



# 单个透空四面体水槽试验

王倩芸, 储昊, 朱云飞, 单鼎隆

(重庆交通大学 河海学院, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

**摘要:** 针对透水框架附近的流场分布规律的相关问题, 通过采用高精度河流动力学水槽试验, 利用基于变频技术的DCMS控制系统, 进行单个透空四面体模型试验。试验在透空四面体周围布置972个测点, 每个测点采用旋桨式光电流速仪测量。通过与无框架流场的对比, 分析横断面流速沿垂直水流方向和沿高度方向的变化规律, 得到透空四面体周围流速分布规律和具体减速、增速部位、平均减速率, 揭示了透空四面体对水流扰动作用。

**关键词:** 透空四面体; 减速效果; 减速部位; 平均减速率

中图分类号: TU 617; U 615

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)02-0083-06

## Single transparent tetrahedral flume experiment

WANG Qian-yun, CHU Hao, ZHU Yun-fei, SHAN Ding-long

(School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University,

National Inland Waterway Regulation Engineering Technology Research Center, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Issues related to the flow field distribution of permeable frame near the river dynamics by using high-precision tank testing, the use of control systems based DCMS inverter technology, carried out through a single empty tetrahedral model test. Test through the air around the tetrahedral arrangement of 972 measuring points, each measuring point using propeller photoelectric velocity measurement. By comparison with frameless flow field, cross-sectional analysis of the flow velocity in the vertical direction and the height direction of the law of change, has been through the air velocity distribution in tetrahedral surrounding concrete and deceleration, growth area, the average deceleration rate, revealed through empty tetrahedral water flow disturbance.

**Keywords:** transparent tetrahedral; deceleration effect; deceleration parts; average reduction rate

近年来, 混凝土四面六边透水框架作为一种新型有效的固岸方法, 已在长江航道整治工程中得到了成功的应用。由于其具有透水与阻水的双重特性, 使流经的水流消能、挟沙力减小, 同时衰减后的流速小于泥沙起动流速时, 将达到减速促淤的目的。如今国内的黄河、闽江等治理工程中, 都应用了这一项护岸技术。由于四面六边透水框架独特的空间几何结构, 水流与其相互作用十分复杂, 为此很多学者展开了研究。周根娣等<sup>[1]</sup>研究水槽中四面六边透水框架和四面六边实体块尾流场的流速垂线分布和紊动量垂线分布,

对比研究了两者的水流结构和防护机理。杨中华等<sup>[2]</sup>对四面六边透水框架迎流布置和背流布置两种典型布置方式下的框架周边流场分别进行测量, 认为背流布置减速效果更好。况宏伟等<sup>[3-5]</sup>在施工陆地上和室内水槽试验中进行了四面六边透空四面体坝的布设试验, 分析四面六边透空四面体的单位体积内框架数量、密度等对减速促淤的影响。李若华<sup>[6]</sup>基于以上影响因素对四面六边透水框架群进行了减速效果的优化研究。文献[7-10]就框架群的长度、间隔长度、架空率、杆件长宽比、截面形状对流场特性进行试验研究且分析在实际工

收稿日期: 2016-06-20

作者简介: 王倩芸 (1993—), 女, 硕士研究生, 从事水工结构、航道整治的研究。

程中的减速促淤效果。

鉴于此，本文利用河流动力学水槽试验系统，对透空四面体尾流流场分布进行分析，得到有无透水框架这两种情况下，横、纵断面流速沿高度方向的变化规律，明确指出减速区域与增速区域以及产生的原因。

### 1 试验研究

#### 1.1 试验装置

试验装置采用高精度河流动力学水槽试验系统，水槽规格 6.0 m×0.25 m×0.2 m(长×宽×高)。试验开始前对流量与变频器和流量计标定，通过标定得到流量与变频器、流量计的线性关系  $K$ 、 $b$  值填入软件中。通过给定软件目标值来验证标定结果的正确性，又通过验证标定结果是正确的。

