

阴极铜剥片机组中挠曲模型的建立及其仿真

□ 程佳卫¹ □ 陈惠贤¹ □ 尹海鹏¹ □ 杨汉元²

1. 兰州理工大学 机电工程学院 兰州 730050

2. 金川集团股份有限公司 甘肃金昌 737104

摘要:在实际生产中,阴极铜剥片机组常常出现铜板分离不开,或者极板脱链等故障,其最主要的原因是由于挠曲装置中挠曲力 P 设计不合理造成的。通过建立挠曲装置的三维模型,分析挠曲过程极板受力,建立挠曲的数学模型,求解出了挠曲力的作用范围。最后利用 ANSYS Workbench 进行静力学分析和挠曲模型仿真,修正了挠曲力 P 的作用范围,解决了挠曲过程挠曲力 P 不合理的问题,为以后调试或制造阴极剥片机组提供理论依据。

关键词:阴极铜剥片机组 挠曲装置 挠曲力 ANSYS Workbench 分析

中图分类号:TH123

文献标识码:A

文章编号:1000-4998(2015)03-0025-03

冶金行业对永久阴极剥片机组的探索在不断的提高和完善,从 1978 年以来,国外通过生产实践对剥片机组进行了一系列的探索和改进,如澳大利亚汤士威尔冶炼厂、芬兰 Outokumpu 公司等^[1]。我国自 2003 年由江铜贵溪冶炼厂引进永久阴极剥片机组以来,行业内以及一些大学教授都在不断地探索和改进永久阴极剥片机组,但其核心技术受到外方长期垄断和技术封

收稿日期:2014 年 9 月

锁。在实际生产过程中,挠曲装置往往出现铜板难分离、极板脱链等问题,故障的频频出现不仅影响生产效率,有时还可能危及生命财产安全^[2-3],因此,对挠曲过程的探索和研究是十分必要的。在 ISA 电解法冶炼铜时,铜板在长大过程中厚度不一致且不锈钢极板和铜板结合力也不同(280~300 MPa),使挠曲装置中油缸所需的力 P 很难控制。如果力太小,不能使顶部开口,即铜板和不锈钢极板没有分离开,在下一步凿刀装置中

表 2 优化前后车架总质量及变化率

名称	初始值	优化结果	变化率
后端高度/mm	630	450.4	-28.5%
前端高度/mm	253	261.65	3.4%
腹板高度/mm	8	7.16	-10.5%
翼板高度/mm	16	14.11	-11.8%
最大应力/MPa	319.4	347.87	8.9%
纵梁体积/mm ³	1.04×10 ⁸	0.82×10 ⁸	-21.3%

架质量为 3 019 kg。从表 2 可以看出,减小纵梁后端高度是车架减重的主要途径。

4 结论

笔者运用有限元分析软件 ANSYS 对车架进行了静力分析,车架应力较大部位发生在前后加载处,中间部位有很大的性能余量。为实现车架的轻量化,以纵梁为优化目标进行了结构优化设计,通过对纵梁高度和板厚进行尺寸优化,车架质量减轻了 349 kg,大幅提高了气瓶运输车天然气的容积率,降低了气体运输成本,取得了良好的经济效益和社会效益,同时也为其它车架的设计与改进提供理论参考和技术支持,具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 朱容庆.重型载重汽车车架轻量化设计研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.
- [2] 尹辉俊.重型自卸车车架的有限元分析及其早期断裂原因分析[D].武汉:华中科技大学,2006.
- [3] 姜勇,顾洪枢,张文明.基于 ADAMS 的铰接式自卸车刚柔耦合动力学建模与仿真分析[J].有色金属(矿山部分),2014,66(3):64-67.
- [4] 李正网.基于 ANSYS 的重型货车车架结构分析和优化研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.
- [5] 杨学军.SGA3722 矿用汽车车架异常断裂的分析[D].北京:北京科技大学,2006.
- [6] 张朝晖,王富耻,王鲁,等.ANSYS 工程应用范例入门与提高[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [7] 谭继锦.汽车有限元法[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [8] 于国维.汽车起重机车架结构件参数化建模程序开发[D].长春:吉林大学,2008.
- [9] 李峻,于学兵,张昆.汽车车架的优化设计方法[J].机械设计与研究,2005,34(2):39-41.
- [10] 冯国胜,刘玉杰,刘鹏.冶金专用车车架结构的优化设计[J].系统仿真学报,2006,18(2):537-539.

