

# 高压水射流

GAOYASHUISHELIU

2

1992

# 高压水射流

1992年第2期 总第46期

## 目 录

### 评 述

国际射流技术发展的动向

——简评第十一届水射流切割技术国际会议 ..... 淮南矿业学院 刘本立 (1)

### 新 应 用

磨料浆体射流切割技术及应用前景 ..... 中国矿业大学 孙家骏 (3)

用高压水射流识别煤岩界面 ..... 中国矿业大学北京研究生部 秦剑秋 (7)

### 磨 料 射 流

前混合磨料射流技术研究新进展 ..... 淮南矿业学院 刘本立等 (8)

淮南矿务局 姚涣文

磨料射流切割机理的显微研究 ..... 中国矿业大学 段 雄 (13)

磨料射流切割参数选择的模糊方法 ..... 北京科技大学 方 涓等 (18)

[美] 肯德基大学 R. Kovacevic

前混合磨料射流供料系统的研究 ..... 焦作矿业学院 尤明庆等 (31)

循环磨料射流正常流动理论分析 ..... 北京科技大学 陈玉凡等 (36)

前混合磨料射流主要参数对切割性能的影响 ..... 中国矿业大学 刘林生等 (40)

磨料射流磨料选用的试验研究 ..... 中国矿业大学 邹正龙等 (48)

### 其 它

人工淹没高压水射流性能的进一步研究 ..... 上海机械学院 胡寿根 (53)

喷嘴及高压水射流性能的实验研究 ..... 上海机械学院 蒋旭平等 (57)

产生与扩展。冲蚀磨损的一条重要规律就是塑性材料在低攻角时冲蚀率最大，而脆性材料则是在高攻角时冲蚀率最大。法向冲击有利于裂纹的形成，而裂纹的形成与磨粒形状有关。

(1) 钝形磨粒冲击时，首先形成轴向深部裂纹，在卸载过程中出现锥形裂纹而导致冲蚀坑。

(2) 锐形磨粒冲击时，首先形成轴向深部裂纹，在卸载过程中出现锥形裂纹而导致

冲蚀坑。

(3) 由于工程陶瓷的颗粒结构，常以沿晶断裂为主要机理，颗粒界面对裂纹扩展起了止裂作用，磨粒冲击动能还没达到穿晶断裂程度。

(4) 高压水在切割脆性材料中具有重要的作用，表现在以水楔形式扩展裂纹。高压水的冲蚀作用一是发生在磨粒动能不足以使材料颗粒完全破碎时辅助扩展裂纹，二是冲刷粉碎体，使磨粒冲击在靶材基体上。

## 一 介绍本书

近年来，水射流技术作为一门新技术发展十分迅速。水射流切割、破碎、钻孔、清洗、除锈等已在工业上被广泛应用，但作为这一技术的基础理论还正在被逐渐认识和形成。面对这种发展，国内还尚未见到一本对水射流技术从理论试验研究和实际应用上做系统阐述的著作，《水射流切割技术》作为一本高等学校教学用书，不仅为培养我国水射流技术人材提供了教材，而且也是献给我国水射流技术工作者的一本好的参考书。

《水射流切割技术》是中国矿业大学长期从事高压水射流技术研究的孙家骏副教授所撰写，是他和水射流界多年来进行理论探讨、试验研究和实践的总结。

《水射流切割技术》详细介绍了流体射流的发生原理、设计和计算，以及当代射流切割技术的最新研究成果。全书分9章，介绍了水射流的一般概念、连续射流与脉冲射流、淹没射流与非淹没射流以及新型磨料射流与空化射流，并对水射流的主要元件——喷嘴从理论和实验测定上作了阐述，对设计选用、喷嘴具有指导作用和参考价值。

这本书的出版，对我国水射流技术的研究应用起到了积极的宣传作用，促进水射流技术能更广泛地在我国应用。

这本书已于1992年8月由中国矿业大学出版社出版发行，各地新华书店经销。定价3.35元。

读者如在当地新华书店买不到，可直接同中国矿业大学出版社门市部联系购买。邮编：221008，地址：江苏省徐州市。

# "A Fuzzy Approach to Abrasive Waterjet Cutting Parameters Selection"

Fang, M., Liu, D., and Kovacevic, R.

