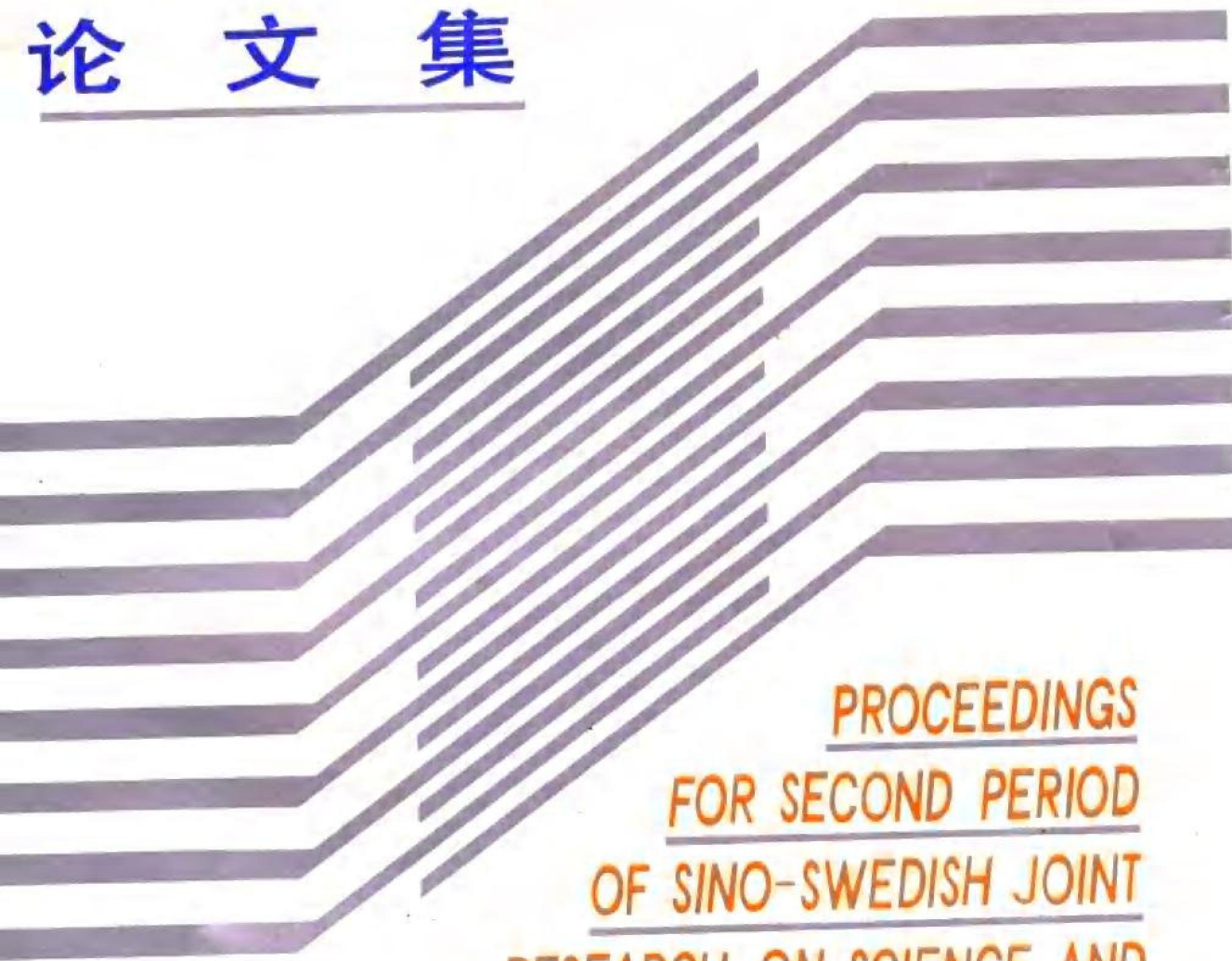


中国—瑞典
冶金科技合作
第二阶段共同研究
论文集



PROCEEDINGS
FOR SECOND PERIOD
OF SINO-SWEDISH JOINT
RESEARCH ON SCIENCE AND
TECHNOLOGY OF METALLURGY

冶金工业出版社

中国—瑞典冶金科技合作 第二阶段共同研究 论文集

中华人民共和国冶金工业部
瑞典国家技术发展局

冶金工业出版社

本文集共分氧气炼钢复合吹炼的最佳化、热轧润滑、含钛微合金化钢的焊接性、利用快速凝固工艺开发微晶材料、中磷铁水脱磷方法的最佳化和矿石的细碎与磨矿技术六部分共25篇论文。这些论文所涉及的工作有的是中国科技工作者完成的，有的是中国和瑞典两国的科技工作者合作共同完成的。论文中探讨和总结的有关内容均有一定深度，对从事钢铁冶金、金属塑性加工、金属材料研究和磨矿技术研究的科技工作者以及有关专业的研究生均有较大的参考价值。