(编辑 小 前)

难以实现铜剥离。如果力太大,可能使铜板发生严重的塑性变形,使极板脱链,甚至使阴极铜产品报废。所以研究清楚挠曲过程中不锈钢极板变形,推导出挠曲过程中作用力 P 适合的非常关键,同时也为整个剥片机组的自主制造奠定理论基础。

1 挠曲装置介绍及其原理分析

1.1 挠曲装置说明

在 ISA 电解法中,不锈钢极板通过在电解液中不断析出铜离子而长大成为阴极铜,铜吸附在不锈钢表面形成左右两块 5~15 mm 厚的铜板。不锈钢极板为 316L,按照国际标准制造;铜板大小为 1 100 mm×1 000 mm。挠曲装置是将两块铜板与不锈钢极板进行一次分离的机械设备,也即在极板的上端部挠曲开一个适当的开口,以便在接下来的剥离铜的凿刀装置中顺利剥离铜产品。挠曲装置是由起固定油缸和作为挠曲支撑作用的两个支架构成,左右两个油缸带动挠曲杆,以均匀速度慢慢靠近极板^[4-5]。可以忽略其中的碰撞影响,用极板弯曲力矩使铜板与极板分开,实现极板和铜板的预分离。

1.2 挠曲三维模型建立

用 SolidWorks 建立一个模型,为了简化模型,用油缸的活塞杆代表挠曲杆,并省略油缸部分,用简化的拉伸凸台代表横向传送链,依次绘出零件,并且装配成如图 1 的挠曲模型,为了能够更好地观察模型,去掉其对称的部分,保留一半。

2 挠曲力的计算

2.1 挠曲力学模型分析

挠曲力是挠曲装置中由挠曲油缸带动的挠曲杆加载在阴极极板上的弯曲力。通过研究薄板小挠度问题

知道,可以求解出板面内的正应力 σ_x, σ_y 和 XY 面内的切应力 τ_{xy} ,但薄板挠曲过程不符合小挠度的条件^[6]。再用材料力学中梁弯曲理论和薄板在 V 型模中弹性弯曲对比,求出的力 P 相差不大^[7],而在实际生产中也要根据实际情况进行合理调整,只是粗略知道一个范围。其解并不要求十分精确。所以本文应用材料力学梁弯曲理论建立数学模型求解,如图 2 所示。

$m-m$ 截面为铜板长大截止面, $m-m$ 到 A 只有不锈钢极板,没有两侧铜板, P 为未知力,但是铜板与不锈钢极板结合力为 300 MPa(取最大值)。 $L=80$ mm, $h=15+3+15=33$ mm,由静力平衡可求得 A, B 处支反力 $F_A=F_B=P/2$, $m-m$ 截面弯矩为 $M=PL/2$,剪力为: $F_S=P/2$ 。

2.2 正应力计算

如图 2 (b) 所示, $m-m$ 的矩形截面极惯性矩为 $I_x=bh^3/12$,抗弯截面系数为:

$$W_x = \frac{I_x}{h/2} = \frac{bh^3/12}{h/2} = \frac{bh^2}{6} \quad (1)$$

正应力为:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{M}{W_x} = \frac{LP/2}{bh^2/6} = \frac{3LP}{bh^2} = \frac{3 \times 80P}{1\ 000 \times 33^2} = \frac{240P}{1\ 089\ 000} \\ &= \frac{P}{4\ 537.5} \end{aligned} \quad (2)$$

