

带式烧结机台车篦条疲劳分析

齐铁力

(唐山学院 a. 河北省智能装备数字化设计及过程仿真重点实验室; b. 机电工程系, 河北 唐山 063000)

摘要:以带式烧结机台车中的篦条为研究对象,运用有限元方法对两种工况下的篦条进行热应力分析,确定了影响篦条失效的主要因素,明确了篦条屈服强度随温度变化的规律。选取两工况下等效应力最大的节点作为疲劳位置,对篦条进行疲劳分析,确定了篦条易疲劳的薄弱部位;并通过与篦条实际寿命相对比,验证了软件计算篦条疲劳寿命的准确性。

关键词:带式烧结机台车;篦条;有限元方法;热应力;疲劳特性

中图分类号:TF046.4;O346 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-349X(2021)06-0028-06

DOI:10.16160/j.cnki.tsxyxb.2021.06.006

Fatigue Analysis of the Grate Bar in the Band Sintering Machine Trolley

QI Tie-li

(a. Key Lab of Intelligent Equipment Digital Design and Process Simulation of Hebei Province;

b. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China)

Abstract: Taking the grate bars in the band sintering machine trolley as the research object, the thermal stress of grate bars under two working conditions is analyzed with finite element method. In this way, the main factors affecting the failure of the grate bars are determined, and the pattern of the yield strength changing with temperature is made clear. The node with the maximum equivalent stress under the two working conditions being selected as the fatigue position, a fatigue analysis is carried out and the weak parts prone to fatigue are determined. Then, the results are compared with the actual life of the grate bars and the accuracy of their fatigue life calculated by the software is verified.

Key Words: band sintering machine trolley; grate bars; finite element method; thermal stress; fatigue property

台车是带式烧结机上承载烧结矿的主要部件,主要由台车体、车轮、卡轮、密封装置、栏板、篦条等组成。台车承受的载荷主要是机械力和热载荷,其运行环境和工作条件都比较恶劣,所以容易产生热疲劳而损坏^[1]。

目前国内外对烧结机台车的研究主要集中在烧结过程控制、烧结机台车及其主梁和栏板

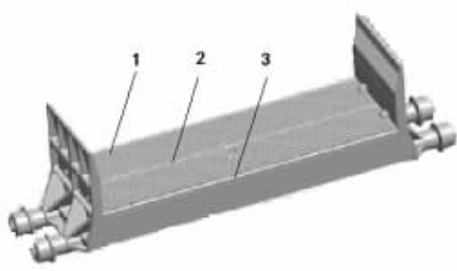
的应力分析与温度分析上,对台车篦条的研究较少^[2-8]。而篦条是承受交变热载荷的关键零件,因此,本文以 130 m² 带式烧结机的篦条为研究对象,运用有限元方法对篦条的应力场与温度场进行分析,在此基础上进一步分析篦条的疲劳特性,得出篦条的屈服特性和易疲劳的薄弱部位。

基金项目:唐山市人才资助项目(A202002031)

作者简介:齐铁力(1967—),女,河北唐山人,教授,硕士,主要从事制造技术与数值模拟研究。

1 三维实体模型

篦条排布在台车底面,分为三排布置,每排 90—120 件,通常中间篦条的温度较高^[9]。篦条的结构比较复杂,因此选取 Solidworks 作为建模工具,利用草图、拉伸、修剪、镜像等命令,完成台车和中间篦条的三维模型,如图 1 和图 2 所示。本文只分析中间篦条的情况,故从台车模型中提取中间篦条,并将其导入 ANSYS 软件中进行分析。两端篦条的分析可参照中间篦条的分析过程。



