

上海大学出版社

2006年上海大学博士学位论文 68



磨料浆体射流技术 及其机理研究

- 作者：刘小健
- 专业：机械制造及其自动化
- 导师：俞 涛

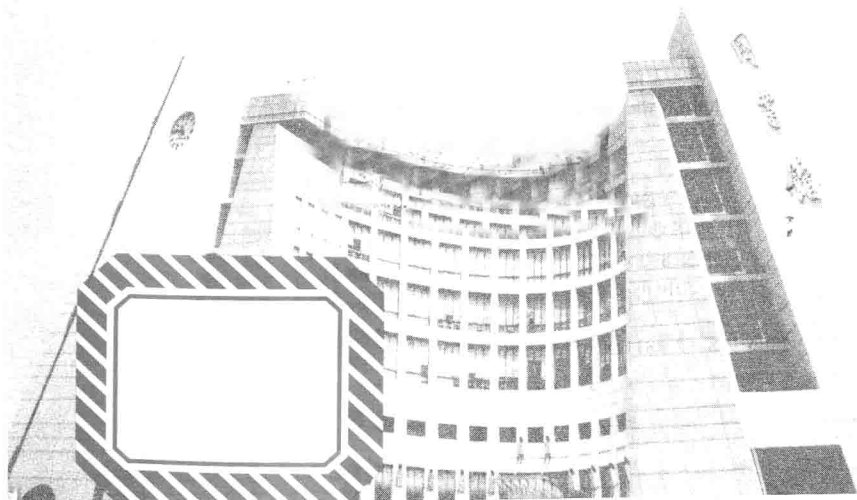


2006年上海大学博士学位论文 68



磨料浆体射流技术 及其机理研究

- 作者：刘小健
- 专业：机械制造及其自动化
- 导师：俞 涛



Shanghai University Doctoral Dissertation (2006)

Research on Abrasive Suspension Jet Technology and Its Mechanism

Candidate: Liu Xiaojian

Major: Machinical Manufacture and Automation

Supervisor: Yu Tao

Shanghai University Press

• Shanghai •

图书在版编目(CIP)数据

2006 年上海大学博士学位论文. 第 2 辑/博士学位论文编辑部编. —上海: 上海大学出版社, 2010. 6

ISBN 978-7-81118-513-3

I. 2... II. 博... III. 博士—学位论文—汇编—上海市—2006 IV. G643.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 162510 号

2006 年上海大学博士学位论文

——第 2 辑

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线 66135110)

出版人: 姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海华业装潢印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 890×1240 1/32 印张 278 字数 7 760 千

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—400

ISBN 978-7-81118-513-3/G·514 定价: 880.00 元(44 册)

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会签名:

主任:周勤之 院士,上海机床厂

委员:姚振强 教授,上海交通大学

顾长庚 教授级高工,上海科技生产力促进中心

叶洪根 教授,上海电器科学研究所

王 坚 教授,同济大学

答辩日期: 2006.5.31

评阅人名单:

周勤之 院士,上海机床厂

叶洪根 教授,上海电器科学研究所

杨建国 教授,东华大学

答辩委员会对论文的评语

磨料射流切割技术具有常温加工、通用性强、切割质量好和环保无污染等特点,磨料浆体射流是一种利用非牛顿流体的特种加工工艺方法。刘小健同学的博士学位论文《磨料浆体射流技术及其机理研究》,重点研究了磨料浆体射流高压发生技术,开发了相应的切割系统,在实验的基础上进行了磨料浆体的机理研究和验证。

刘小健同学博士学位论文的创新研究成果如下:

1. 以膨润土作为添加剂,论文研制了拥有自主知识产权的浆料配制工艺,获得了具有良好工艺性能的浆料,提出幂律模型是描述该磨料浆体流变特性的最佳流变模型,并确立了磨料浆体射流的本构方程。

