

# 可逆流体换向装置一些基本问题的试验研究

樊燕芳, 徐 聪, 景 山

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 102201)

**摘要:** 可逆流体换向装置是决定气动式脉冲液体射流泵的流体输送效率的关键组成部件。通过试验研究了不同入流结构、不同出流结构、面积比、引流间隙等因素对可逆流体换向装置输送性能的影响。结果表明: 较大的入流射流出口速度可以产生更好的引流效果; 带较长接收管的出流结构总体上的流体输送效果不如无接收管的出流结构; 由于涡流分离导致的沿壁返流, 过大的面积比将导致引流效果变坏, 最优面积比值选取 1.5 为宜; 当引流间隙长度和出流结构入口直径的比值为 0.9~1.0 时, 不同出流结构的引流效果均较好。

**关键词:** 可逆流体换向装置; 引流率; 入流结构; 出流结构; 面积比; 引流间隙

中图分类号: TL93 文献标识码: A 文章编号: 0258-0918(2008)03-0280-09

## Experimental study on fundamental performance of reverse flow diverters

FAN Yan-fang, XU Cong, JING Shan

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 102201, China)

**Abstract:** The Reverse Flow Diverter (RFD) is one of the key components affecting the liquid-delivered efficiency. The effects of inflow structure, outflow structure, area ratio and suction gap on the performance of RFDs were studied in this paper. It can be found experimentally that expected entrainment phenomenon can be achieved when the outlet velocity of fluid for RFDs' inflow structure is sufficient. There is less liquid delivered by an RFD with a long receiver than that without a receiver. Because of back-flow caused by vortex separation, oversize area ratio cannot have better entrainment phenomenon and the optimum area ratio is 1.5. When the ratio of suction gap length to inlet diameter of outflow structure is 0.9~1.0, the excellent liquid-delivered efficiency can be obtained.

**Key words:** Reverse Flow Diverter; suction factor; inflow structure; outflow structure; area ratio; suction gap

收稿日期: 2007-07-22; 修回日期: 2007-11-26

作者简介: 樊燕芳(1985—), 女, 山西原平人, 硕士研究生, 化学工程与技术专业

世界能源的日益紧张,核能的利用越来越受重视,核工业也随之将有一个较大的发展空间。在核工业领域中,各种核反应堆将产生大量具有放射性的乏燃料,这些乏燃料在处理过程中产生的废液也具有很强的放射性,这些放射性液体在输送过程中必须尽量避免泄露,因此在核燃料后处理厂中如何进行放射性液体的输送受到了广泛的关注<sup>[1]</sup>。目前,国内外后处理厂在放射性屏蔽区内,通常采用的输送设备主要有机械泵、自流式设备、蒸汽喷射器、气提泵和真空提升泵、射流泵等<sup>[2]</sup>。其中气动式脉冲液体射流泵由于具有本身没有运动部件,结构简单,密封性好,排液压头较高,不会加热和稀释液体,能输送高温及含悬浮固体颗粒的放射性液体等优点,成为目前核工程领域中最为广泛应用的放射性流体输送设备<sup>[3-5]</sup>。

前苏联全苏热工研究所的索科洛夫<sup>[6]</sup>等人对应用于实际中的多种类型的射流装置进行了理论和实验研究,但主要针对的是普通流体的输送,而用于放射性流体输送的射流装置在结构上与此相比有较大的不同:与前者采用的喷嘴-喉管型式相比,后者多采用喷嘴-喷嘴型式,但对此结构的相关试验研究以及结构性能对比研究的报道较少。关于气动式脉冲液体射

流泵,英国核燃料公司(BNFL)已在英美等国的核燃料后处理厂中进行了较为广泛的研究和应用。其中,直接影响流体输送效率的可逆流体换向装置 RFD(Reverse Flow Diverter) 是决定气动式脉冲液体射流泵技术成功与否的关键。但迄今为止,公开发表的文献中甚少涉及 RFD 的微观结构布局、基本设计参数、操作规律等各项数据。目前国内对 RFD 的研究还多限于理论上的分析和设计<sup>[7,12]</sup>,对装置微观结构参数的影响规律和机理还缺少系统性的结果。由于 RFD 输送流量的变化取决于多个参数变化的共同作用,因此 RFD 结构、尺寸等具有复杂的多样性,影响了 RFD 的具体设计和应用。为此,以放射性流体的输送为背景,将针对可逆流体换向装置的一些基本问题进行试验研究,考察各种结构参数以及操作参数等对 RFD 引流效果的影响,以促进 RFD 基本问题结论的进一步明晰化。

