



大中型矿渣立式磨磨盘结构的动态分析

刘学杰¹, 梁莉¹, 郑刚², 赵越凡¹

(1. 内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 包头钢铁(集团)有限责任公司设计研究院, 内蒙古 包头 014010)

摘要:为了探索改进立式磨动态性能的途径,以大中型矿渣立式磨为研究对象,采用有限元软件 ANSYS 对立式磨磨盘的结构参数调整和设置减震情况进行有限元模态分析,分析振型和固有频率的变化。结果表明,增大磨盘颈部的壁厚,减小磨盘的高度,增大磨盘落料区支撑板的厚度以及减小磨盘的直径,都可以改善立式磨磨盘的动态性能;立式磨磨盘颈部的壁厚增大 100 mm,立式磨磨盘落料区支撑板的厚度增大 40 mm,固有频率提高了 17.77%,实现了磨盘的动态优化。

关键词:立式磨;磨盘;模态分析

中图分类号:TQ172.63 文献标志码:A

文章编号:1008-5548(2013)04-0072-05

Dynamic Analysis for Rolling Plate Structure of Large and Medium Sized Vertical Rolling Mills

LIU Xuejie¹, LIANG Li¹, ZHENG Gang², ZHAO Yuefan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014000; 2. Design and Research Institute, Baotou Iron and Steel (Group) Co. Ltd., Baotou 01400, China)

Abstract: To investigate the way of improving dynamic performances of vertical rolling mills, series modal analysis for the rolling plate of large or medium sized vertical rolling mills were carried out through finite element method software ANSYS to discuss the relationship between the structure parameter adjustments and the dynamic properties. The mode shapes and nature frequencies were analyzed. The results indicate that the dynamical performance of vertical rolling mills can be improved through increasing the thickness of wall neck portion or the thickness of millstone support plate. Their dynamical performance can also be improved through decreasing the height or diameter of rolling plate. Through increasing the thickness of wall neck portion by 100 mm and the millstone support plate by 40 mm, the nature frequency increases 17.77%, which realizes the dynamic optimization of rolling plate.

Key words: vertical rolling mill; rolling plate; modal analysis

立式磨具有高效节能的特点, 目前已经成为水泥生产厂家的主要粉磨设备, 但是在应用过程中也暴露

出一些问题, 如磨辊磨盘等粉磨部件磨损、磨机振动以及吐渣等^[1], 这些问题影响了立式磨的粉磨效率, 其中磨机振动是非常重要的问题。当振动轻微时, 会造成立式磨的粉磨效率下降, 还会影响立式磨零部件的使用寿命; 当振动严重时, 产生共振现象, 导致立式磨无法工作^[2]。为解决上述问题, 有必要对立式磨磨盘进行动态分析和优化。目前, 通过有限元仿真技术对立式磨机身、磨盘、摇臂、加压装置进行静力学分析较多^[3-4]。在动态分析方面, 杨林建等^[5]对大型立式磨机身进行建模及有限元分析, 通过模态分析得出机身的 1、2、3 阶振型图和等效应力应变图。陈世教等^[6]利用理论分析和有限元分析 2 种方法对 TRM 型生料辊式磨机身摇臂系统的结构形式和振动情况进行分析, 将 2 种方法的分析的主要结果(前 4 阶固有频率)进行对比, 发现 2 种方法所得结果基本吻合。

磨盘是质量最大的转动件, 因此它是影响立式磨动态性能的关键因素; 然而, 对磨盘进行动力学分析的研究尚属空缺。鉴于磨盘对磨机振动的重要性, 本文中对磨盘进行动力学模态仿真, 主要分析各种结构参数的调整对磨盘模态的影响。

1 模型与分析计算

1.1 磨盘的模态分析

1.1.1 磨盘的几何模型和有限元模型

基于实体建模软件 CATIA 对立式磨的磨盘进行三维建模, 在建模过程中遵循简化原则, 简化一些不必要的特征, 比如吊耳、螺纹孔及小尺寸细节结构等。立式磨磨盘的几何模型如图 1 所示。