## 磨料射流切削参数选择的模糊方法

北京科技大学 方 涓 [美] 肯德基大学 R·Kovacevic

### 摘 要

磨料射流加工是一种新型加工方法,应用于对钛合金、超硬合金、玻璃及陶瓷等难以加工材料的切割。目前系统切削参数的选择只能根据经验试凑。本文应用模糊集理论建立了参数选择的多重模糊蕴涵关系,用近似推理来确定系统的切削参数。实践证明这是一种简单而有效的方法,可用于离线或在线选择参数。

### 一、引 言

磨料射流作为一种机械切削方式开辟了一条对难以加工材料加工的新途径。难以加工材料主要是指钛合金、超硬合金、玻璃、合成材料、金属基合成材料和新型陶瓷。起初磨料射流加工限于直线或成形切割,近年来已包括类似车、铣、钻小孔径的切削加工。磨料射流进行铣削加工中的基本问题是如何得到设计深度的切割槽。根据实验,切削深度与射流压力、磨料供量、磨料粒度、靶距、横移速度、入射角和喷嘴磨损等因素有关。Hanish (1984, 1989)曾建议建立一个数学模型用以预测在不同材料中磨料射流切削深度。要确定铣削加工的深度首先要解决下列问题:

- ① 铣削过程微切割机理;
- ② 在微切割中流体动力学过程;
- ③ 磨粒尺寸分布及其冲击参数;

④ 在重复冲击下磨料与金属互相作用机理;

⑤ 材料清除速度与靶头横移速度运动方程的解;

⑥ 射流切削三维空间的分析。

由于铣削过程固有的复杂性和目前对磨料射流切削原理的研究还无法建立一个精确的数学模型来描述加工的物理过程,因此当前在加工特定材料时先进行大量实验, Kovacevic (1992)应用回归方程来得到预测模型。由于简化模型的假定条件同实际情况有差别,若其中一个参数改变,现有方法就不能根据预定的切割深度可靠地选择其他参数,磨料射流铣切表面质量无法保证。

在根据预定深度选择切削参数中,我们感兴趣的是输入(要求深度)与输出(切削参数)的关系。模糊系统不要求精确的模型,通过实例数据建立模糊蕴涵命题,模拟人类近似推理方法,确定各切削参数。实践证明这种方法实验与计算时间比常规选择参数的方法少得多,可用于离线和在线选择。

### 二、磨料射流加工过程参数关系

磨料射流切削与其他加工方法一样,影响因素众多,可归纳如图1所示。其结果,如表面质量、尺寸精度(切割深度、切割宽度)、金属清除速度取决于磨料射流各参数之间的关系。大部分参数都可选为控制变量。然而,

恰当地选择工作参数就能有效地提高加工的精度和效率。

### 三、切削参数对切割深度的影响

根据在线控制的难易程度及实验结果,我们选择喷嘴内径、射流压力、磨料供量及横移速度为显著影响铣切加工深度的因素,确定切削深度与这些参数之间的模糊关系。首先进行了在不同切削条件下的切割深度的实验。每次实验只变更一个被选参数(最小值、中间值、最大值)其他三个参数不变。试样材料 AISI 1020,尺寸 150×50mm。深度沿切割槽用深度计每间隔 10mm 测量一次(取其起端距边缘 10mm,共测 4 次)其平均值供分析用。其结果列于表 1。

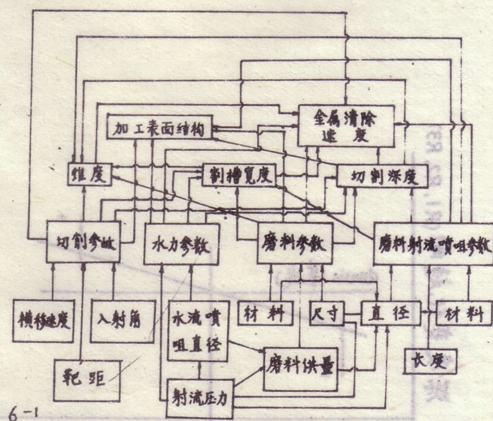


图1 磨料射流加工参数关系图

受到某些系统条件的限制,在线基本控制变量是:磨料尺寸、磨料种类、磨料射流喷嘴内径、射流压力、横移速度、入射角和靶距。若能

### 实 验 结 果

表 1

加 工 条 件		切割深度
射流压力 (MPa)	300	V = 0.63mm/s 17.6
	250	Q = 13.58g/s 13.7
	200	ID = 1.65mm 9.5
磨料供量 (g/s)	18.8	P = 250MPa 15.5
	13.58	V = 0.63mm/s 13.7
	3.7	ID = 1.65mm 10.9
横移速度 (mm/s)	1.00	P = 250MPa 10.2
	0.63	ID = 1.65mm 13.7
	0.33	Q = 13.58g/s 20.5
磨料射流 喷嘴内径 (mm)	1.2	P = 250MPa 12.0
	1.65	D = 13.58g/s 13.7
	2.20	V = 0.63mm/s 18.1

我们选取的各参数皆为中间值,所得深度值为参考值  $d_{Basic}(d_B)$ 。各工作参数如下:

喷嘴内径 ID = 1.65mm;  
射流压力 P = 250MPa;

