度、表面划伤、缺口影响的疲劳试样，选用 LY12cz 铝合金板试件，试件的形状和尺寸以及缺口形式如图 1 所示。



(a)

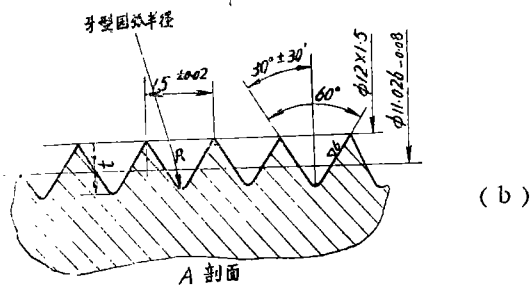


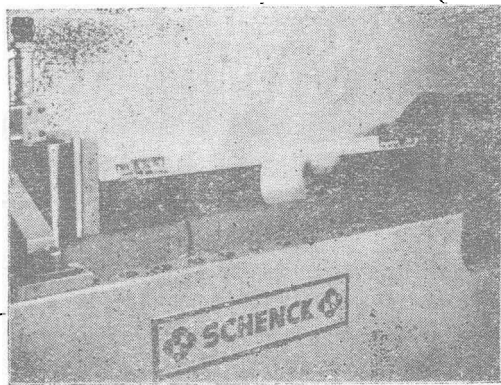
图2. 不同螺纹牙型圆弧半径的螺栓 (单位: 毫米)

考虑螺栓螺纹牙型圆弧半径和加工工艺影响的疲劳试样, 选用 30C₂MnS₁A 钢材, 热处理后 $\sigma_B = 120$ 公斤/毫米², 试件的形状和尺寸见图 2。

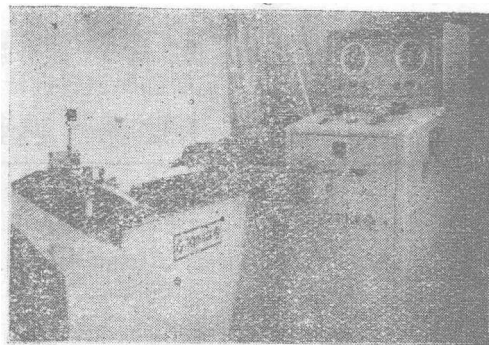
考虑晶间腐蚀影响的试样, 选用×机的机身下大梁铝型材, 试件及夹持情况见照片 1。

表面光洁度、表面划伤、缺口对疲劳强度影响的试验是在瑞士制 *Amsler* 高频疲劳试验机上进行的, 此试验机是电磁共振式机器, 机器有力学—光学测力计, 直接把交变载荷用光带格数反映出来, 并自动纪录载荷循环次数。

螺纹牙型圆弧半径、加工工艺及晶间腐蚀对疲劳强度影响的试验是在西德制 *Schenck* 疲劳试验机上进行的, 此试验机是机械共振式机器, 有力学—光学测力系统, 并直接记录载荷循环次数, *Schenck* 试验机系统见照片 2。



照片1. 晶间腐蚀影响的试件及夹具



照片2. Schenck 疲劳试验机系统

三、试验方法

本次试验采用成组对比试验的方法, 确定表面光洁度、表面划伤、缺口、螺纹牙型圆弧半径、加工工艺以及晶间腐蚀对疲劳强度的影响, 即每种试样都分别在几个应力水平下试验, 得出一条 $S-N$ 曲线, 然后再根据这些 $S-N$ 曲线进行疲劳强度的对比。成组对比试验的方法; 它具有直观、明显并能迅速给出结果等优点, 在实际研究中很受欢迎。

具体试验方法如下:

表面光洁度、划伤、缺口影响的试验，选用光滑试件 (∇_6)、表面有划伤试件、中心孔 ($K_t=2.5$) 试件和表面电解抛光的光滑试件 (∇_{12}) 四种，分别在 5~7 个应力水平下进行疲劳试验，每个应力水平下试验 10 个试件，得出四条 $S-N$ 曲线，然后直接比较这些因素对疲劳强度的影响。

螺栓螺纹牙型圆弧半径影响的试验，选用七组不同牙型圆弧半径的试样，由于试件受限制，只选 3 个应力水平下进行疲劳试验，每个应力水平下试验 6~12 个试样，得出七条 $S-N$ 曲线，再直接比较它们的疲劳性能。这七组试样是：

- 螺纹牙型圆弧半径：(1) $R < 0.1$ 毫米 滚压加工 (2) $R = 0.15$ 毫米 车削加工
 (3) $R = 0.10$ 毫米 车削加工 (4) $R = 0.20$ 毫米 车削加工
 (5) $R = 0.30$ 毫米 车削加工 (6) $R = 0.20$ 毫米 车削加工 (不对称)
 (7) $R = 0$ 毫米 车削加工