**中国—瑞典冶金科技合作
第二阶段共同研究论文集**

中华人民共和国冶金工业部
瑞典国家技术发展局

*

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街崇文门北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 34 1/4 字数 817 千字

1990年6月第一版 1990年6月第一次印刷

印数00,001~700册

ISBN 7-5024-0752-9

TF·167 定价35.30元



前 言

中国—瑞典冶金科技合作是在我国对外开放政策指引下,在国家科委领导下开展起来的。1982年冶金工业部与瑞典国家技术发展局(STU)签订了长期科技合作协议。根据协议精神,双方就共同感兴趣的科研项目进行合作研究。研究成果由中瑞双方共享。

1983~1985年为中瑞冶金科技合作的第一阶段,进行了不锈钢耐热钢、粉末冶金和喷射冶金三个题目的合作研究,16篇论文(中文版)已由冶金工业出版社1987年10月出版发行。

1986年进入第二阶段合作研究,双方确定了7个合作课题:氧气炼钢复合吹炼的最佳化、热轧润滑、含钛微合金化钢的焊接性、利用快速冷凝工艺开发微晶材料、中磷铁水脱磷方法最佳化、矿石的细碎与磨矿技术和重型运输车辆的腐蚀分析与防护。经过中瑞双方专家的共同努力,1988年完成了前6项的科研任务,于1989年4月在瑞典斯德哥尔摩召开了第二阶段成果总结交流会。会上宣读了论文,双方对合作成果表示满意,并同意将全部论文印刷出版。

本文集汇集了中瑞冶金科技合作第二阶段共同研究6个题目的25篇论文,可供从事这些专业的科技工

作者阅读、参考。

值此本文集出版之际，我们谨向瑞典国家技术发展局Paul Forsgren博士和对中瑞冶金科技合作热情支持的先生们致以衷心的感谢。

中华人民共和国冶金工业部科学技术司

1989年11月

目 录

氧气炼钢复合吹炼的最佳化

氧气炼钢——最佳喷嘴设计与中磷铁水及预处理铁水复吹操作的研究.....	3
有关转炉复合吹炼若干问题的探讨.....	24
复吹转炉环形喷枪水模研究.....	29

热 轧 润 滑

在中间试验轧机上的热轧润滑效果.....	37
热轧润滑和磨损机理的研究.....	55

含钛微合金化钢的焊接性

钛等元素对微合金钢焊接性的影响及HAZ组织的分类	81
钢的化学成分和焊接线能量对含钛微合金钢力学性能的影响.....	102
钢的化学成分和焊接线能量对含钛微合金钢力学性能的影响 (补充报告)	149
经受不同焊接热循环的高强度低合金 (HSLA) 中微合金沉淀 物的特征.....	168
钢材的焊接冷裂纹——文献综述.....	233
微量合金元素Ti、Nb和V对结构钢焊接冷裂纹的影响	256

利用快速冷凝工艺开发微晶材料

快凝含钛316L不锈钢及其氮化行为	287
快凝粉末热挤压法生产的TiN析出强化316L不锈钢的微观结构及 力学性能.....	303

快凝TiN析出强化316L不锈钢的高温拉伸性能	316
TiN弥散强化、氮固溶强化、快速凝固316L不锈钢的拉伸行为和 点蚀性能	326
激冷微晶粉末的凝固形貌和偏析程度	352
高速钢粉末结构的透射电镜分析	363
高速钢粉末中的碳化物	367

中磷铁水脱磷方法最佳化

铁水预处理过程中采用石灰基熔剂对铁水同时脱硫脱磷的可行性 研究	375
中磷铁水脱磷方法最佳化	422

矿石的细碎与磨矿技术

大型球磨机效率的研究	467
磨矿效率与分级效率相关关系的研究	480
细碎与粗磨过程	491
给矿粒度对磨矿效率的影响 (一)	519
给矿粒度对磨矿效率的影响 (二)	532

氧气炼钢复合吹炼的 最佳化

氧气炼钢——最佳喷嘴设计 与中磷铁水及预处理铁水 复吹操作的研究

徐 爽 杨启星 (中国冶金工业部北京钢铁研究总院)
Tomas Jonasson (瑞典冶金研究所)