磨料供量  $Q=15.58\text{g/s}$ ;  
 横移速度  $S=0.63\text{mm/s}$ 。

其他各参数在实验中均为常数:宝石喷嘴直径  $0.33\text{mm}$ 、磨料喷嘴长度  $63.5\text{mm}$ 、入射角  $90^\circ$ 、磨料为石榴石、粒度  $\text{No}120$ 。

磨料射流切削参数对切割深度的影响用其对参考值  $d_b$  的比例关系来表达。根据实验结果切削参数比例因子随喷嘴内径、射流压力及磨料供量增加而增加;而提高横移速度则使其切削参数比例因子数值减小。

我们将切割深度用切削参数比例因子与参考值  $d_b$  的乘积来表示:

$$d = d_b \prod_{i=1}^n Ri \quad (1)$$

其中  $d_b = 13.7\text{mm}$

$Ri$ —比例因子,切削条件变更后相对于参考值的变化倍数。

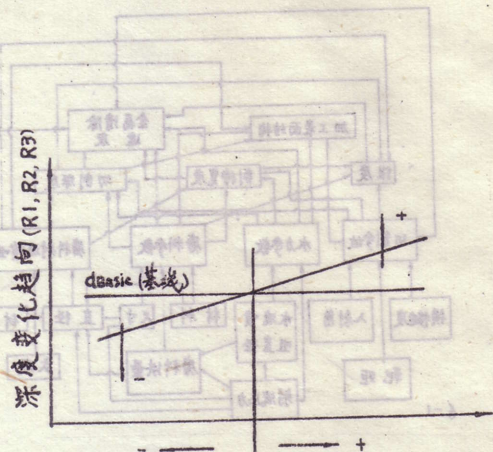
$$Ri = di/d_b \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (2)$$

$n$ —选择的参数变量,在这里  $n=4$

操作者根据切削材料种类、切割深度、加工表面质量要求和喷嘴实际磨损程度在线调整射流压力、磨料供量和横移速度。为此我们将由于切削参数变化而引起切割深度相对于参考值变化的比例因子作为输入,根据二者之间的模糊关系求出相应的切削参数作为输出。

#### 四、切削参数与其比例因子的集合描述

切削参数磨料射流喷嘴内径  $ID$ 、射流压力  $P$ 、磨料供量  $Q$  和横移速度  $S$  的论域都分成 17 等级  $(-8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)$ , 各取 5 个语言值:负大、负小、零值、正小、正大,记作:NB、NS、ZO、PS、PB。根据我们的经验对于连续变化的变量,选用三角形图(3)来确定其隶属函数是恰当的。同时也给出了相应比例因子



磨料射流喷嘴内径 ( $ID$ )  
 射流压力 ( $P$ )  
 磨料供量 ( $Q$ )

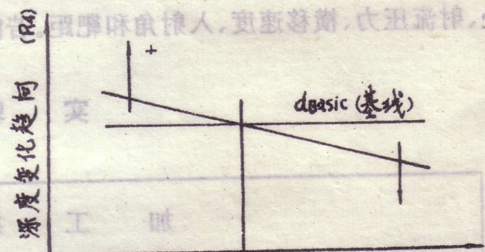


图2 切削参数对切割深度变化影响

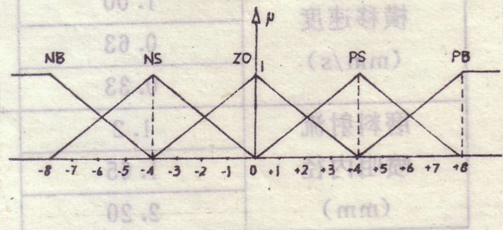


图3 模糊集隶属函数在论域中分布

R1, R2, R3, R4 的模糊集的定义如表 2~表 9 所示。这样四个切削参数与其相应的比例因子全都模糊化了。

### 五、建立近似推理的蕴涵关系

根据操作者的经验我们可以建立操作规则的模糊蕴涵关系如下：

对于磨料射流喷嘴内径 ID

规则 1 若 R1=NB 则 ID=NB

规则 2 若 R1=NS 则 ID=NS

规则 3 若 R1=ZO 则 ID=ZO

规则 4 若 R1=PS 则 ID=PS

规则 5 若 R1=PB 则 ID=PB

每一条规则可以建立一个

$FR \in \mathcal{F}(R1 \times ID)$

$$FR_i = (R1)_i \times (ID)_i, \quad i=1, 2, \dots, 5 \quad (3)$$

$$\mu_{FR_i} = \min(\mu_{R1}, \mu_{ID}) \quad (4)$$

将要求的切削参数比例因子作为输入变量, 将所要求的切削参数作为输出, 对规则 1 则有模糊关系:

