

制浆造纸用低浓盘磨机磨片的研究进展

刘欢¹, 刘洪斌¹, 董继先², 乔丽洁², 郭西雅²

(1. 生物基纤维材料全国重点实验室, 天津市制浆造纸重点实验室, 中国轻工业造纸与生物质精炼重点实验室, 天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457; 2. 陕西科技大学机电工程学院, 西安 710021)

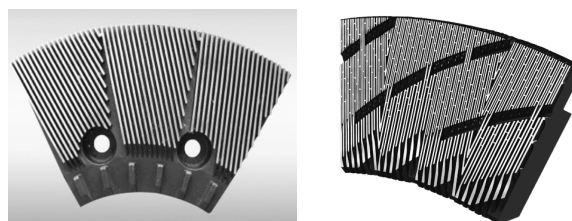
摘要: 盘磨机低浓磨浆过程是制浆造纸纤维性能改善的关键阶段, 直接决定成纸的质量。磨片是对纤维施加冲击的核心部件, 其齿形设计与选择直接影响浆料质量及磨浆能耗。为了充分把握低浓磨片设计、应用发展脉络及趋势, 本文从齿型分类、量化评估、设计及优化方法、先进制造方法等方面对低浓盘磨机磨片进行总结分析。低浓盘磨机磨片量化表征参数主要有磨齿切断长、交错面积、交错长度、交错区域平均数量及空载功率等, 而磨片可通过齿型特征进行流程化设计, 进而基于磨浆强度、流体力学、先进设计方法及人工智能算法进行优化设计。低浓盘磨机磨片优化设计、材料设计及先进制造工艺的结合将促进我国低浓盘磨机磨片的设计及应用水平。未来高效低能耗磨片的设计应以纤维性能可控及能耗降低为导向, 紧紧依托磨浆机理的研究深化与先进设计方法的开发, 而磨片行业应以产品供应及技术服务两条主线发展, 以“过程评估-磨片优化-运行反馈”模式实现高端磨片的制造及应用。

关键词: 盘磨机; 低浓磨片; 分类; 设计; 制造

低浓磨浆或打浆是指对处于相对旋转的狭小沟槽型间隙(0.05~0.3 mm)内的浆料(如2%~6%)进行机械处理的操作过程^[1-2]。低浓磨浆过程复杂又细致, 是制浆造纸的核心工段, 其直接影响纤维形态、浆料性能及成纸的性能。低浓连续磨浆设备主要有盘磨机、锥形及圆柱磨浆机等, 而盘磨机是目前低浓磨浆设备中应用最广泛的设备。影响低浓磨浆特性的主要有控制参数、磨片齿形参数及原料特性参数, 其中控制参数主要包括磨浆功率(或电流)、流量、进出口压力、浆料浓度等; 而磨片齿形参数主要包括内径、外径、齿倾角、槽宽、齿宽等。因此, 在既有原料条件下可通过调节控制参数和磨片齿型实现磨浆过程的优化节能。

低浓盘磨机磨片(简称低浓磨片)区别于高浓磨浆所用磨片的特征在于其磨齿近乎直接作用于纤维, 使得纤维形态发生改变。而高浓磨浆过程中磨齿与纤维之间、纤维与纤维之间的作用较强, 磨齿直接作用占比减小。两类磨浆过程所用磨片有

所不同, 如图1所示。低浓磨片设计灵活且种类丰富, 齿形设计直接影响其对纤维的冲击作用。磨浆过程是通过磨片的动态冲击对浆料纤维施加复杂作用力^[3], 使纤维发生形态改变(如切断、细纤维化等)^[4], 并使得浆料的滤水性能适当降低, 以满足成形及成纸性能的要求。力是磨浆对浆料冲击作用的源头, 磨片作为力的直接作用部件, 其齿形参数特征直接影响磨区内力的分布及磨浆效果。



(a) 低浓磨片(晨钟)

(b) 高浓磨片(Andritz)

图1 制浆造纸用磨片举例

低浓磨浆在制浆造纸过程中被广泛应用, 不同

基金项目: 陕西省教育厅科学研究计划项目(24JP031); 陕西省重点研发计划项目(2025GH-YBXM-006)

作者简介: 刘欢(1991—), 副教授, 博士, liuhuan@tust.edu.cn。

工艺对于磨浆的要求差异较大,因此磨片的合理设计与选择十分重要。一般情况下,研究开发磨片受新型磨浆技术的指导,而磨浆理论的研究催生高效磨浆技术。磨浆过程看似简单,实则是影响参数众多的复杂过程,而对低浓磨片的研究是优化磨浆过程的关键。因此,本文从磨片的种类、量化评估、优化设计等方面对现有低浓磨片的研究进行综述,以期对低浓磨片的研究与开发提供参考。