摘 要

在中国与瑞典的合作研究项目中, 由瑞典冶金研究所 (MEFOS) 负责进行氧气炼钢的复合吹炼研究, 此项工作由中国访问学者与 MEFOS 的研究人员共同合作完成。

在复合吹炼领域中已进行的研究如下:

- 1) 喷嘴设计及其反向冲击的水模研究;
- 2) 在试验厂开展的预处理铁水和中磷铁水的复合吹炼;
- 3) 用于低硅铁水复吹工艺的特殊炉渣。

这些领域涉及到把预处理铁水的复合吹炼引入炼钢厂将要面临的问题, 作者在 MEFOS 的研究指出了在这些领域内解决问题的可能途径。水模研究表明, 借助于嵌入喷嘴内的一根钢质螺旋, 就可以减少反向冲击的频率和强度。

用预处理铁水和中磷铁水在试验厂进行的试验表明: 转炉采用 LD-AC 或铁水预处理及特殊渣料技术, 就能够将钢中的磷限制在低水平上。使用预烧结的特殊渣, 可以毫无困难地吹炼低硅铁水, 并能够令人满意地去除磷硫。

符号一览表

< >: 钢液中元素

(): 渣中元素

T : 温度, $^{\circ}\text{C}$

Ma : 表观马赫数

$i.d.$: 内径

Hz: 频率单位, s^{-1}

R_w : 整个圆盘侵蚀速度, $\%/ \text{min}$

t_i : 试验时间, min

W_a : 试验后圆盘质量, g

W_b : 试验前圆盘质量, g

$B-A = B/A$: 反向冲击

$\Delta P(\text{abs})$: 磷的绝对去除量, %

$\Delta S(\text{abs})$: 硫的绝对去除量, %

L_P : 磷在渣与钢中的分配

L_S : 硫在渣与钢中的分配

Fe_t : 渣中总铁, %

$\langle \text{Si} \rangle \text{O}$: 铁水中的硅, %
 $d\langle \% \text{P} \rangle / dt$: 脱磷率, %/min

$d(\text{CaO})/dt$: CaO 溶解速率, kg/min

1 前言

MEFOS与钢铁研究总院(中国·北京)于1985年在预处理铁水的复合吹炼领域,开展了研究合作,其目的旨在帮助中国开发氧气炼钢复合吹炼。

该工作是由瑞典国家技术开发局(STU)主持的,它是MEFOS研究计划中的一部分,并吸收了瑞典钢生产者协会的建议。试验工作由在MEFOS的中国访问学者及MEFOS的研究人员共同完成。

MEFOS的研究范围包括喷嘴设计、反向冲击现象、中磷或预处理铁水的复吹以及低硅铁水复吹过程的成渣。

2 水模中的反向冲击研究

2.1 引言

自上个世纪以来,浸没式喷嘴的气体喷射技术在有色冶金及钢铁工业中得到广泛应用,这种技术已经显示出许多优点。例如,较好的温度均匀性及钢液成分的均匀性,显著地增加了液态金属中不同组分的反应速率,有效地加速了粉剂或气体反应物进入液态金属的传质过程。

在氧气炼钢中,经不同结构的喷嘴进行各种气体的复吹,与常规LD底部吹炼相比,可获得更好的操作效果。一些作者指出,称之为“反向冲击”的现象是喷嘴侵蚀的原因之一[1][2]。这种不受欢迎的现象可描述为:气体由喷嘴喷出的同时,对喷嘴顶部及周围耐火材料产生反向冲击作用。这种作用是导致浸没式喷嘴损坏的原因。与此现象有关的三个主要原因是:①喷嘴气体的速度;②喷嘴的结构;③喷吹气体与液体的密度之比。