1. 左端篦条;2. 中间篦条;3. 右端篦条

图 1 台车的三维模型

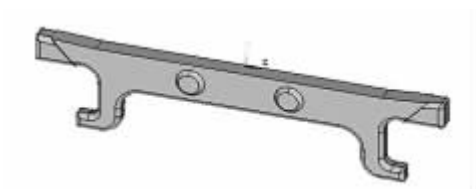


图 2 中间篦条的三维模型

2 有限元数值模型

划分网格:在理论层面,机械结构的有限元网格划分可以是任意的,而在实践过程中不得不考虑其可行性和经济性,因此在划分网格时,需遵循的原则是^[10]:在满足计算精度的前提下简化结构;运用重复性、对称性等,缩短计算时间。

划分网格时一般会考虑计算规模和精度两个因素来明确网格数量,通常在进行静力分析时,会选取较少的网格数量,而在计算应力时,需在精度要求不变的情况下选取较多的网格数量。本文研究对象为中间篦条,对其网格划分后,网格数为 6 599 个,节点数为 8 651 个,如图 3 所示。

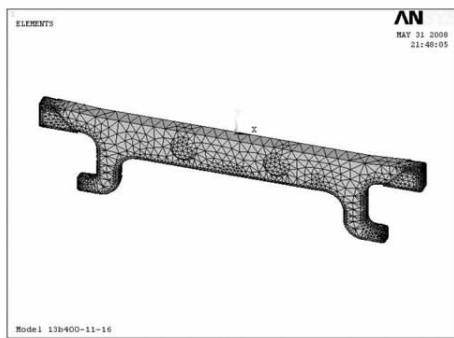


图 3 中间篦条的有限元模型

选择单元:以三维实体单元来表示篦条的结构与实际情况更相符。篦条的结构不规则,因此选择比较灵活的四面体单元。

本构模型:高铬铸铁作为篦条的材料,密度为 $3\,714\text{ kg/m}^3$,导热系数为 $39.3\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,弹性模量为 196 GPa ,泊松比为 0.28 ,常温屈服强度为 340 MPa 。

3 热应力分析

针对篦条实际工作情况,分两种工况进行分析:一是分析篦条处在最高温 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 时的热应力;二是分析篦条处在最低温 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 时的热应力。

3.1 工况一下的热应力

运转时台车在某一时刻的温度呈稳态对称分布^[11]。篦条的工作条件十分恶劣,由实地测量可得,台车体中间篦条的表面温度高达 $850\text{ }^\circ\text{C}$,两端(台车长度方向)散热条件更差,温度还要高出 $80\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 。矿石在烧结过程中在台车的中心点火,因此温度由台车中心向两端逐渐降低。假定在图 3 中,台车中心与篦条的左端更近,篦条左端的温度则比右端高约 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 。因此,在有限元分析中,在篦条的左、右端分别施加 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 的热载荷,如图 4 所示。工况一下篦条的温度分布云图如图 5 所示。

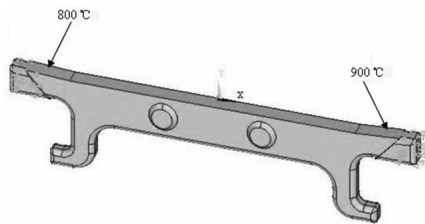


图 4 工况一下篦条热载荷的施加

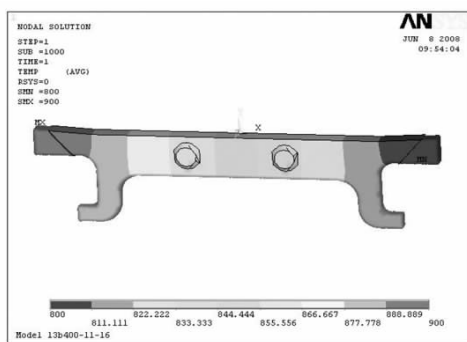


图 5 工况一下篦条温度分布云图

由图 5 可知,工况一下,篦条的温度从一端到另一端呈线性分布,即篦条在台车中心的点火处或离中心最近的地方所获得的热量最大,篦条热量最大部位最容易因热而发生变形。这就是工况一下篦条靠近台车中心处容易引起烧蚀的主要原因。

