

辊压机辊系结构与疲劳寿命分析研究

刘 驰

纳科诺尔精轧股份有限公司, 河北 邢台 054000

[摘要]辊压机是一种重要的粉磨设备,在电池极片压延应用广泛。锂电辊压机(对辊机)是极片制造的核心精密设备,位于涂布→干燥之后、分切/模切之前,用高压把正负极极片压实到目标厚度与密度,直接决定电池能量密度、内阻、循环寿命与安全性。它的辊系是其主要的工作零件之一,它要承受着高压变动载荷以及磨粒磨损的联合作用,对于辊系的设计是否合理,关系到整个机器可靠性高低及经济性好坏。文章就辊压机辊系的设计方法进行研究,详细介绍了影响辊压机辊系设计的主要尺寸参数并进行了轴承支撑方式的选择,构建了辊系有限元分析模型并对它的应力情况进行了计算并找出了疲劳敏感区域,结合疲劳载荷谱以及材料数据做出了使用寿命估算。针对影响因素的研究着重对过盈量大小、结构圆角以及卸荷槽尺寸大小、表面处理工艺以及残余应力等进行研究并提出了解决措施。

[关键词]辊压机; 辊系; 结构设计; 疲劳寿命; 过盈配合; 有限元分析

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19767

中图分类号: TH122

文献标识码: A

Research on the Structural Design and Fatigue Life Analysis of Roller System in Roller Press Machine

LIU Chi

Naknor Technology Co.,Ltd., Xingtai, Hebei, 054000, China

Abstract: Roller press is an important grinding equipment widely used in battery electrode rolling. Lithium ion roller press (roller press) is a core precision equipment for electrode sheet manufacturing. It is located after coating and drying, and before slitting/die-cutting. It uses high voltage to compact the positive and negative electrode sheets to the target thickness and density, directly determining the battery energy density, internal resistance, cycle life, and safety. Its roller system is one of its main working parts, which must withstand the combined effects of high-pressure variable loads and abrasive wear. The rationality of the roller system design is related to the reliability and economy of the entire machine. The article studies the design method of the roller system of the roller press, details the main dimensional parameters that affect the design of the roller system of the roller press, and selects the bearing support method. A finite element analysis model of the roller system is constructed, and its stress situation is calculated to identify the fatigue sensitive area. Based on the fatigue load spectrum and material data, the service life is estimated. In the research on influencing factors, emphasis is placed on the size of interference fit, structural fillet, unloading groove size, surface treatment process, and residual stress, and solutions are proposed.

Keywords: roller press machine; roller system; structural design; fatigue life; interference fit; finite element analysis

引言

辊压机的工作原理就是利用一对相背同速转动的碾轮对物料给以高压,物料在碾轮间形成了压料层进而得到粉碎。在锂离子电池极片制造中,辊压机(对辊机)是核心精密设备,位于涂布→干燥之后、分切/模切之前,用高压把正负极极片压实到目标厚度与密度,直接决定电池能量密度、内阻、循环寿命与安全性。其核心作用是:把烘干后蓬松的极片压薄、压密、压平、压牢,提升能量密

度、降低内阻、防止掉粉/短路、保障后道可加工性。相比较传统的球磨机制备效率更高,耗能更低,运转更加稳定可靠^[1]。其中辊系是整个机组中的主要工作机构,在工作中承受着极大的径向挤压负载和变动的弯曲扭转应力,同时还受到物料研磨磨损的连续冲击,它的设计是否合理直接影响着整个机台的可靠性能、使用寿命长短以及后期维修保养的复杂度,辊系常见失效现象有辊轴疲劳断裂、过盈配合面微动磨损、辊面抗磨合金层磨损剥落等。据相

关文献报道,该起事故中辊压机主轴断裂是疲劳断裂,断裂原因是主轴工作面到轴径之间的斜面过渡部位存在着应力集中部位且这个部位的工作环境比较差从而使得在其断裂点位产生应力腐蚀裂纹进而逐渐扩展到无法承受工作负荷而断裂。所以对辊系进行系统的进行疲劳寿命分析从而找出影响疲劳寿命的主要因素并提出有效的改进措施对其具有很重要的实践意义。