加工工艺的影响主要是考察螺纹牙型圆弧半径用车削加工和滚压加工后的疲劳强度，选两组试样进行比较。

晶间腐蚀影响的试验，选无晶间腐蚀和有晶间腐蚀二组试样，由于试件较少，只选 3 个应力水平下进行疲劳试验，每个应力水平下试验 5~7 个试样，得出两条 $S-N$ 曲线，直接进行疲劳性能的比较。

注意，在每个应力水平下试验时，每组都要取 5 个以上试样，所得到的疲劳循环周数 N ，我们是按取对数平均值进行处理的，这种处理方法在实际中是较常用的。它具有简单直观等优点，缺点是只有 50% 的概率。

四、试验结果和分析

表面光洁度、表面划伤、缺口对疲劳强度影响的试验结果见表 1 和图 3。

表 1 表面光洁度、表面划伤、缺口对疲劳强度影响的试验数据 ($\sigma_{平均} = 9$ 公斤/毫米²)

光滑试件 (∇_6)	S_{max} (公斤/毫米 ²)	24	21	19	18	17	16
	\bar{N} (对数)(周)	1.125×10^5	2.045×10^5	5.45×10^5	1.544×10^6	6.733×10^6	$10^7 \rightarrow$
光滑试件 (电解抛光至 ∇_{12})	S_{max} (公斤/毫米 ²)	24	22	20	18	16.5	
	\bar{N} (对数)(周)	1.390×10^5	2.751×10^5	6.804×10^5	1.952×10^6	$10^7 \rightarrow$	
中心孔试件 ($K_t=2.5$)	S_{max} (公斤/毫米 ²)	21	19	17	15	14	13
	\bar{N} (对数)(周)	5.027×10^4	9.128×10^4	1.537×10^5	4.504×10^5	1.639×10^6	$10^7 \rightarrow$
表面划伤试件	S_{max} (公斤/毫米 ²)	21	19	17	15	14	13
	\bar{N} (对数)(周)	8.083×10^4	1.331×10^5	4.075×10^5	7.633×10^5	5.079×10^6	$10^7 \rightarrow$