材料的屈服极限随温度的升高而降低。在施加热载荷的前提下,因屈服极限降低,分析对象的应力值会趋近屈服极限,因而材料遭到破坏。在烧结的过程中,篦条一方面受高温影响,另一方面还要承受机械载荷,热和力之间的相互作用共同形成了篦条载荷。在对篦条进行应力分析时,常温条件下施加 1.6×10^{-2} MPa 的机械载荷,具体载荷和约束的施加如图 6 所示。

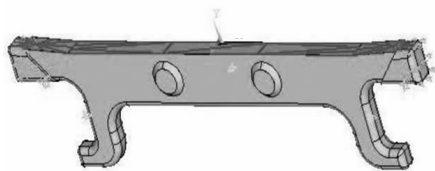


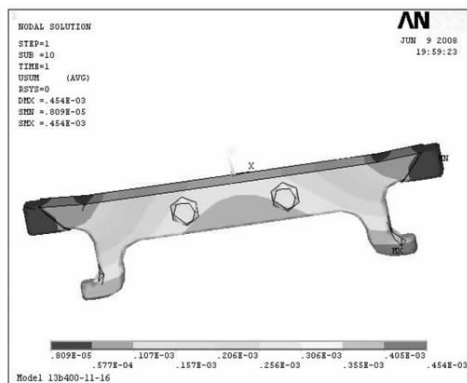
图 6 工况一下篦条载荷和约束的施加

经数值计算,得到篦条的位移分布云图和等效应力分布云图,如图 7 所示。

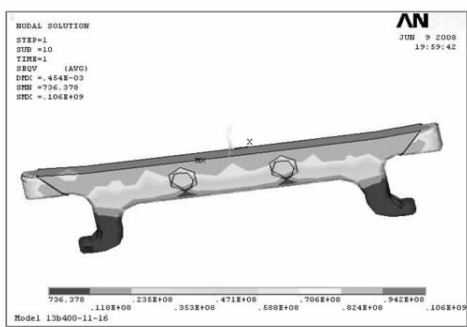
由图 7(a)可知,篦条顶部应力较小,而两脚外侧的位移较大,这是由于两脚处形状变化大,应力集中现象严重,故工况一下篦条的应力疲劳最可能发生在其两脚的外侧。

篦条的材料是高铬铸铁,在 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的屈服极限为 89 MPa 。由图 7(b)可知,篦条最大

应力值为 106 MPa ,篦条局部已经超过此时的屈服极限,出现塑性变形现象。



(a)位移分布云图

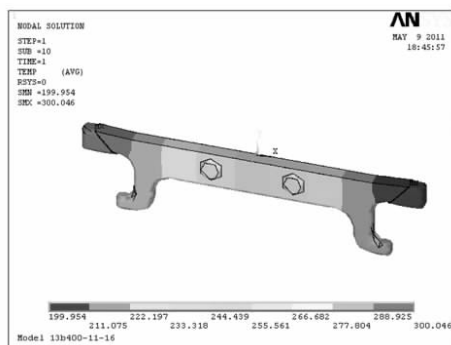


(b)等效应力分布云图

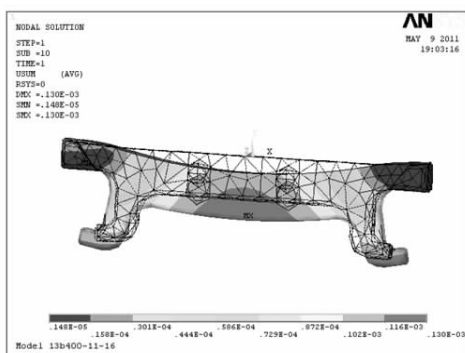
图 7 工况一下篦条位移和应力分布云图

3.2 工况二下的热应力

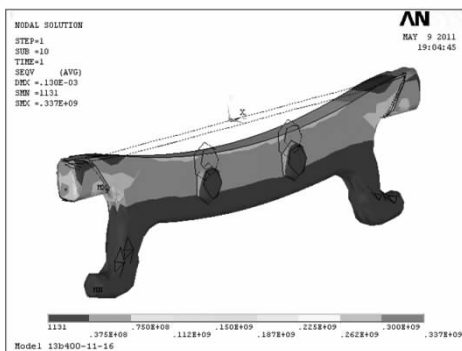
对工况二下进行热应力分析时热载荷的施加变为一端 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,另一端 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$,其余条件和步骤与工况一相同,在此略去。经计算得到工况二下篦条的温度、位移、应力分布云图如图 8 所示。