1 辊压机辊系结构与载荷特性

轧辊机轧辊系统主要由两个部件:挤压辊与支撑轴承构成。挤压辊一般都选用的是分段式的结构形式,是把辊轴与辊套用过盈联结的方法组合在一起,而在辊套外表面根据生产工艺的要求可以嵌入硬质合金柱钉或者是堆焊耐磨层,这两个部件是通过过盈联接来传递力的作用,这就避免了键槽等结构对零件强度造成的损失,而辊轴则是靠两个端部的轴承支撑装入到机架之中,一侧是固定的辊,另一侧是活动的辊,靠液压缸加压进行挤压力的作用,而从受力特点上看的话,它在运行的过程当中所承受着的载荷是有较为显著的交变作用的,在正常的工况下的话它的平均单位压强一般都在 140~180MPa 左右,其设计的最大工作压强最好选择为 200MPa^[2]。物料在辊之间依次经过加速段、压缩段以及反跳段,在该过程中其受到的压力大小是不均匀的:压缩段压力最大,而加速段及反跳段较小;并且由于物料大小和分布情况的不同,在同一根辊面上不同宽度位置所受压力也不同,从而使得整个辊径受到周期性的弯矩作用,这也是造成轴肩部位应力集中严重的一个重要原因。同时,在剪力与弯矩共同作用下,辊列又会处于一种典型的多轴应力状态之中,这对疲劳计算造成了很大的困难。辊式破碎机的工作压力常用线压力 F_m 表示,一般取值区间在 80~100kN/cm 之间。在具体的设计工作中则要依据所选物料的特性和处理规模以及机器尺寸大小来选取合适的作业压力范围作为辊系结构设计的基础载荷数值。

2 辊系结构设计

2.1 关键结构参数确定

滚压机轧辊系统的主要尺寸参数主要是辊径 D , 辊宽

B 以及最小辊缝 $s_{\min}$ 。其中辊径 D 可以由以下公式计算得出:

$$D = K \cdot d_{\max} \quad (1)$$

上式中,是经验系数,从统计得出的一般为 10~24 之间取值,是給料最大颗粒尺寸。大辊径有利于物料啃入、提高轧辊使用时间,但会使整机质量及制造费用增大;而小辊径的质量相对较小,但由于其啃入状况较差。

辊宽 B 由下式确定:

$$B = K_B \cdot D \quad (2)$$

式中的为辊宽系数,取值在 0.2~1.2 之间。最小辊距即两轧辊中心线间最短距离可以表示成:

$$s_{\min} = K_s \cdot D \quad (3)$$

其中是最低辊缝比,在水泥熟料中取值为 0.016~0.024,在水泥原料中取值为 0.020~0.030。这些参数的恰当搭配是保障辊压机粉磨效果以及使用寿命的前提,更是用于后面辊系结构三维有限元模型生成的重要几何输入信息,主要参数选择区间见下表 1。

2.2 轴承及支撑结构设计

辊压机辊组的轴承设计方案对整机运转平稳性以及辊组受力状况有着重要的影响。对于小型中型的辊压机一般选择调心滚子轴承方案,在此类型轴承自身就有自动找正的功能来适应由于物料分布不均所造成的辊轴轴线歪斜,以保证其在可承受范围内的正常使用。而当设备增大以后就选择四列圆柱滚子轴承,这种轴承的承受载荷大、径向抗弯能力强等特点得到广泛应用并且常常配以推力轴承做到轴向固定^[3]。在支持设置上则采用一端固定一端浮动的方式,也就是在辊轴的一端做双向固定用来承受轴向力,在另一端允许有一定的轴向移动来抵消热伸长以及加工误差所带来的影响。固定端及活动端轴承的选择以及配合公差的设计必须既要满足负荷又要考虑热适应性,在此基础上尽量不要有过大的约束造成附加应力而引起疲劳损坏。

