

# 基于有限元法的吊钩结构研究

韦铁平, 曾寿金, 练国富

(福建工程学院 机械与汽车工程系, 福建 福州 350118)

**摘要:** 钢索起吊重物的摆动角度是影响吊钩结构强度的重要因素。通过有限元软件 ANSYS 模拟计算, 揭示吊钩结构的危险截面及钢索摆动角度对吊钩结构强度的影响规律。计算结果表明: 吊钩结构的危险截面分别在 A-A、B-B 和 C-C 截面处; 随着摆动角度的增大, 水平附加分力引起的 A-A 和 C-C 截面处的应力值变化极小, 而 B-B 截面呈递增趋势, 影响显著。分析结果为吊钩结构的强度设计提供理论依据。

**关键词:** 起重机; 吊钩; 摆角; 有限元法

**中图分类号:** TB121; O346

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2017)03-0234-04

## Study of hook structure based on finite element method

Wei Tiejing, Zeng Shoujin, Lian Guofu

(College of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The swinging angle of a steel cable is a key factor affecting the strength of hook structure. The brittle sections of the hook structure and the law of the swinging angle affecting the strength of the hook structure were revealed with ANSYS software. The results indicate that the sections of A-A, B-B and C-C are the brittle sections. The tensile stress of the sections of A-A and C-C changes very little, but rises markedly in the section of B-B with the increase of the swing angle. The results can serve as a theoretical basis for the strength design of crane hook structure.

**Keywords:** crane; hook; swinging angle; finite element method

吊钩是起重机械中重要构件,是直接承受重物载荷的部分。起重机吊钩如果发生断裂或损坏,将会造成重大的安全事故。为保证起重机械安全稳定运行,起重机吊钩的结构及工况参数的选择非常重要。Toshihisa 等<sup>[1]</sup>对船用吊钩进行静力学分析及疲劳试验,发现圆弧过渡角的变化对吊钩强度的影响不大,但柄部直径的大小对吊钩强度影响明显。T. Muromakia 等<sup>[2]</sup>认为吊钩设计具有类似典型的锥形为最佳形状。Y. Torres 等<sup>[3]</sup>发现吊钩的断裂是由应变时效脆化造成的。K. Easterling<sup>[4]</sup>指出可通过预测应力的集中区域,

优化起重机吊钩的形状,延长其工作寿命并降低故障率。此外,通过数值模拟分析,可揭示吊钩结构应力、应变分布规律,并确定吊钩的危险截面<sup>[5-9]</sup>。上述研究主要针对吊钩结构参数对其强度的影响分析,而运行工况中吊物钢索与吊钩之间的摆角变化同样对吊钩安全工况造成影响。

本研究以量程为 32 t 的起重吊钩作为研究对象<sup>[10]</sup>,对吊钩变化摆角的工况模型进行数值模拟计算,从而确定吊钩结构的危险截面并探讨摆角对吊钩强度的影响规律,为吊钩结构的强度设计提供理论依据。

收稿日期: 2016-12-01; 修回日期: 2016-03-20

基金项目: 福建省属高校科研专项(JK2014032); 福建省青年自然科学基金项目(2017J05071); 福建省自然科学基金项目(2015J01181)

通讯作者: 韦铁平(1984-),男(壮族),广西贵港人,讲师,博士,研究方向:强度设计、力值计量。

# 1 吊钩的有限元模型

## 1.1 吊钩模型简化

选择的吊钩为 M 级强度、材料为 Q345qD, 结构如图 1。Q345qD 是低合金高强度结构钢, 具备较高的强度、韧性, 能够承受机车车辆的载荷以及冲击, 有较好的抗疲劳性、低温韧性和耐大气的腐蚀性。

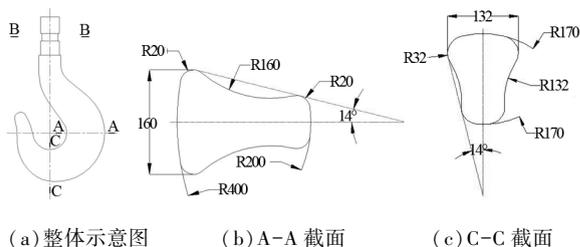


图 1 吊钩结构尺寸示意图(单位:mm)

Fig.1 The dimension of hook structure(unit:mm)

吊钩结构的强度为研究重点, 直杆螺纹作为约束端, 螺纹可简化。采用大型前处理软件 ANSA 对复杂模型建立有限元网格模型, 吊钩结构的有限元模型如图 2。单元类型选择 Solid185, 节点数为 20 693 个, 单元数为 10 479 个。