通过 CATIA 与有限元软件 ANSYS 的无缝连接, 把在 CATIA 中建立的三维实体模型输出为 Parasolid (* . x_t) 文件, 读入到 ANSYS 中进行分析。将几何模型导入 ANSYS 后需要进行如下设置^[7]: 1) 定义材料参数。立式磨磨盘的材料为 45 号钢, 各向同性材料, 输入的材料特性性能参数如下: 弹性模量为 2×10^{11} Pa, 泊松比为 0.3, 密度为 $7\ 800\text{ kg/m}^3$ 。2) 划分网格。单元类型采用 Solid45 单元。使用自由网格命令进行网格划分。由磨盘零件的网格试划分可知, Smartsizing 的值为 5 时, 能得到较好的网格和较合适的单元数。共

收稿日期: 2013-01-31, 修回日期: 2013-03-20。

第一作者简介: 刘学杰(1953—), 男, 博士, 教授, 研究方向为数字化技术。
E-mail: xuejieliu2000@yahoo.com。

通信作者简介: 梁莉(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为数字化技术。电话: 13474994690, E-mail: 670238375@qq.com。

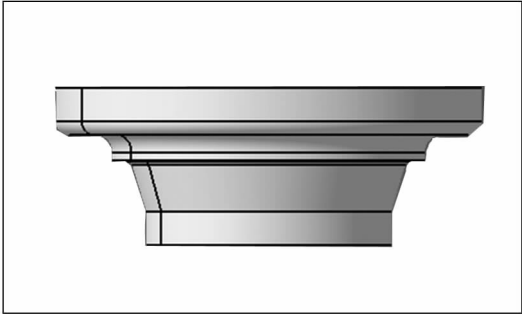


图 1 立式磨磨盘的几何模型

Fig. 1 Geometric model of vertical rolling mill plate

生成节点 86 423 个,单元 434 666 个。生成的磨盘有限元模型如图 2 所示。

1.1.2 施加约束并求解

根据立式磨的实际运作情况,确定约束方式为约束其底部面上所有节点的 UX 、 UZ 方向,定义分析类型(modal),求解方法(block lanczos),频率范围(取为 0~10 000)以及输出结果(8 阶模态),开始求解。

1.1.3 分析结果

结构的振动可以表达为各阶固有振型的线性组合,其中低阶振型对结构的动态影响程度比高阶振型大,因此,低阶振型决定了结构的动态特性。运用仿真软件 ANSYS 得出立式磨前 8 阶固有频率(见表 1),各阶固有频率对应的振型如图 3 所示。由图可得前 8 阶



图 2 立式磨磨盘的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of vertical rolling mill plate

表 1 立式磨磨盘的模态参数及描述

Tab. 1 Mode parameters and descriptions of vertical rolling mill plate

阶次	固有频率/Hz	振型描述
1	0	磨盘绕 z 轴转动
2	119.88	磨盘左右摆动(1 阶)
3	120.11	磨盘前后摆动(1 阶)
4	204.40	磨盘盘面前后弯曲
5	204.49	磨盘盘面左右弯曲
6	260.16	磨盘盘面整体凹凸振动
7	275.64	磨盘左右摆动(2 阶)
8	277.54	磨盘前后摆动(2 阶)