3 辊系疲劳寿命分析

3.1 有限元模型与边界条件

辊系疲劳寿命计算的前提是建立精确的有限元模型,

表 1 辊压机辊系关键结构参数取值范围

参数名称	符号	计算公式	系数取值范围	备注
辊径	D	$D = K \cdot d_{\max}$	$K=10\sim24$	取决于物料性质及工艺要求
辊宽	B	$B = K_B \cdot D$	$K_B=0.2\sim1.2$	窄辊对应大辊径,宽辊对应小辊径
最小辊隙	$s_{\min}$	$s_{\min} = K_s \cdot D$	$K_s=0.016\sim0.030$	水泥熟料取 0.016~0.024, 原燃料取 0.020~0.030
线压力	F_m	—	80~100 kN/cm	表征单位长度粉磨力

在三维实体建模的基础上通过使用 ANSYSWorkbench 等有限元设计软件来制作出挤压辊的三维模型,对其进行上辊轴与辊套间的过盈配合以及柱钉与柱钉孔之间过盈配合的接触分析。其中模型须包含辊轴、辊套还有轴承内圈的形状特征,例如轴肩圆角、卸荷槽这样的局部结构等。

在接触关系上,辊轴和辊套采用过盈配合接触,过盈量选取设计值的 2.0~3.0%轴径范围,摩擦系数选择 0.15~0.20。当过盈配合时,在理论计算的基础上得到辊轴、辊套过盈配合过盈量的上下限,随后针对不同的过盈量下过盈联接作有限元分析,获得辊轴以及辊套的过盈配合状态下,接触表面压强、辊套的整体应力状况等。

边界条件中,在轴承位置施加径向位移约束及轴向固定约束,载荷根据辊面压力分布曲线,在压缩区范围内施加的同时考虑扭矩的影响,在轴肩圆角以及过渡配合面附近进行了网格加密处理,使在应力集中区域有足够的计算密度。在有限元建模与分析过程中采用了安全系数法及 ANSYS 软件对辊轴可能出现危险截面进行理论分析,从其计算结果及数值模拟结果可以看出,危险轴颈部分有较高的应力集中,是造成辊轴断裂的重要因素之一。

3.2 应力分布与危险点识别

有限元分析结果表明,辊系的最大等效应力位于轴颈处的过度圆角位置;通过仿真计算发现,危险轴颈位置上有较大的应力聚集,是导致辊轴折断的原因,过盈连接的两端也都出现了较大的应力集中现象,在具体的制造过程中应当注意如何降低其应力集中的程度。挤出机中挤压辊的质量关系到整个设备的工作可靠性和使用寿命长短乃至维修保养的难易程度,柱钉式挤压辊的轴颈及套筒之间、柱钉与孔之间的连接都采用了过盈配合的形式,用 ANSYS 建立了挤压辊中过盈配合的有限元模型来研究这两种连接方式在不同过盈度下的应力变化情况,以供设计挤压辊时参考。

在额定工况时,轴颈圆角部位的最大主应力可以达到材料的屈服强度的 40%~60%,应力集中系数一般为 1.8~2.5 之间(主要受圆角半径相对于轴径的影响)。过盈配合面的接触压强沿轴线方向分布呈两端高,中部低的趋势分布情况,端部的压强值约相当于中部压强的 1.3~1.6 倍。

3.3 疲劳载荷谱与材料性能

辊系疲劳计算需创建能体现实际情况下的载荷谱,正常运行状态下,辊压机转动一圈完成一个完整的加载-卸载过程,所以疲劳载荷按运转速度相应频率做周期性变换,

而启动停止时由于有瞬变冲击力的作用及物料大小不同产生的瞬间重载,故载荷谱内除了正常的载荷循环还有一定比例的过载循环。

轧辊轴材质一般选用 30CrNiMo8 中碳合金钢,经过调质处理后基体硬度范围为 280~340HB,抗拉强度大于等于 700MPa。通过相关研究发现,断裂辊轴选用 30CrNiMo8 钢锻造基体以及表面堆焊耐磨层的形式较为理想,30CrNiMo8 钢属于强淬透性钢种,在经过调质处理以后可以获得更深的淬火硬化区,具有良好的综合机械性能、可焊性和热处理特性^[4]。疲劳计算所用 S-N 曲线参照该材料的标准实验数据,在此基础上对尺寸系数、表面光洁度系数以及应力集中系数加以修正。考虑到平均应力的影响,应用 Goodman 准则进行等寿命修正。