2.2 试验

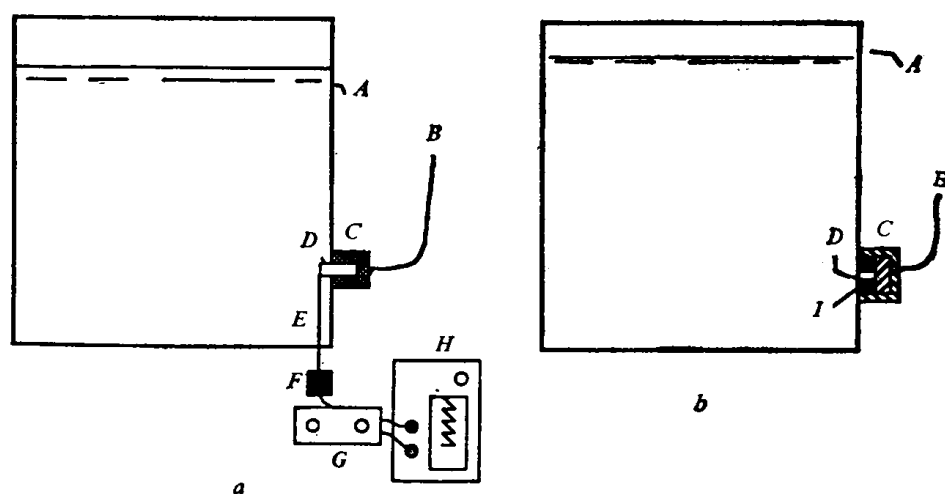


图 1 试验装置示意图

a—测量反向冲击B-A频率的试验装置; b—侵蚀试验装置

A—水力学模型内径1.0m, 高1m; B—气体入口; C—喷嘴装配; D—喷嘴; E—探针; F—压力传感器; G—放大器; H—高速打印机; I—试验圆盘

2.2.1 设备特点

试验是在MEFOS的内径1m的圆型有机玻璃模型内完成的，液面高0.9m，采用两种类型的喷嘴（每种类型各有四种结构）。第一种用于喷嘴的侵蚀试验，第二种用于反向冲击测定。喷嘴装在位于模型侧壁的孔洞内，以便水平地喷吹空气或氮气，孔与模型底板的距离为0.25m，每支喷嘴试验时的气体压力和流量由压力表及流量计测量。进行喷嘴侵蚀试验时，在喷嘴前端安装注满硼酸的圆盘。做反向冲击试验时，使用了传感探针、压力传感器、放大器及图形记录仪。用快速傅氏变换算法分析仪（FFT）定量地测定反向冲击强度。图1为试验装置示意图。

2.2.2 喷嘴结构

为研究基本现象，设计了四种不同内径的管型喷嘴，其尺寸及喷吹参数示于表1。

表 1 管型喷嘴的尺寸及喷吹参数

喷嘴代号	直 径, mm		面 积 mm ²	质 量 流 量 kg/min	Ma
	内 径	外 径			
A	2	8	3.14	0.07~0.54	0.9~7.0
B	4	8	12.6	0.17~1.90	0.6~6.4
C	6	10	28.3	0.06~3.20	0.1~4.6
D	8	10	50.3	0.52~3.40	0.42~2.8

为弄清喷嘴不同设计对喷吹效果的影响，在6mm的普通管型喷嘴内嵌入钢质螺旋，这种喷嘴可以产生螺旋形气流。嵌入的钢质螺旋将为气体旋转流动提供两条通道。将5.5mm宽、1mm厚的钢条扭成螺旋形状，以分别得到螺距为1.6、2.4、3.6、4.8和6mm的喷嘴结构。螺距是指钢质螺旋，一个循环所推进的距离，或者钢条最近顶点间长度的2倍。钢质螺旋的长度约为6cm，见图2。表2给出这些喷嘴的尺寸及喷吹参数。

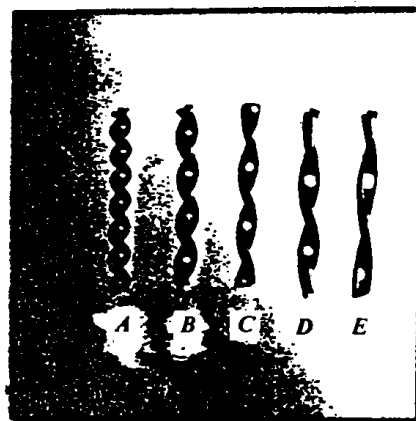


图 2 镶嵌之前的钢质螺旋

A—用于喷嘴（SA）的螺距为1.6cm；B—用于喷嘴（SB）的螺距为2.4cm；C—用于喷嘴（SC）的螺距为3.6cm；D—用于（SD）喷嘴的螺距为4.8cm；E—用于喷嘴（SE）的螺距为6.0cm

表 2 带钢质螺旋的喷嘴尺寸及喷吹参数

代 号	内 径 mm	螺旋螺距 cm	曲率半径	面 积 mm ²	质量流量 kg/min	Ma
C	6	—	—	28.3	0.06~3.2	0.1~4.6
SA	6	1.6	2.67	22.8	0.16~2.3	0.3~4.4
SB	6	2.4	4.0	22.8	0.3~2.8	0.3~5.1
SC	6	3.6	6.0	22.8	0.3~2.3	0.5~4.1
SD	6	4.8	8.0	22.8	0.3~2.3	0.5~4.2
SE	6	6.0	10.0	22.8	0.2~2.2	0.4~4.0