1 低浓盘磨机磨片的分类

低浓磨盘(片)的种类繁多,为磨片的选型提供了丰富的选择,但也为磨片的选择造成了困难。低浓磨片的分类方法有很多,常见的有:(1)按照作用结果,磨片可分为切断为主型及细纤维化(或分丝帚化)为主型;(2)按照磨齿轮廓,可分为直齿、弧形齿两大类;(3)按照齿分布,可分为放射型、等距型及组合型等^[5];(4)按照磨齿旋向,分为左旋及右旋磨片;(5)按照磨齿旋向与磨盘转向的关系,分为泵送型及拉入型;(6)按照磨区分区情况,分为直通齿磨齿及分区磨齿;(7)按照单组磨齿分布与单组磨齿的关系,分为中心配置及伪配置磨片^[6]。

如图2所示,直齿及弧形齿是制浆造纸最常用的低浓磨盘齿形,以下将主要对此两类齿形进行阐述。直齿磨片主要包括放射型直齿磨片及等距型直齿磨片两类,目前大部分低浓磨片研究集中在等距直齿磨片。而弧形齿磨片相对复杂,主要包括螺旋线齿形磨片、圆弧形齿形磨片等。

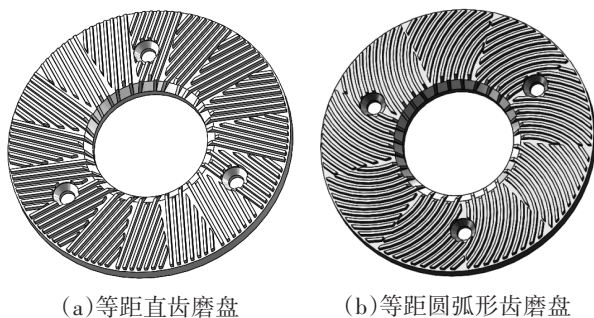


图2 常见低浓磨盘

低浓磨片相对于高浓磨片结构相对简单但齿形复杂多变,其主要齿形参数包括内径、外径、齿倾角、槽宽、齿宽、齿高、齿倾角、单组磨齿中心角等,相关参数的定义参见文献[7]。低浓磨片通常采用“a(齿宽)-b(槽宽)-c(齿高)”代号来表征齿形参数,

但其难以代表所有关键磨齿参数。因此,除了运用代号表示磨片对应的齿形特征外,还应以磨片量化评估参数来表征磨片的性能^[8],用以指导低浓磨浆过程磨片的选择。

2 低浓磨片的量化评估参数

通常情况下,低浓磨浆过程用冲击次数及冲击强度来表征^[9-10],典型的有比能耗及磨浆强度。其中,比能耗表征对纤维冲击的总体能耗,而磨浆强度表征冲击施加的方式。此外,KEREKES等^[11]提出了用冲击次数、单次冲击能耗(强度)及作用于纤维的力来表征磨浆过程。可见,磨浆强度是衡量低浓磨浆过程必不可少的参数,且其与低浓磨片的量化表征息息相关。本文将仅与磨片齿形参数相关的、用于综合表征磨片施加冲击能力的参数,称为磨片量化评估参数。

2.1 磨齿切断长

磨齿切断长(cutting edge length)是表征磨齿交错过程中磨齿对纤维冲击的重要参数。磨齿切断长由WULTSCH等^[12]提出,ROUX等^[13]考量磨齿角参数提出了其另一种表达形式。刘欢等^[14-15]对两者进行了分析,认为磨齿切断长可以从动盘磨齿滑动长度(L_{C1})及当量磨齿总长度(L_{C2})两个方面进行物理意义的解释,对于盘磨机而言,其两类计算表达式可参见表1。此外,还有基于此的改进形式,此处不再赘述,可参见文献^[16]。

表1 盘磨机磨盘磨齿切断长的计算^[14]

L_c	积分形式	离散形式
L_{C1}	$\frac{4\pi^2(r_c^3 - r_i^3)\cos\alpha_{AR}}{3(a_R + b_R)(a_S + b_S)}$	$\sum_{k=1}^p \frac{n_{Rk}n_{Sk}\Delta r_k}{\cos\alpha_{ASk}}$
L_{C2}	$\frac{4\pi^2(r_c^3 - r_i^3)}{3(a_R + b_R)(a_S + b_S)}$	$\sum_{k=1}^p \sqrt{\frac{n_{Rk}^2\Delta r_k}{\cos^2\alpha_{ARk}}} \sqrt{\frac{n_{Sk}^2\Delta r_k}{\cos^2\alpha_{ASk}}}$

注:表1中, r_i 及 r_c 为磨盘内外径, n 为磨齿齿数, α 为磨齿倾角;下标中,R及S代表动盘及定盘,A表示平均值; k 为分区标号, p 为分区总数。

2.2 磨齿交错面积

磨齿交错面积(bar intersecting area)是衡量磨区利用面积的关键参数,也是计算磨齿交错参数的关键。JAGENBERG^[17]针对零倾角的荷兰式打浆机首次提出磨齿交错面积的概念,用以表征磨浆过程的比压。式(1)的面积计算公式是后期计算盘磨机