实验数据表明试样面状态是影响疲劳强度的重要因素。对于这种高强度铝合金，表面稍有缺陷，常成为极危险的尖锐缺口，形成应力集中。

一般来说，疲劳裂纹多起于零件表面，这是因为：

(1) 作用在实际构件上的载荷通常很复杂，而且几乎总是引起弯曲和扭转，这些载荷降低了表面最大抗力。

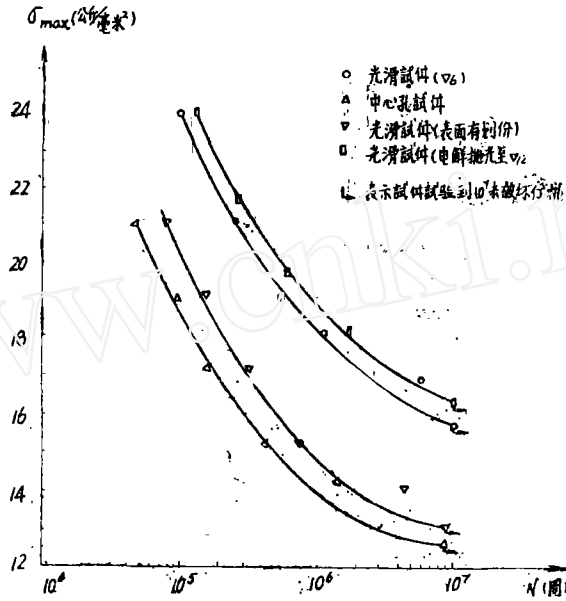


图3. 表面光洁度、划伤和缺口影响的试验结果

(2) 表面是对机械损伤和化学损伤（腐蚀、氧化、脱碳等）最敏感的地方。在许多场合下，由于表面受腐蚀和脱碳，结构的表面强度低于材料内部的强度。

(3) 突然的应力变化或结构缺陷引起的峰值应力，这值在表面最高。

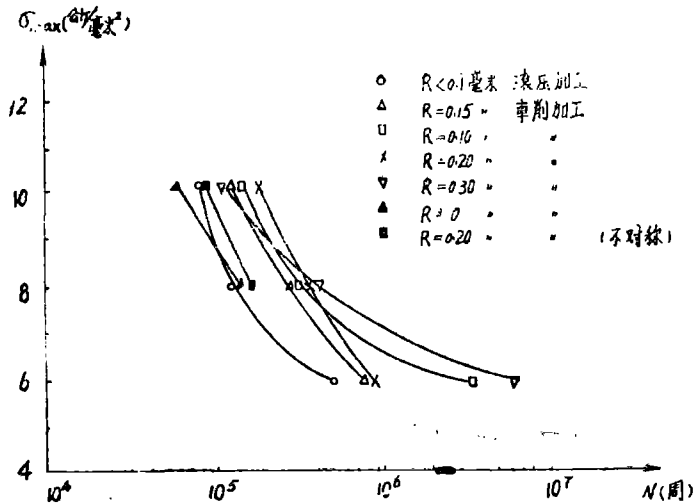


图4. 不同螺纹牙型圆弧半径对疲劳强度影响的实验结果

(4) 加工过程中产生的刀痕或切削, 熔焊过程中产生的切口效应也总发生在表面。

在循环载荷作用下, 由于试样表面状态对疲劳强度有很大的影响, 所以, 在零构件加工过程中, 必须尽可能保证最光滑的表面, 尽量避免形成刀痕、磨伤、裂纹等表面层的损伤。

螺栓螺纹牙型圆弧半径和加工工艺对疲劳强度影响的试验结果见表 2 和图 4。

螺纹和孔洞一样, 也是属于外形突然变化和材料不连续的地方, 它就是常使结构造成疲劳破坏的隐患。一般说来, 有效应力集中系数 k 是随着园角半径 R 的增大而减小的。实验充分证明了这一点, R 等于 0.3 的螺栓的疲劳强度最高, R 等于 0.2 的次之, R 等于零的疲劳强度最差。因此, 增大园角半径是提高疲劳强度的有效措施。

表 2 螺纹牙型圆弧半径对疲劳强度影响的实验数据

螺纹牙型圆弧半径 R (毫米)	螺纹数量 (个)	加工工艺	是大应力 σ_{max} (公斤/毫米 ²)	6	8	10
			对数 \bar{N} (周)	\bar{N}	\bar{N}	\bar{N}
小于 0.1	8	滚压加工		5.176×10^5	1.269×10^5	7.095×10^4
0.15	7	车削加工		7.998×10^5	2.92×10^5	1.3023×10^5
0.10	8	"		3.423×10^6	2.862×10^5	1.3023×10^5
0.20	12	"		8.46×10^5	3.124×10^5	1.863×10^5
0.30	10	"		5.9×10^6	4.031×10^5	5.75×10^4
0.00	12	"			1.44×10^5	5.76×10^4
0.20	6	" (不对称)			1.52×10^4	7.24×10^5

晶间腐蚀对疲劳强度的影响的实验结果见表 3 和图 5。

表 3 晶间腐蚀和无晶间腐蚀的疲劳试验数据 ($R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0.1$)

晶间腐蚀件	P_{max} (公斤)	3000	3800	5000
	\bar{N} (周)	9.297×10^5	1.9936×10^5	2.16×10^4
无晶间腐蚀件	P_{max} (公斤)	3800	4200	5000
	\bar{N} (周)	2.107×10^5	1.608×10^5	6.10×10^4

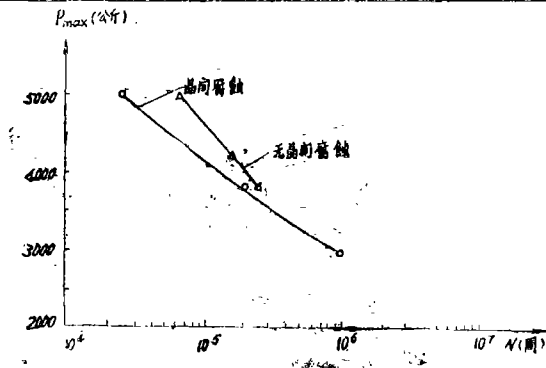


图5. 晶间腐蚀与无晶间腐蚀疲劳性能对比

金属表面被腐蚀一般可使表面变粗或在某些点上形成坑和裂缝,在交变应力作用下,会使疲劳强度大大的下降,这就是腐蚀疲劳问题。大量的研究都表明,对腐蚀疲劳的抗力主要取决于对腐蚀的抗力^[6]。一般来说腐蚀的不利影响是随着时间的增加而增加的。对于疲劳强度来说,如何使结构件防腐蚀是一个不容忽视的问题。

五、结 论

1. 从实验结果可以看到,缺口对试件的疲劳强度有很大的影响。这是由于在缺口尖端有很高的应力集中,致使试件的疲劳强度大大降低,在同一应力水平下,缺口试件的疲劳强度比光滑试件的疲劳强度降低6~15倍。因此应力集中在疲劳设计和研究中是个十分重要的问题。

2. 实验结果表明,表面划伤对试件疲劳强度也有很大的影响。在同一应力水平下,表面有轻微划伤的试件的疲劳强度比光滑试件的疲劳强度降低4~14倍,这是因为表面划伤就造成了表面的不连续,引起应力集中,致使疲劳强度下降。