2.2.3 喷嘴侵蚀试验

在水模研究中,喷嘴周围耐火材料的侵蚀可以用特殊圆盘的侵蚀来模拟。将化学纯的 H_3BO_4 (硼酸)注入外径为6.8cm、高约为3cm的圆盘中,加压10 t,形成密度达 $1.35t/m^3$ 的圆盘。成形之后在盘的中间钻孔,以便镶嵌在喷嘴的出口端。然后将圆盘称重,并将其和喷嘴一起装入水模型的侧面墙壁上。当水达到所需高度时,便开始用气体喷吹。每种操作条件的试验时间为25min或不足25min。待圆盘完全干燥之后,再次称量试验圆盘质量并对其进行某些检验。

2.2.4 反向冲击测定

试验自始至终仅使用一个压力传感器、一支内径3mm的感应探针,探针紧靠喷嘴的出口端边缘。由于检测仪器的初值已选定,因此记录仪的灵敏度范围相应应在 $1.2mV/格 \sim 5.0mV/格$ 之间变化。对每一种试验条件,测定二次反向冲击频率,每次测试记录时间大约10s。人工计算之后,取二次结果的平均值。

使用FFT分析仪,单就喷嘴D的反向冲击强度进行了定量测定。对压力传感器进行了校对以修正压力和电压数值。在气体喷吹前,将分析仪置于零位,这样水的静压在波形中就被消除掉,而只有来自于反向冲击的压力被记录在软盘上。每种流量进行8次记录,而后倒回记录带,将其中的三次记录绘图以作分析。每一种波形记录,均由分析仪打印出一张有10个最大毫伏数值的报表,因此记录下大概80个极大值。计算这些数值,就可以得到某种气体流量下的反向冲击强度的平均值。

2.3 结 果

2.3.1 反向冲击测定

不同内径管型喷嘴的反向冲击频率与其表观马赫数(Ma)之间的关系,示于图3。它表明在Ma等于1的临近区间,反向冲击频率数值从低到高(最大约为 $35s^{-1}$)逐渐增加,当最大值过后,反向冲击频率则不断随着Ma的增加而减小。Ma大于2之后,不论其增长与否,反向冲击频率波动在一个较低水平内(约 $5s^{-1}$)。

反向冲击强度具有明显特性,且取决于喷嘴内径。使用较大内径的喷嘴,即输入较高能量时,喷嘴的反向冲击也较大。

图4表明内径为8mm的喷嘴,其反向冲击强度与表观马赫数的关系。在Ma接近1时,反向冲击强度出现峰值,在该试验条件下的反向冲击强度值为 $0.013 \times 10^5 \sim 0.031 \times 10^5 Pa$ 。

“螺旋型”喷嘴的反向冲击频率与表观马赫数的关系示于图5。用内径6mm的管型喷嘴(代号C)在图形中作参照。将“螺旋型”喷嘴与管型喷嘴相比,这些图形显示出类

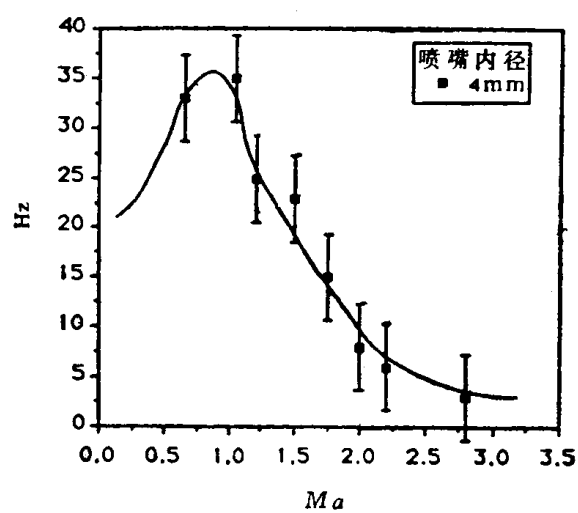
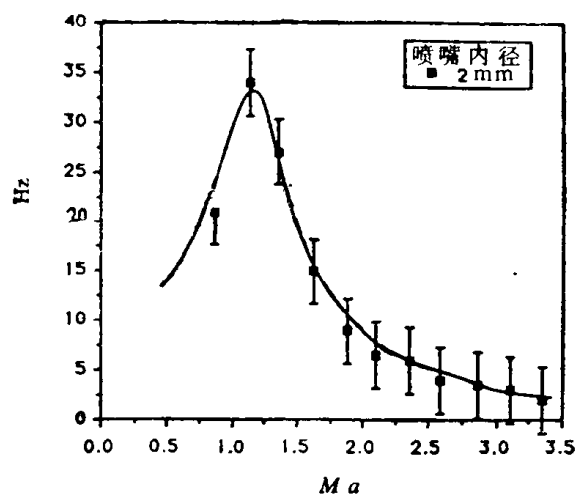