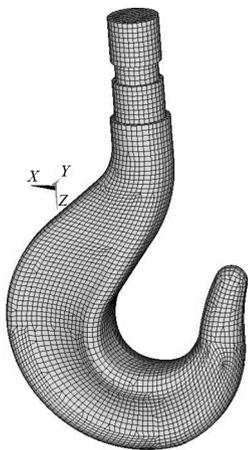


图 2 吊钩结构有限元模型

Fig.2 The finite element model of hook structure

## 1.2 边界条件及加载

### 1.2.1 边界条件

吊钩和吊钩梁通过螺纹连接。为研究吊物过程钢索摆角对吊钩结构的影响, 在此处吊钩的螺纹面上施加全自由度约束不会造成太大误差<sup>[9]</sup>。

### 1.2.2 加载

吊物钢索发生摆动时, 偏离竖直方向的角度为  $\alpha$ , 即钢索的摆角。选择 7 个不同的钢索摆角, 分别为  $-30^\circ$ 、 $-20^\circ$ 、 $-10^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$  和  $30^\circ$ 。此时, 模拟将通过水平分量和竖直分量的载荷实现钢索发生摆角时的受载工况。载荷的竖直方向分量为吊钩额定吊重  $G = 3.2 \times 10^2$  kN, 载荷的水平分量  $F = G \tan \alpha$ ; 此处钢索直径取 16 mm, 载荷的作用面区域约为  $D$  与吊钩中间竖直截面最大厚度的乘积<sup>[9]</sup>。

## 1.3 强度理论

第三强度理论认为, 使材料发生塑性屈服的主要因素是最大切应力  $\tau_{\max}$ , 无论材料处于何种应力状态, 只要构件中的最大切应力达到某一极限切应力值  $\tau_u$  时, 就会引起材料的塑性屈服。考虑安全因数, 此理论的强度条件为:

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma] \quad (1)$$

其中,  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  为主平面对应的主应力;  $[\sigma]$  为材料的许用拉应力。

该理论的缺陷是没有考虑中间主应力  $\sigma_2$  的影响。

第四强度理论认为, 使材料发生塑性屈服主要取决于畸变能密度。即无论材料处于何种应力状态, 只要其畸变能密度到达某一极限值时, 就会引起材料的塑性屈服。此理论的强度条件为:

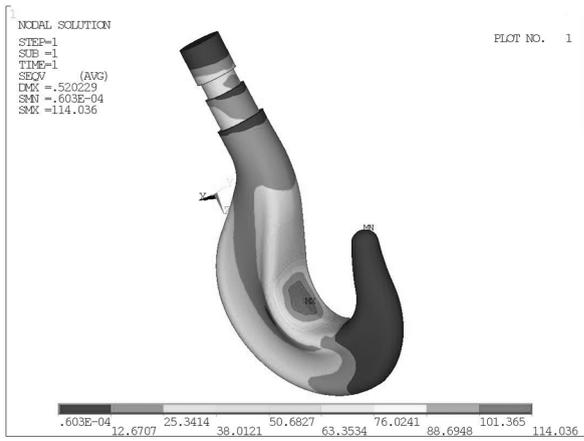
$$\sqrt{\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq [\sigma] \quad (2)$$

其中,  $\sigma_2$  为主平面对应的主应力;  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 。

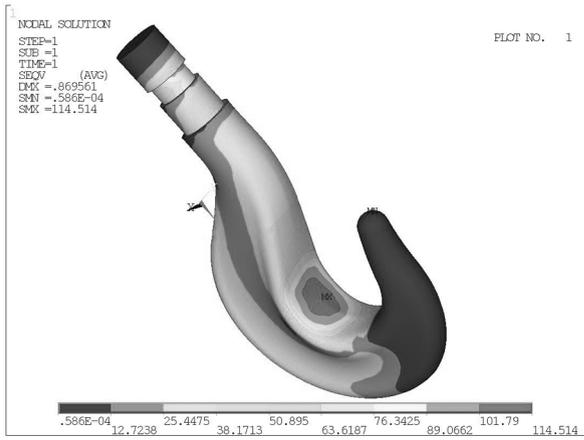
拉伸试验证明, 对于钢材、铝、铜等塑性材料而言, 第四强度理论比第三强度理论更符合试验结果。本文将采用第四强度理论作为吊钩结构破坏评判准则。