2. 从工艺上实现了浆料与高压传递介质的双独立循环系统。论文从流变学理论出发,研究了磨料浆体的流变性能,分析了磨料浆体射流的流场特性,并对射流在喷嘴处的速度分布进行了数值模拟,通过磨料浆体的切割性能研究,对应用系统及理论进行了试验验证。

论文工作反映了刘小健同学在机械制造及其自动化专业领域掌握了坚实宽广的基础理论和系统深入的专业知识,具有独立从事科学研究工作的能力。论文内容丰富,结构合理,文字流畅,具有一定理论指导意义和较高的实用价值。达到了博士学位论文水平。

答辩过程中,刘小健同学叙述清晰,回答问题正确。

答辩委员会表决结果

通过无记名投票,答辩委员会一致同意通过刘小健同学的博士学位论文答辩,并建议授予其工学博士学位。

答辩委员会主任: **周勤之**

2006年5月31日

摘 要

随着工业生产的飞速发展,越来越多的高性能材料被研制出来,其中许多材料具有特殊的结构特性,如果采用传统的加工方法进行切割,很难保证切割质量,特别是对材料进行复杂的异形切割时,很难达到设计要求。而磨料射流切割因具有冷态、点割、通用性强、切割质量好和环保无污染等特点,在切割领域占有越来越重要的位置。

然而,目前常用的磨料射流技术还存在一些不足或者说不适宜在我国广泛应用的地方,如:后混合磨料水射流系统采用超高压(压力 ≥ 200 MPa)使得喷嘴的耐磨性、系统超高压密封问题等成为在我国应用的一个瓶颈,影响了系统使用过程中的稳定性和可靠性;前混合磨料水射流系统因喷嘴直径大,使切口宽度增大,切割面较粗糙,且磨料在管道内易发生沉积、堵塞,且系统不能实现连续供料和工作。

本文的磨料浆体射流就是在上述技术背景下提出并展开研究的,该课题的研究主要从工艺技术上降低了系统压力,实现了浆料与高压传递介质的双独立循环使用,提出了新的磨料浆体配制工艺和方法,改善了工艺结构,降低了加工成本。在理论上探索并掌握了磨料浆体的流变特性、流场特性、进行了喷嘴处流场数值模拟及磨料浆体射流切割性能的研究。

论文首先由系统高压传递的关键设备——高压料罐的结构入手进行设计,改变了国外高压缸体的传输机制,实现了浆料与高压传递介质的完全隔离,在此基础上设计了本文磨料浆体射流系统的总体结构及工艺流程,实现了浆料与高压传递介

质的双独立循环使用与系统的连续工作过程。

对浆料配制中添加剂的结构特点进行研究,分析出磨料浆体的主要工艺特性为良好的分散、悬浮性,较好的触变性和润滑性等。利用流变学的原理与测量方法,依据最小二乘法理论,优选出磨料浆体的流变模型为幂律模型,确立了其本构方程的形式。

由连续介质力学观点出发,建立了磨料浆体射流流场的控制方程,在求解区域内采用交错网格的布置方式,使用有限体积法,将磨料浆体射流流场的控制方程进行离散,得到其离散方程,为后续进行喷嘴处数值计算和数值模拟提供了基础。

在交错网格系统中,针对磨料浆体射流喷嘴处的特征,进行了边界条件的设置与离散方程源项的构造。选用流场计算的 SIMPLE 算法求得正确的速度场和压力场,并使用 TDMA 方法作为迭代步骤,进行了磨料浆体射流流场控制方程组的求解,通过相应的流体力学软件,对喷嘴处流场进行了速度分布的数值模拟,模拟结果显示,配制浆料时添加剂的重量比对喷嘴处的速度分布影响比较大。

最后,对磨料浆体射流最主要的切割性能之一的切割能力进行了试验设计,对其切割典型材料展开了试验研究,结果表明:切割不同类型材料时,影响切割能力主要因素的影响程度略有不同。同时,将磨料浆体射流的切割性能与前混合磨料水射流作了对比分析,认为前者的切割质量明显好于后者,前者的切割能耗平均低于后者 300 GJ/m^3 以上,而切割能力稍弱于后者。另外,基于对试验进行理论预测和质量监控的需要,还对磨料浆体射流进行了切割深度建模研究。