图 3 反向冲击频率与表观马赫数之间的关系

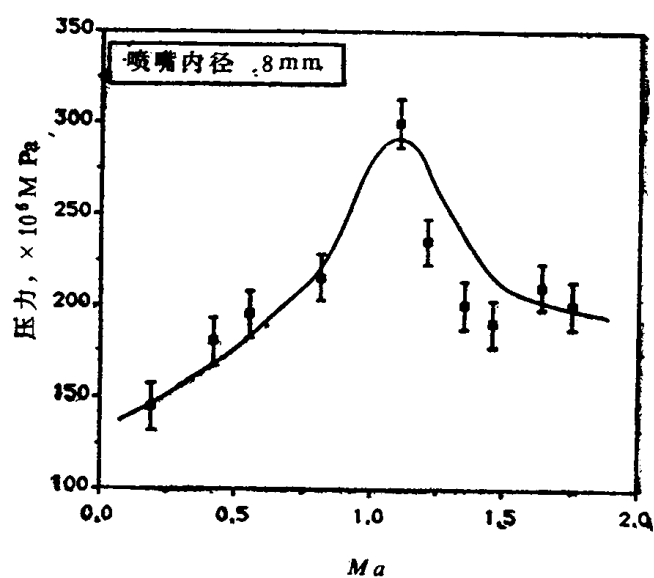


图 4 反向冲击强度与表观马赫数的关系

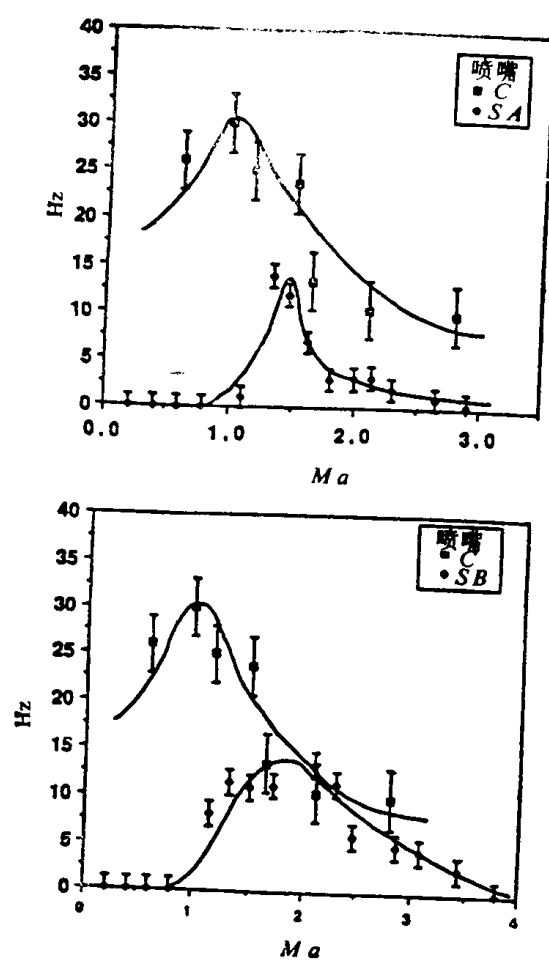


图 5a 反向冲击频率与表观马赫数的关系

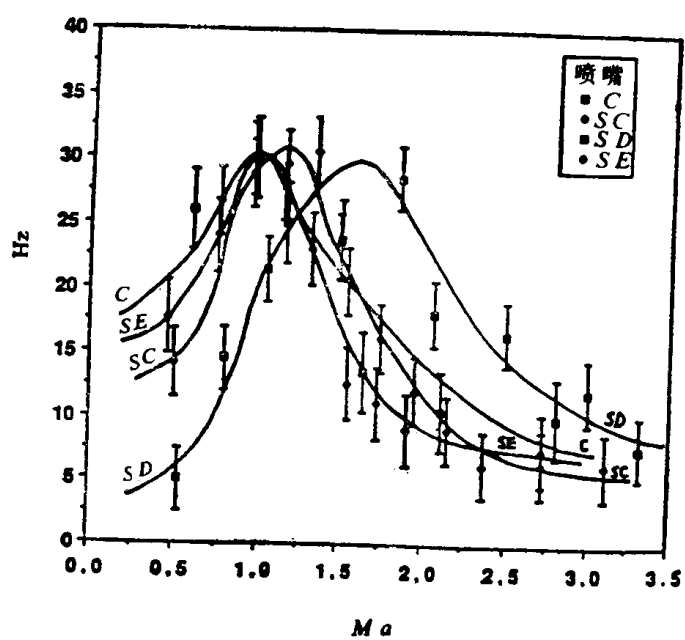


图 5b 管型喷嘴C作参照，喷嘴SA、SB、SC、SD、SE 是螺距递增的“螺旋型”喷嘴

似的频率变化趋势，只不过峰值的出现在 Ma 为1.5~2.0时，而不是 Ma 等于1时。这种峰值的后移或许是钢质螺旋产生的涡旋气流所造成的结果。抛开峰值的后移问题不谈，对于喷嘴 SA 和 SB （具有更短的螺距，因之可产生更为强烈的涡旋气流），其最大频率要比参照喷嘴 C 低50%。对那些具有较长螺距的喷嘴来说，其最大频率则几乎与参照喷嘴 C 相同，只不过峰值的出现向高 Ma 的方向移动了。