磨齿交错面积的依据。

$$A_c = A_p K_s K_R \quad (1)$$

式中: A_p 为磨盘总面积; K_s 和 K_R 分别为定盘和动盘齿面面积占比。

ROUX 等^[18]对等距直齿磨盘的 A_c 进行了计算。此外, ELAHIMEHR 等^[19]考虑到磨区未被磨齿占据面积,重新推导了 A_c 的计算式。而刘欢等^[20-21]针对带挡坝的直齿磨盘,推导出 A_c 的计算方法。

2.3 磨齿交错区域的平均数量及磨齿交错长度

磨齿交错区域的数量(Bar crossing zone number, N_{BC})是重要的磨齿交错参数,是磨盘量化的关键参数。其是由 PFARR 在研究荷兰式打浆机时而提出的,根据式(2)计算^[17]。

$$N_{BC} = \frac{A_c}{a_{BC}} \quad (2)$$

式中: a_{BC} 为单个磨齿交错区域的面积。

ROUX 等^[22]研究了磨齿交错区域数量随磨盘旋转角度及磨盘角参数的变化规律,并计算了等距直齿磨盘的交错区域平均数量^[18,20-21]。

LIU 等^[8]及 ELAHIMEHR 等^[19]针对等距直齿磨片,考量不同磨齿交错区域边缘形式及磨齿交错区域的数量,推导了磨齿交错长度的计算式,用以表征对纤维的冲击作用。

2.4 理论空载功率

空载功率是指在低浓磨浆过程中磨盘间隙足够大时所消耗的功率,这是由磨盘的流体动力学特性决定的,与磨盘的齿形参数息息相关,影响磨浆效率。如图3所示为两种不同定义的空载功率, A 为空载区域与磨浆区域的临界点, P_{nl1} 为以临界磨盘间隙定义的空载功率, P_{nl2} 为以磨盘间隙大于 2.5 mm 定义的空载功率。因此,计算磨盘的理论空载功率是磨盘量化表征手段之一。LIU 等^[23]对低浓磨浆过程的空载功率进行了系统的综述,大部分关于空载功率的计算均与磨盘直径及转速相关,仅有一种经验计算方法(见式(3))考虑到了磨盘齿形参数,但其存在量纲不统一的问题^[24]。

$$P_n = 102 \left(\frac{N}{100} \right)^3 \left(\frac{d_e}{100} \right)^{4.3} \frac{b}{0.45(a+b)} \frac{g}{0.25} \quad (3)$$

式中: P_n 为空载功率, 马力(1 马力=0.746 kW); N 为转速, r/min; d_e 为磨盘外径, a 为齿宽, b 为槽宽, g 为磨齿高度, 英寸(1 英寸=0.025 4 m)。

对于单一磨片的评估而言,以上4类量化评估

参数均可用于表征低浓磨片的磨齿冲击性能或能耗。当用于不同类型磨片的比较时则需要慎重考虑^[16,18,20-21];一般情况下,对不同齿宽、槽宽磨片的冲击性能进行评估时,以上参数均可采用;对于具有不同角参数磨片的评估,推荐采用磨齿交错区域数量;而对于含挡坝参数磨片的评估,则可采用磨齿交错区域数量。

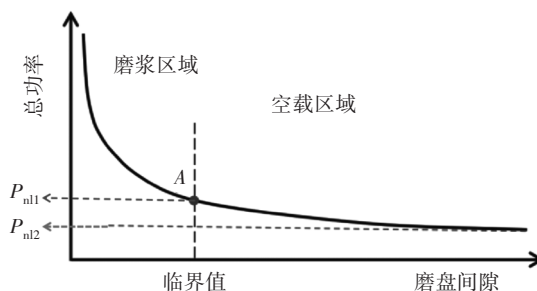


图3 两种不同定义的空载功率^[23]

3 低浓磨片的设计及优化方法

低浓磨片的设计及优化是低浓磨浆过程优化的关键,是关系到低浓磨浆过程高效低能耗的核心课题,其主要包括磨片的齿形设计方法及优化设计两类。优化一般指特定目标情况下磨片的设计,而磨片的齿形设计指特定类型磨齿的通用设计方法。

3.1 基于齿形特征的低浓磨片齿形设计方法

基于齿形特征的磨片设计主要是针对不同类型磨片所提出的设计流程。国内最早的相关研究是关于谷物研磨粉碎的直齿及弧形齿磨片^[25],其设计方法可供借鉴。沈立新对圆环分区等距直齿磨片^[26]及等距直通齿磨片^[27]的设计进行举例,并论述了相关齿形参数的经验推荐值^[28]。苏昭友等^[29]、王佳辉等^[30]对盘磨机磨片设计依据、磨片参数设计进行了综述。徐登伟等^[31]基于沈立新等的研究,阐述了一种草木纤维一步分离磨片的设计流程。梁钱华^[32]根据等角螺线(或对数螺旋)数学性质,提出了一种盘磨机磨片的结构,而王成昆等^[33]针对螺旋线磨齿在盘磨机磨片及锥形磨浆机磨片的应用进行了综述,并未阐述其设计方法。郭西雅等^[34]结合层次分析法(AHP)和质量功能展开法(QFD),构建磨片设计要求的质量屋(HOQ),经计算获得磨片设计要素重要度排序,从而可得到磨片设计的关键参数。此外,祁凯等^[35]针对造纸法烟草薄片磨浆专用磨片的研究与应用进行综述,阐述了专用磨片的分

