

# 黄原胶改性矩形顶管减阻泥浆性能研究\*

郭飞<sup>1</sup>, 付鸿绪<sup>2</sup>, 孟毅欣<sup>1</sup>, 许有俊<sup>2\*</sup>, 李选<sup>2</sup>

(1. 北京市政建设集团有限责任公司, 北京 100089; 2. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:**以膨润土为基础材料, 引入黄原胶作为改性剂, 通过单一变量试验系统研究膨润土、纯碱、羧甲基纤维素钠(CMC)及黄原胶对泥浆性能的影响, 该泥浆广泛适用于砂土、粉土及粉质黏土地层中的矩形顶管工程。结果表明, 黄原胶能显著增强泥浆的粘度和触变性, 抑制水分滤失, 提升泥皮厚度。最优配比为膨润土10%、纯碱0.4%、CMC 0.8%、黄原胶0.5%。将该配比下泥浆与实际工程所用泥浆比较后可知: 泥浆滤失量每30 min由15 cm<sup>3</sup>降至9 cm<sup>3</sup>(降幅40%); 泥皮厚度由1.5 mm升至2.5 mm(增幅66%); 漏斗粘度由80 s升至101.35 s(增幅26%)。研究成果可为类似矩形顶管工程中减阻泥浆的配制与性能优化提供参考。

**关键词:** 顶管减阻泥浆; 黄原胶; 滤失量; 单一变量试验; 泥浆改性

中图分类号: TU59

文献标识码: A

文章编号: 2095-2295(2026)01-0069-06

DOI: 10.16559/j.cnki.2095-2295.2026.01.009

## Study on the performance of xanthan gum-modified rectangular pipe jacking drag-reducing mud

GUO Fei<sup>1</sup>, FU Hongxu<sup>2</sup>, MENG Yixin<sup>1</sup>, XU Youjun<sup>2\*</sup>, LI Xuan<sup>2</sup>

(1. Beijing Municipal Constructions Co., Ltd., Beijing 100048, China; 2. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** To improve the performance of drag-reducing mud in rectangular pipe jacking construction and to overcome the shortcomings of conventional muds—such as high fluid loss, low viscosity, and poor filter cake quality—bentonite was chosen as the base material, with xanthan gum incorporated as a modifier. A single-variable experimental approach was employed to investigate the effects of bentonite, soda ash, sodium carboxymethyl cellulose (CMC), and xanthan gum on mud properties. The optimized mud demonstrates broad applicability in sandy, silty, and silty clay ground conditions commonly encountered in rectangular pipe jacking projects. Results show that xanthan gum markedly increases mud viscosity and thixotropy, reduces fluid loss, and enhances filter cake thickness. The optimal formulation consists of 10% bentonite, 0.4% soda ash, 0.8% CMC, and 0.5% xanthan gum. Compared with mud used in actual field applications, the optimized formulation achieved the following improvements: fluid loss decreased from 15 cm<sup>3</sup> to 9 cm<sup>3</sup> in minutes (a 40% reduction); filter cake thickness increased from 1.5 mm to 2.5 mm (a 66% improvement); and funnel viscosity rose from 80 s to 101.35 s (a 26% increase). These results offer valuable guidance for designing and optimizing drag-reducing mud formulations in similar rectangular pipe jacking applications.

**Key words:** pipe jacking; drag-reducing mud; xanthan gum; filtrate loss; single-factor experiment; mud modification

近年来随着顶管工程的推广应用, 因其空间占用率低、环境污染小、城市运营干扰低<sup>[1]</sup>, 逐步成为

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(52168060)。

作者简介: 郭飞, 男, 博士。

通信作者: 许有俊, 男, 教授, E-mail: xyoun@163.com

收稿日期: 2025-10-13

地铁车站、行人过街通道及综合管廊等工程修建的主要施工方法<sup>[2-3]</sup>。其中大断面、长距离及复杂地层顶进等复杂施工条件逐渐增多<sup>[4]</sup>对于顶管顶进过程中的减阻泥浆性能提出了更高的要求,因此对于现有工程中泥浆表现出的性能缺陷掺入新型高分子材料进行改进是十分有必要的。

针对矩形顶管等工程中的泥浆近年来有众多学者进行了相关研究。王旭等<sup>[5]</sup>通过室内试验及微观试验确定了膨润土、CMC及纯碱对泥浆性能的影响。王越等<sup>[6]</sup>通过室内试验结合数值模拟,从泥浆的在顶进过程中的泥皮厚度评价泥浆性能,明确了泥浆粒径与地层粒径之间的关系。王保田<sup>[7]</sup>针对高含水量泥浆的沉降特性以及自重沉积过程中的物理学特性进行系统研究,针对淤泥化学改良机理进行了开创性研究。高增奎等<sup>[8]</sup>详细分析了减摩泥浆中膨润土种类及含量与泥浆的漏斗粘度、失水量和析水率等指标之间的关系。胡凯等<sup>[9]</sup>在泥浆中掺入聚丙烯酰胺、羟甲基纤维素钠和温轮胶对减阻泥浆工作性能、流变性能与触变性能等指标的影响。徐煌华等<sup>[10]</sup>对在地下连续墙中对施工中的减摩泥浆进行研究,得出泥浆重度与槽壁稳性之间的关系。现有研究中黄原胶作为高分子改性材料掺入传统泥浆后最佳配比未明确,掺入后的泥浆性能提升围观作用机理亟待研究。CHANG等<sup>[11]</sup>通过室内试验验证了黄原胶与地层之间的相互作用,明确了黄原胶的保水性,为其在顶管工程减摩泥浆中的使用提供了理论依据。根据现有研究可知,为应对愈加复杂的施工环境,对泥浆进行改进是必然的研究趋势,而针对黄原胶改性的矩形顶管减摩泥浆缺乏配比研究,针对泥浆中的黄原胶掺量亟待明确。