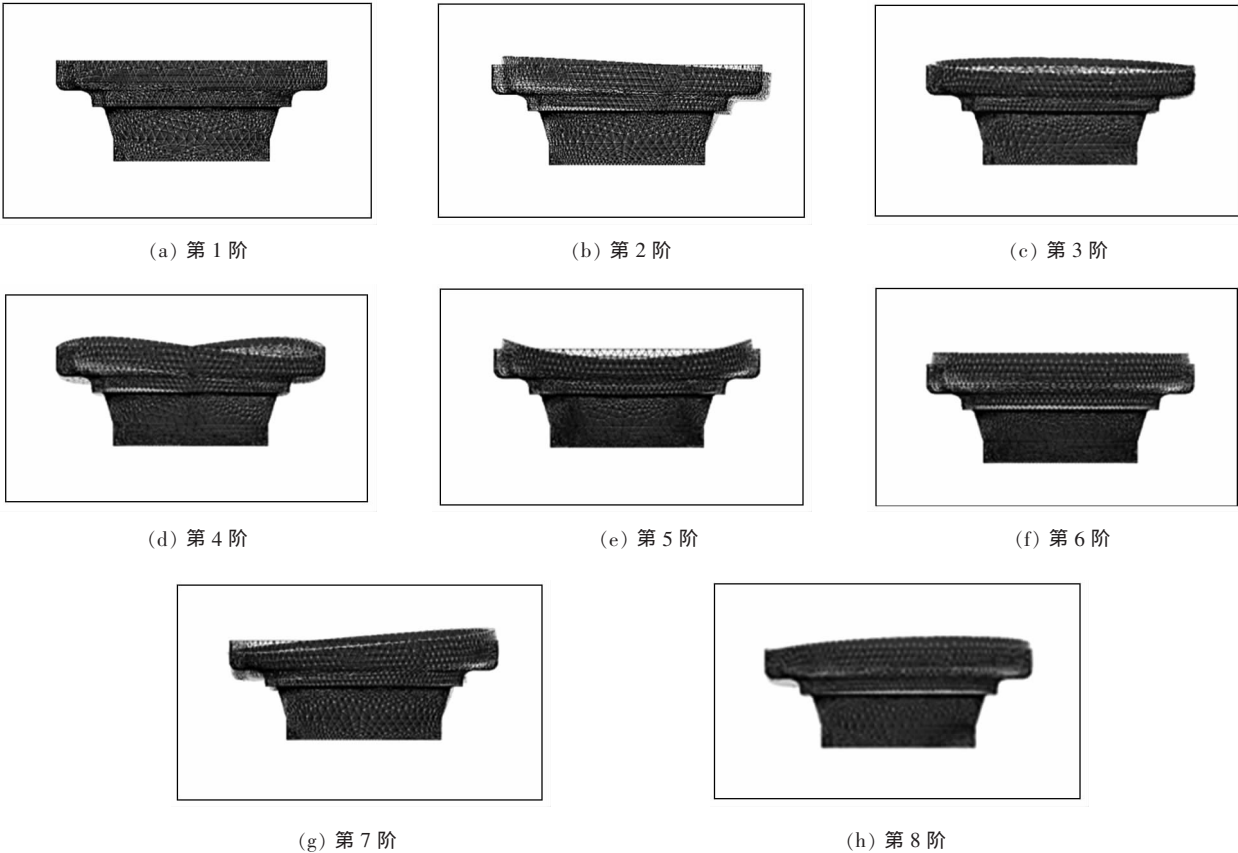


图 3 前 8 阶固有频率对应的模态振型

Fig. 3 Vibration modes corresponding to 1st to 8th nature frequencies

固有频率值和相应的振型描述(见表 1)。结合实际情况,立式磨在运行的过程中,主要振动方式是立磨的上下振动。对于两主磨辊加两辅助磨辊的立式磨,工作载荷可以造成盘面 2 个方向弯曲。由此可得,第 4 阶固有频率是该类型立式磨振动的最关键频率。从磨盘的模态分析结果可以看出,磨盘拐角下磨盘颈部壁的刚度较小,整个磨盘的低阶模态的振型均与此局部变形有关。

1.2 结构参数调整

立式磨振动的实质是立式磨系统所受激励的频率与该系统的某阶固有频率相接近时,系统振幅显著增大,从而产生共振的现象。一般地,可以通过调整立式磨具体结构、设置减震或改变离心率 3 种方案来避免共振^[8],因此,考察立式磨磨盘结构的改变对其动态性能的影响。