$$FR_1 = (R1)_{NB} * (ID)_{NB} \quad (5)$$

其隶属函数可表达为

$$\mu_{FR_1} = \min\{\mu(R1)_{NB}, \mu(ID)_{NB}\} \quad (6)$$

根据表 2、表 3 可分别定义  $(R1)_{NB}$ 、 $(ID)_{NB}$  为:

$$\frac{1}{-8} + \frac{0.75}{-7} + \frac{0.5}{-6} + \frac{0.25}{-5} + \frac{0}{-4} + \dots + \frac{0}{7} + \frac{0}{8}$$

$$(R1)_{NB} = \frac{1}{-8} + \frac{0.75}{-7} + \frac{0.5}{-6} + \frac{0.25}{-5} + \frac{0}{0.4} + \dots + \frac{0}{7} + \frac{0}{8}$$

$FR_1$  为  $R1 \times ID$  上的模糊关系可表达成表 10, 同理可将规则 2~5 分别表达在表 11~表 14 中。

在实际应用中, 往往需综合考虑这些规

则, 即构成多重模糊蕴涵:

$$FR \triangleq \{(R1)_{NB} \times (ID)_{NB}\}$$

$$\begin{aligned} & U \{(R1)_{NS} \times (ID)_{NS}\} \\ & U \{(R1)_{ZO} \times (ID)_{ZO}\} \\ & U \{(R1)_{PS} \times (ID)_{PS}\} \\ & U \{(R1)_{PB} \times (ID)_{PB}\} \end{aligned}$$

$$= U_{i=1}^5 \{(R1)_i \times (ID)_i\}$$

$$\mu_{FR} = \max\{\mu_{FR1}, \mu_{FR2}, \mu_{FR3}, \mu_{FR4}, \mu_{FR5}\}$$

这样比例因子 R1 与喷嘴内径总的模糊关系可用表 15 表示。

若要求切割深度为 12mm, 已知射流压力 250MPa, 磨料供量 13.5g/s, 横移速度为 0.63mm/s (即 R2=R3=R4=1) 应选用多大的喷嘴内径?

根据式 1 计算可得  $R1 = 0.88$ , 从表 15 可得模糊子集:

$$\begin{aligned} \mu \{(R1)_{0.88}\} &= \{0 \quad 0.25 \quad 0.5 \quad 0.75 \\ & \quad 0.75 \quad 0.75 \quad 0.5 \quad 0.25 \\ & \quad 0.25 \quad 0.25 \quad 0.25 \quad 0.25 \\ & \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\} \end{aligned}$$

所得到的模糊集包含了多种信息, 究竟应该选择那一个数值呢? 我们选用加权平均法, 并取其隶属度为加权系数, 则所选择的喷嘴内径为:

$$\begin{aligned} ID_{aver} &= \left\{ \sum_{i=1}^{17} ID_i \times \mu(ID)_i \right\} / \sum_{i=1}^{17} \mu(ID)_i \\ &= \{0.25 \times (1.03 + 1.56 + 1.65 + 1.72 + 1.8 + 1.87) \\ & \quad + 0.5 \times (1.12 + 1.4) + 0.75 \times (1.21 + 1.3 + 1.34)\} / \\ & \quad 0.25 \times 6 + 0.5 \times 2 + 0.75 \times 3 \\ &= 1.38 \text{mm} \end{aligned}$$

基于表 15 模糊集经过加权平均法计算的比例因子 R1 与磨料射流喷嘴内径变化的关系可用图 4a 表示。

### 六、其他参数的蕴涵关系

同理我们可以建立比例因子 R2, R3, R4 分别与射流压力 P、磨料供量 Q、横移速度 S

间的蕴涵关系:

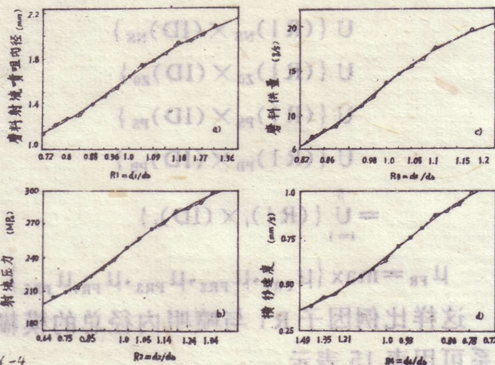


图4 磨料射流加工切削参数及其对深度影响比例因子

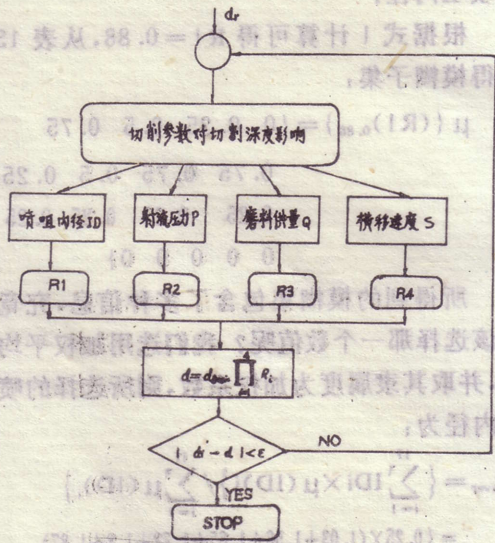


图5 磨料射流切削参数选择框图  
对于射流压力(P)