## 1 试验流程和方法

RFD 是利用射流紊动扩散作用来传递能量和质量的流体机械,由入流结构、出流结构、引流间隙等部分组成,主要应用于气动式脉冲液体射流泵中。如图1所示,气动式脉冲液体

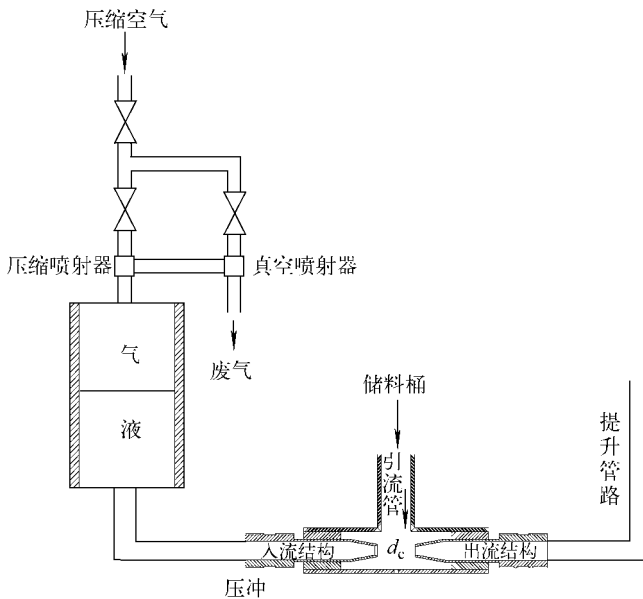


图1 RFD 装配组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of RFD assembly

射流泵<sup>[9-12]</sup>是由动力源(由压缩喷射器和真空喷射器组成)、活塞桶、RFD 三大部分组成,工作过程分压冲和抽吸两个过程:压冲时,高压气体在压缩喷射器的作用下,直接作用于气液活塞筒内的液体之上,加压流体经过 RFD 的入流结构,把压能转化为动能,在入流结构的出口处形成射流。由于射流边界层的紊动扩散作用,在引流间隙中的射流核心区周围将产生负压区,使部分从储料桶通过引流管进入引流间隙中的流体被卷入射流主体。这两股流体在引流间隙以及出流结构内混合,进行能量和质量传递,于是加压流体的速度减小,被吸流体的速度增大,两者的速度在出流结构出口处渐趋一致。在此过程中,混合流体的动能逐渐转换成静压能,流体由此被输送到更高的下一级料液桶中。在抽吸过程中,真空喷射器抽吸活塞筒内的气体,使压力降低到储料桶和排液管中部分液体能被反吸到气液活塞筒内,当筒内的反吸液体上升到设计值时,关闭通气阀和抽气阀,打开压缩空气阀,再将筒内液体压缩到设计标准,如此反复循环。此流程中,RFD 的压冲过程是本文研究的主要内容。

在 RFD 结构参数的设计过程中,考虑到扩散角太小会导致 RFD 的整体长度加长,不利于设备在输送放射性流体的狭窄环境下安装,当扩散角为  $20^\circ$  时,试验表明已可以达到较好的引流效果。因此采用的可逆流体换向装置(RFD)入流结构如图 2 所示,分别采用出口直径为 6.5 mm, 8.0 mm, 扩散角为  $20^\circ$  的喷嘴产生入射射流。出流结构如图 3 所示,分别采用入口直径为 6.5 mm, 8.0 mm, 12.0 mm, 扩散角为  $20^\circ$  的喷嘴(扩散管)以及带喉管的喷嘴(接收管—扩散管)作为入射流体和引流流体的混合扩散结构。入流、出流结构的装配组成示意图如图 1 所示,采用左右对称及轴对称布局,在入流结构和出流结构间自然形成引流间隙。

试验过程中采用的 RFD 性能评价试验平台的流程图如图 4 所示。图中采用机械泵 1 提供恒定射流,相当于脉冲液体射流泵操作时压冲周期中由活塞桶提供的准恒定射流;对于 RFD 部分 2,采用可以替换不同结构 RFD 的设计。在实验过程中,引射流体和工作流体都采