3.4 疲劳寿命预测结果

根据 Miner 线性累积损伤定律以及前面所做的应力计算结果,利用 ANSYS Fatigue 模块给辊系做了疲劳寿命估算,估算结果表明:在正常载荷条件下,原先的设计方案中辊轴轴颈圆角部位的疲劳寿命估计为 1.2×10^7 次循环,服役时间为 8000~10000h 左右,远远低于设计寿命的要求,而实际上工况中的辊轴运行达到 14000h 以上就会出现断裂的情况,两者相差一个数量级,在这个区域内还存在微动腐蚀疲劳,其寿命仅为原方案的 65%~75%,因此这是另外一个比较脆弱的地方。载荷谱里过载循环所占比例会影响寿命预测结果,在过载比例从 5%提高到 15%的情况下,寿命预测值减少大约 35%,为了使疲劳寿命预测更加准确就需要更为合理的微动磨损模型以及使用四轴疲劳准则。

4 疲劳寿命影响因素与结构优化

4.1 过盈配合对寿命的影响

过盈量是决定辊系应力、疲劳寿命的重要因素,在改变有限元模型的结构尺寸下,得到不同的工况条件下危险截面上最大应力与应力集中系数。当过盈量从 1.5%上升为 3.0%时,过盈配合面端部接触压力增加约 40%,轴颈圆角处的最大等效应力增加在 10%~15%之间。

但是不足的过盈量会使传递的扭矩不够,在受力的作用下配合面间发生滑移,导致更加严重的微动磨损破坏;通过相关实验得知:有过盈加强预压应力存在并能减少在载荷作用下的孔边应力集中度是减少疲劳裂纹产生,增强结构的疲劳寿命的一种方式,适当的过盈量在保证足够的扭矩传递的同时又不至于导致疲劳寿命大幅下降的情况,推荐采用轴径的 2.0%~2.5%。

4.2 结构圆角与卸荷槽参数

轴颈过渡圆角半径是造成应力集中的主要几何因素,若圆角半径从 2mm 增大到 6mm 时,过渡圆角处的应力集中系数从 2.5 降低到了 1.6 左右,相应的疲劳寿命提高了 1.8 倍左右;轴肩端面开卸载槽可优化应力状态,卸载槽结构可以改变过盈配合结合表面之间的应力状况,降低了局部应力集中度,改善了应力状态,提高了结构抵抗微动疲劳损坏的能力,延长了疲劳寿命。

卸荷槽的设计深度及宽度之间的最佳组合方式。通过有限元仿真计算得出,卸荷槽深度应选取轴径的 3%~5%,宽度在圆角半径 2~3 倍的情况下可以取得更好的卸荷作用;同时,卸荷槽的形状也对卸荷的效果产生了一定的影响,在相同尺寸下,U 型截面卸荷槽相较矩形截面卸荷槽有更好的卸荷能力,可以更好地卸出配合面末端的最大接触压力值,减少微动破坏几率和可能性。

4.3 表面强化与残余应力

表面强化处理可以使辊轴表面产生有利的残余压应力而使疲劳裂纹的产生和发展受到一定的制约。常见的表面强化方式有辊压强化、喷丸强化以及高频淬火等。通过在表面制造出残余压应力可以使得材料表面的应力幅值下降大约 20%~40%,从而提高其疲劳寿命 15%~30%。