(a)温度分布云图



(b)位移分布云图



(c)等效应力分布云图

图 8 工况二下篦条温度、位移、应力分布云图

由图 8(a)可以看出,工况二下,篦条上的温度从一端到另一端呈线性分布,篦条在靠近台车中心的左端所获得的热量最大。

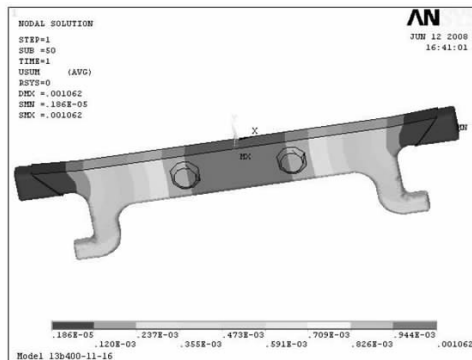
由图 8(b)可知,篦条中部和两脚外侧的位移较大,顶部两侧应力较小,故工况二下应力疲劳最可能发生在篦条的中部和两脚外侧。

高铬铸铁材料在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的屈服极限为 331 MPa 。由图 8(c)可知,工况二下篦条最大应力值为 337 MPa ,因此,篦条局部已经超过此时的屈服极限,出现塑性变形现象。

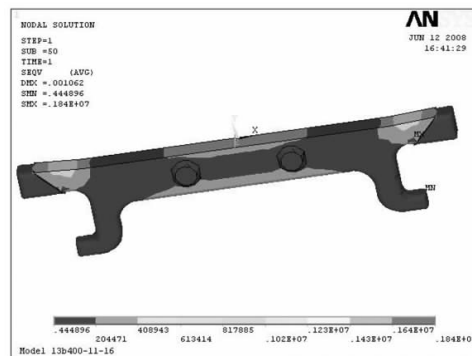
3.3 常温下的热应力

在常温下施加相同的机械载荷(即篦条只受机械载荷),篦条位移及应力分布云图如图 9 所示。

由图 9(a)可知,篦条两端位移变化及应力分布都是对称的。高铬铸铁材料常温下的屈服极限为 340 MPa ,由图 9(b)可知,常温下篦条最大应力为 1.84 MPa ,远远小于此时的屈服极限。



(a)位移分布云图



(b)等效应力分布云图

图 9 常温下施加机械载荷的
篦条位移、应力分布云图

3.4 热应力结果分析

(1)在常温下施加相同的机械载荷,篦条所受最大应力为 1.84 MPa ,远远小于此时的屈服极限。当施加温度载荷以后,两种工况下的最大应力值分别为 106 MPa 和 337 MPa ,对应的屈服极限分别为 89 MPa 和 331 MPa ,此时篦条局部已经超过相应工况下的屈服极限,说明篦条的变形主要是热载荷引起的,机械载荷对篦条变形影响不大。

(2)随着温度的升高,篦条的屈服极限不断降低。由两种工况可知,篦条在工作中受到循环热载荷的作用,很容易产生热疲劳,所以对篦条进行热应力疲劳分析,进而得到篦条疲劳寿命,对于篦条的结构优化设计非常必要。