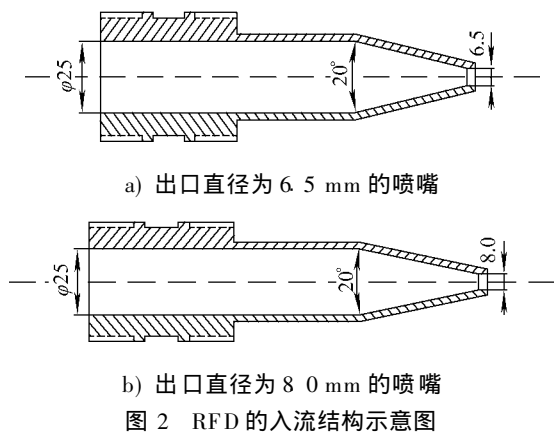


Fig. 2 Schematic diagram of RFD inflow structure

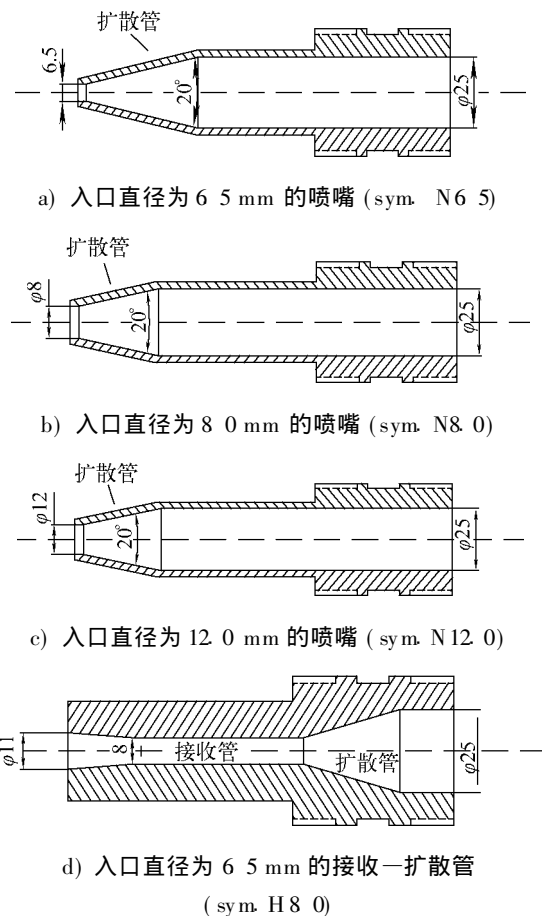


图 3 RFD 出流结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of RFD outflow structure

用室温下的水,入流和引流流体混合后通过提升管流出直接排向贮罐,通过调节入流管路的旁路阀门来调节工作流体的入流流量和压力;在 RFD 结构周围布置四个测压点,包括入流工

作压力,引射口压力,引流间隙压力和出流结构出口压力,以便掌握流体压强在RFD中的分布变化情况。各测压点的压力采用量程为500 kPa,精度为±0.5%的SY-9411型压力传