#### 1.2 透空四面体形状及模型比尺

原型透空四面体杆件长度为 100 mm，截面 10 mm×10 mm，杆件高度为 81.64 mm。

原型和模型都是处在同一重力场中，故它们的重力加速度相同，即  $\lambda_g = 1$ ，(模型长度 100 mm，

截面 10 mm×10 mm) 取长度比尺  $\lambda_L = 10$ ，这样可得重力相似情况下的其他比尺为：速度比尺： $\lambda_u = \lambda_L^{1/2} = 10^{1/2} = 3.16$ ；时间比尺： $\lambda_t = \lambda_L^{1/2} = 10^{1/2} = 3.16$ ；流量比尺： $\lambda_Q = \lambda_L^{5/2} = 316.23$ 。模型采用与原型相同的流体，则有  $\lambda_\nu = 1$ ，这时力和质量的比尺是相同的，即： $\lambda_F = \lambda_M = \lambda_L^3$ 。

流速测量方法采用旋桨式光电流速仪，这种流速仪由光电式传感器和计数器两部分组成，传感器用以产生流速信号，计数器用来定时和记数，经仪器简单计算后，可以直接显示流速值。测速范围是 0.03 ~ 1.20 m/s。

水平断面水流方向 1# ~ 18# 中，1# ~ 5# 间距为  $3L_0$ ，5#、3# 透空四面体中心和钝头边界。6# ~ 10# 间距为  $L_0$ ，10# ~ 12# 为  $2L_0$ ，12# ~ 14# 为  $3L_0$ ，14# ~ 16# 为  $5L_0$ ，16# ~ 18# 为  $8L_0$ 。垂直水流方向截面 1\* ~ ±5\* 等间距为  $0.25L_0$ 。

垂直断面从底部往上为近壁面、 $0.2H$ 、 $0.5H$ 、 $0.8H$ 、 $H$ 、 $1.2H$ ，其中  $H$  代表透水框架顶部高程。测点布置见图 1、2。

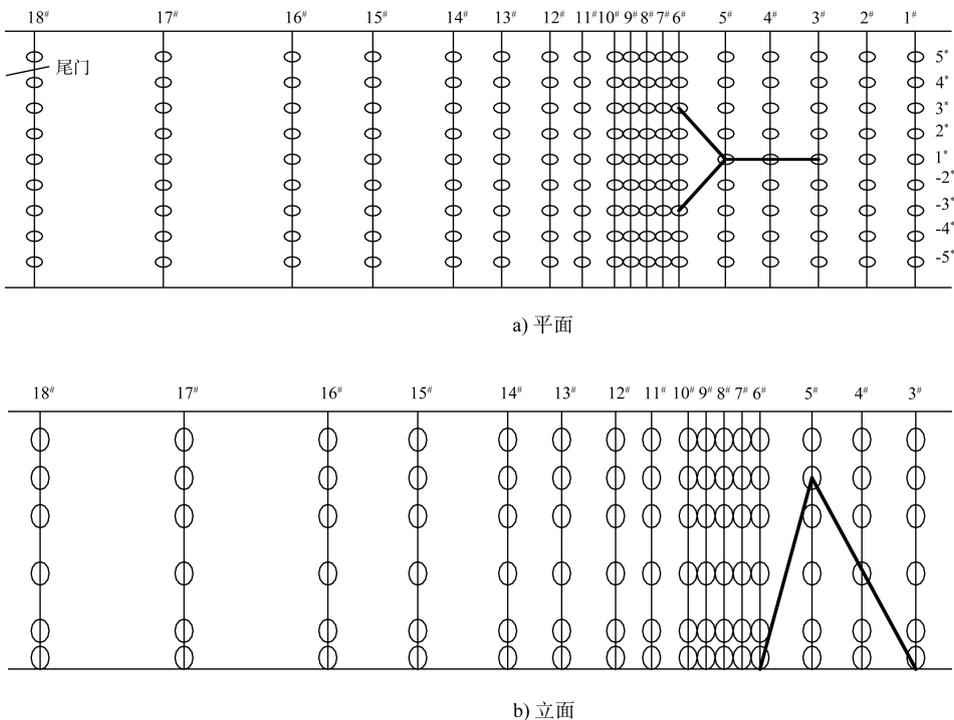
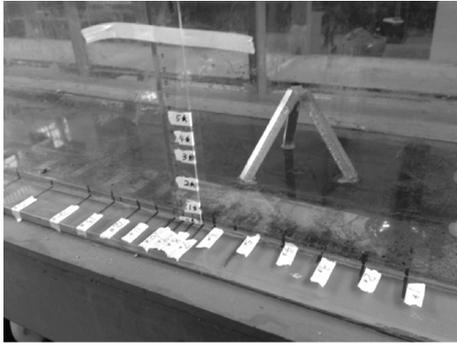
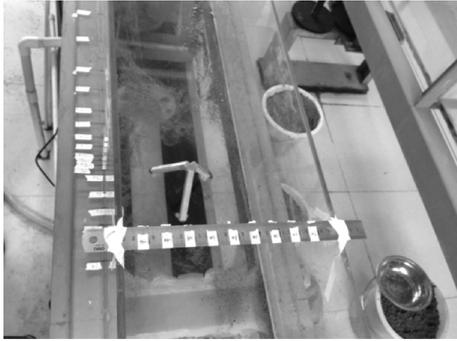


