# 矿浆泵叶轮磨损数值模拟及陶瓷防护研究

# 应武权 何家宁 郭 凯 毛新超

(昆明理工大学机电工程学院,昆明 650500)

文 摘 为了解决矿浆泵叶轮磨损腐蚀导致的矿浆泵寿命短、可靠性较差等缺陷。本文通过 Fluent 软件 对矿浆泵叶轮进行了磨损特性的数值分析。模拟得到主要磨损区为叶片进出口压力面,与实际磨损情况基本 一致。结合陶瓷涂层耐磨耐腐的特点,采用冷喷涂的方法制备了高铬铸铁基体 AT13 陶瓷涂层表面试样。测 试结果表明:涂层显微硬度高达1020 HV;磨损试验测得涂层试样损失质量仅为 5.1 mg;X 射线衍射分析出涂 层与基体结合良好;平均孔隙率为 1.25%。涂层试样的表面硬度和耐磨性远高于高铬铸铁,涂层质量较好,该 涂层工艺可以为矿浆泵叶轮防护提供技术参考。

**关键词** 矿浆泵叶轮,数值分析,磨损规律,陶瓷涂层 中图分类号:TH117 DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2019.02.005

# Numerical Simulation of Slurry Wear in Slurry Pump and Research on Ceramic Protection

YING Wuquan HE Jianing GUO Kai MAO Xinchao

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

**Abstract** In order to solve the defects caused by the wear and corrosion of the slurry pump impeller, such as short life and poor reliability. In this paper, the numerical analysis of the wear characteristics of the slurry pump impeller was carried out by Fluent software. The main wear zone is inlet and outlet pressure surfaces of the blade, which is basically consistent with the actual wear. Combined with the wear resistance and corrosion resistance of ceramic coating, the surface sample of the high-chromium cast iron-base AT13 ceramic coating was prepared by cold spraying method. The test results show that the microhardness of the coating is 1020HV; the loss quality of the coating sample is only 5.1mg; X-ray diffraction analysis shows that the coating has good bonding with the matrix; and the average porosity is 1.25%. The surface hardness and wear resistance of the coating sample is higher than that of the high chromium cast iron. The coating quality is good. The coating process can provide technical reference for the protection of the slurry pump impeller.

Key words Slurry pump impeller, Numerical analysis, Law of wear, Ceramic coating

#### 0 引言

离心式矿浆泵通常应用于悬浮固体颗粒、高密度 的固液两相流的水利运输。矿浆泵运送矿浆中的矿 物颗粒形态不规则硬度较高,具有一定的腐蚀性,这 些物质与叶轮发生强烈的相互作用,产生冲击和腐蚀 作用,使其逐渐失去效力,从而导致泵性能下降。所 以,对于矿浆泵叶轮磨损规律及防护的研究显得尤为 重要。

Fluent 是矿浆泵流场特点和磨损特性研究的主要工具软件。其中固液两相流数值方法主要采用 Euler-Euler 和 Euler-Lagrange 方法。主要的两相流 模型有 VOF、Mixture、Eulerian 模型和 DPM 模型<sup>[1]</sup>。 近年来,越来越多国内外学者采用数值模拟的手段来 分析矿浆泵。L.ALEJANDRO 为侵蚀磨损计算制定

收稿日期: 2018-06-14

基金项目:云南省人才培养项目(KKSY201501060)

第一作者简介:应武权,1993年出生,硕士研究生,主要从事矿山机械陶瓷防护应用研究。E-mail:906251172@qq.com 通讯作者简介:何家宁,1964年出生,教授。E-mail:hjning@126.com

了一种根据侵蚀磨损的速率变形网格的新方法<sup>[2]</sup>。 M.ZANGENEH分别对清水介质和固液两相介质两种 不同工况下渣浆泵内部流场特性进行了数值模拟计 算,结果显示相比于清水工况渣浆泵内部过流件上的 压力分布受固相粒子性质的影响较大<sup>[3]</sup>;K.V.PA-GALTHIVARTHI利用离散相 DPM 模型对离心泵内 部流场进行模拟分析,研究预测了泵的磨损趋势<sup>[4]</sup>。 国内采用数值模拟手段对离心泵的研究起步较晚。 夏密对渣浆泵流场进行数值模拟并结合实验验证,研 究分析了叶片的磨损规律<sup>[5]</sup>。