感器来进行测定,再由A/D采集系统进行实时采集;入流流量、提升流量采用量程为1 000 L/h,误差范围为2.0%~3.2%的转子流量计直接测定。

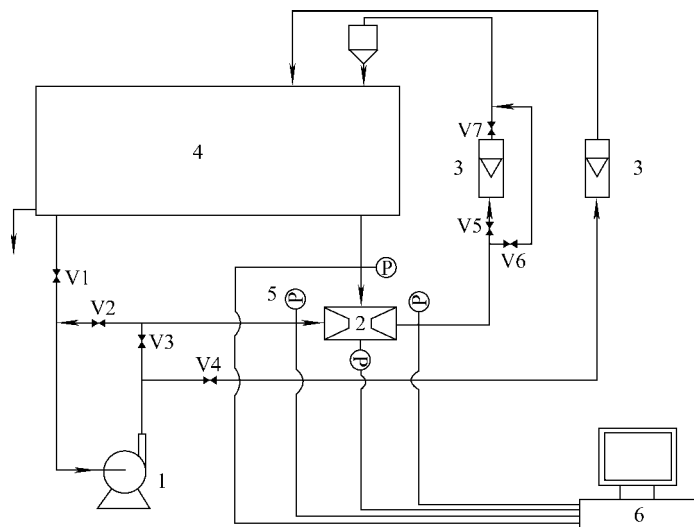


图4 RFD性能评价试验平台

Fig. 4 RFD performance evaluation testing platform

1—离心泵;2—RFD;3—流量计;4—贮罐;5—压力传感器;  
6—AD数据收集系统;7—(V1-V7)调节阀

## 2 试验结果和讨论

通过试验,研究了不同入流结构,不同出流结构、面积比、引流间隙等结构因素对可逆流体换向装置引流率的影响。提及的引流率均按照式(1)定义

$$q = V_{out}/V_{in} \quad (1)$$

其中, $V_{in}$ 是入流流体流量, $V_{out}$ 是出流流体流量。当 $q < 1$ 时,表明有部分入流流体沿如图1所示的引流管路进入贮槽,即引流管中出现“返水现象”。这是RFD压冲操作中最为棘手的问题,也是RFD微观结构设计(流场规划)中的重中之重; $q = 1$ 则表明此时的入流流体经过RFD的转向操作已全部进入提升管中,引流管路中既没有向上的返流,也没有向下的引流流动; $q > 1$ 则表明引流间隙中有部分流体被卷吸入射流区并随同入射射流一起进入了出流结构,从而导致实际提升流量大于入流流量,这是RFD压冲操作中最希望达到的效果,也是RFD

微观结构设计的目标之一。

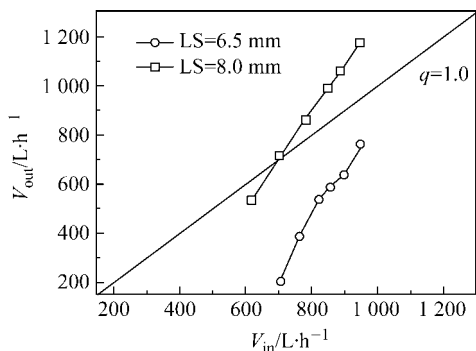
### 2.1 入流结构型式的影响规律

为了考察RFD入流结构型式对RFD引流效应的影响规律,在保证引流间隙、出流结构相同的情况下,试验研究了不同入流结构下的出口流量随流体入口流量的变化规律,试验结果如图5所示。

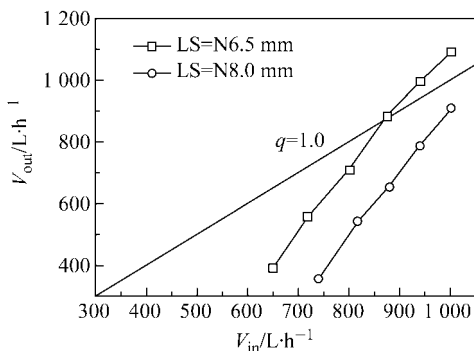
试验中图5a、b的入流结构分别采用如图2a所示的出口直径为6.5 mm的喷嘴以及如图2b所示的出口直径为8.0 mm的喷嘴,而图5a的出流结构为扩散管入口直径为8.0 mm的接收管—扩散管(图3d, H8.0),图5b的出流结构是入口直径为12.0 mm的扩散管(图3c, N12.0)。从图中可以看出,不管出流结构是扩散管模式还是接收管—扩散管模式,都可以得出以下结论:喷嘴出口直径为6.5 mm入流结构在较大入流流量时可以实现流体输送的引流效应,而喷嘴出口直径为8.0 mm的入流结构引流效果很差。这主要是因为与射流出口直径为6.5 mm的喷

嘴相比,射流出口直径为 80 mm 的出口面积增大,则相同的入流流量经过该喷嘴时,出口处的射流速度减小,在引流间隙内不能形成足够的负压区来增强流体输送的引流效应。由此可见,入

流结构射流出口速度对 RFD 引流效应具有非常重要的影响。因此,在本文考察其他因素对 RFD 引流效果影响的时候,入流结构均选用射流出口直径为 65 mm 的喷嘴。