在地下工程推行“资源节约、环境友好”的建设理念背景下,向注浆材料内添加高分子材料可极大改善泥浆性能。黄原胶作为一种卓越的生物聚合物,具备极强的增稠性与低浓度高粘度,并且具有良好的兼容性与耐候性<sup>[12-13]</sup>,使用其改性的减阻泥浆具备良好的推广前景。本研究通过单一掺量试验确定了水基黄原胶改性泥浆的泥浆配比。

## 1 工程概况

依托包头市八一公园地下人行过街通道项目,针对顶管顶进过程中图1所示出现的“冒浆”现象,通过改进泥浆配比,加入新型高分子材料对泥浆性能进行改进,介绍了该种泥浆的配制与性能,以满足

工程所需。

八一公园北门地下过街通道北侧出入口位于包院宾馆南侧朝西,南侧出入口位于八一公园主入口北侧朝东。中间过街段采用顶管法施工,使用土压平衡顶管机进行顶进。顶进长度约44.6 m,通道内结构内径为5.5 m × 3.3 m,外尺寸为6.5 m × 4.3 m。顶管通道平均覆土深度为4.8 m,穿越底层以砂土、粉土及粉质粘土为主,表层普遍分布新近堆积成因人工填土。被下穿的钢铁大街属于城市主干道,机动车交通流量大,设计车速高,沿街两侧埋设地下管线多,街道两侧人流量大,因此工程具有较大的施工风险,需要泥浆具有良好的粘度和较低的滤失量。

顶进过程中使用的泥浆为传统泥浆,为施工方根据过往施工案例按经验配置,具体配比为:膨润土:碳酸钠:CMC(羧甲基纤维素钠):水=6%:0.4%:0.6%:93%,泥浆具体性能如表1所示。该传统泥浆注入地层后会在管节表面形成泥浆套,通过将管土摩擦由干摩擦变为湿摩擦以减小顶进时的阻力。泥浆中添加的膨润土遇水膨胀起到减摩以及支撑土体的作用,纯碱对膨润土进行钠化改性,聚丙烯酰胺对泥浆进行增稠并降低滤失性。从泥浆性能角度分析,工程中出现的“冒浆”病害原因为膨润土含量(6%)较少而导致的泥浆套骨架薄弱,CMC含量(0.6%)不足导致的泥浆控水能力不足,最终在顶管顶进扰动时未形成高质量稳定泥浆套,并直接诱发了“冒浆”事故。为对施工中出现的“冒浆”病害进行针对性研究,使用内蒙古地区特色高分子材料-黄原胶对泥浆进行改进,以期为后续工程提供预防性解决方案。



图1 八一公园顶进时“冒浆”现场照

Fig. 1 Sitephoto of “slurry pumping” during the advancement at Baiyi Park

表1 施工泥浆材料性能参数

Table 1 Performance parameters of construction slurry materials

漏斗粘度 /s	泥皮厚度 /mm	滤失量 /( $\text{cm}^3 \cdot 30 \text{ min}^{-1}$ )	比重	pH 值	含沙量 /%	吸水率 /%
80	1.5	13	1.4	8	1.45	1

## 2 试验准备

### 2.1 泥浆材料与试验仪器

泥浆主要采用膨润土与水混合而成,为改善泥浆的滤失量以及粘聚力,在泥浆中创新的加入高分子材料黄原胶改善泥浆性能。配置比例为膨润土:水:其他参加剂=1:8:1,研究主要采用以下5种材料:

1)膨润土:采用稳定性较高,具有良好吸附性、膨胀性、分散性和阳离子交换性的河南华畜牌钻井用纳基膨润土。

2)碳酸钠:采用国药集团化学试剂有限公司生产的高纯度无水碳酸钠,通过沉淀泥浆中的钙、镁离子改善泥浆的水化性能。

3)CMC:采用上海长光企业发展有限公司生产的低粘度 CMC,添加入泥浆中作为降滤失剂。

4)黄原胶:采用工程所在省份生产的黄原胶作为添加剂,对泥浆的粘度、流变性、稳定性以及悬浮性进行改良。

5)清水。

本次试验所用的仪器主要有 ZNS-2A 型中压失水仪、MK-03 型直读式六速旋转粘度计、马氏漏斗粘度计、泥浆搅拌机,以及量筒量杯等常用试验器材。依据已有的工程泥浆制备经验以及岩土工程钻井液性能指标,文中通过以下性能指标对泥浆性能进行评价:滤失量、泥皮厚度、静/动切力、漏斗粘度、析水率以及流动性系数。