- 规则1 若  $R2=NB$  则  $P=NB$
- 规则2 若  $R2=NS$  则  $P=NS$
- 规则3 若  $R2=ZO$  则  $P=ZO$
- 规则4 若  $R2=PS$  则  $P=PS$
- 规则5 若  $R2=PB$  则  $P=PB$

对于磨料用量(Q)

- 规则1 若  $R3=NB$  则  $Q=NB$
- 规则2 若  $R3=NS$  则  $Q=NS$

规则3 若  $R3=ZO$  则  $Q=ZO$

规则4 若  $R3=PS$  则  $Q=PS$

规则5 若  $R3=PB$  则  $Q=PB$

对于横移速度S

规则1 若  $R4=NB$  则  $S=PB$

规则2 若  $R4=NS$  则  $S=PS$

规则3 若  $R4=ZO$  则  $S=ZO$

规则4 若  $R4=PS$  则  $S=NS$

规则5 若  $R4=PB$  则  $S=NB$

根据这些规则并给以综合考虑,可得到

相应的  $R2-P, R3-Q, R4-S$  的模糊关系,经过加权平均法计算得到比例因子  $R2, R3, R4$  分别与射流压力,磨料供量及横移速度变化的关系,分别表示在图4b,4c,和4d中。

## 七、讨论

应用模糊集理论建立磨料射流切削参数对切割深度影响的模型,其结果可用曲线图作离线选择,也可方便地用计算机辅助在线选择。图5为根据切割深度选择切削参数的流程框图。首先确定所需要的切割深度,然后根据测量的喷嘴内径输入  $R1$ ,其余可调节其他三个参数直到估计值与要求值的误差小于定精度为止。

下面实例说明了上述方法的应用过程。加工材料 AISI 1025,要求铣切深度 15mm,允许误差 0.2mm。操作者首先测量实际喷嘴内径,  $ID=1.3mm$ ,根据表2、3、15可图4a或得  $R1=0.83$ 。其他  $R2, R3, R4$  可根据相应的表或图得

$R2=0.89, P=231MPa; R3=1.07, Q=16.34g/s;$  和  $R4=1.37, S=0.42mm/s, d_b=13.7mm$ 。

预计切割深度  $d=d_b \cdot \prod_{i=1}^4 Ri=14.8mm$

为了验证这种方法的可靠性,选用了上述切削参数对 AISI 1025 材料进行加工,切

割长度为 50mm, 其平均切割深度为 14.3mm。表 16 同时给出了其他两个实验的结果。

从上述实验结果可看出以模糊蕴涵分析为基础的磨料射流切削参数选择方法是有效的。很明显, 在此基础上可以设计一个模糊控制器, 在切割深度波动时, 利用反馈信息调整各参数以保证加工精度, 如在切削过程中不可避免的会产生喷咀的磨损, 它直接影响切割深度及表面质量。通过对喷咀磨损检测的反馈信息可在线调整相应的切削参数如横移速度, 以补偿喷咀内径磨损对加工深度的影响。

## 八、结 论

通过上述研究说明将模糊集理论应用于磨料射流切削参数选择上能取得良好的效果。对典型材料加工过程只要通过有限实验即可建立该材料的数据库数据, 从而建立影响加工深度的多重蕴涵关系, 应用近似推理即可求得所需要的切削参数。

在磨料射流加工过程中, 切削参数如射流压力、喷咀内径、磨料粒度均匀性、磨料供量等, 因某种原因可能发生变化, 预定的切削

参数就无法保证均匀的加工深度。上述方法就可根据变化的情况离线或在线调整其他参数, 因而为研究新一代带有模糊控制器的系统奠定了基础。

## 参 考 文 献

- [1] Hashish, M., An Investigation of Milling with Abrasive Waterjets, ASME Trans, Journal of Engineering for Industry, 1989, 111.
- [2] Hashish, M., A modeling Study of Metal Cutting Abrasive Waterjets, ASME Trans, Journal of Engineering, Materials and Technology, 1984, 106, 1.
- [3] Kovacevic, R., et al., Rehabilitation of the Concrete Pavements Assisted with Abrasive Waterjets, The 11th International conference on jet cutting Technology, BRHA, st. Andrews Scotland, Sept, 8-10, 1992.
- [4] Lee, Ch. Ch., Fuzzy Logic in Control Systems: Logic Controller Part I, IEEE Trans on Systems, man and Cybernetic, 1980, 20, 2.
- [5] 吴望启等, 应用模糊集方法, 北京师范大学出版社, 1982.