类及特征。刘欢等^[36-38]提出了一种用于等距弧形齿磨盘及三级放射型弧形齿磨盘设计的方法,为圆弧形弧形齿磨盘的设计提供了指导。

3.2 基于磨浆强度的低浓磨片的设计优化方法

前文已有阐述,低浓磨浆强度是表征磨浆过程冲击作用强弱的重要参数。对于特定磨浆条件下,最优磨浆强度或磨片量化表征参数的选择是低浓磨片优化设计的关键。前人阐述磨片的设计理论多基于比边缘负荷(SEL)^[28-30],齿形量化表征参数多依据磨齿切断长。刘欢等^[39-40]基于沈立新等的磨齿设计案例,提出了一种基于SEL的等距直齿磨盘的设计方法,使得磨齿设计有理可依。考虑到SEL的应用局限性,刘欢等^[41-43]基于单个磨齿交错区域的净切向力,提出了适用于含挡坝与不含挡坝的等距直齿磨盘齿形参数的设计方法及流程,可结合磨浆特性实现最优单个磨齿交错区域的净切向力的确定,从而指导磨盘设计。尉迟学墉等^[44]考量齿形参数设计了盘磨机磨片选择估算软件,可实现等距直齿磨片磨浆SEL及比能耗等参数的估算,可为齿形优化选择提供参考。此外,刘欢等^[45-49]设计了适用于放射型直齿、等距直齿、弧形齿磨片齿形参数的计算软件,为低浓磨盘的设计及选择提供依据。

3.3 基于磨区流体力学的齿形设计优化方法

基于计算流体动力学(CFD)及粒子追踪技术对低浓磨浆过程磨区浆料流动模拟是低浓磨片水力学评估及齿形优化的又一重要手段。刘欢等^[50]对前期盘磨机磨区浆料流动的理论及实验研究进行了系统的综述,此处不再赘述。国内外研究人员对低浓磨区浆料流动的研究主要是不同参数影响下动盘沟槽、定盘沟槽及磨盘间隙的浆料流动形式。一方面,计算机模拟可实现不同齿形低浓磨片磨区浆料流动及流体力学特性的模拟,实现水力学评估与对比,进而实现磨片齿形特征的优化,但这种量化研究与实际磨浆特性的关联性值得进一步研究。如董继先等^[51-53]对磨齿倾角、单组磨齿中心角及挡坝参数影响下不同等距直齿磨片的磨区浆料流体力学特征进行了研究;刘庆立等^[54]采用粒子追踪技术,通过改变磨齿数量和磨齿形状,对比了不同磨齿情况下浆料纤维的微观流动特性。另一方面,若能找到磨区浆料的流动特征参数与磨浆特性(如打浆度、纤维长度或保水值)间的关系,将为磨片齿形

特征的优化提供更加有力的参考。

3.4 先进设计方法及人工智能在低浓磨片设计优化中的应用

先进设计方法在磨片设计优化中的应用是未来磨片研究的重要方向,在磨片设计方法、磨浆机理逐渐清晰的背景下可以有所突破。马洪斌等^[55]运用蒙特卡罗方法对热磨机圆环分区直齿磨片的齿高、齿倾角、磨片齿数和齿长进行了优化设计,其采用的直长齿,或许可以基于新的磨片设计方法进行优化研究,并进行低浓磨浆实验验证。郭西雅等^[56]针对特定原料特性及磨浆要求,提出了基于粒子群优化BP神经网络算法的等距直齿磨盘齿形参数预测模型,并基于Creo软件实现了其参数化设计及一站式开发。低浓磨片种类繁多,其优化设计规律难以探寻。借助先进的设计方法及人工智能技术,对现有数据进行归纳总结并构建数据关联模型,为特定目标下的磨片优化设计提供解决方案,此方向值得深入研究。

4 低浓磨片的先进制造方法

磨片的制造过程主要包括材料选择、加工成型、强化后处理、动平衡等环节,直接决定磨片的使用寿命及性能。金属材料适应设计、磨片齿形目标设计、制造过程的数字化及智能化、磨片加工车间的全自动化是未来磨片先进制造的发展方向。

4.1 磨片材料的设计与选择

磨片是盘磨机的核心部件,其材料是决定磨片使用寿命及性能的基础。目前,磨片材料有灰口铸铁、高铬铸铁、不锈钢、金刚砂、尼龙等^[57],而用于制浆造纸磨浆过程的磨片材料主要有高铬铸铁和多元合金(马氏体不锈钢)。其中,高铬白口铸铁^[58-59]相较于一般白口铸铁具有良好耐磨损、耐酸碱、耐高温等性能,因此应用比较广泛,主要有Cr15、Cr17、Cr20、Cr26等。生产高端磨片的材料主要有7Cr17Mo、5Cr16Mo、3Cr15Mo等马氏体不锈钢^[60]。另外,可对新型耐磨材料的成分进行重新设计,有效控制材料内部微观结构、各相的析出和组成形式,从本质上改善材料的性能,延长磨片的使用寿命。