1.2.1 调整立式磨磨盘的结构

根据磨盘的实际运行情况和受力情况,主要从磨

盘的高度和磨盘颈部的壁厚 2 个方面改变其结构参数: 1) 增大磨盘颈部的壁厚, 增大磨盘壁的刚度, 如图 4(b) 所示, 调节值为增大 100 mm; 2) 增大磨盘的高度, 主要从磨盘的落料区域厚度(见图 4(c))、磨盘的中部(见图 4(d))和磨盘的底部(见图 4(e))3 个方向增大, 调节值为增大 50 mm; 3) 减小磨盘的高度, 主要从磨盘的中部区域减小(见图 4(f)), 调节值为减小 50 mm。

1.2.2 减震处理

将共振的峰值进行偏移, 减小共振的能量。采用的方法是: 在磨盘壁上设置奇数个孔, 以改变其振型。对设置了 1、3 个孔的磨盘进行动态分析。图 5(a)、(b) 所示分别为设置 1、3 个孔的磨盘模型。

1.2.3 改变离心率

磨盘的转速对立磨的运行极其重要。当磨盘转速大时, 物料受到的离心力较大。根据离心力要求而确定的 LM 型莱歇磨磨盘的实际工作转速计算公式^[9]为

$$n=58.5D_0^{-0.5}, \quad (1)$$

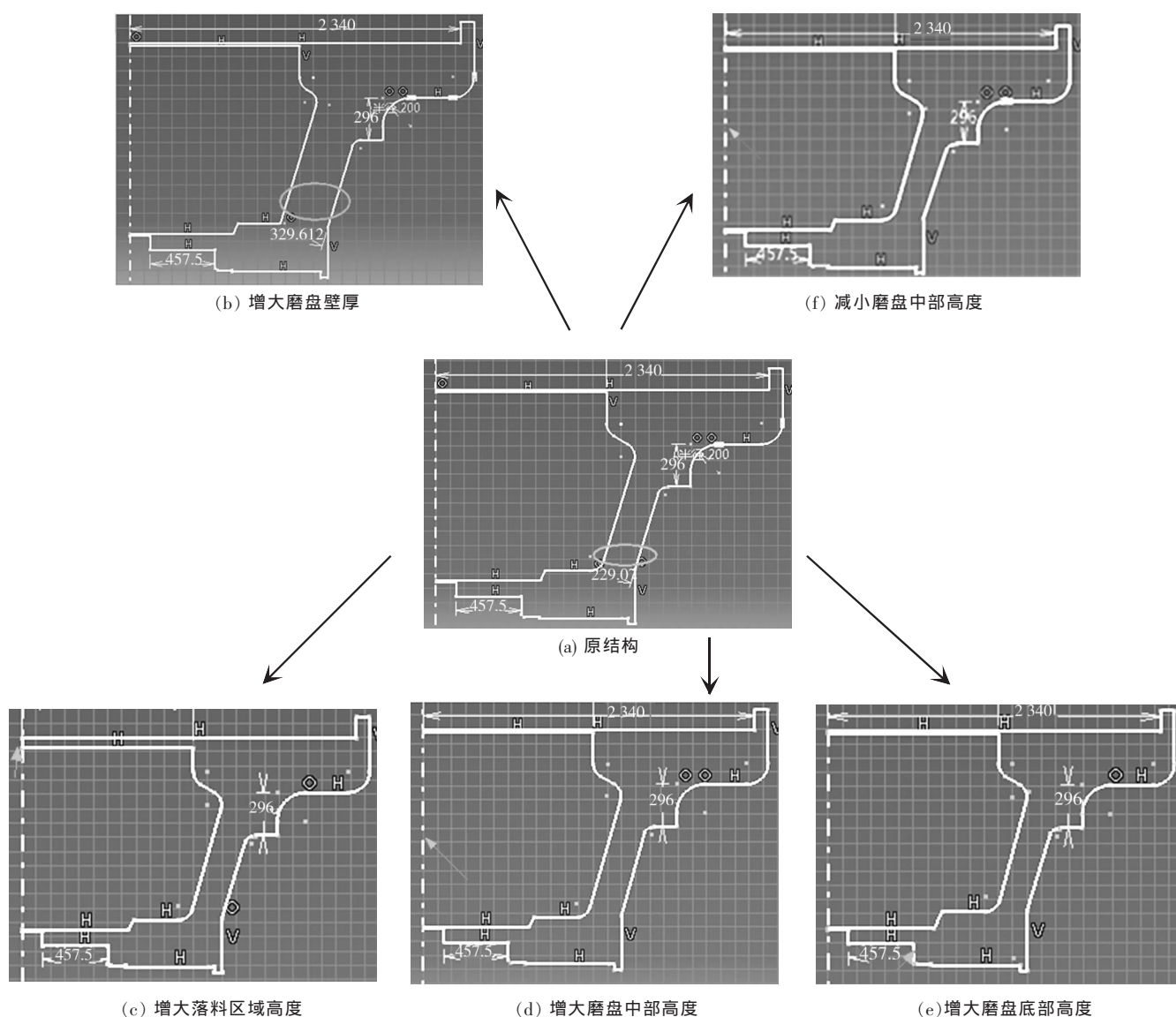


图 4 立式磨结构参数的调整

Fig. 4 Structural parameters adjusting of vertical rolling mill plate

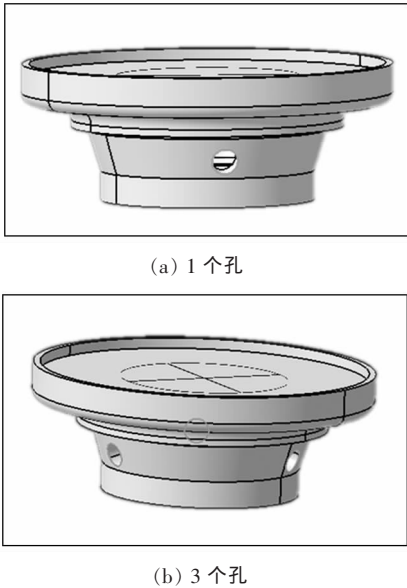


图 5 设置 1、3 个孔的磨盘模型

Fig. 5 Rolling plates models of setting 1 and 3 holes on wall

式中: n 为立式磨磨盘实际工作转速, r/min ; D_0 为立式磨磨盘外径, mm 。