4 疲劳分析

4.1 问题描述

由篦条热应力计算结果可知,由于承受激烈循环的温度波动,篦条受到很大的热应力循

环,易产生疲劳破坏。本文选取两工况下等效应力最大的节点为疲劳分析的对象,提取此节点等效应力来进行篦条的疲劳寿命计算。

4.2 疲劳寿命计算

疲劳位置选在篦条热应力最大的节点处,疲劳事件选择两种工况下的热应力循环,疲劳载荷选择两工况下的热应力。

由于篦条的疲劳位置处形状不规则,如同角钢受弯时的形状,所以需设定应力集中系数,查阅《应力集中系数手册》中的相关内容,得到此处应力集中系数为 1.2^[12]。

在 ANSYS 软件的材料设置中,输入高铬铸铁的疲劳特性数据,得到其 S-N 曲线,如图 10 所示。

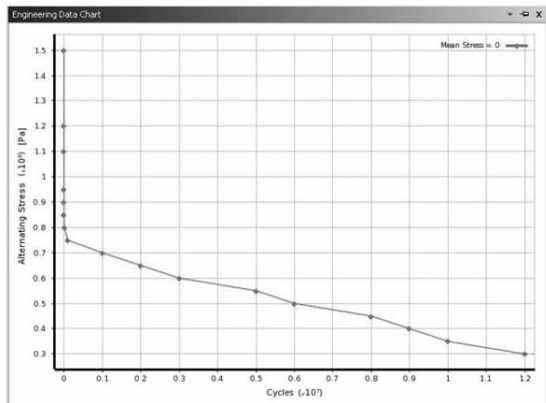


图 10 高铬铸铁 S-N 曲线

在 ANSYS 软件中,将事件循环次数设置为 10 000,进行疲劳寿命计算,其结果如图 11 所示。

```
PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION 1 NODE 0

*** POST1 FATIGUE CALCULATION ***

LOCATION 1 NODE 1737

EVENT/LOADS 1 1 EVE1 AND 1 2 EVE1
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.80242E+08 WITH TEMP = 800.00
CYCLES USED/ALLOWED = 0.1000E+05/ 9231. = PARTIAL USAGE = 1.08336

CUMULATIVE FATIGUE USAGE = 1.08336
```

图 11 疲劳寿命计算结果

从疲劳寿命计算的结果可得,此处的最大循环寿命为 9 231 次。将 130 m² 带式烧结机作为研究对象,其长度为 53.145 m,台车调速范围为 1.3~3.9 m/min^[6],现取 2 m/min,一般烧结机每天工作 24 h,每年工作约 330 d,实

际中篦条的循环寿命为 8 941 次。经 ANSYS 软件计算得到的篦条寿命与之相比,相差不大,符合实际情况,说明计算准确。

为了得到整个篦条的寿命,在 ANSYS 的 workbench 模块中建立仿真模型,得到的疲劳寿命结果,如图 12 所示。

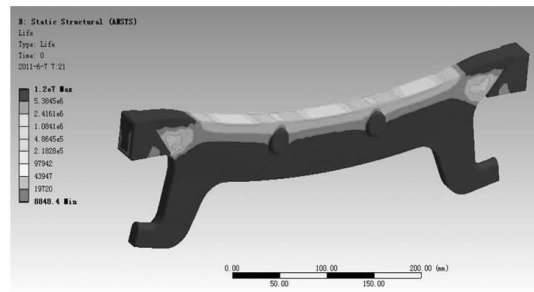


图 12 篦条所有节点疲劳寿命结果

4.3 疲劳结果分析

(1)经软件计算,130 m² 带式烧结机篦条的最大循环寿命为 9 231 次,而且其实际寿命为 8 941 次,计算结果基本和实际情况相符。篦条常温下受纯机械载荷作用时,其受到的交变应力幅非常小,由 S-N 曲线可知,机械载荷不会造成篦条的疲劳破坏;而热载荷下的篦条应力幅达到了 231 MPa,应力变化非常大,这使得在篦条表面非常容易产生裂纹并快速扩展,最终使得篦条失效,这是引起篦条失效的最主要原因之一。由此可以得出结论:篦条破坏的主要原因是激烈的热循环而造成的热疲劳。