由于不锈钢极板许用应力为 137 MPa,所以:

$$\sigma = \frac{P}{4\ 537.5} \leq 137 \text{ MPa}$$

所以 $P \leq 621.6$ kN。

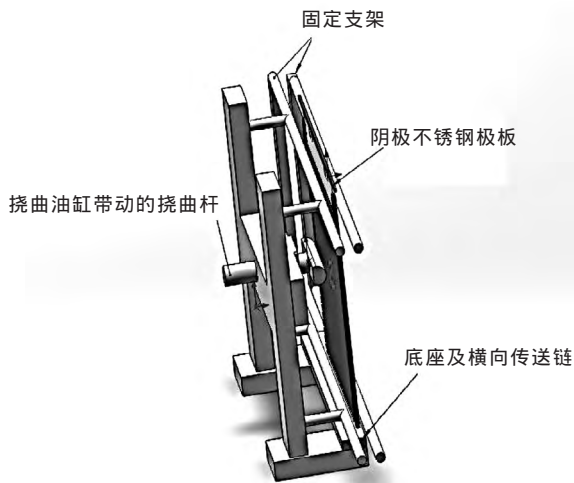
2.3 切应力的计算

在计算弯曲力 P 作用下,铜板与不锈钢极板接触面上的切应力由材料力学中矩形梁弯曲切应力计算得到:

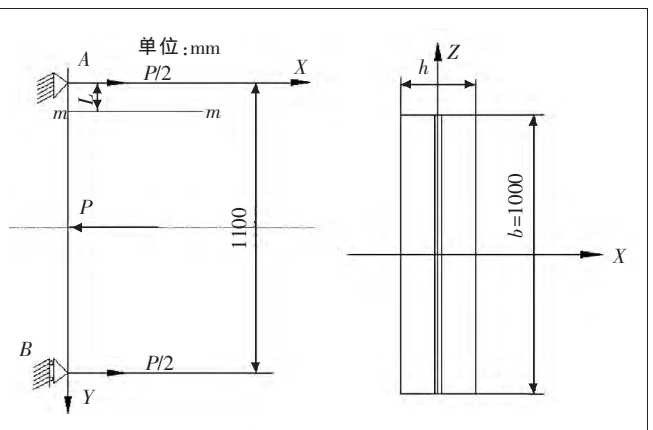
$$\tau = \frac{F_S S_A^*}{I_x h} \quad (3)$$

式中: S_A^* 为截面 $m-m$ 对 X 轴的静矩。

由材料力学公式得:



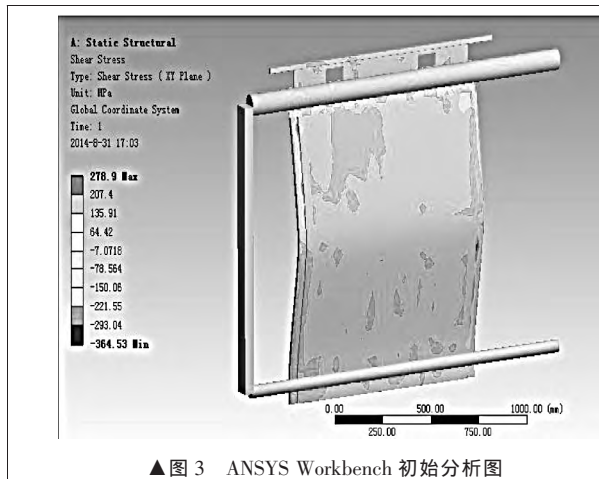
▲图 1 挠曲装置的三维模型



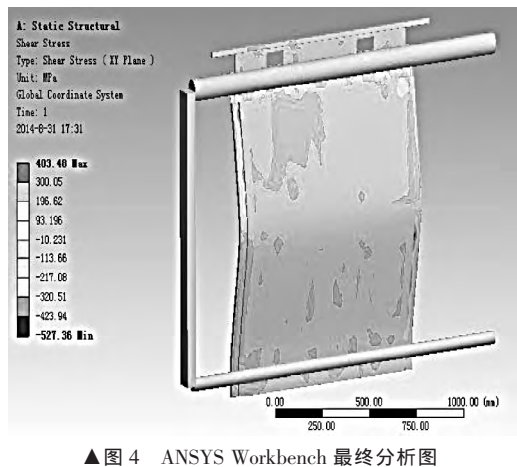
(a) 挠曲模型受力示意图

(b) $m-m$ 截面图

▲图 2 挠曲过程的力学模型



▲图3 ANSYS Workbench 初始分析图



▲图4 ANSYS Workbench 最终分析图

$$S_A^* = \int_A x dA = \frac{b}{2} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - x^2 \right] \quad (4)$$