4.2 磨片制造成型

王平等^[61]对磨片的加工成型工艺做了较全面的总结。本文对铸造、焊接及铣削三种成型方式进行介绍,并对其最新发展进行了补充。

4.2.1 铸造成型

铸造成型是最常见的磨片制造方法,主要有普通砂型铸造及覆膜砂铸造等方式,其主要流程包括造型、浇注、热处理等环节。其中,模具设计、浇注类型及方案等铸造工艺,会直接影响产品的质量及磨片的组织形态。磨片齿形参数会影响磨片的铸造加工难度,因此针对特殊磨片或改变铸造工艺时,需要对铸造工艺的合理性进行评估,例如可以通过对铸造过程进行模拟等来实现。相关磨片制造企业,如Valmet公司,便在铸造前进行模拟分析以保证工艺的合理性;此外,吴江等^[62]基于MAGMA soft软件对各种磨片的铸造过程进行了模拟(如图4所示),为实际铸件铸造过程提供指导,进而提高磨片的成品率、抗冲击性能等。

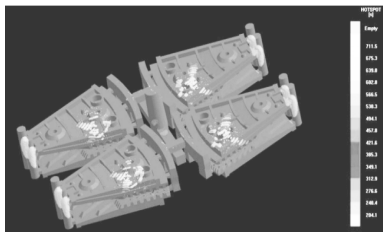


图4 磨片铸件热节分布图^[62]

4.2.2 焊接成型

磨片的焊接成型指将预先加工好的磨齿焊接到平板或锥形基体上的加工过程,此类方法无需铸造且磨片外形美观,但存在加工效率低的缺点,且对技术人员的焊接技术要求较高。磨片类型主要有文献^[61]中所介绍的焊接锥形转子及定子、镶嵌式焊接磨片等。焊接完的磨片需要进行热处理,以消除焊接产生的热应力。此外,在沟槽存在焊缝的传统TIG(钨极惰性气体保护)焊接方式(如图5所示)存在产量低、机械强度差、寿命短、能耗高等问题^[63],因此综合磨齿机械强度、磨浆特性等,探究优化的磨齿焊接成型工艺及结构或可进一步促进焊接磨片的发展。

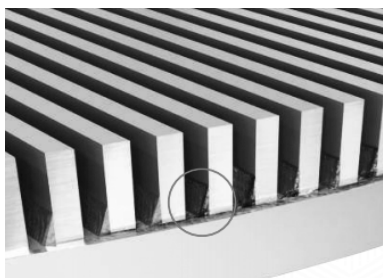
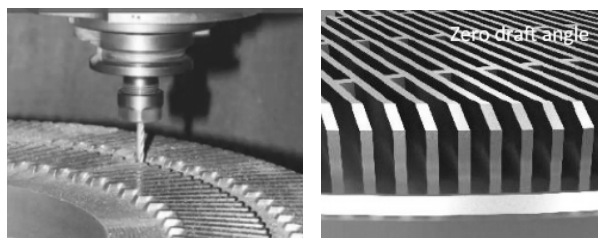


图5 焊接磨片^[63]

4.2.3 铣削成型

磨片的铣削成型能够精准地控制磨片的齿形参数,磨齿边缘较为锋利,可加工磨齿宽度较小的磨片。如图6所示,Parason公司采用激光切割及四轴数控机床对磨片进行铣削成型,最大限度保证了磨区的均匀性及槽宽的精确度,最小齿宽为0.8 mm,具有零拔模角度的特征^[63],可实现低强度磨浆。但铣削成型方法对加工设备的要求比较高,加工成本较高,因此适用于特殊齿形磨片的中小批量生产。



(a)磨片铣削成形

(b)零拔模角度特征

图6 磨片铣削成型^[63]

4.3 磨齿表面特殊处理

磨齿表面特殊处理主要有表面强化处理、粗糙化处理等。表面强化处理的技术主要有渗碳、渗氮、超音速火焰喷涂、爆炸喷涂等^[61,64],目的是提高磨片的硬度、耐磨性,进而提高磨盘使用寿命。而表面粗糙化处理^[65-66]是通过激光熔覆、等离子喷涂、爆炸喷涂等方法将磨齿表面粗糙化,提升磨区磨齿与纤维之间的摩擦力,改善磨浆效果。此外,Parason公司针对焊接成型磨片开展了磨齿表面及磨齿前缘耐磨性处理(AWT)^[63],发现焊接磨片经过处理后,磨片寿命可提升66%。因此,对成型完成的磨片应确定合理的热处理工艺及表面特殊处理策略,从而改善磨片的磨浆特性及寿命,降低使用成本。