由式(1)可得,立式磨磨盘半径与实际工作转速成反比。当立式磨磨盘半径减小时,所要求的立式磨磨盘的工作转速将增大。本文中对立式磨磨盘半径减小 100 mm 来分析其动态特性。

2 结果与讨论

2.1 立式磨磨盘结构参数调整的模态分析结果。

表 2 所示为立式磨磨盘结构参数调整的模态分析结果。由表可知,与原结构相比,方案 a 在增大磨盘壁厚后,明显增大了磨盘壁的刚度,第 4 阶固有频率提高了 4.8%。方案 b 在增大了落料区域厚度后,落料区域的刚度明显增大,从而磨盘盘面 2 个方向的弯曲振动减弱,第 4 阶固有频率提高了 17%。方案 c 在增大了磨盘中部区域的高度后,第 4 阶固有频率几乎无变化。方案 d 在增大了磨盘底部区域的高度后,第 4 阶固有频率略有降低。方案 e 在减小磨盘的高度后,

表 2 立式磨磨盘结构参数调整的模态分析结果

Tab. 2 Mode analysis results of vertical rolling mill plate after structure parameters adjustment

阶次	固有频率/Hz					
	原结构	方案 a	方案 b	方案 c	方案 d	方案 e
1	0	0	0	0	0	0
2	119.88	135.65	118.14	118.96	119.00	120.84
3	120.11	135.77	118.29	119.18	119.22	121.02
4	204.40	214.29	239.23	204.20	202.85	204.66
5	204.49	214.35	239.37	204.27	203.70	205.52
6	260.16	276.00	267.44	258.72	257.81	260.99
7	275.64	298.46	276.41	270.95	272.24	280.24
8	277.54	301.41	278.10	272.46	274.28	282.58