图 1 测点布置

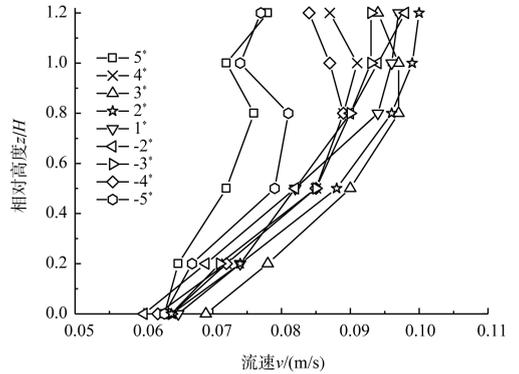


a) 立面

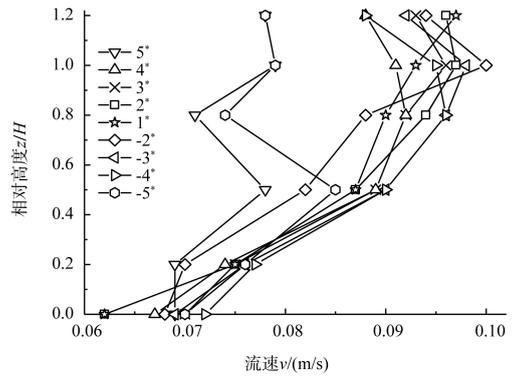


b) 平面

图 2 测点布置实物



a) 无透水框架



b) 有透水框架

图 3 1#断面

### 1.3 试验方案

试验开始前给定目标值流量  $7.0 \text{ m}^3/\text{h}$ , 调节尾门, 控制水深  $110 \text{ mm}$ , 在测得高度  $1.2H$  处流速达到  $0.1 \text{ m/s}$  时开始测量。

## 2 透空四面体流场特性

### 2.1 横断面流速沿垂直水流方向变化规律

试验测得, 如图 3a) 所示 (文中只列出了 1# 断面, 6# 与 1# 流速分布相似) 无透空四面体 1# 断面。1# 和 6# 横断面的流场规律基本相同, 说明试验初始条件可靠, 且无透空四面体时流场的基本规律呈现出由边壁处 ( $5^*$ 、 $-5^*$ ) 到流场中心 ( $1^*$ ) 流速逐渐增大的现象, 同时流场按中心 ( $1^*$ ) 对称分布。

有透空四面体断面流速沿宽度方向的变化规律 (图 3b), 发现 1# 按高度方向的流速分布与无透空四面体时的分布基本相同, 说明透空四面体对来流的影响很小, 同时可以看出流场对称性很好。

$3^*$  断面为四面体的内部断面 (图 4), 其中  $2^*$  截面上高度  $0.5H \sim 0.8H$  范围有明显的减速现象 (图 5a),  $-2^*$  截面上高度  $0H \sim 0.2H$  范围有明显的增速现象 (图 5b); 这说明  $2^*$  截面能量传递受阻, 相比较  $-2^*$  截面能量传递增强, 出现了此消彼长的现象。对比有无透水框架的流速图,  $4^*$  和  $-4^*$ 、 $5^*$  和  $-5^*$  处流速变化很小 (不再列出)。整体图像表现出在 1# 截面为最明显减速部位由  $0.2H$  到  $0.5H$  再到  $0.8H$  最终到  $1.2H$  高度处 (图 5c)。