5 总结与展望

本文从低浓盘磨机磨片类别、磨片量化评估参数、磨片设计及优化方法、先进制造方法等方面进行综述,以期实现低浓磨片的设计、制造及应用一体化,促进磨片行业的高质量发展及低浓磨浆过程的节能降耗。主要结论如下:

(1)低浓盘磨机磨片可通过量化表征参数进行评估,主要有磨齿切断长、交错面积、交错长度、交错区域平均数量及空载功率等。

(2)低浓盘磨机高效低能耗磨片的开发是磨浆

过程节能降耗的基础,对磨片可通过基本齿形特征进行流程化设计,进而基于磨浆强度、流体力学、先进设计方法及人工智能算法进行优化设计。

(3)通过低浓盘磨机高效低能耗磨片的合理设计,结合材料特殊设计及先进制造工艺,可实现高效率、长寿命、工艺适应型低浓磨片的开发,为制浆造纸企业提供高效磨浆技术与产品。

未来,对低浓盘磨机磨片的研究及行业的发展应符合以下趋势:

(1)深入开展磨浆机理及目标导向下的低浓磨片优化设计方法研究,通过参数调节及磨片优化实现磨浆过程的节能、效率提升及纤维性能可控。

(2)依托先进机械设计及制造技术,服务磨片设计、加工制造行业的高质量发展,以新质生产力促进磨片加工企业的数字化及智能化水平,提升企业的实力。

(3)磨片生产行业应以产品供应及技术服务两条主线并驾齐驱,优质的产品 & 个性化技术服务相辅相成,通过“过程评估-磨片优化-运行反馈”模式实现磨片制造及应用的良性循环,提升企业核心竞争力。

参考文献:

- [1] SHARPE P E, RODARMEL J L. Low consistency refiner plate design and selection[J]. Pulp and paper Canada, 1988, 89(2): 51-57.
- [2] 何北海. 造纸原理与工程[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010.
- [3] 刘欢, 董继先, 韩鲁冰. 盘磨机磨区力学研究及进展[J]. 中华纸业, 2017, 38(20): 12-18.
- [4] NORDMAN L. The refining of pulp[J]. Paper technology, 1968, 9(6): 480-484.
- [5] LIU H, DONG J X, GUO X Y, et al. Design method of curved-bar refining plates for disc refiner[J]. Paper and biomaterials, 2019, 4(1): 40-47.
- [6] JORIS G. Le raffinage de la pate a papier: volume 1[M]. France: Acieries de Bonpertuis, 1990.
- [7] 刘欢, 董继先, 郭西雅, 等. 低浓磨浆过程等距直齿磨盘齿型参数的设计与选择方法[J]. 中国造纸, 2022, 41(S1): 114-118.
- [8] LIU H, DONG J X, JING H, et al. Characterization of the parameters for the refining intensity in terms of performance[J]. Journal of Korea TAPPI, 2019, 51(2): 28-40.
- [9] LEWIS J, DANFORTH D W. Stock preparation analysis [J]. TAPPI journal, 1962, 45(3): 185-188, 192.
- [10] KEREKES R J. Energy and forces in refining[J]. Journal of pulp and paper science, 2010, 36(1/2): 10-15.
- [11] Kerekés R J, McDonald J D. Fiber-based characterization of pulp refining[J]. TAPPI journal. 2022, 21(9): 497-503.
- [12] WULTSCH F, FLUCHER W. Der escher-wyss-kleinrefner als standardprüfgerät für moderne stoffe fiber itungsanlagen[J]. Papier, 1958, 13(12): 334-342.
- [13] ROUX J C, JORIS G, CAUCAL G. Quequils écueils de al charge sépcifique d'arêtes dans la rafnage à basse concentration[J]. Rev ATIP, 1999, 53(1): 3-9.
- [14] LIU H, ROUX J C, DONG J X, et al. Physical meaning of cutting edge length and limited applications of specific edge load in low consistency pulp refining[J]. Nordic pulp & paper research journal, 2020, 37(2): 250-263.
- [15] 刘欢, ROUX J C, 董继先. 磨齿切断长及比边缘负荷理论的理解及应用[J]. 中国造纸学报, 2022, 37(S1): 162-169.
- [16] 刘欢, 董继先, ROUX J C, 等. 盘磨机低浓磨浆过程强度表征的有效性及应用[J]. 中国造纸, 2023, 42(7): 57-62, 152.
- [17] MELTZER F. Refning technology[M]. Leatherhead: Pira International Ltd, 2000.
- [18] ROUX J C, BLOCH J F, BORDIN R, et al. The net normal force per crossing point: a unified concept for the low consistency refining of pulp suspensions[C]//I' ANSON S J, ed. Transaction of the 14th Fundamental Research Symposium, Oxford, 2009. Manchester: FRC, 2018: 51-83.
- [19] ELAHIMEHR A, OLSON J A, MARTINEZ D M, et al. Estimating the area and number of bar crossings between refiner plates[J]. Nordic pulp & paper research journal, 2012, 27: 836-843.
- [20] LIU H, ROUX J C, DONG J X, et al. Refining intensity and dynamics of low consistency pulp refining utilizing straight bar plates with dams[J]. Cellulose, 2023, 30(15): 9793-9814.
- [21] 刘欢. 等距直齿磨盘磨浆过程强度模型及磨浆动力学研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2022.
- [22] CHARUEL R, ROUX J C, DE AGOSTINI F, et al. Influence de la geometrie des lames sur le raffinage des pates chimiques[J]. Rev ATIP, 1988, 42(4): 153-160.
- [23] LIU H, DONG J X, GUO X Y, et al. no-load power of disc refiner in low consistency refining[J]. Journal of Korea TAPPI, 2020, 6(2): 87-96.
- [24] NASAB N R, OLSON J A, HEYMER J, et al. Understand-