除此之外还有许多对矿浆泵的磨损机理和磨损 特性的研究,但是在矿浆泵过流件防护方面,众多企 业都是采用高耐磨的合金材料高铬铸铁来制作矿浆 泵的易磨损件,最典型的就是叶轮<sup>[6]</sup>。采用这种合 金材料制造的矿浆泵,耐磨性能依旧不足,导致生产 效率低下和零件磨损损耗巨大等问题。

本文通过 Fluent 软件,采用 DPM 模型对矿浆泵 叶轮进行了磨损特性的数值分析。结合陶瓷涂层高 耐磨耐腐蚀的特点,制备了陶瓷涂层试样,实验分析 矿浆泵叶轮陶瓷防护的可行性以及巨大的应用前 景<sup>[7]</sup>。

1 矿浆泵叶轮内部流场分析

## 1.1 矿浆泵叶轮几何模型

根据原型矿浆泵叶轮设计参数,通过相似转换法 简化建立特征简单的模型叶轮进行计算分析。矿浆 泵的主要设计参数:流量为450 m<sup>3</sup>/h,额定转速为 980 r/min,叶片进口直径为180 mm,扬程65 m,叶轮 为闭式叶轮,主要由叶片和盖板组成,叶片数为6。

## 1.2 网格划分

利用 ICEM CFD 网格划分软件中进行网格划分。 采用非结构网格划分划分所有流体域,设置分界面来 定义流体域相互接触面。网格质量直接影响数字模 拟结果,流体域各部分划分的网格情况和网格质量如 图 1 所示。



图 1 流体域网格及其质量



分别划分好进口段和叶轮内流道网格后,通过网 宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2019年 第2期 格合并生成在软件 Fluent 中使用的网格,其网格和质量见图 2。



图 2 合成网格及其质量

Fig.2 Synthetic grid and its quality

合成网格总数量为 548 255; 网格质量达到模拟 仿真要求。因此把合成网格文件导出, 把 Mesh 文件 导入 fluent, 进行边界条件等参数设置。

#### 1.3 计算模型和边界条件参数设置

本次数值模拟的目的是分析矿浆泵叶轮内固相 颗粒对叶轮的磨损情况。打开 Fluent 仿真软件,采用 Euler-Lagrange 方法的 DPM 磨损模型。这种磨损模 型需要分为两部分,先对叶轮内部流场进行模拟,再 来计算固相颗粒对叶轮的磨损情况。因此首先来计 算无固相颗粒的清水流场<sup>[8]</sup>。

第一步,采用 k-e 湍流模型,添加流体域材料为液 态水。添加流体域属性,把叶轮部分流体设置为 Frame motion,设置旋转轴为z轴,设置转速980 r/min。

进口边界条件采用速度进口,通过公式(1)计算,进口速度为:4.9 m/s。出口边界条件设置为压力 出口,数值:0.1 MPa。

进口条件采用速度进口,进口直径 D = 0.18 m, 流量  $Q = 450 \text{ m}^3/\text{h} = 0.125 \text{ m}^3/\text{s}$ ,进口速度  $v = \frac{4Q}{\pi D^2} = 4.9 \text{ m/s}$ 。

设置交界面,把进口段的 interface1 跟叶轮的 interface2 设置为交互界面 inter。设置进口条件为速度 进口,进口速度为 4.9 m/s,出口条件为压力出口,出 口压力为 0.1 MPa,设置叶片和前后盖板为旋转壁面 条件,跟随旋转域以 980 r/min 旋转,其他壁面条件 均为标准壁面条件,采用 SIMPLE 算法。其他参数默 认,初始化后进行迭代计算。

#### 2 流场和磨损分析

#### 2.1 叶轮内部流场和压力场

模型在迭代到 203 步的时候,达到收敛。根据资料可知,叶轮流体域的速度和压力的分布情况对叶轮的磨损产生直接的影响,所以在启用 DPM 磨损模型之前,先分析叶轮内流场的速度和压力分布,分布云