第 4 阶固有频率几乎无变化。
2.2 立式磨磨盘减震设置的模态分析结果

表 3 所示为立式磨磨盘减震设置的模态分析结果。由表可知,与原结构相比,在质量减小的情况下,固有频率略有降低,而振型无明显改变。可能需要另外考虑减震措施。

表 3 立式磨磨盘减震设置的模态分析结果

Tab. 3 Modal analysis results of vertical rolling mill plate damping

阶次	固有频率/Hz		
	磨盘	1 个孔	3 个孔
1	0	0	0
2	119.88	117.33	115.33
3	120.11	118.00	115.47
4	204.40	203.57	201.83
5	204.49	203.88	202.66
6	260.16	256.66	254.06
7	275.64	271.41	268.26
8	277.54	273.47	269.16

2.3 立式磨磨盘离心率改变的模态分析结果

表 4 所示为立式磨磨盘离心率改变的模态分析结果。由表可知,与原结构相比,立式磨磨盘半径减小,质量减小,固有频率提高。

表 4 立式磨磨盘直径改变的模态分析结果

Tab. 4 Mode analysis results of vertical rolling mill plate after alteration of plate diameters

阶次	固有频率/Hz	
	磨盘	磨盘半径减小
1	0	0
2	119.88	126.24
3	120.11	126.44
4	204.40	213.85
5	204.49	214.89
6	260.16	294.97
7	275.64	308.32
8	277.54	309.58

综合比较调整立式磨具体结构、设置减震或改变离心率 3 种方案,增大磨盘颈部的壁厚,增大磨盘落料区支撑板的厚度,减小磨盘的高度和半径,均能使立式磨的固有频率提高。结合实际情况考虑,减小立式磨磨盘的高度与半径对于解决实际性问题操作并不容易,通常情况下不采用,因此,有必要研究磨盘颈部的壁厚对固有频率的影响。图 6 所示为磨盘颈部的壁厚分别增大 50、100、150 mm 时,立式磨磨盘的第 4 阶固有频率。可以看出,磨盘颈部的壁厚增大值为 100~150 mm 时,固有频率并无明显提高的现象。在立式磨磨盘的高度、半径、落料区支撑板的厚度均不变的情况下,立式磨磨盘颈部的壁厚为 100 mm 时,磨盘的动态性能最好,第 4 阶固有频率为 214.29 Hz。立式

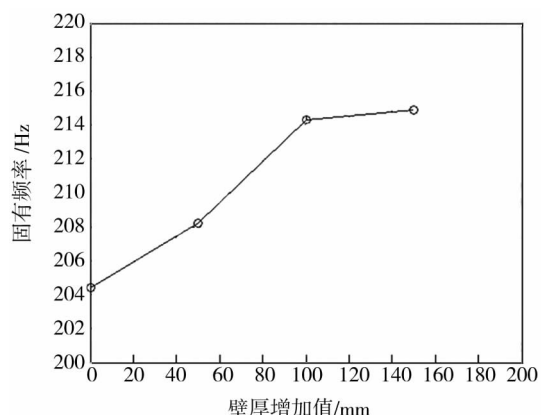


图 6 立式磨磨盘颈部壁厚与固有频率的关系

Fig. 6 Relationship between wall neck portion thickness and nature frequency of vertical rolling mill plate

磨盘落料区支撑板对磨盘的动态特性影响较大,但是立式磨磨盘内部结构存在局限性,因此落料区厚度增大 40 mm 为最佳厚度,第 4 阶固有频率为 233.83 Hz。基于以上分析结果,提出综合改进方案如下:立式磨磨盘颈部的壁厚增大 100 mm,立式磨磨盘落料区支撑板的厚度增大 40 mm,其他结构参数均不变,分析得第 4 阶固有频率为 240.72 Hz,提高了 17.77%。

3 结论

从立式磨磨盘结构模态分析结果可以看出,磨盘拐角下磨盘颈部壁的刚度较小。整个磨盘的低阶模态的振型均与磨盘颈部壁局部变形有关。通过调整立式磨磨盘结构、设置减震和改变离心率这 3 种方案进行动态分析,由分析结果可得以下结论:

