

工艺方法对某结构形式的强度影响研究

Research on Effect of Milling Process of Some Structure Strength

蔡培培 吴炜 胡凯征 张洪波 / 中国空空导弹研究院

摘要:以某结构形式为例,研究了加工工艺对其强度、尤其是疲劳强度的影响,讨论了产生裂纹的原因,提出了工艺改进措施并得到了试验验证。结果表明,结构根部的应力集中是疲劳强度降低并出现裂纹的原因,加工工艺对疲劳强度有较大影响,改进工艺后,该结构根部应力集中程度降低,抗疲劳性能明显改善。

关键词: 铣削工艺方法; 强度; 寿命

Keywords: milling process; strength; lifetime

0 引言

传统上,对结构件的强度等力学特性分析主要基于其设计状态或成型终态,而加工工艺过程对结构最终力学特性影响的研究尚不充分。本文以某金属结构为例,研究了加工工艺对其强度尤其是疲劳强度的影响,讨论了产生裂纹的原因,提出了工艺改进措施并得到了试验验证。

1 结构型式

1.1 装配关系

某金属结构在使用时,由前、后锁紧装置轴向限位,如图1所示。整个系统在使用过程中,作用于此结构本体上的轴向载荷和部分横向以及侧向载荷由

此金属结构承担。

1.2 加工工艺

此结构与本体为一体,前后端面由车削方式加工而成,与本体接合部位呈尖锐直角,存在“清根”现象,根部过渡圆角半径 $R \leq 0.1\text{mm}$,宏观观察即可见此结构前后端根部粗大的车削刀纹,如图2所示,图中箭头标示位置为结构与本体的过渡处。

2 应力环境分析

此结构形式存在两个应力集中因素,一是清根导致根部过渡圆角过小,另一是存在粗大刀纹,两个因素共同作用形成重复应力集中。刀纹尺度为微米量级,过渡圆角尺度为毫米量级,两个

应力集中因素的尺度相差较大,小尺度因素引起的应力集中存在于大尺度因素引起的应力状态范围内,此时的重复应力集中系数等于两个因素单独作用下各自应力集中系数的乘积^[1],大尺度应力集中因素一定时,小尺度应力集中程度的大小就成为影响根部应力水平至关重要的因素。

车削刀纹可以简化为沟槽缺陷,理论分析表明,受载构件存在沟槽缺陷时,应力集中程度随沟槽方向的不同有较大差异。考虑图3所示的情况,均匀受拉无限大平板上存在椭圆孔,其长短半轴分别为 a 和 b ,无穷远处应力为 S , β 为椭圆孔长轴与应力 S 方向的夹角, θ 为椭圆孔边界上点的方位角。

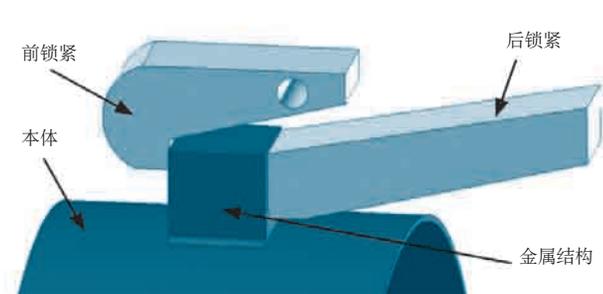


图1 装配关系示意图

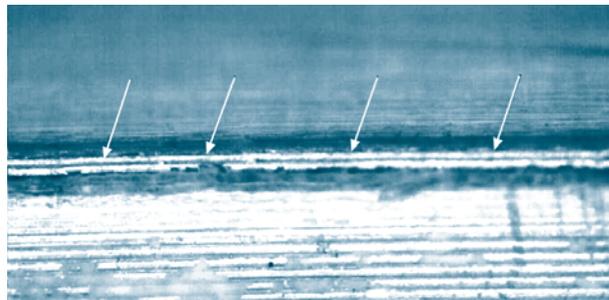


图2 前后端根部车削刀纹

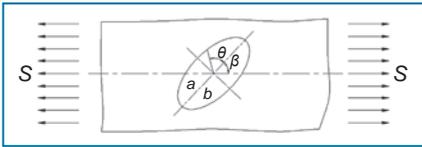


图3 均匀受拉无限大平板上的椭圆孔

根据弹性力学^[2]可知,椭圆孔边界处应力为:

$$\sigma_{\theta} = S \cdot \frac{1 + 2m \cos 2\beta - m^2 - 2 \cos 2(\beta - \theta)}{1 - 2m \cos 2\theta + m^2}$$

$$\text{其中, } m = \frac{a-b}{a+b}.$$

以长短轴之比为4:1的椭圆沟槽为例,计算可知:当 $\beta = 0^\circ$,即沟槽方向与应力S方向一致时,应力集中系数为1.5;当 $\beta = 45^\circ$,即沟槽方向相对应力S方向存在 45° 倾斜时,应力集中系数为5.8;当 $\beta = 90^\circ$,即沟槽方向与应力S方向垂直时,应力集中系数为9。