2.3.2 用装有硼酸的圆盘进行的侵蚀试验

圆盘的侵蚀是以其自身的质量损失，即 R_w 来衡量的，这可以通过下述关系式来计算：

$$R_w = \frac{W_b - W_a}{t_t} \times 100\%$$

式中 R_w ——整个圆盘的侵蚀速度，%/min；
 t_t ——试验时间，min；
 W_a ——试验后的圆盘质量，g；
 W_b ——试验前的圆盘质量，g。

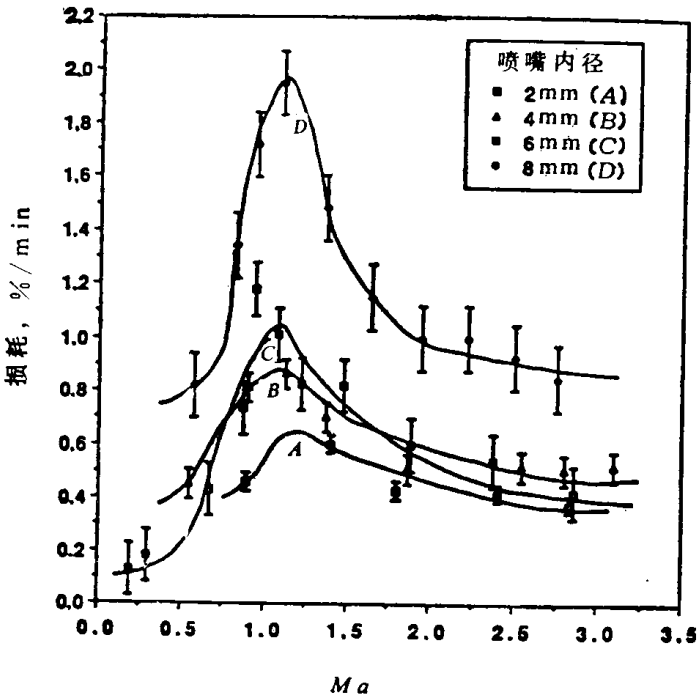


图 6 整个圆盘侵蚀速度与喷嘴表观马赫数的关系

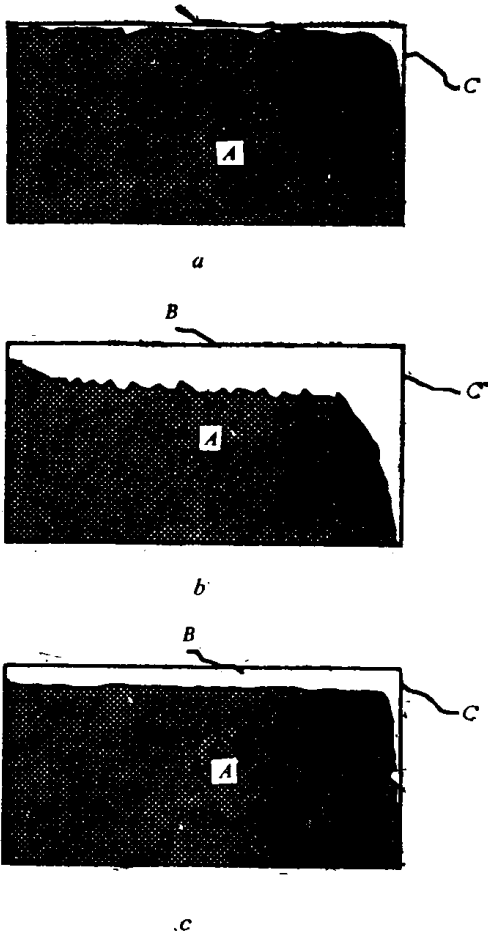


图 7 圆盘侵蚀的三个阶段
A—试验后，B—试验前，C—喷嘴出口前沿
a—低侵蚀阶段 ($Ma < 0.4$)，
b—高侵蚀阶段 ($Ma = 0.8 \sim 1.4$)，
c—稳定而较低的侵蚀阶段 ($Ma > 2.0$)