图如图 3 所示。可以看到叶轮内部压力和速度均从 进口处伴随叶片逐步向外围增大,压力和速度分布基 本符合其他学者的研究结论。



(a) 速度分布 (b) 压力分布

图 3 速度和压力分布云图

Fig.3 Contours of velocity and pressure

## 2.2 DPM 磨损和实际工况对比分析

采用标准的 k-epsilon 湍流模型完成流场的初步 计算,接下来利用 DPM 磨损模型,对矿浆泵在不同固 相粒径,不同固相浓度的工况下进行叶片、前后盖板 的磨损的数值模拟。固定浓度 15%,模拟 0.25、0.5、1 mm 不同粒径的工况;固定粒径 0.5 mm,分析 10%、 15%、20% 不同浓度的工况。

打开 DPM 磨损模型,在固相颗粒中添加石英砂 属性,密度2650 kg/m<sup>3</sup>。在上述的工况下,进行 DPM 计算,用 Tecplot 软件进行图像后处理,分别得到图 4 和图 5 的叶片磨损分布。



图 4 不同粒径下叶片的磨损分布

Fig.4 Distribution of the wear of the blades with different particle sizes



图 5 不同浓度下叶片的磨损分布

Fig.5 Wear distribution of blades at different concentrations

从以上工况下的磨损对比可以发现,叶片的磨损 主要集中在压力面上,其中叶片进口、尾部的磨损情 况最为严重,也可以看出随着粒径和浓度的增大,叶 片的磨损情况有不同程度的增大,这次对叶片磨损的 数值模拟的结果也基本符合图 6 的实际工况磨损情 况。同样对于叶轮的前后盖板也进行了磨损分析,采 用了具有折中的工况:浓度15%,粒径0.5 mm。前盖 板的模拟磨损和实际磨损的对比见图7,后盖板的对 比见图8。



图 6 实际工况下叶片的磨损情况 Fig.6 Blade wear in actual condition



图 7 前盖板磨损的对比

Fig.7 Comparison of front cover wear



图 8 后盖板磨损对比 Fig.8 Comparison of rear cover wear

前盖板的模拟的磨损分布,主要在盖板边缘。企 业里拍摄的报废前盖板的磨损情况图片可以看出,实 际工况下,前盖板边缘的磨损和材料丢失的最为严 重。后盖板的磨损分布相对复杂,主要分布在叶片压 力面结合处,盖板靠近中心处和盖板边缘。

通过以上图片也可以看出,叶片、前、后盖板在模 拟工况下的磨损情况基本符合企业服役的实际工况 下的磨损情况,所以该矿浆泵叶轮磨损模型具有可信 度。通过此次的数值模拟,可以较为清晰的了解矿浆 泵叶轮的磨损规律,具有非常好的研究价值。因此基 于传统矿浆泵的实际磨损问题和叶轮磨损的数值模 拟特点,急需对传统的高铬铸铁叶轮进行改进和 优化。

据文献[5-11],综合分析后认为陶瓷材料硬度 高,耐磨,耐腐蚀等性能是矿浆泵企业梦寐以求的,其 性能十分契合矿浆泵叶轮的性能的实际需要。因此, 本文对陶瓷涂层技术在矿浆泵上的应用进行了实验 分析。

#### 3 陶瓷涂层防护的实验分析

#### 3.1 试样制备

实验试样选用氧化铝基氧化钛(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13% TiO<sub>2</sub>,下文通称AT13)陶瓷材料作为矿浆泵叶轮理想 宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2019年 第2期 的耐磨耐腐蚀涂层材料,基体材料选用高铬铸铁。

在冷喷涂之前,必须对基体材料进行表面预处 理。通过喷砂预处理可以除去基体表面的杂质及表 面氧化膜,促进涂层附着,提高涂层粒子与基体金属 间的咬合力度,从而提升涂层粘结强度,增加附着力, 预处理工艺如下:

(1)使用丙酮溶液对基体材料进行冲洗,祛除表 面附着物,包括油污、灰尘等;

(2)使用 GP-1 型喷砂机对上述处理后的金属 基体进行表面喷砂处理,选用 60 目棕刚玉作为喷砂 磨料,设置空气压力为 0.7 MPa,喷砂角度为 60°~ 80°,喷砂距离为 100~150 mm,时间为 10 min,喷砂 后利用高压空气将表面吹净,然后再用丙酮全面清洗 一遍。