关键词 磨料浆体,流变特性,本构方程,交错网格,流场特性,数值模拟,切割性能,切割深度模型

Abstract

With the rapid development of industrial process, more and more high performance materials are developed, and many of them have special structures. If they are cut via some conventional methods, it's difficult to get high quality. When the materials are cut with sketch shaped specially, it's very difficult to obtain the design requirement. Since the abrasive jet cutting has the features of cold conditions, point-cut, commonality, high-quantity and pollution-free, it occupies more and more important position in the cutting field.

But there are some shortages in the existing abrasive jet technology or there are some imperfect influencing the wide using of it in our country. Such as high-pressure(≥ 200 MPa) is used in abrasive jet cutting system and this make a application bottleneck in our country because of the nozzle abrasability or the hermetic problem with high-pressure which influence the stability and the reliability of the system. Since the nozzle size is bigger in the dia-injected abrasive water jet cutting system, the cutting width is bigger, the cutting face is rougher, the abrasive grain is easier to deposit or plug in the pipe, and the continuous feeder process can't be realized.

This paper is presented and studied with above

technology background, the research mainly reduces the system pressure in the process technology, realizes the recycled use of the abrasive suspension and the high-pressure transfer medium separately, new process and method are presented which improve the process structure, reduce the machining cost. The rheological characters, the flow field characters are explored and grasped, the numerical simulation of the flow field in nozzle is made, the abrasive suspension jet cutting performance is studied.

In this paper, the structure of the high-pressure tank which is the key device of the system is designed, in which the abrasive suspension and the high-pressure transfer medium is complete isolated. The transfer mechanism of the high-pressure tank overseas is changed. Based on this foundational study, the total structure and the process flow are designed, the recycled use of the abrasive suspension and the high-pressure transfer medium independently is realized, and the work process of system is designed to be work continuously.

The additive structure features in the suspension are studied. It is analysed about main technical features of the abrasive suspension that it has good dispersibility, suspension property, good thixotropy and lubricity. Using the rheologic principle and the method, basing on the least squares techniques, the author selected the rheological model is the power-law model, established the constitutive equation form of the abrasive suspension.

From the viewpoint of the continuous medium mechanical, the control equations of the abrasive suspension jet flow are established, in solution field, the stagger grid mode and finite volume method are adopted. Discretizing the the control equations of the abrasive suspension jet flow, the discrete equations will be gotten, and this provides the foundation for the post numerical calculation, numerical simulation.

In the system of stagger grid, aiming to the feature of the abrasive suspension jet nozzle, the boundary conditions is set up, the source item of the discrete equations is build. To get the correct velocity flow and the pressure flow, the SIMPLE arithmetic is adopted. The TDMA is used as the alternate step to get the solution of the control equations of the abrasive suspension jet flow. The numerical simulation about the velocity distribution is performed via the hydrodynamics software. The result shows that the additive weight ratio in the process of making up suspension influences deeper on velocity distribution.

At last, the test for verifying abrasive suspension jet cutting ability is designed as the main cutting performance. The cutting test with typical materials is carried through. The result shows that the influence level of the main factors on cutting ability is different with different materials. At the same time, abrasive suspension jet cutting performance is compared with the dia-injected abrasive water jet. It is believed that the first one is better than the second one in

cutting quality, the consumed ratio energy of the first one is lower than the second one about 300 GJ/m^3 , but the cutting ability is slightly weaker than the second one. Besides, based on the need for the theoretical prediction on the test and the need for quality monitor, the model for predicting abrasive suspension jet cutting depth is presented also.

Key words Abrasive Suspension, Rheological Character, Constitutive Equation, Stagger Grid, Flow Field Character, Numerical Simulation, Cutting Performance, Cutting Depth Model.