a) 出流结构:接收-扩散管,H80



b) 出流结构:扩散管模式,N120

图5 入流结构对RFD引流效应的影响

Fig. 5 Impact of various inflow structures on RFD suction effect

## 2.2 出流结构型式的影响规律

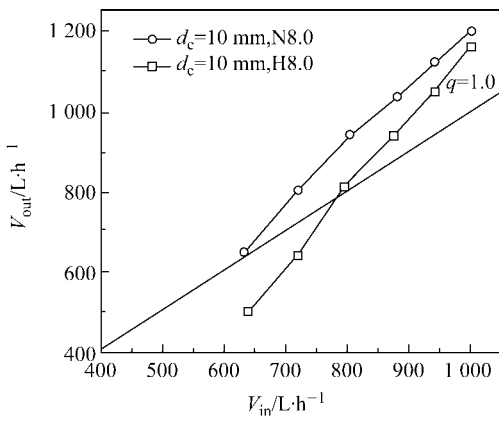
以单RFD作为流体换向装置的非连续模式的流体输送过程中,出流结构的选择有两个大的方向:其一是借鉴传统射流泵的吸收管(喉管)-扩散管(喷嘴)模式,其二是直接采用扩散管的喷嘴型模式。前者试图利用吸收管在出流流体进入扩散管之前使流体沿径向的轴向速度分布均匀一致,以实现流体在扩散管中进行动能向静压能转换时的能量损失最小,从而保证有更多的流体被输送。显而易见,与直接采用扩散管作为出流结构相比,增加吸收管固然可以保证扩散管中的能量损失减小,但同时也增加了流体通过吸收管时产生的沿程阻力损失,因此增加扩散管是否适宜必须从这两方面同时考虑。

图6a、b是在引流间隙长度分别为10 mm、3 mm时,以如图3b所示的扩散管模式以及如图3d所示的吸收管-扩散管模式作为出流结构时的试验结果对比图。如图6a所示,当引流间隙长度为10 mm时,毫无疑问,直接采用扩散管作为出流结构具有更好的引流效果(最高引流率接近1.2),但当引流间隙长度较小时( $d_c=3$  mm),如图6b所示,在入射流量较高时吸收管-扩散管模式的出流结构具有较好的引

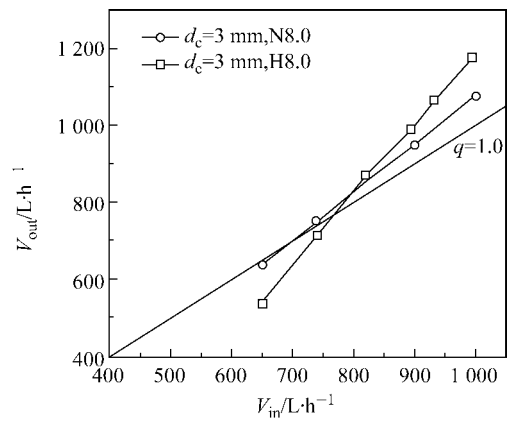
流效果。这是因为,当引流间隙长度较小且速度较大时,入射射流和卷吸入的引流流体在尚未完成充分发展,即沿径向的轴向速度分布还非常不均匀时,就直接进入管径逐渐变大的扩散管,此时流体在扩散管中将产生较大的涡流能量损失,导致输送流量降低,此时可提供混合流体充分发展区域的具有长接收管的吸收管-扩散管模式就具有更好的引流效果。但在实际的RFD操作中,为保证抽吸操作具有小的流动阻力,通常要求引流间隙长度尽量选取较大值为好,因此从总体效果上看,以直接扩散的型式作为出流结构的设计是较为合理的。

## 2.3 面积比的影响规律

图7是RFD压冲工作时的理想的局部流场示意图。如图所示,入射流体通过入流结构喷嘴后,高能流体进入引流间隙,流体的流动面积突然扩大,在引流间隙中形成射流区,射流区从喷嘴出口开始沿流动方向直至出流结构入口将逐渐扩散。其典型特征是中心部分的射流核心区(轴向速度沿径向分布均匀一致)范围逐渐减小,环绕四周的边界层区域范围逐渐扩大。当射流流速足够大时,依靠流体分子间的摩擦作用,部分环境流体被射流卷吸向前运动,从而在局部形成空穴区,空穴四周的流体将自动连