- ing of no-load power in low consistency refiners[J]. Canadian journal of chemical engineering, 2014, 92(3): 13-18.
- [25] 吴元进. 动力钢磨磨片改进设计的探讨[J]. 农业机械学报, 1965(1): 35-40.
- [26] 沈立新. 盘磨磨片齿型的设计(上)[J]. 纸和造纸, 1999(4): 22-23.
- [27] 沈立新. 盘磨磨片齿型的设计(下)[J]. 纸和造纸, 1999(5): 23-24.
- [28] 沈立新. 盘磨磨片齿型的设计与选择[J]. 纸和造纸, 1998(6): 30-32.
- [29] 苏昭友, 王平. 盘磨机磨片的设计理论与方法[J]. 纸和造纸, 2011, 30(8): 10-16.
- [30] 王佳辉, 王平, 王洪斌, 等. 盘磨机直齿磨片的设计与选择[J]. 中华纸业, 2015, 36(4): 10-15.
- [31] 徐登伟, 周定国. 草木纤维一步分离磨片设计初探[J]. 木材加工机械, 2012, 23(3): 26-29.
- [32] 梁钱华. 一种盘磨机磨片的新颖设计[J]. 中华纸业, 2014, 35(24): 33-34.
- [33] 王成昆, 王平. 对数螺旋线在磨浆机磨齿设计中的应用[J]. 中国造纸, 2015, 34(9): 37-41.
- [34] 郭西雅, 董继先, 刘欢, 等. 质量功能展开法在盘磨机磨片设计中的应用[J]. 中国造纸, 2019, 38(12): 43-48.
- [35] 祁凯, 董继先, 刘欢, 等. 造纸法烟草薄片磨浆专用磨片的研究与应用[J]. 中国造纸, 2021, 40(1): 55-61.
- [36] 董继先, 刘欢, 郭西雅, 等. 一种等距弧形齿磨盘设计方法: CN201811280606.X[P]. 2018-10-30.
- [37] 董继先, 刘欢, 郭西雅, 等. 一种三级放射型弧形齿磨盘设计方法: CN201811280609.3[P]. 2018-10-30.
- [38] LIU H, DONG J X, GUO X Y, et al. Design method of curved-bar refining plates for disc refiner[J]. Paper and biomaterials, 2019, 4(1): 40-47.
- [39] 刘欢, 董继先, 郭西雅, 等. 基于比边缘负荷理论的等距直齿磨片齿型参数设计的研究[J]. 中国造纸, 2019, 38(10): 38-42.
- [40] 董继先, 刘欢, 段传武, 等. 一种基于SEL的等距直齿磨盘的设计方法: CN201910989592.7[P]. 2019-10-17.
- [41] 刘欢, 蒲永平, 董继先, 等. 一种含挡坝等距直齿磨盘齿型设计方法、系统及存储介质: CN202210977513.2[P]. 2022-08-15.
- [42] 刘欢, 蒲永平, 董继先, 等. 一种等距直齿磨盘齿型设计方法、系统及计算机存储介质: CN202210975628.8[P]. 2022-08-15.
- [43] 刘欢, 董继先, 郭西雅, 等. 低浓磨浆过程等距直齿磨盘齿型参数的设计与选择方法[J]. 中国造纸, 2022, 41(S1): 114-118.
- [44] 尉迟学壖. 基于磨浆强度理论的磨片设计与选择方法的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017.
- [45] 刘欢, 董继先, 蒲永平, 等. 基于磨齿滑动长度的比边缘负荷计算软件 V1.0[CP]. 2023SR0002916, 中国版权保护中心, 2023-01-03.
- [46] 刘欢, 董继先, 蒲永平, 等. 等距直通齿磨盘低浓磨浆过程强度计算软件 V1.0[CP]. 2023SR0002921, 中国版权保护中心, 2023-01-03.
- [47] 刘欢, 董继先, 乔丽洁, 等. 非零倾角放射型直齿磨盘齿型参数化计算软件 V1.0[CP]. 2024SR0215604, 中国版权保护中心, 2024-02-01.
- [48] 刘欢, 蒲永平, 董继先, 等. 螺旋线磨盘齿型基本参数计算软件 V1.0[CP]. 2024SR0215524, 中国版权保护中心, 2024-02-01.
- [49] 刘欢, 蒲永平, 董继先, 等. 磨盘圆弧磨齿基本参数计算软件 V1.0[CP]. 2024SR0215672, 中国版权保护中心, 2024-02-01.
- [50] 刘欢, 董继先, 韩鲁冰. 盘磨机磨区内纸浆流动研究与进展[J]. 中国造纸, 2017, 36(9): 66-73.
- [51] 董继先, 段传武, 刘欢, 等. 基于CFD的挡坝参数对磨区浆料流动的影响[J]. 陕西科技大学学报, 2022, 40(2): 144-152.
- [52] DUAN C W, DONG J X, LIU H, et al. Effect of dam number on the pulp flow in the low consistency disc refiner[C]// TAN J R. Proceedings of the 2011 international conference on mechanical design: advances in mechanical design. Singapore: Springer, 2021: 1203-1223.
- [53] 杨瑞帆, 董继先, 刘欢, 等. 磨齿倾角对等距直齿磨盘磨区流动参数影响的数值模拟研究[J]. 中国造纸, 2021, 40(5): 69-76.
- [54] 刘庆立, 汤伟, 吴九汇, 等. 采用粒子追踪技术的盘磨机微观磨浆机理研究[J]. 中国造纸, 2020, 39(2): 46-52.
- [55] 马洪斌, 马岩, 杨春梅. 蒙特卡罗法在热磨机磨片优化设计中的应用[J]. 森林工程, 2012, 28(5): 28-32.
- [56] 郭西雅. 盘磨机磨盘齿形预测及其参数化设计系统的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021.
- [57] 向红亮, 罗吉荣. 纸浆盘磨机磨片制造方法及材料分析[J]. 现代铸铁, 2002(4): 25-27.
- [58] 朴东学. 高铬白口铸铁基体组织与抗磨性能[C]//中国铸造协会. 聚焦新质生产力加快铸造行业高质量发展: 第二届中国铸造协会年会论文集. 上海: 《铸造工程》杂志社, 2024: 94-98.
- [59] 黄钧声. 我国高铬抗磨白口铸铁磨片材料的发展[J]. 现代铸铁, 2007(1): 81-84.
- [60] 狄崇祥. 新型马氏体相变耐磨材料研发[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
- [61] 郭娟, 王平. 磨浆机磨片的新型成型工艺与表面强化处