R_w 值可用作喷嘴周围耐火材料的模拟侵蚀速度。图 6 表示圆盘侵蚀速度与管型喷嘴表观马赫数之间的关系。显然，在低 Ma 条件下，圆盘侵蚀速度一直增加，直到 Ma 等于 1 时达到峰值为止。而后随着 Ma 的继续升高，侵蚀速度开始下降，这与反向冲击频率随 Ma 的变化趋势相吻合。

整个圆盘的侵蚀速度还取决于喷嘴的内径。该图表明，喷嘴的内径愈大，圆盘侵蚀速度愈大。这意味着与输入能量有关的反向冲击强度，是考虑喷嘴侵蚀速度的另一个重要因素。

从对试验圆盘的侵蚀检验来看，这些喷嘴侵蚀的一般特点可以按下述三个阶段来描述，而这三个阶段又是根据 Ma 大小来划分的。图 7 表示的是它们的图解。

图 8 所示系“螺旋型”喷嘴试验结果。与参照喷嘴 C 相比，在喷嘴流量几乎相等的条件下，喷嘴 SA 和 SB 的侵蚀速度的降低，主要是反向冲击频率的下降造成的（见图 5 与图 8）。

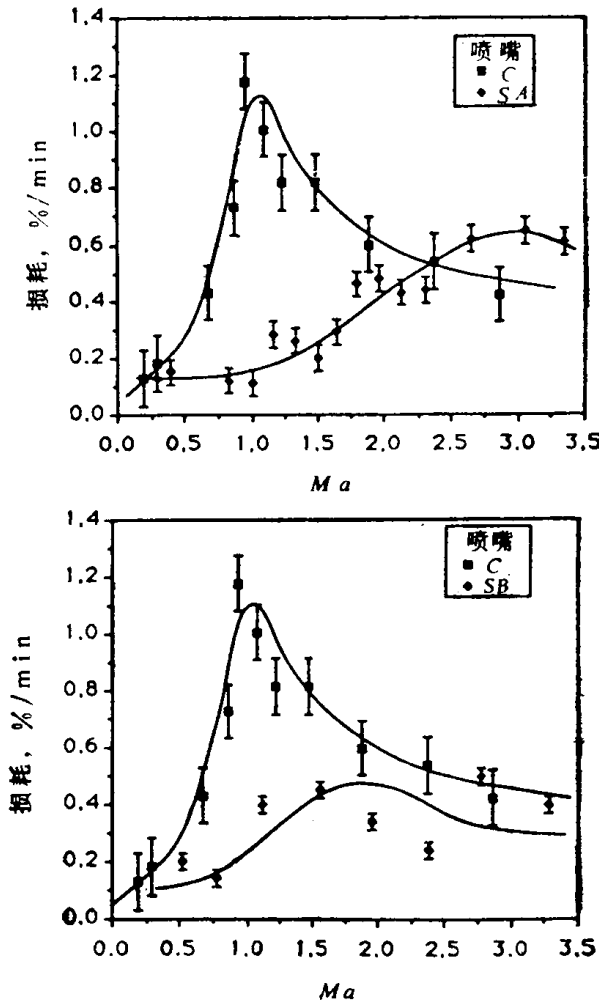


图 8 整个圆盘侵蚀速度随表观马赫数的变化

2.4 讨论

2.4.1 反向冲击与气泡射流现象之间的关系

在对浸没式喷嘴的研究中，发现喷嘴出口邻近区域，可划分为二种流动方式。当 Ma