a) 引流间歇为 10 mm



b) 引流间歇为 3 mm

图 6 出流结构型式的影响规律

Fig. 6 The impact law of RFD outflow structures

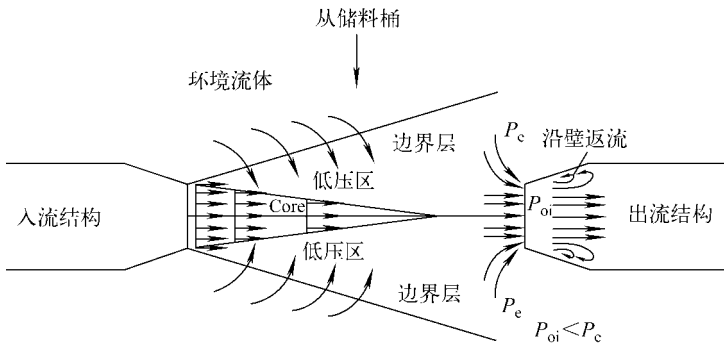


图 7 RFD 压冲操作理想流场示意图

Fig. 7 Schematic diagram of ideal flow field for RFD discharge operation

续补充空穴,使得在空穴处的压力低于周围环境的压力。因此,当射流区形成时,在射流区周边将产生一个低压区,这是保证 RFD 压冲操作时实现引流效应的必需条件,尤其是出流结构入口处的压力必须保证比周围环境压力低,否则就将产生沿引流管路向上的返流现象。除了入射射流能否产生如上所述的理想低压区外,不可忽略的是出流结构本身对其入口处压力的影响。显而易见,如果出流结构本身(包括后续提升管路)阻力过大,出流结构入口处压力必然随之升高,从而也将导致返流现象发生。因此,从出流结构和入流结构的面积比上考虑,一个直观的认识是:大的面积比因为可保证出流结构具有小的过流阻力,因此也应具有好的引流效果。由此,尽量选择大的面积比成为 RFD 微观结构传统设计(局部流场规划)中的一个追

求,但实际试验表明,这种设计目标存在一个明显的误区。

图 8 是在入流结构相同时, RFD 的面积比  $m$  分别为 1.0、1.5、3.4 时的流量提升对比图。由图可以看出,在该试验条件范围内,出流结构采用入口直径为 80 mm 的喷嘴型式(N8.0, 图 3b)时,与入口直径为 65 mm 的 N6.5 结构(图 3a)相比,其入口阻力减小,因此其引流效果明显比后者要好。但与入口直径为 120 mm 的 N12.0 结构(图 3c)相比,却可以得到一个截然相反的结论:此时 N12.0 出流结构的引流效果较 N8.0 的明显要低,即并非出流结构入口阻力越小越好。在试验过程中,这一现象在不同引流间隙、不同入流结构、不同的引流管路和提升管路阻力下都毫无例外的出现。这是因为:射流卷吸流体进入出流结构后,由于提升管

路中阻力的存在,部分流体将发生如图7所示的沿管壁逆流动方向的分离返流(Separation)。当RFD出流结构入口面积过大时,这部分返流流体可以很容易的回到引流间隙而导致引流效果变差。当RFD出流结构入口面积较小时,由于向前射流的抑制,这部分返流流体不容易再次进入引流间隙,同时工作流体的高速流动使得工作流体整体携带能力加强,引流比增大,因此可以很好的改善引流效果。正是因为高速射流可以在更大范围内抑制扩散管内沿边壁的返流,而大的面积比同时可以减小入口阻力,所以我们可以发现:当入射流速度较大时,N12.0的引流效果较N6.5更好一些。综合上述,我们可以确定出流结构入口面积和入流结构出口面积比( $m$ )对RFD的微观引流现象具有非常重要的影响,并且这种影响具有双重竞争的性质。试验表明出流结构入口和入流结构出口的面积比约为1.5时引流效果最好。

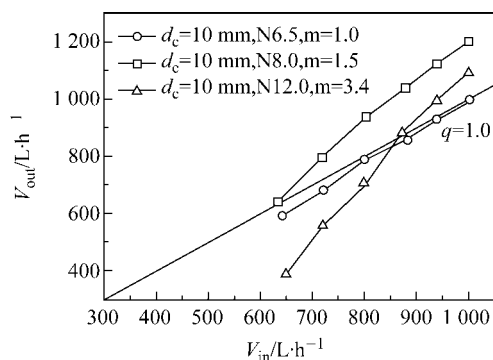


图8 出流结构入口面积和入流结构出口面积比的影响规律

Fig. 8 The impact law of inlet area of out flow structure and outlet area of inflow structure ratio

## 2.4 引流间隙的影响规律

RFD在工作过程中,在引流间隙处,从入流结构进入的高能流体和被引射进来的流速较低的流体发生动量交换,高能流体被减速,而低能流体被加速。在这个过程中引流间隙的长度将直接决定射流的发展变化,合理的引流间隙设计可以使得两股流体通过能量交换形成恰如一股射流的均匀的速度剖面。因此,引流间隙对卷吸进入射流的流体量以及对出流结构中返