# 2 模拟结果与分析讨论

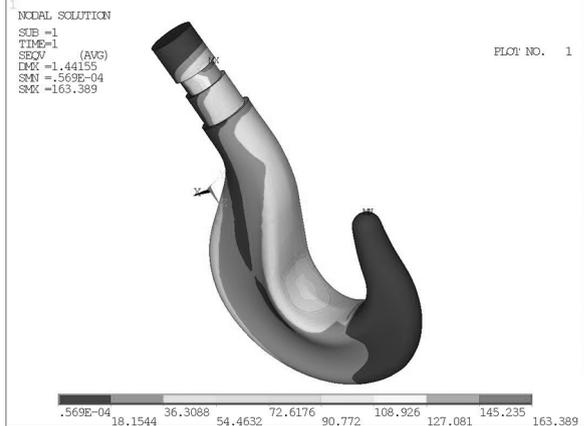
分析结果选择第四强度理论计算 Von Misses 应力显示云图分布。图 3(a)、(b) 和 (c) 分别为钢索摆角为  $-30^\circ$ 、 $0^\circ$  和  $30^\circ$  吊钩结构的应力云图。图中显示, 吊钩结构的集中应力发生在 A-A 截面、B-B 直杆螺纹和 C-C 截面处, 吊钩危险截面随着摆角的改变会发生变化。由图 3(c) 可知, 吊钩在  $-30^\circ \sim 30^\circ$  之间的载荷作用下, 最大 Von Misses 应力数值不超过 164 MPa, 吊钩材料满足



(a)  $\alpha = -30^\circ$



(b)  $\alpha = 0^\circ$



(c)  $\alpha = 30^\circ$

图 3 不同摆角位置下吊钩结构的应力云图

Fig.3 The stress cloud diagram of hook structure under different swinging angles

强度要求。

图 4 为摆角 $\alpha$ 引起 3 个截面处集中应力值的变化规律曲线图;图 5 为钢索摆角变化时,由外载荷在 3 个截面处引起的弯曲变形贡献示意图。由

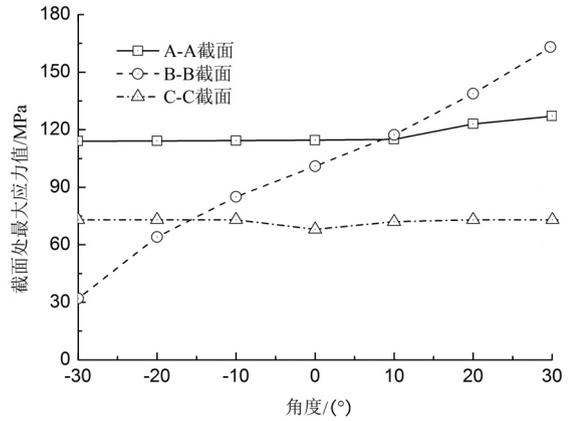
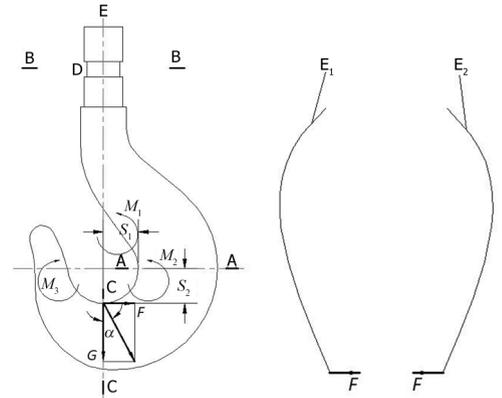


图 4 摆角对各截面处集中应力值的影响规律

Fig.4 The effect of the concentrative stress on the sections of hook structure



(a) A-A 截面附加荷载 (b) 吊钩直杆轴线 E 的变形

图 5 外载对吊钩结构的影响分析

Fig.5 The influence of lifting weight on the sections of hook structure

图 4、5 分析可知:

1)图 4 显示,C-C 截面处仅受竖直方向吊物 G 作用,钢索摆角引起的水平分力 F 对 C-C 截面不会造成影响。因此,该截面处最大应力值不会受到钢索摆角影响。