3. 研究表明,试件表面光洁度对疲劳强度有一定的影响,表面光洁度为 ∇_{12} 的疲劳强度比表面光洁度为 ∇_6 (在同一应力水平下)提高30%到一倍左右。这是因为电解抛光可以部分消除试件表面的缺陷,减少了应力集中点,从而相应的提高了疲劳强度。一般说来,试件的疲劳强度是随着表面光洁度的提高而提高的。

4. 螺纹牙型圆弧半径的改变对螺栓疲劳强度的影响很大,实验表明,螺栓的疲劳强度随着螺纹牙型圆弧半径的增加而提高。 $R=0.20$ 毫米和 $R=0.30$ 毫米的疲劳强度比 $R=0$ 的高约2倍,螺纹的不对称性对疲劳强度也有影响,同是 $R=0.20$ 毫米的螺栓,对称的比不对称的(在同一应力水平下)疲劳强度高2%至18%。

5. 实验结果证明螺栓的加工工艺中,采用车削的疲劳强度普遍的高于滚压的疲劳强度。这结论和文献[7,8]的结果是一致的。

6. 晶间腐蚀对疲劳强度有一定的影响,这是因为腐蚀点就是应力集中点,应力集中的地方通常也是疲劳源,它在交变应力作用下会促使裂纹的形成和扩展,从而降低了试件的疲劳强度,实验也证实了这点。

参 考 文 献

- [1] Ужцк, Г. В., Прочность Металлов в Машиностроении, Трудрезервиздат 1958
- [2] Barrois, W and Ripley, E. L., "Fatigue of Aircraft Structures", 1963
- [3] Gassner, E and Schütz, W., "Fatigue Design Procedures", 1969
- [4] Schijve, J., "Fatigue of Aircraft structures", Israel JI of Technoloe, 8. 1—2 (1970) 1—20
- [5] Darrell F Socie., "Fatigue-Life Rrediction using Local stress-strain Concept", Proceeding of the Society for Expermental Stress Analysis xxxiv, 1 (1977)

- [6] Forrest, P. G., "Fatigue of Metals", 1962
- [7] Fatigue Strength of stall Screw Threads with Large Roat Radii under Axial Loading. E. S. D Item No. 67013
(Approved for Issue Jaunary 1967)
- [8] Fatigue Strength ofStall Screw Threads under Axial Loading. E. S. D. Item No. 67020 (Approved for Issue March 1967).

行业动态

“有限元法在曲轴强度计算中的应用”

电算技术审查会在上海召开

“有限元法在曲轴强度计算中的应用”电算技术审查会于1981年3月底至4月初在上海市召开。参加这次审查会的有来自高等学校、船检部门、研究院所和工厂等16个单位的26名代表。

会议听取了课题进展情况、“用三维有限元法进行曲轴强度计算”及“三维等参数元素应力分析程序”的介绍审阅了有关资料，并进行了热烈的讨论。一致认为：“上海内燃机研究所和复旦大学合作进行的这项工作，编制了计算程序和前处理程序，并对多种类型的曲轴进行了强度计算和实验验证，取得了较好的成果，圆满地完成了农机部(原一机部)下达的重点科研项目研究任务，在曲轴强度有限元计算方面处于国内领先地位，与我们所了解的国际先进水平相当。”

该应力分析程序具有较高精度，计算速度较快，能在国产中型计算机上装用。配备有自动生成三维曲轴计算网格的模型发生器，使计算的数据准备工作量大为减少，为用户提供了很大方便。

在研究过程中，曾先后对十余种机型的曲轴进行了二维和三维计算，并与光弹、电测等实验数据进行了比较，效果较好，偏差在工程允许的范围內，为转入工程实际应用创造了良好的条件。

审查会建议：

(1) 对于这项有实际价值的研究成果应及时推广、应用，在生产、科研、教育工作中发挥更大作用。

(2) 进行多方案的计算、比较，以逐步形成一整套行之有效的曲轴强度计算规范，为解决我国内燃机工业迫切需要解决的有关问题作出应有的贡献。

又讯：

× × × ×

“柴油机轴系扭振研究”电算技术审查会，同时在上海召开。

会议听取了上海内燃机研究所、上海市计算技术研究所关于“电算柴油机轴系扭振研究”课题进展情况、计算原理及电算及电算程序的介绍，与会代表审阅了有关技术文件，进行了热烈讨论和实事求是的评议，认为该课题组同志在电算柴油机轴系扭振研究方面做了很多工作，编制了自由振动、强制振动、动力学计算及干扰力距振型的简谐分析等四个专题的程序，程序数较完整，功能较全，计算中考虑的因素比较全面、细致。电算程序通用性较广，对柴油机动力学及扭振特性的数值计算具有一定的实用价值。

本刊通讯员 黄宏伟