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.1.1 水射流技术的特点及应用领域	1
1.1.2 磨料射流技术发展背景	5
1.1.3 课题来源	8
1.1.4 课题研究的目的和意义	8
1.2 课题研究现状和发展趋势	9
1.2.1 高压水射流技术发展与研究现状	9
1.2.2 磨料浆体射流技术研究现状及发展趋势	10
1.3 论文研究的主要内容	13
1.4 本章小结	15
第 2 章 磨料浆体射流切割技术的实现	16
2.1 磨料浆体射流切割系统原理设计	16
2.1.1 磨料浆体射流形成原理设计	16
2.1.2 磨料浆体射流切割系统的组成	17
2.1.3 磨料浆体射流系统的工作原理及工艺流程设计	18
2.2 磨料浆体射流切割系统中关键技术分析	19
2.2.1 浆料的选用及其配制	20
2.2.2 系统中双循环结构的设计与分析	24
2.2.3 数控系统及 CAD 系统设计	25
2.3 本章小结	26

第 3 章 磨料浆体的流变特性研究	28
3.1 磨料浆体的工艺性能分析	28
3.1.1 造浆粘土的构造特点	28
3.1.2 磨料浆体的工艺性能分析	32
3.1.3 磨料浆体的稳定性	35
3.2 磨料浆体的基本流变参数	35
3.2.1 非牛顿流体的分类	36
3.2.2 流变学概念	37
3.2.3 磨料浆体射流的物质函数	38
3.3 磨料浆体物质函数的测量方法及结果	40
3.3.1 物质函数的测量目的	40
3.3.2 流变测量仪及其测量原理	40
3.3.3 磨料浆体物质函数的测量	43
3.4 磨料浆体本构方程研究	45
3.4.1 研究磨料浆体本构方程的必要性	45
3.4.2 本构方程必须满足的原则	46
3.4.3 纯粘性非牛顿流体的本构方程	46
3.4.4 磨料浆体本构方程的确立	47
3.5 本章小结	52
第 4 章 磨料浆体射流流场离散方程的研究	53
4.1 计算流体动力学概述	53
4.1.1 计算流体动力学涵义	53
4.1.2 计算流体力学的工作步骤	54
4.1.3 计算流体动力学的特点	55
4.2 磨料浆体射流流场控制方程的建立	55
4.2.1 磨料浆体射流流场的控制方程	56
4.2.2 磨料浆体射流流场控制方程的统一形式	58
4.3 磨料浆体射流流场控制方程的离散	59

4.3.1	常用的离散化方法	60
4.3.2	有限体积法的基本思想和特点	61
4.3.3	交错网格的建立	62
4.3.4	磨料浆体射流流场离散方程的建立	65
4.4	本章小结	71
第5章	磨料浆体射流在喷嘴内流场的数值模拟	72
5.1	边界条件的处理	72
5.1.1	入口边界条件的处理	72
5.1.2	壁面边界条件的处理	74
5.2	磨料浆体射流流场离散方程组的数值计算	76
5.2.1	流场数值计算的主要方法	76
5.2.2	流场计算的 SIMPLE 算法	78
5.2.3	基于 SIMPLE 算法的速度修正方程	78
5.2.4	基于 SIMPLE 算法的压力修正方程	80
5.2.5	SIMPLE 算法的计算步骤	81
5.3	磨料浆体射流离散方程组的解法	83
5.3.1	TDMA 算法	83
5.3.2	TDMA 算法在求解磨料浆体射流离散 方程中的应用	86
5.4	磨料浆体射流流场的数值模拟结果及分析	87
5.5	本章小结	90
第6章	磨料浆体射流切割性能研究	91
6.1	概述	91
6.2	磨料浆体射流切割能力研究	92
6.2.1	正交实验法	93
6.2.2	正交试验的步骤	93
6.2.3	影响切割深度的因素正交试验分析	95