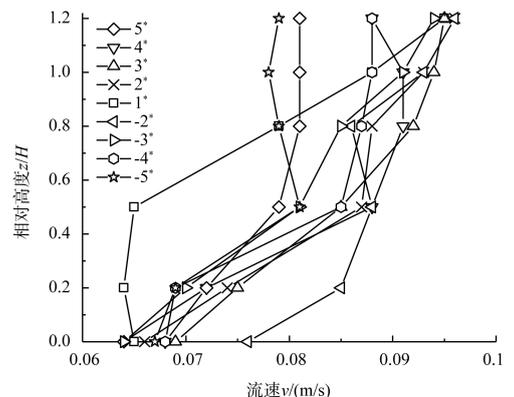
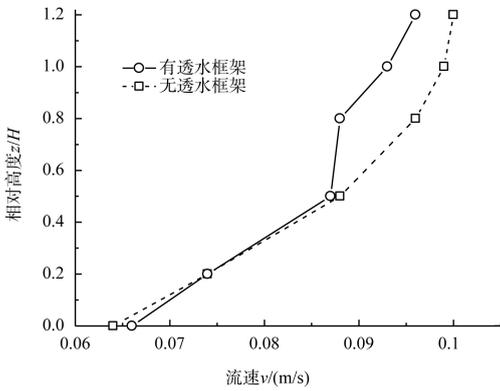
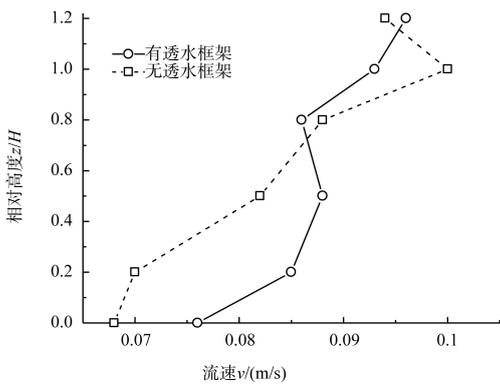


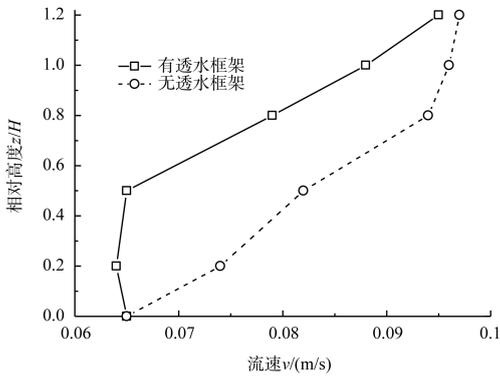
图 4 有透水框架 3# 断面



a) 2°



b) -2°



c) 1°

图5 3#断面与减少明显区域的对比

图6为6#断面位于透空四面体尾流场区,在3\*和-3\*截面上高度0H~0.2H范围内减速现象最明显,其最小值达到0.035 m/s,但在0.2H~0.5H高度范围有明显的线性增速现象,0.5H~0.8H的流速变化不大;2\*和-2\*在高度0.5H~0.8H也有明显的减速段(图7),0.2H~0.5H流速线性减小在0.5H处达到最小,0.5H~0.8H高度范围流速值变化不大,0.8H~1.2H呈线性增

大,在1.2H处达到最大值。此时,4\*、-4\*、5\*和-5\*比较无透水框架时也有明显的增速现象。整体图像体现出3\*和-3\*截面线性增长时对应2\*和-2\*截面线性减小,反之3\*和-3\*截面线性减小时对应2\*和-2\*截面线性增大。4\*、-4\*、5\*和-5\*截面与无透水框架时图像整体趋势变化不大,只是整体图形斜率变大,表现出在高度范围0H~0.8H有明显增长现象,同时可以看出流场对称性不是很强。