流的抑制等存在重要影响。保持入流结构和出流结构固定不变,我们对不同引流间隙长度对引流效果的影响规律进行了考察,结果如图9所示。

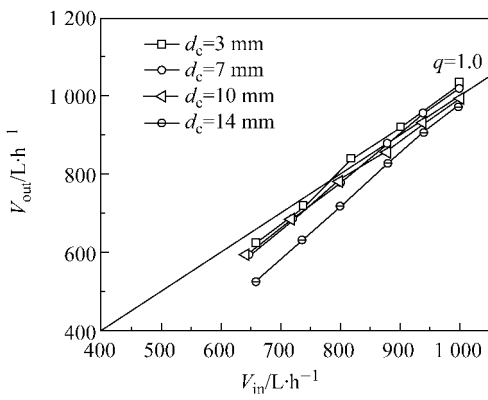
图9a的试验中,出流结构是入口直径为6.5 mm的喷嘴型式(N6.5,图3a)。由图可见,在引流间隙长度较小时,即3 mm和7 mm时引流效果较好,此时 $d_c/d_{out} = 0.46 \sim 1.08$ 。

图9b的试验中,除出流结构采用入口直径为8.0 mm的喷嘴型式(N8.0,图3b)外,其他条件与图9a完全相同。由图可以看出,引流间隙长度为7 mm和10 mm时效果较好,此时 $d_c/d_{out} = 0.88 \sim 1.25$ 。

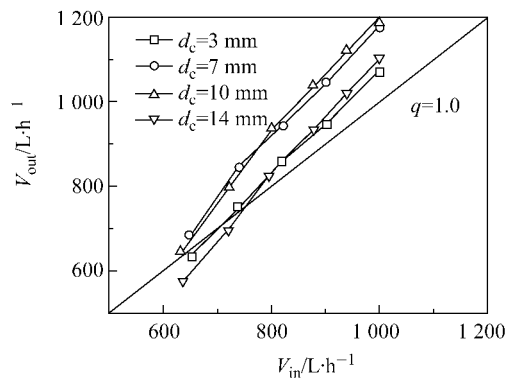
图9c的试验中,除出流结构采用入口直径为12.0 mm的喷嘴型式(N12.0,图3c)外,其他条件也均与图9a中的相同。可以看出,在该组结构和参数的配合下,入出流结构间距较大时,即10 mm和14 mm时引流效果较好,此时 $d_c/d_{out} = 0.83 \sim 1.17$ 。

图9d的试验中,除出流结构采用喉管型式(H8.0,图3d)外,其他条件均与图9a中的相同。可以看出,当出流结构采用喉管型式(H8.0,图3d)时,引流间隙长度对引流率的影响较小,此时 $d_c/d_{out} = 0.27 \sim 1.27$ 。

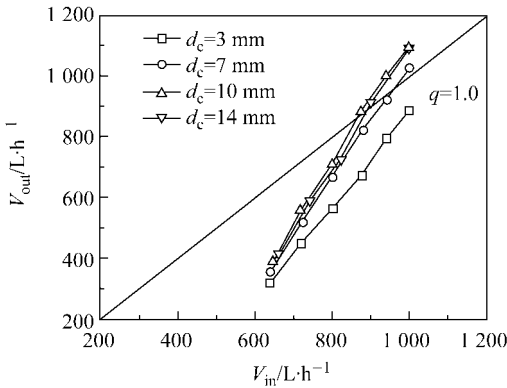
从上述试验结果分析可以得出,引流间隙的选择必须权衡流体在RFD中的流体流动损失以及所能达到的引流效果来进行。这主要是由于RFD内流体的流动属于有限空间伴随射流,其流体的流动行为非常复杂,在引流间隙中会有流体的混合和卷吸。当无因次引流间隙距离 $d_c/d_{out}$ 较小时,流体不能均匀混合,使得进入引流间隙中的高能流体与引流流体不能充分进行能量交换,导致扩散管进口处的流速分布很不均匀,使得扩散损失增大。因此在扩散管中,输送流体依然存在较大的速度梯度,RFD的引流效果变差。然而,无因次引流间隙距离 $d_c/d_{out}$ 太大时,增加了流体的沿程阻力损失,同时射流在进入出流结构之前就过早得扩散,容易在引流管中形成“返水”现象。因此引流间隙距离的选择必须是两者的一种妥协和平衡。在本试验范围内,综合考虑各种不同出流结构的引流效果后,选择引流间隙长度时以 $d_c/d_{out} =$