冷喷涂制备涂层的过程主要是依赖高压气流带 动粒子高速喷射,粒子和金属基体表面碰撞引起巨大 的塑性变形而发生沉积,所制备涂层的质量好坏取决 于多方面因素交互影响,冷喷涂工艺参数条件设置如 下:以自然空气作为工作气体,载气温度 630℃,喷涂 压力约为 2.9 MPa,喷涂距离 25 mm,进粉速率约0.55 g/s,喷枪横移速度取 6 mm/s,试样微观形貌见图 9。

— 27 —



图 9 微观形貌 Fig.9 Microscopic appearance

## 3.2 涂层形貌及孔隙率分析

#### 3.2.1 试验方案

使用 VEGA3-SCAN 型号高真空电子扫描显微 镜(SEM)对冷喷涂制备的 AT13 陶瓷涂层截面的微 观形貌进行观察分析。使用 PS 软件对 SEM 图形进 行处理,通过像素比分析涂层孔隙率。

使用 D8-ADVANCE 型 XRD 衍射仪分析涂层的 物相组织及沉积特性。

## 3.2.2 结果分析

## 3.2.2.1 涂层孔隙率计算

利用 PS 软件对 SEM 图像进行处理,计算涂层孔 隙率,评价标准是箭头指示的黑色斑点像素所占总区 域像素的比例,如图 10 所示。



图 10 PS 处理的涂层相貌 Fig.10 Appearance of the PS treated coating

随机选取冷喷涂 AT13 涂层的 4 个区域进行 PS 处理计算,其中最大孔隙率约为 1.39%,最小孔隙率 约为 1.13%,平均孔隙率约为 1.25%,这远低于一般 热喷涂涂层的孔隙率(平均约为 3%),可以有效提高 涂层的耐磨性能。

## 3.2.2.2 物相组织及沉积特性分析

通过对比分析,可以得到涂层的物相成分及沉积 效果。与基体相比(图 11),涂层图谱中出现较多尖 锐衍射峰,分析物相为稳定的金红石 TiO<sub>2</sub>和 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相,总体质量较好杂质较少。其中,在大约 28°,涂层 - 28 - 图谱中出现了比较尖锐的衍射峰,而在大约45°,在 基体图谱中出现了明显的峰值,涂层图谱中并未出 现,分析是由于涂层粒子的结晶效果较好导致出现 28°的衍射峰,涂层厚度及致密性较好导致 X 射线未 能穿过45°涂层生成衍射峰。通过上述分析可以得 出结论,冷喷涂制备的AT13 涂层可以完全覆盖基体 材料,涂层质量致密且均匀,涂层粒子沉积效果较好, 厚度也较为理想。



综上所述可以得出结论:在涂层和基体相接触的 分界面略有凹凸,非常有利于涂层附着,提升结合强 度;涂层冷喷涂效果优良,涂层厚度适中质量较好,沉 积紧密且均匀,存在少量缺陷,但不影响涂层整体质 量。

### 3.3 涂层的耐磨损试验

#### 3.3.1 试验方案

涂层的耐磨性跟硬度有较大关系,传统叶轮材料 高铬铸铁硬度为 58~62 HRC<sup>[12]</sup>,而 AT13 陶瓷涂层 测得的显微硬度高达 1 020 HV(>68 HRC),陶瓷涂 层的硬度明显大于基材高铬铸铁的硬度。

磨损试验<sup>[16]</sup>试样用丙酮及酒精清洗冲净,风干 后用电子天平进行称重。使用 M-2000 型磨损试验 机测试耐磨性能,试验条件:磨轮材料选用 GCr15,载 荷为 150 N,转速为 300 r/min,每磨损 5 min 将试样 取下,通过清洗、烘干后进行称重,试样原始质量  $M_1$ , n 次磨损后的试样质量为  $M_n$ ,磨损量  $\Delta M = M_1 - M_n(n)$ =1、2、3、4、5、6),累计磨损时长 0.5 h。采用同样方 法对进行过表面抛光处理的无涂层高铬铸铁基体试 样进行磨损试验,形成对比试验。