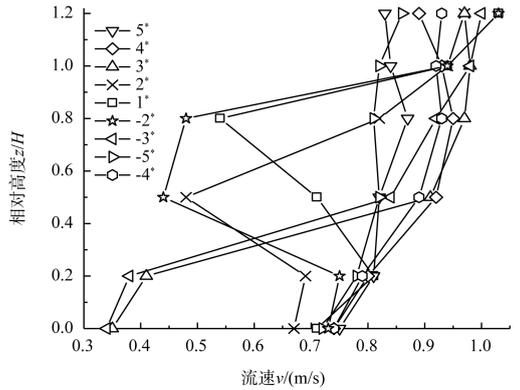


图6 有透水框架6#断面

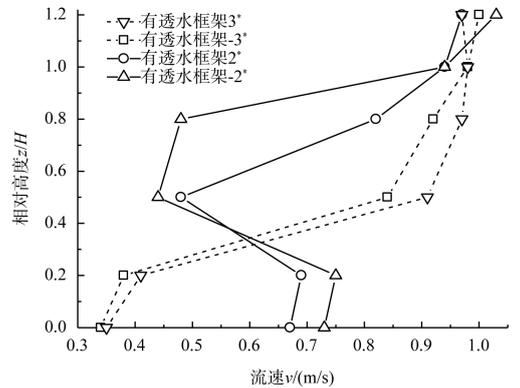


图7 6#断面邻近截面±2°和±3°的对比

13#断面位于透空四面体的下游区域,在3\*和-3\*截面上高度0H~0.2H范围内减速现象最明显,最小值达到0.055 m/s,比6#断面到12#断面有所增加,在0.2H~0.5H高度范围有明显的线性增速现象(图8a)),2\*和-2\*在高度0.5H~0.8H也有明显的减速段,不存在0.2H~0.5H流速线性减小段,而出现0.5H~1.2H高度范围线性增大区间(图8b)),说明在远离透空四面体过程中减速效果在逐渐削弱。此时,4\*、-4\*、5\*和-5\*比

较无透水框架时也有稍许增速现象。整体图像体现出 3\* 和 -3\* 截面 0H~0.2H 流速值变化不大、0.2H~1.2H 高度范围线性增长, 2\* 和 -2\* 截面在 0H~0.5H 流速值变化不大、0.5H~1.2H 高度范围线性增长; 4\*、-4\*、5\* 和 -5\* 截面与无透水框架时图像整体趋势变化不大, 只是整体图形斜率逐渐减小, 表现出在高度范围 0H~0.8H 有增长现象减少, 同时流场的对称性很好。

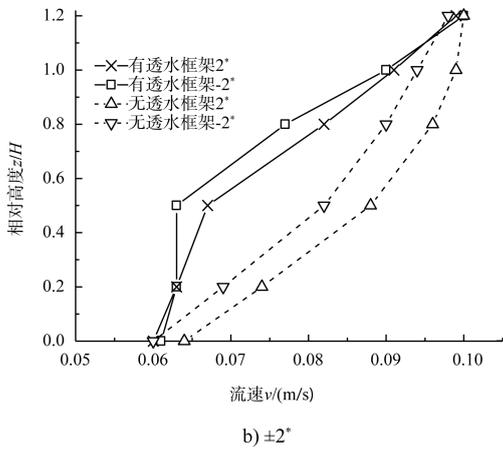
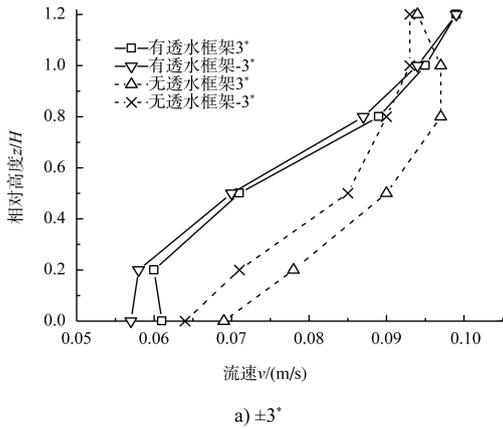


图 8 有无透水框架 13# 断面与截面流速对比

断面 18# 远离四面体布置, 其整体图像和无透水框架时基本一致, 说明此时透水框架对尾流场的影响具有一定的范围, 并且随着距离的增加影响效果越来越小。

2.2 高度方向流速平均减速率沿水流方向变化规律

分析 1\* 截面 (图 9) 可以清楚看出, 1# 和 2# 断面减速率很小, 3# 和 4# 断面减速率明显增大, 在 4# 断面达到最大值 13.46%, 此处位于透空四面体前跟杆件后面, 水流大部分往两侧分流; 5# 和 12# 断面减速率比较稳定, 说明透水框架对水流影