模糊集 R1

表 2

等级序列	变化范围	隶属度				
		NB	BS	ZO	PS	PB
-8	$\leq 0.68$	1	0	0	0	0
-7	0.68-0.74	0.75	0.25	0	0	0
-6	0.74-0.78	0.5	0.5	0	0	0
-5	0.78-0.82	0.25	0.75	0	0	0
-4	0.82-0.86	0	1	0	0	0
-3	0.86-0.90	0	0.75	0.25	0	0
-2	0.90-0.94	0	0.5	0.5	0	0
-1	0.94-0.98	0	0.25	0.75	0	0
0	0.98-1.03	0	0	1	0	0
1	1.03-1.07	0	0	0.75	0.25	0
2	1.07-1.12	0	0	0.5	0.5	0
3	1.12-1.16	0	0	0.25	0.75	0
4	1.16-1.20	0	0	0	1	0
5	1.20-1.25	0	0	0	0.75	0.25
6	1.25-1.30	0	0	0	0.5	0.5
7	1.30-1.36	0	0	0	0.25	0.75
8	$\geq 1.36$	0	0	0	0	1

模糊集 ID

表 3

等级序列	变化范围 mm	隶属度				
		NB	BS	ZO	PS	PB
-8	$\leq 0.76$	1	0	0	0	0
-7	0.76-1.09	0.75	0.25	0	0	0
-6	1.09-1.17	0.5	0.5	0	0	0
-5	1.17-1.26	0.25	0.75	0	0	0
-4	1.26-1.35	0	1	0	0	0
-3	1.35-1.44	0	0.75	0.25	0	0
-2	1.44-1.52	0	0.5	0.5	0	0
-1	1.52-1.60	0	0.25	0.75	0	0
0	1.60-1.69	0	0	1	0	0
1	1.69-1.77	0	0	0.75	0.25	0
2	1.77-1.84	0	0	0.5	0.5	0
3	1.84-1.92	0	0	0.25	0.75	0
4	1.92-1.99	0	0	0	1	0
5	1.99-2.07	0	0	0	0.75	0.25
6	2.07-2.14	0	0	0	0.5	0.5
7	2.14-2.3	0	0	0	0.25	0.75
8	$\geq 2.3$	0	0	0	0	1

模糊集 R2

表 4

等级序列	变化范围	隶属度				
		NB	NS	ZO	PS	PB
-8	0.59	1	0	0	0	0
-7	0.59-0.67	0.75	0.25	0	0	0
-6	0.67-0.72	0.5	0.5	0	0	0
-5	0.72-0.77	0.25	0.75	0	0	0
-4	0.77-0.82	0	1	0	0	0
-3	0.82-0.87	0	0.75	0.25	0	0
-2	0.87-0.92	0	0.5	0.5	0	0
-1	0.92-0.97	0	0.25	0.75	0	0
0	0.97-1.02	0	0	1	0	0
1	1.02-1.07	0	0	0.75	0.25	0
2	1.07-1.12	0	0	0.5	0.5	0
3	1.12-1.17	0	0	0.25	0.75	0
4	1.17-1.22	0	0	0	1	0
5	1.22-1.27	0	0	0	0.75	0.25
6	1.27-1.32	0	0	0	0.5	0.5
7	1.32-1.39	0	0	0	0.25	0.75
8	≥1.39	0	0	0	0	1

模糊集 P

表 5

等级序列	变化范围 MPa	隶属度				
		NB	BS	ZO	PS	PB
-8	<160	1	0	0	0	0
-7	160-191	0.75	0.25	0	0	0
-6	191-200	0.5	0.5	0	0	0
-5	200-209	0.25	0.75	0	0	0
-4	209-218	0	1	0	0	0
-3	218-227	0	0.75	0.25	0	0
-2	227-237	0	0.5	0.5	0	0
-1	237-245	0	0.25	0.75	0	0
0	245-254	0	0	1	0	0
1	254-262	0	0	0.75	0.25	0
2	262-270	0	0	0.5	0.5	0
3	270-278	0	0	0.25	0.75	0
4	278-286	0	0	0	1	0
5	286-294	0	0	0	0.75	0.25
6	294-302	0	0	0	0.5	0.5
7	302-330	0	0	0	0.25	0.75
8	≥330	0	0	0	0	1