1)适当增大磨盘颈部的壁厚可以增大磨盘壁的刚度,从而提高其固有频率;

2)磨盘的高度减小,质量减小,固有频率提高;
3)磨盘落料区支撑板厚度增大,固有频率提高,改善了其模态情况;

4)立式磨磨盘半径减小,质量减小,固有频率提高,改善了其模态情况;

5)立式磨磨盘颈部的壁厚增大 100 mm,立式磨磨盘落料区支撑板的厚度增大 40 mm,固有频率提高了 17.77%,取得了较好的优化效果。

以上有限元分析所得的结果得到了工程实践的印证,对新型立式磨的设计开发具有一定的启示。

致谢:感谢内蒙古科技大学产学研培育项目(编号:PY201120)、包头钢铁集团公司科技研发项目(编号:201360)对本研究的大力支持!

参考文献(Reference):

- [1] 聂景亮. 立式磨粉磨性能分析与仿真实验技术研究[D]. 济南: 济南大学, 2011:1-2.
- [2] 何立勇, 钱志福, 盛学前, 等. HRM3700E 立磨振动原因分析及处理措施[J]. 水泥, 2010(9):35-36.
- [3] 陈作炳, 孙亚忠. 立式磨磨盘有限元分析[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(2):133-135.
- [4] 胡其清. 立磨关键部件有限元分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009: 22-37.
- [5] 杨林建, 李剑. 基于 UG 的大型立式粉磨机建模及有限元分析[J]. 矿山机械, 2010, 38(19): 89-92.
- [6] 陈世教, 杨方霞. 辊式磨摇臂系统动力学分析研究[J]. 机械制造, 2010, 48(552): 35-38.
- [7] 高耀东, 刘学杰, 周可璋, 等. 机械工程应用精华 30 例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010:107-117.
- [8] 李军锁. 机械结构系统的动态优化设计方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006: 21-23.
- [9] 戴少生. 立式磨的转速探讨[J]. 上海建材学院学报, 1996, 9(1):55-61.

中国颗粒学会副理事长、《中国粉体技术》主编魏飞教授 团队制备出世界最长碳纳米管

近日,中国颗粒学会副理事长、《中国粉体技术》主编、清华大学化工系教授魏飞带领的化工系与微纳力学中心(CN-MM)联合研究团队成功制备出世界上最长的、单根长度达半米以上的碳纳米管,这也是目前所有一维纳米材料长度的最高值。相关工作于 6 月 27 日以《基于 Schulz-Flory 分布的半米长碳纳米管制备》(Growth of half-meter long carbon nanotubes based on Schulz-Flory distribution)为题在线发表在国际著名期刊《美国化学会纳米》(ACS Nano),并被美国纳米技术与科学网 Nanowerk 邀请作为重点工作进行报道。文章第一作者为清华化工系博士生张如范,共同通讯作者为魏飞和微纳力学中心张莹莹副研究员。

自从 2010 年清华大学化工系制备出 20 cm 长的单根碳纳米管以来,提高其长度就越发困难,国际上再也没有新的突破。魏飞教授意识到需要进行制备方法论的重新审视,他把超长碳纳米管看作一种一维线性高分子,巧妙地把描述高分子分子量分布的 Schulz-Flory(舒尔兹-弗洛里)机理用来描述碳纳米管长度增加的过程。该团队首次研究发现,在 Schulz-Flory 机理描述下,碳纳米管的催化剂活性概率起到了最关键的作用。对于碳纳米管的生长而言,其高温生长过程中催化剂的失活是一个不可逆的规律,从而限制了碳纳米管的长度,并且长碳纳米管的密度急剧下降;因此,尽可能地提高其催化剂活性概率是进一步提高碳纳米管的长度的唯一途径。该团队充分发挥材料制备和化工技术学科交叉的优势,在制造设备、制备工艺方面进行了大量改进和创新,首次将生长每毫米长度碳纳米管的催化剂活性概率提高到 99.5%以上,终于成功制备出单根长度超过半米的碳纳米管,创造了新的世界纪录。