响逐渐减小, 13# 和 18# 断面减速率很小, 说明此时透水框架对水流的作用很小。

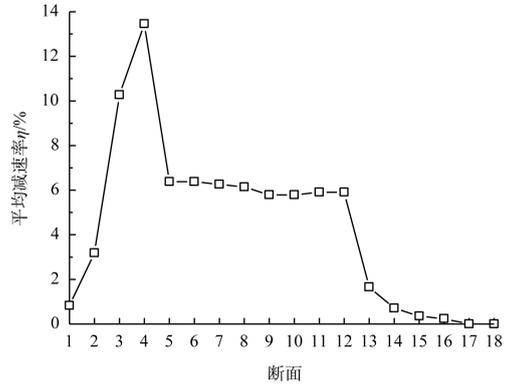


图 9 1\* 截面平均减速率变化规律

对比分析 2\* 和 -2\* 可知 (图 10), 二者图像走势基本一致, 都出现了 1#、3#、4#、5# 断面减速率为负值的现象, 说明透空四面体的存在并不是整个周围区域流速都减小, 分析此现象是由于 1\* 截面在 3# 和 5# 断面流速迅速减小, 水流能量迅速减少, 减少的能量一部分消耗在透空四面体杆件周围摩擦阻力和水流自身的黏滞阻力上, 剩余的能量传递到其邻近的截面 2\* 和 -2\* 上, 从而导致 3# 和 5# 断面流速增长现象; 但 2\* 和 -2\* 流速增大的位置有所不同, 2\* 截面流速增大出现在 3# 断面, 而 -2\* 出现在 4# 断面, 此现象和前面分析的透空四面体在其内部流场对称性不是很强相一致。过了 5# 断面减速率开始增长, 在 9# 断面达到最大值。随后由于远离透空四面体, 减少率开始逐渐减少。16# 和 18# 断面减速率趋近于 0, 说明透空四面体对 2\* 和 -2\* 处流场沿水流方向作用范围截止到 16# 断面处。

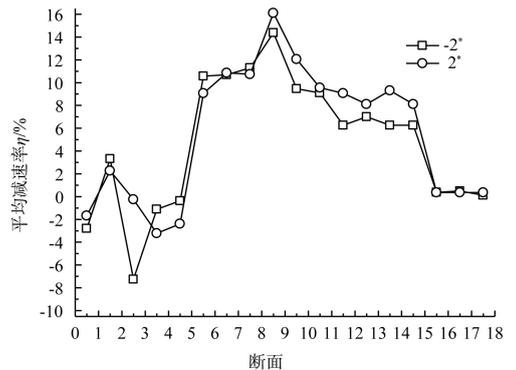


图 10 2\* 与 -2\* 截面平均减速率变化规律

对比分析 3\* 和 -3\* 可知 (图 11), 图像走势一致, 1# 和 4# 断面减速率很小, 说明透空四面体前单根杆件只对其 1\*、2\* 和 -2\* 截面处的水流有相互作用, 而对于 3\* 和 -3\* 处截面的水流作用很小, 说明透空四面体前单根杆件对 3\* 和 -3\* 处流场沿垂直水流方向作用范围截止到 ±3\* 截面处; 在 5# 断面时 3\* 和 -3\* 截面处减速率为负值, 说明此处有明显的流速增大现象, 其原因是此处正是透空四面体尾部两根杆件的前段, 在水流冲击杆件时, 杆件不仅对水流向两侧分流, 并向前段回流, 导致流速整体平均值增大; 6# 断面处减速率最大, 此处正是尾部两根杆件尾流最近处, 对水流的减速作用最明显, 经过 6# 断面减速率开始下降, 17# 和 18# 断面减速率趋近于 0, 说明透空四面体对 3\* 和 -3\* 处流场沿水流方向作用范围截止到 17# 断面处。