#### 3.3.2 结果分析

通过磨损试验台对 AT13 涂层试样和无涂层基 体试样分别进行试验,图 12 可以看出,无涂层基体试 样的最大磨损失重达到 23.7 mg,而 AT13 涂层试样 的最大磨损失重只有 5.1 mg,这表明 AT13 涂层耐磨

宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2019 年 第2期

性能比高铬铸铁要理想很多。

如图 13 所示,磨损试验后对比两种试样表面可 以得出结论:无涂层基体试样表面存在明显的犁沟形 划痕,部分区域出现剥落现象。AT13 涂层试样表面 仅有少许层状剥落,并无明显划痕,整体表面质量较 好。







(b) AT13涂层试样图 13 磨损 SEM 图Fig.13 SEM images of wear surfaces

#### 4 结论

(1)数值模拟结果显示:叶片部分主要分布在压力面的进口和尾部;前盖板部分主要分布在盖板边缘;后盖板部分主要分布在盖板与叶片压力面结合处、盖板中部和边缘。固相浓度和粒径基本不会影响叶轮磨损分布,但随着固相浓度和粒径增大,整体磨损加剧。这个模拟结果基本符合实际工况的磨损特点,模拟结果相对可靠,可以用于叶轮结构优化,易磨损区防护研究等。

(2)冷喷涂制得的 AT13 陶瓷涂层整体质量较 好,涂层可以完全覆盖基体表面,并且平整无明显缺 陷,平均孔隙率低,硬度高达1020 HV,耐磨性能好, 满足离心式矿浆泵叶轮的耐磨性工艺设计的需求,可 以为叶轮防护、延长寿命周期提供一定的技术手段。

#### 参考文献

[1] 罗亮, 张师帅. 基于两种固液两相流模型的渣浆泵 叶片磨损预测[J]. 水泵技术, 2016(6):16-19.

[2] ALEJANDRO L, MATTHEW T, et al. CFD study of fluid flow changes with erosion [J]. Computer Physics Communications, 2018,227(02):27-41.

[3] ZANGENEH M. Inverse design of centrifugal compressor vaned diffusers in inlet shear flows [J]. AMSE, 1994, 118(2):385.

[4] PAGALTHIVARTHI K V, GUPTA P K, TYAGI V, et al. CFD prediction of erosion wear in centrifugal slurry pumps for dilute slurry flows [J]. Journal of Computational Multiphase Flows, 2011, 3(4):225-246.

[5] 夏密. 离心泵输送大颗粒时固液两相流场的数值计 算[D]. 浙江理工大学,2016.

[6] 吴宪平, 朱先旺. 渣浆泵过流件耐磨材料的研究进展[J]. 长沙大学学报,2010,24(5):28-29.

[7] 向先保. 杭州湾海水环境下水泵转动部件失效机理 分析及耐磨陶瓷涂层防护研究[D]. 上海交通大学,2007.

[8] 赵恩乐. 离心式杂质泵内部固液两相湍流场数值计 算与磨损分析[D]. 合肥工业大学,2017.

[9] 段宝章. TC18 合金表面防腐耐磨涂层制备与性能研 究[D]. 南京航空航天大学,2015.

[10] 邱善广,李相波,王佳,等. 低压冷喷涂铝涂层微观 结构与沉积特性研究[J]. 材料开发与应用,2012,27(6):43-53.

[11] WANG Y, LIM S, LUO J L, et al. Tribological and corrosion behaviors of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/polymer nanocomposite coatings [J]. Wear, 2006, 260(9-10):976-983.

[12] 弓玉. 提高煤炭洗选工况中渣浆泵过流部件寿命的 措施[J]. 铸造设备与艺,2017(5):46-50,56.

[13] YAMADA M, ISAGO H, NAKANO H, et al. Cold spraying of  $TiO_2$  photocatalyst coating with nitrogen process gas [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(6):1218-1223.

[14] 王璐璐. 基于轴类部件磨损修复的冷喷涂涂层制备 及性能研究[D]. 集美大学,2015.

[15] 管相杰. 金属基陶瓷涂层的制备及耐磨、耐腐蚀性能研究[D]. 青岛科技大学, 2008.

[16] 赵坚,陈小明,等. 纳米 Ce 改性对 WC 陶瓷涂层微 观结构及抗磨损性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程,2018, 41(2):43-46

— 29 —