在 $m-m$ 截面处,由于不锈钢极板厚度为 3 mm,所以铜板与极板交界处($x=1.5$ mm)的静矩为:

$$S_A^* = \int_A x dA = \frac{b}{2} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - x^2 \right] = \frac{b}{2} \left[\frac{h^2}{4} - 1.5^2 \right] \quad (5)$$

计算 $m-m$ 截面切应力:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{F_S S_A^*}{I_x h} = \frac{F_S \frac{b}{2} \left[\frac{h^2}{4} - 1.5^2 \right]}{\frac{bh^3}{12} h} = \frac{6F_S b \left[\frac{h^2}{4} - 1.5^2 \right]}{h^4} \\ &= \frac{6 \times P/2 \times 1000 \times \left[\frac{33^2}{4} - 1.5^2 \right]}{33^4} = \frac{P}{743.8} \geq 300 \text{ MPa} \end{aligned}$$

则 $P \geq 223.2$ kN, 所以油缸输出的挠曲力的范围为: $223.2 \text{ kN} \leq P \leq 621.6 \text{ kN}$, 具体数值还要根据实际生产情况进行合理调试, 总之以实现铜板与不锈钢剥离、且不损坏极板为目的进行调试。

3 挠曲模型的仿真

3.1 挠曲模型静力学分析

用 SolidWorks 建立挠曲模型,经分析去掉对挠曲力影响不大的结构,以达到简化模型的作用。然后输入到 ANSYS Workbench 中进行静力学分析^[8]。在固定支架的中心位置处加载。将力 $P=223.2$ kN 转化为面力 F_x , 加载在中心 $0.1 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 的面积上,作静力分析。这样近似处理对挠曲力的影响很小,结果如图 3 所示。

3.2 挠曲力的修正

从 ANSYS Workbench 分析结果来看,铜板与极板顶端接触面的应力约为 207~278 MPa, 这还不能实现铜板和极板的预剥离,所以要调整载荷,使图中最大切应力区的下限值不小于 300 MPa,见表 1。

经过反复调整最终确定挠曲力 $P=322.9$ kN。静力分析结果如图 4 所示, 阴极铜板与不锈钢极板顶端交

表 1 载荷与预剥离截面切应力关系

P/kN	223.2	243.2	330	325	323	322.9
截面切应力/MPa	207.4	225	318.9	306.7	302	300

接面处的切应力大于或者等于 300 MPa。即只要加载力 P 在 $621.6 \text{ kN} \geq P \geq 322.9 \text{ kN}$ 范围, 即可实现铜板与不锈钢极板的预分离。

4 结束语

本文通过对比建立了简化的挠曲模型, 再经过力学计算确定了挠曲杆力 P 力的范围, 最后通过 SolidWorks 建立三维模型, 然后通过 ANSYS Workbench 进行静力学模拟仿真, 并且修正了力 P 的取值范围, 最终确定了挠曲力的范围, 解决了一直以来由于挠曲力未知而引起的各种问题, 给阴极剥片机组的调试提供有力的依据, 并为以后自主制造阴极剥片机组提供理论依据。

参考文献

- [1] 熊友泉. 国内首条引进 ISA 电解装备的完善 [J]. 有色设备, 2009(3):28-31.
- [2] 张邦琪, 梁卫国. 铜电解技术的进展 [J]. 中国有色冶金, 2007(5):12-18.
- [3] 姚素平. 永久阴极铜电解技术述评 [J]. 有色冶金设计与研究, 2000(3):11-19+29.
- [4] 张伟旗, 蔡龙生. 阴极永久剥片机组常见设备故障的控制 [J]. 世界有色金属, 2013(1):43-45.
- [5] 冯益民. 贵冶 ISA 法极板处理机组 [J]. 铜业工程, 2006(3):45-46, 16.
- [6] 徐之纶. 弹性力学 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
- [7] 李湘生, 纪胜如. 薄板在 V 型模中弯曲的弹性变形和弹塑性变形分析 [J]. 湖北工学院学报, 1996(3):28-32.
- [8] 凌桂龙, 丁金滨, 温正. ANSYS Workbench 13.0 从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

(编辑 日月)