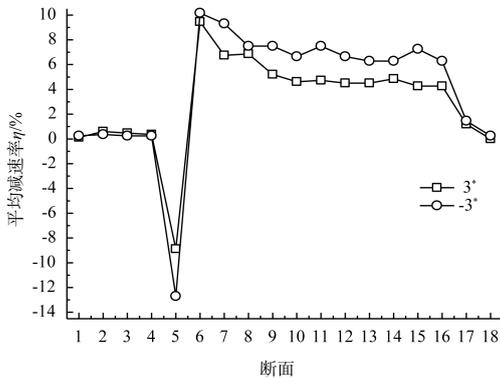


图 11 3\* 与 -3\* 截面平均减速率变化规律

对比分析 4\* 和 -4\* 可知 (图 12), 二者图像走势一致, 1# 和 4# 断面减速率很小, 验证了透空四面体前单根杆件对沿垂直水流方向作用范围截止到 ±3\* 截面处; 在 5# 和 18# 断面 4\* 和 -4\* 截面处减速率为负值, 说明整体有明显的流速增大现象, 6# 和 7# 断面处减速率最小, 说明此处流速明显增大, 其原因由于 3\* 和 -3\* 截面处在 6# 断面减速率最大, 对水流阻水作用明显, 流能量迅速减少, 减少的能量一部分消耗在透空四面体杆件周围摩擦阻力和水流自身的黏滞阻力上, 剩余的能量传递到其邻近的截面 4\* 和 -4\* 断面偏下游 6# 和 7# 断面上, 从而导致 6#、7# 断面在 4\* 和 -4\* 处减速率最小, 流速最大; 随着能量进一步传递, 能量在

不断地消散, 表现出 9#~17# 断面减速率逐渐增大, 在 18# 断面处减速率为 0, 恢复原来流状态。

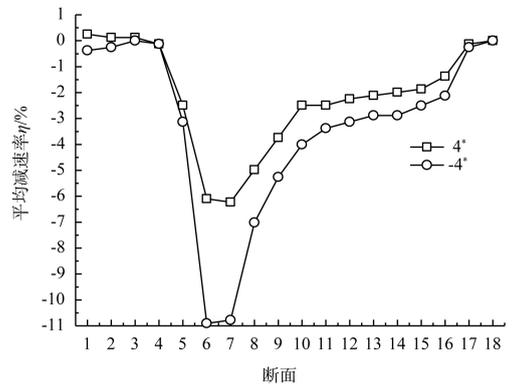


图 12 4\* 与 -4\* 截面平均减速率变化规律

对比分析 4\* 和 -4\* 及 5\* 和 -5\* 可知 (图 12、13), 二组图像走势一致, 只是在减速率最小的断面从 6#、7# 断面上向下游 7#、8# 断面移动, 表现出水流遇到透空四面体后杆件时, 水流绕过杆件, 向两侧分流, 杆件尾部流场流速迅速减小, 能量开始向两侧和下游传递。

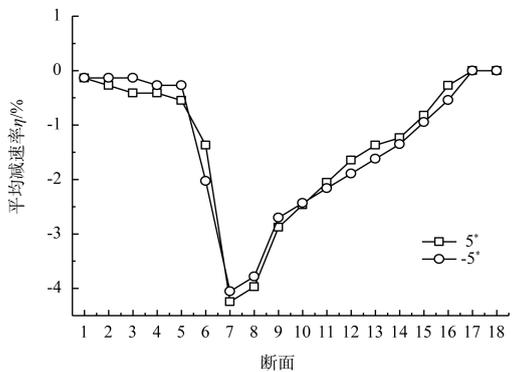


图 13 5\* 与 -5\* 截面平均减速率变化规律

### 3 结论

- 1) 流场对称性方面: 经历了来流区对称, 到透空四面体内部无对称性, 再到近尾流区流场对称性不是很强, 直至无影响区流场恢复原有对称性。
- 2) 流场高度范围减速最明显区域在迎流区 0H~0.2H、内部区 0H~0.5H、尾流区 0H~0.8H。
- 3) 不同截面沿水流方向高度范围流速平均减速率 η 值不同, 表现出透空四面体杆件尾流近处减速率最大, 两侧及前端减速率最小。
- 4) 来流自身能量主要耗散在杆件周围, 剩下的能量向杆件两侧及下游传递。 (下转第 93 页)