针对过盈连接表面,在提高配合表面耐磨性的同时可以减少对过盈值的依赖程度,扩大加工裕度范围。在实际应用方面,喷丸强化由于其工艺灵活、成本低廉被广泛地使用^[5],而超声滚压强化能获得更深层次的残余压应力以及更好的表面粗糙度,适用于具有较高疲劳强度需求的场合,采用残余应力作为平均应力进行 Goodman 修正后,预计延长了 40%~60%左右的疲劳失效寿命。

4.4 优化方案对比与验证

把上述改进措施进行不同的组合,得到三个优化方案,方案 A:适当增大圆角半径(由 2mm 变为 5mm)并设有卸荷槽;方案 B:在方案 A 的基础上优化过盈量至 2.2‰;方案 C:在方案 B 之上增加了轴颈表面的轧制强化工艺。经过有限元仿真与疲劳寿命计算的结果如表 2 所示。

表 2 辊系疲劳寿命优化方案对比

方案	最大等效应力/MPa	应力集中系数	预测疲劳寿命/ 10^7 次	寿命提升倍数
原始方案	385	2.45	1.2	—
方案 A(圆角+卸荷槽)	262	1.65	2.1	1.75
方案 B(A+过盈优化)	248	1.58	2.5	2.08
方案 C(B+表面强化)	235	1.52	3.1	2.58

根据表 2 可以看出,方案 C 的改进最为明显,疲劳寿命达到原方案的近 2.58 倍,达到了大于 20000h 的设计寿命的要求。文献对于辊压机辊轴设计缺点,在 Solidworks 下进行了辊轴的有限元应力分析以及提出改善方法的应用实例也证实了这个观点—优化方法可以有效提高辊轴的性能及使用寿命等。通过仿真计算发现,经过优化的结构满足了疲劳强度的要求,增强了安全裕度。

5 结束语

本文针对辊压机辊系结构设计及其疲劳寿命的研究做了比较全面的研究工作,在其结构设计中介绍了辊径、辊宽以及最小辊隙等相关要素选择及轴承支撑布置方案;利用有限元计算找到了辊轴的轴颈圆角过渡区及过盈配合面端部这两个危险区域。在疲劳强度估算中得出最初的结构设计由于轴颈圆角区存在不足之处而导致疲劳寿命下降,需要进行相应的改进。过盈配合量、结构圆角大小、卸荷槽尺寸及表面处理方式是影响辊系疲劳寿命的主要因素,合理选择它们可以使疲劳寿命提高 1.5~2.5 倍,完全符合工程设计中所要求的 20000h 以上的要求。未来的研究当中可以增加对于不同物料影响下辊系载荷谱的变化情况的相关研究,形成新的更为准确的多工况耦合作用下的疲劳分析模型;另一方面研究新类型的梯度材料以及复合强化方法应用于辊系当中,以此提高其抗疲劳能力,最后利用好数字孪生、物联网等先进的监测手段,对辊系剩余寿命进行实时计算并发出警报提醒相关人员注意保养维护工作等。

[参考文献]

- [1]于浚哲,滕延伟,褚旭.基于 ANSYS Workbench 的辊压机辊子过盈联接应力分析[J].水泥技术,2015(3):38-40.
 - [2]王进军.高压辊磨机压辊过盈联接应力分析[J].装备制造技术,2013(8):59-62.
 - [3]刘阳,张进生,王志.挤压辊结构要素对其疲劳寿命影响的仿真研究[J].矿山机械,2009,37(19):70-72.
 - [4]邓春燕,王力,王涛.水泥辊压机辊轴断裂原因[J].理化检验-物理分册,2025(9):42-48.
 - [5]黄金成,石海川,孙登建.辊压机辊轴断裂行为仿真分析与结构优化[J].水泥工程,2025(2):53-55.
- 作者简介:刘驰(1995—),男,汉族,河北省邢台市信都区人,机械工程师,2019 年 7 月毕业于吉林化工学院机械设计及其自动化专业,最高学历本科,现主要从事辊压机设计工作或研究的方向。