因结构主要承受轴向载荷,计算表明其根部主应力与本体周向基本正交,而根部刀纹方向沿本体周向,与主应力方向垂直,此时应力集中程度最大。

受载时,两个应力集中因素的共同作用诱发了根部较高的应力水平,很大程度上降低了强度尤其是疲劳强度,减少了使用寿命。

使用过程中,此结构根部曾经发生裂纹故障。理化检测表明,裂纹是大应力低周疲劳所致,疲劳裂纹均起源于此结构前、后端根部的加工刀纹,裂纹走向与刀纹方向一致。地面水平冲击试验再现了裂纹现象,裂纹位置、走向以及理化断口检测表明故障机理与前述分析一致。

3 加工工艺改进

3.1 改进措施

前述分析表明,此结构根部两个应力集中因素的共同作用是其强度尤其是疲劳强度降低的原因,因此加工工艺的改进应致力于缓解该处的应力集

中程度。为此,采取图4所示的改进措施,即根部采用铣削方式加工,并控制加工刀纹深度,且不进行“清根”处理,保留工艺圆角和工艺台阶。

采用铣削方式加工可以改变加工刀纹方向,有效降低或消除小尺度因素的应力集中程度;保留工艺圆角和工艺台阶可以缓解大尺度因素的应力集中程度。

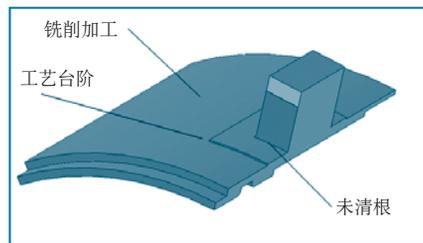


图4 加工工艺改进措施示意图

3.2 改进效果

对改进效果首先采用有限元方法进行理论分析,采用铣削方式加工并控制刀纹深度后,可以有效降低甚至消除小尺度因素的应力集中程度,理论分析转为集中于大尺度因素的应力集中改善程度。为此建立图5所示的力学分析模型,本体四周施加固定约束,并于对称面处施加对称边界条件,采用轴向加载模式,施加于此结构上缘前端。

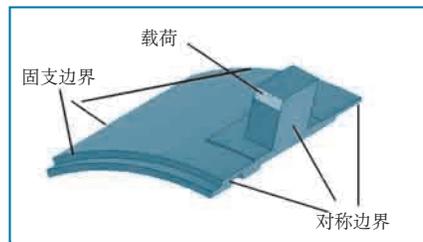


图5 分析模型示意图

1) 工艺圆角影响

改进前,根部进行“清根”处理,过渡圆角半径为 $R=0.02\sim 0.1\text{mm}$;改进后,工艺圆角 R 保持在 0.2mm 以上。相对于过渡圆角 $R=0.1\text{mm}$ 的情况,工艺圆角为 $R=0.2\text{mm}$ 时,计算可知,相同轴向载荷及边界条件下,应力降低了 $10.5\%\sim 11.4\%$;以结构

不发生屈服变形为标准,静力强度提高了 $11.7\%\sim 12.9\%$;根据材料S-N曲线的等效应力方程^[3]分析,疲劳寿命提高了 $42\%\sim 48\%$ 。

2) 工艺台阶影响

取工艺台阶厚度 $\delta=0.15\text{mm}$,计算可知,相同轴向载荷及边界条件下,保留工艺台阶时,应力降低约 5% ;以结构不发生屈服变形为标准,静力强度提高约 5.7% ;疲劳寿命提高约 20% 。

3) 对比试验

改进加工工艺后,采用新结构组装产品进行全尺寸地面载荷试验,并与改进前结果对比。试验表明,与原状态相比,工艺更改后,此结构寿命提高 70% 以上,结构抗疲劳性能明显改善,有效提高了使用可靠性。

4 结论

此结构根部的应力集中因素是其强度尤其是疲劳强度降低并出现裂纹的原因。工艺方法对此结构的强度尤其是疲劳强度有较大影响,改进工艺后,根部应力集中程度降低,抗疲劳性能明显改善。

AST

参考文献

- [1] 航空工业部科学技术委员会编. 应力集中系数手册 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [2] Timoshenko S. P., Goodier J. N.. 弹性理论(第三版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [3] 赵育善, 余旭东, 马彩霞, 王焘. 材料数据手册 [M]. 北京航空材料研究所, 1993.

作者简介

蔡培培, 工程师, 研究方向为空空导弹总体结构设计。