- 理[J]. 中国造纸, 2016, 35(6): 75-79.
- [62] 吴江. 基于铁型覆砂技术的热磨机磨片的研发[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [63] Parason Machinery. Refining plates & filling[EB/OL]. [2025-06-15]. <https://www.parason.com/products-and-wear-parts/refiner-plates-fillings>.
- [64] 张辉, 李忠正. 盘式磨浆机技术研究进展与趋势[J]. 中国造纸, 2007(10): 40-45.
- [65] 刘欢, 董继先, 罗冲, 等. 盘磨机磨片粗糙化改性及其磨浆性能的研究综述[J]. 中华纸业, 2019, 40(14): 20-25.
- [66] 蒋小军, 严震, 赵杨, 等. 粗粒多元合金磨片的粗糙化磨浆机理[C]//中国造纸学会. 中国造纸学会第十九届学术年会论文集. 北京:《中国造纸学报》编辑部, 2020: 366-369.

Research Progress on Low Consistency Refiner Segments for Pulp and Paper Making

LIU Huan¹, LIU Hongbin¹, DONG Jixian², QIAO Lijie², GUO Xiya²

(1.State Key Laboratory of Bio-based Fiber Materials, Tianjin Key Laboratory of Pulp and Paper, China Light Industry Key Laboratory of Papermaking and Biorefinery, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2.College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Low-consistency refining in disc refiners is a critical stage for improving fiber properties in pulp and paper manufacturing, directly determining the quality of the finished paper. Refiner plates (referred to as refiner segments collectively in the paper when not specifically specified) are the core components that exert impact on fibers. The design and selection of their bar profiles directly affect the pulp quality and pulp refining energy consumption. To comprehensively outline the developmental context and trends of refiner plates, low-consistency refiner plates are systematically summarized and analyzed in this paper from multiple aspects, such as bar profile classification, quantitative evaluation parameters, design and optimization methodologies, and advanced manufacturing techniques. Refiner plates can be designed through process-oriented design based on bar profile characteristics, and further optimized based on refining intensity, fluid mechanics, advanced design methods, and artificial intelligence algorithms. The combination of optimized design, material design, and advanced manufacturing processes for low-consistency disc refiner plates will promote the design and application levels of low-consistency disc refiner plates in China. Furthermore, the future design of high-efficiency, low-energy-consumption refiner plates should prioritize controllable fiber properties and reduced energy consumption. The design and optimization of these plates will be closely tied to deeper research into refining mechanisms and the development of advanced design methodologies. The refiner plate industry should develop with a dual focus on product supply and technical services, implementing a "process evaluation-plate optimization-operational feedback" model to achieve the manufacturing and application of high-end refiner plates.

Key words: disc refiner; low consistency refiner segment; classification; design; manufacture