模糊集 R3

表 6

等级序列	变化范围	隶 属 度				
		NB	NS	ZO	PS	PB
-8	$\leq 0.79$	1	0	0	0	0
-7	0.79—0.83	0.75	0.25	0	0	0
-6	0.83—0.85	0.5	0.5	0	0	0
-5	0.85—0.87	0.25	0.75	0	0	0
-4	0.87—0.91	0	1	0	0	0
-3	0.91—0.94	0	0.75	0.25	0	0
-2	0.94—0.96	0	0.5	0.5	0	0
-1	0.96—0.99	0	0.25	0.75	0	0
0	0.99—1.01	0	0	1	0	0
1	1.01—1.04	0	0	0.75	0.25	0
2	1.04—1.07	0	0	0.5	0.5	0
3	1.07—1.09	0	0	0.25	0.75	0
4	1.09—1.11	0	0	0	1	0
5	1.11—1.14	0	0	0	0.75	0.25
6	1.14—1.17	0	0	0	0.5	0.5
7	1.17—1.20	0	0	0	0.25	0.75
8	$\geq 1.2$	0	0	0	0	1

模糊集 Q

表 7

等级序列	变化范围 (g/s)	隶 属 度				
		NB	BS	ZO	PS	PB
-8	$\leq 1.04$	1	0	0	0	0
-7	1.04—5.45	0.75	0.25	0	0	0
-6	5.45—6.72	0.5	0.5	0	0	0
-5	6.72—8.0	0.25	0.75	0	0	0
-4	8.0—9.2	0	1	0	0	0
-3	9.2—10.42	0	0.75	0.25	0	0
-2	10.42—11.71	0	0.5	0.5	0	0
-1	11.71—12.96	0	0.25	0.75	0	0
0	12.96—14.08	0	0	1	0	0
1	14.08—15.08	0	0	0.75	0.25	0
2	15.08—16.08	0	0	0.5	0.5	0
3	16.08—17.08	0	0	0.25	0.75	0
4	17.08—18.08	0	0	0	1	0
5	18.08—19.08	0	0	0	0.75	0.25
6	19.08—20.08	0	0	0	0.5	0.5
7	20.08—23.58	0	0	0	0.25	0.75
8	$\geq 23.58$	0	0	0	0	1

模糊集 R4

表 8

等级序列	变化范围	隶 属 度				
		PB	PS	ZO	NS	NB
-8	$\leq 0.71$	1	0	0	0	0
-7	0.71-0.76	0.75	0.25	0	0	0
-6	0.76-0.80	0.5	0.5	0	0	0
-5	0.80-0.84	0.25	0.75	0	0	0
-4	0.84-0.87	0	1	0	0	0
-3	0.87-0.91	0	0.75	0.25	0	0
-2	0.91-0.94	0	0.5	0.5	0	0
-1	0.94-0.98	0	0.25	0.75	0	0
0	0.98-1.03	0	0	1	0	0
1	1.03-1.10	0	0	0.75	0.25	0
2	1.10-1.17	0	0	0.5	0.5	0
3	1.17-1.25	0	0	0.25	0.75	0
4	1.25-1.31	0	0	0	1	0
5	1.31-1.39	0	0	0	0.75	0.25
6	1.39-1.45	0	0	0	0.5	0.5
7	1.45-1.56	0	0	0	0.25	0.75
8	$\geq 1.56$	0	0	0	0	1

模糊集 S

表 9

等级序列	变化范围 (mm/s)	隶 属 度				
		NB	BS	ZO	PS	PB
-8	$\leq 0.18$	1	0	0	0	0
-7	0.18-0.34	0.75	0.25	0	0	0
-6	0.34-0.38	0.5	0.5	0	0	0
-5	0.38-0.43	0.25	0.75	0	0	0
-4	0.43-0.47	0	1	0	0	0
-3	0.47-0.52	0	0.75	0.25	0	0
-2	0.52-0.57	0	0.5	0.5	0	0
-1	0.57-0.61	0	0.25	0.75	0	0
0	0.61-0.66	0	0	1	0	0
1	0.66-0.72	0	0	0.75	0.25	0
2	0.72-0.78	0	0	0.5	0.5	0
3	0.78-0.84	0	0	0.25	0.75	0
4	0.84-0.90	0	0	0	1	0
5	0.90-0.97	0	0	0	0.75	0.25
6	0.97-1.03	0	0	0	0.5	0.5
7	1.03-1.23	0	0	0	0.25	0.75
8	$\geq 1.23$	0	0	0	0	1