2)图 4 显示,当钢索摆动角度  $\alpha$  为正值时, A - A 截面处最大应力值几乎没有发生改变;当钢索摆角  $\alpha$  为负值时,该处的最大应力值逐渐增大。从图 5(a)可知,  $\alpha = 0$  时,钢索拉力 G 对 A-A 截面产生逆时针弯曲应力  $M_1$ ;钢索摆角为正值时,多出水平方向的力 F,对 A-A 截面产生逆时针弯曲应力  $M_2$ ,  $M_1$  和  $M_2$  叠加,使 A-A 截面受到的应力值增大;当  $\alpha$  为负值时,水平分力 F 对 A-A 截

面产生顺时针弯曲应力  $M_3$ , 而  $M_1$  和  $M_3$  相抵消, 使 A-A 截面受到的应力值减小。因  $F$  与 A-A 截面的距离  $S_2$  较小, 产生的弯曲应力不大, 因此 A-A 截面的应力变化较小。

3) 图 4 显示, B-B 截面处的应力随着钢索摆角  $\alpha$  增大而增大, 且影响显著。由图 5(a) 可知, 截面 B-B 主要受到吊重  $G$  的影响, 当钢索发生摆动, 则吊钩除受到竖直方向  $G$  的作用, 还有附加水平分量  $F$ 。图 5(b) 显示, 当  $\alpha$  为正值时, 水平分力  $F$  使得中性轴 E 变形为  $E_1$  形状, D 处的拉应力由吊重  $G$  与水平分量  $F$  叠加而成, 产生更大的应力值。随着摆角  $\alpha$  的增大, 水平分量  $F$  增大, D 处受到的应力值随之增大。当  $\alpha$  为负时, 产生的水平分力  $F$  使得中性轴 E 变形为  $E_2$  形状, 引起 B-B 截面 D 处受到压应力, 并与  $G$  产生的拉应力叠加, 从而 D 处产生的应力值减小。随着  $\alpha$  的增大, 压应力值增大, D 处受到的拉应力值随之减小。水平分力  $F$  与 B-B 截面距离较大, 产生的附

加弯矩也大, 因此水平分力对该截面应力影响极大。

### 3 结论

1) 不同工况下, 吊钩结构可能的危险截面为 A-A、B-B 和 C-C。吊物钢索摆动, 水平方向会产生附加分力。摆角越大, 水平附加分力越大, 而竖直分力恒为吊物重量。

2) 水平分力会在 B-B 和 A-A 截面产生附加弯矩, A-A 和 B-B 截面处的应力为竖直分力产生的应力值与附加弯矩产生的应力值的叠加。摆角为负值时, A-A 截面应力值基本不受影响; 摆角为正值时, A-A 截面应力值缓慢增加。而对于 B-B 截面, 随着摆角的增大, 其拉应力值单调递增且变化极大。

3) 从数值模拟分析结果看, 各种工作状态下的吊钩结构强度仍然充裕。因此, 在满足强度要求的基础上, 吊钩结构可做进一步优化。

### 参考文献:

- [1] Nishioka T, Lee H, Won Y, et al. Strength evaluation of marine crane hooks by static-load and fatigue experiments[J]. Ocean Engineering, 2010, 45(Special): 1027-1032.
- [2] Muromaki T, Hanahara K, Nishimura T, et al. Multi-objective shape design of crane-hook taking account of practical requirement[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Computational Mechanics and the 12th International Conference on the Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science. Hong Kong-Macau China. Nov.30- Dec.3, 2009. Washington D C: AIP Publishing, 2010, 1233(1): 632-637.
- [3] Torres Y, Gallardo J M, Dominguez J. Brittle fracture of a crane hook[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(1): 38-47.
- [4] Shaban M, Mohamed M I, Abuelezz A E, et al. Determination of stress distribution in crane hook by caustic[J]. Stress, 2013, 2(5): 369-370.
- [5] 高海峰, 白广忱, 费成巍. 起重机吊钩等效应力非线性可靠性灵敏度分析[J]. 机械设计与制造, 2014(6): 167-170.
- [6] 闫兴民, 张亮有. 基于 SolidWorks 起重机吊钩的有限元分析[J]. 机械工程与自动化, 2016(1): 44-45.
- [7] Easterling K. Introduction to the Physical Metallurgy of Welding[M]. Berlin: Elsevier, 2013.
- [8] 卢泽晖, 胡吉全. 基于 ANSYS 的起重机吊钩有限元分析[J]. 装备制造技术, 2011(2): 44-46.
- [9] 李水水, 李向东, 范元勋, 等. 基于 ANSYS 的起重机吊钩优化设计[J]. 机械设计与制造, 2012(4): 37-38.

(责任编辑: 陈雯)