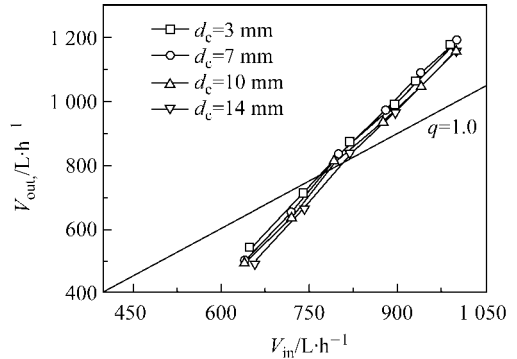
a) 标号 N6 5



b) 标号 N8 0



c) 标号 N12 0



d) 标号 H8 0

图9 输送流量随引流间隙的变化规律

Fig. 9 The variation law of output flow with suction gap

0.9~1.0 作为标准为宜, 此时不同的入流、出流结构均具备较好的引流效果。

### 3 结论

针对气动式脉冲液体射流泵中的关键部件——可逆流体换向装置的一些基本问题进行了试验研究。研究结果表明:

- 1) 通过入流结构的射流出口速度越大, 越易在引流间歇间形成负压区, 产生的引流效果越好。
- 2) 从总体上看, 通过在接收管中消除流体速度分布来提高输送流量的方法并不能补偿由于摩擦阻力损失带来的流量下降。因此直接采用无长的接收管的扩散管作为出流结构是更为适合的, 这在微观结构上就是喷嘴—喷嘴型式。
- 3) 以引流率作为标准, 面积比  $m = 1.5$  时

引流效果最好。出流结构入口面积过大将导致前行射流不能有效抑制沿边壁的返流, 引流效果从而变差。

- 4) 以引流率作为标准, 引流间隙长度和出流结构入口直径比为 0.9~1.0 时, 针对入流结构为直径为 6.5 mm 的喷嘴, 不同出流结构的 RFD 均可获得较好的引流效果。

### 参考文献:

- [1] 姜胜任, 任凤仪. 核燃料后处理工学[M]. 北京: 原子能出版社, 1995: 367-375.
- [2] Davies B, Jeremiah J P. Liquid Transportation in HLW Plants[M]. 北京: 核工业第二设计院, 1995.
- [3] 陆宏圻. 射流泵技术的理论和应用[M]. 北京: 水力电力出版社, 1989.
- [4] 王玲花, 高传昌. 脉冲射流泵研究进展[J]. 水利电力机械, 2006, 28(6): 33-35.
- [5] 高传昌, 王玲花, 陈德新. 脉冲液体射流泵能量平衡理



论的研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2006, 27(2): 50-53.

[6] 索科洛夫, 津格尔. 喷射器[M]. 北京: 科学出版社, 1977.

[7] 高传昌, 尚华, 刘新阳, 等. 脉冲液体射流泵时均值基本方程中的流速系数[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(1): 19-22.

[8] 高传昌. 脉冲液体射流泵时均值基本性能的研究[J]. 水动力学研究与进展, 2002, 17(3): 270-280.

[9] 高传昌. 脉冲液体射流泵基本性能的研究[J]. 水利学报, 2000, 1: 34-41.

[10] 陆宏圻, 高传昌. 气液活塞式脉冲液体射流泵装置效率装置效率的理论研究[J]. 机械开发, 2000, 4: 33-36.

[11] 高传昌, 陆宏圻. 气液活塞式脉冲液体射流泵装置性能的理论研究[J]. 机械开发, 2000, 4: 52-56.

[12] 郭彦华. 核用气动式脉冲液体射流泵和涡流二极管泵性能实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.

(上接第 279 页)

进行整体考虑和负责;

(5) 报警系统显示的改进。这里主要是指采用数字化仪控系统后报警系统的显示, 或者通过深入开发 DCS 商用软件, 增加和丰富人机接口功能; 或者开发独立于 DCS 平台的通用的报警显示系统, 其中需要考虑组态数据导入维护的方便性、报警显示的组织和显示特性修改的灵活性、报警显示系统与 DCS 原有报警系统在报警显示、报警控制方面的兼容性以及与不同 DCS 平台通讯的兼容性。

## 7 结束语

报警系统设计的改进是一项长期的系统工

程, 需要电站设计水平的整体提高与相互促进。通过对报警系统设计的讨论以及个人工作中的体会, 对报警系统的设计提出一些设想和建议。

## 参考文献:

[1] IEC 62241-2004, Nuclear power plants. Main control room. Alarm Functions and Presentation[S].

[2] The Engineering Equipment and Materials Users Association, Alarm Systems: A Guide to Design, Management and Procurement[M], 1999.

[3] Regulatory Guide 1.97-1983, Instrumentation for Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants to Assess Plant and Environs Conditions During and Following An Accident, Revision 3[S].