8

(R1)<sub>NB</sub>与(ID)<sub>NB</sub>的模糊关系

表 10

		ID 论域							
		-8	-7	-6	-5	-4	...	8	
FR1=	论域	-8	1	0.75	0.5	0.25	...	0	
		-7	0.75	0.75	0.5	0.25	0	...	0
		-6	0.5	0.5	0.5	0.25	0	...	0
		-5	0.25	0.25	0.25	0.25	0	...	0
		-4	0	0	0	0	0	...	0
		·	·	·	·	·	·	·	·
		·	·	·	·	·	·	·	·
		·	·	·	·	·	·	·	·
		8	0	0	0	0	0	...	0

(R1)<sub>NS</sub>与(ID)<sub>NS</sub>的模糊关系

表 11

		ID 论域											
		-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	...	8	
FR2=	论域	-8	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0	
		-7	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0	...	0
		-6	0	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0	...	0
		-5	0	0.25	0.5	0.75	0.75	0.75	0.5	0.25	0	...	0
		-4	0	0.25	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0.25	0	...	0
		-3	0	0.25	0.5	0.75	0.75	0.75	0.5	0.25	0	...	0
		-2	0	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0	...	0
		-1	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0	...	0
		·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	
	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	
	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0		

(R1)<sub>Z0</sub>与(ID)<sub>Z0</sub>的模糊关系

(R1)<sub>Z0</sub>与(ID)<sub>Z0</sub>的模糊关系

表 12

		ID 论 域													
		-8	...	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	...	8	
FR3=	论 域	-8	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		-4	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
		-3	0	...	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0	...	0
		-2	0	...	0	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0	...	0
		-1	0	...	0	0.25	0.5	0.75	0.75	0.75	0.5	0.25	0	...	0
		0	0	...	0	0.25	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0.25	0	...	0
		1R	1	0	...	0	0.25	0.5	0.75	0.75	0.75	0.5	0.25	0	...
		2	0	...	0	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	...	0	
		3	0	...	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0	...	0	
		4	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0	
		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
		8	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0	

(R1)<sub>PS</sub>与(ID)<sub>PS</sub>的模糊关系

表 13

		ID 论 域													
		-8	...	0	1	2	3	4	5	6	7	8			
FR4=	论 域	-8	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		1R	1	0	...	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0	0
			2	0	...	0	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0	0
			3	0	...	0	0.25	0.5	0.75	0.75	0.75	0.5	0.25	0	0
			4	0	...	0	0.25	0.5	0.75	0.75	0.75	0.5	0.25	0	0
			5	0	...	0	0.25	0.5	0.75	0.75	0.75	0.5	0.25	0	0
			6	0	...	0	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0	0
		7	0	...	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0	0	
		8	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

(R1)<sub>PB</sub>与(ID)<sub>PB</sub>的模糊关系

关系矩阵的 $\alpha$ (ID)<sub>PB</sub>与 $\alpha$ (R1)

表 14

		ID 论 域						
		-8	...	4	5	6	7	8
论 域 IR	-8	0	...	0	0	0	0	0
	4	0	...	0	0	0	0	0
	5	0	...	0	0.25	0.25	0.25	0.25
	6	0	...	0	0.25	0.5	0.5	0.5
	7	0	...	0	0.25	0.5	0.75	0.75
	8	0	...	0	0.25	0.5	0.75	1

磨料射流喷嘴内径 ID 与其比例因子的总蕴涵关系

表 15

		ID 论 域																
		-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
论 域 IR	-8	1	0.75	0.5	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-7	0.75	0.75	0.5	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-5	0.25	0.25	0.5	0.75	0.75	0.75	0.5	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-4	0	0.25	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-3	0	0.25	0.5	0.75	0.75	0.75	0.5	0.25	0.25	0.25	0.25	0	0	0	0	0	0
	-2	0	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0	0	0	0	0
	-1	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	0.75	0.75	0.75	0.5	0.25	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0.25	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0.25	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0.25	0.5	0.75	0.75	0.75	0.5	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0
	2	0	0	0	0	0	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0
	3	0	0	0	0	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	0.75	0.75	0.5	0.25	0	
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0.25	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.5	0.75	0.75	0.75	0.5	0.25	0.25
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	0.75	0.75	
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.5	0.75	1	

实 例

表 16

序 列	基本参数 切削深度 db(mm)	要求切削深度 d <sub>r</sub> (mm)	切削参数及相应比例因子								子计深度 (mm)	实际深度 (mm)
			ID (mm)	R1	P (MPa)	R2	Q (g/s)	R3	S (mm/s)	R4		
1	13.7	10	1.65	1	224	0.85	12.85	0.99	0.87	0.87	10.02	9.1
2	13.7	15	1.3	0.83	231	0.89	16.34	1.07	0.47	1.37	14.8	14.3
3	13.7	20	1.47	0.91	280	1.20	15.47	1.05	0.42	1.27	19.94	20.1