(2)由疲劳理论可知,低周疲劳的循环次数一般在 10 000 次以下,且常伴有塑性变形现象发生^[13]。而由篦条热应力分析结果可知,两种工况下篦条所受最大等效应力均超过了相应温度下的屈服极限,出现了塑性变形现象,这正符合疲劳理论中低周疲劳会产生塑性变形现象的论断。由此可以得出结论:篦条由于循环热载荷而产生的疲劳属于低周疲劳。这是由于循环的热应变会引起应变疲劳,当篦条产生疲劳裂纹并扩展到一定程度,再受到机械冲击之后,就会出现突然断裂的现象。对于篦条的低周疲劳的研究可以应用工程中的应变寿命方法来对篦条的疲劳特性进行更加详细的分析。

(3)由相关文献可知,影响疲劳的众多复杂因素中,应力集中和较大的平均应力对疲劳强度危害最大。而由热应力等效应力分布云图可知,篦条两脚外侧应力集中现象严重,并且此处较其他部位平均应力大,因此此处是篦条疲劳的薄弱部位,所以,优化篦条两脚外侧结构,降低此处的应力集中,是提高篦条疲劳强度非常有力的措施。

5 结论

(1)篦条的破坏主要是由于激烈的热循环引起的热疲劳而造成的。

(2)篦条由于循环热载荷而产生的疲劳属于低周疲劳。

(3)在对篦条进行设计制造时,可优化两脚外侧结构,减小此处的应力集中,以提高篦条寿命。

参考文献:

- [1] 靳华东. 烧结机台车起拱现象的分析及处理研究[J]. 中国设备工程, 2020(17): 128 - 129.
 - [2] 黎振兹. 烧结机台车热应变疲劳寿命的断裂力学计算以及提高其寿命的若干措施[J]. 重型机械, 1979(2): 13 - 19.
 - [3] 白明华. 带式烧结机新结构原理与设计计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 56 - 57.
 - [4] 周立平, 刘生, 王海平. 大型烧结机台车体的应力分析[J]. 一重技术, 2001(2): 29 - 30.
 - [5] 赵琪昌, 孙东明. 烧结机台车栏板因热疲劳断裂的研究及其对策[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2008(2): 11 - 15.
 - [6] 王会刚, 李振虎, 刘炳新. 带式烧结机台车篦条有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2009(4): 39 - 41.
 - [7] SHIGAKI I, NARAZAKI H. A machine-learning approach for a sintering process using a neural network[J]. Production Planning & Control, 1999, 10(8): 727 - 734.
 - [8] FAIS A. Processing characteristics and parameters in capacitor discharge sintering[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15): 2223 - 2230.
 - [9] LI C Z, HONEYANDS T, O'DEA D. DEM study on size segregation and voidage distribution in green bed formed on iron ore sinter strand[J]. Powder Technology, 2019, 356: 778 - 789.
 - [10] 马阳波. 带式烧结机台车有限元分析及轻量化设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
 - [11] 邓守梁, 万黎明. 高效生产高质量烧结机炉篦条工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2020(3): 84 - 86.
 - [12] 航空工业部科学技术委员会. 应力集中系数手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 63.
 - [13] 裴元东, 熊军, 史凤奎, 等. 烧结篦条粘结机理研究及防治措施[J]. 烧结球团, 2018, 43(2): 1 - 4.
- (责任编辑: 李秀荣)
-
- (上接第10页)
- [6] 孙恺, 沈精虎. 单级倒立摆系统的设计与仿真[J]. 煤矿机械, 2018, 39(9): 8 - 11.
 - [7] 任桢, 林都. 旋转倒立摆虚拟仿真模型构建与验证[J]. 现代电子技术, 2019, 42(6): 60 - 64.
 - [8] 伍晓丽. 基于卡尔曼滤波的旋转倒立摆智能控制算法研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2017.
 - [9] 王贤明, 陈炜, 赵新华. 倒立摆系统起摆与稳摆控制算法研究综述[J]. 自动化技术与应用, 2015, 34(11): 5 - 8.
 - [10] 梁婷婷. 基于 Quanser 半实物仿真实验平台的控制系统研究与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- (责任编辑: 李秀荣)