### 2.2 泥浆配比试验设计

首先根据膨润土、碳酸钠及 CMC 3 种材料配置泥浆,设置初始配比为膨润土:纯碱:CMC = 10%:0.1%:0.2%,此时通过单一变量试验来分析泥浆性能会受到各组分含量变化的影响规律,具体试验分组见表 2~4。

在确定 3 种材料的最佳配比后以表 5 所示分组在泥浆中添加高分子材料黄原胶,观察不同质量分数的黄原胶对泥浆性能的影响。

表2 CMC 碳酸钠膨润土泥浆试验分组设计 1

Table 2 CMC sodium carbonate expansive soil slurry test group design 1

组号	膨润土 /%	碳酸钠 /%	CMC /%	水(余量) /%
A1	4	0.1	0.2	95.7
A2	6	0.1	0.2	93.7
A3	8	0.1	0.2	91.7
A4	10	0.1	0.2	89.7
A5	12	0.1	0.2	87.7
A6	14	0.1	0.2	85.7

表3 CMC 碳酸钠膨润土泥浆试验分组设计 2

Table 3 CMC sodium carbonate expansive soil slurry test group design 2

组号	膨润土 /%	碳酸钠 /%	CMC /%	水(余量) /%
B1	10	0.1	0.2	89.7
B2	10	0.2	0.2	89.6
B3	10	0.3	0.2	89.5
B4	10	0.4	0.2	89.4
B5	10	0.5	0.2	89.3
B6	10	0.6	0.2	89.2

表4 CMC 碳酸钠膨润土泥浆试验分组设计 3

Table 4 CMC sodium carbonate expansive soil slurry test group design 3

组号	膨润土 /%	碳酸钠 /%	CMC /%	水(余量) /%
C1	10	0.4	0.2	89.4
C2	10	0.4	0.4	89.2
C3	10	0.4	0.6	89
C4	10	0.4	0.8	88.8
C5	10	0.4	1.0	88.6
C6	10	0.4	1.2	88.4

表5 高分子泥浆试验分组

Table 5 Polymer slurry test grouping

组号	膨润土 /%	碳酸钠 /%	CMC /%	黄原胶	水(余量) /%
D1	10	0.4	0.8	0.1	88.7
D2	10	0.4	0.8	0.2	88.6
D3	10	0.4	0.8	0.3	88.5
D4	10	0.4	0.8	0.4	88.4
D5	10	0.4	0.8	0.5	88.3
D6	10	0.4	0.8	0.6	88.2

### 3 结果与分析

为初步确定高分子材料加入时的泥浆配合比,将前3组试验结果整理如图2~5所示,研究各原料对泥浆性能的影响。

如图2所示,随着膨润土含量从4%增至14%,泥浆的漏斗粘度由24.02 s逐步提升至67.8 s,泥浆滤失量每30 min由15 cm<sup>3</sup>降至为9 cm<sup>3</sup>,析水率由9.47%降至0%。当膨润土含量达到10%时,继续增加其含量对滤失量与析水率的改善效果显著减弱。分析认为,膨润土作为泥浆的主要固相成分,其颗粒在水相中形成空间网络结构,有效提升了泥浆的粘度和悬浮稳定性,从而抑制了水分析出。然而当膨润土含量超过10%后,泥浆内部结构趋于饱和,进一步增加膨润土对性能的提升有限,反而可能因过度稠化影响其流动性。故后续实验组确定膨润土质量分数为10%。

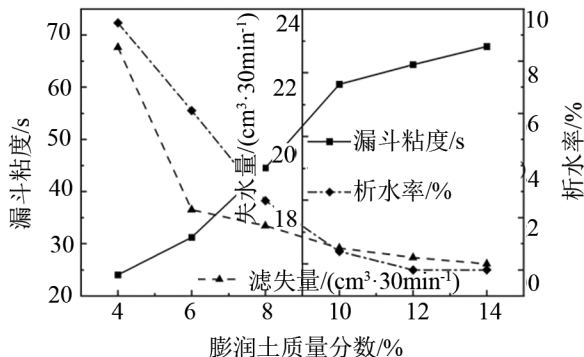


图2 膨润土含量-泥浆性能影响曲线

Fig. 2 Bentonite content-slurry performance influence curve

如图3所示,随着纯碱含量从0.1%增至0.6%,泥浆的滤失量每30 min由17.5 cm<sup>3</sup>降至12.0 cm<sup>3</sup>,漏斗粘度由38.28 s降至32.02 s,析水率由1.3%降至0%。纯碱的加入促进了膨润土的钠化改性,增强了其水化分散能力,从而优化了泥浆的稳定性和滤失性能。但当纯碱含量超过0.4%后,泥浆粘度和切力出现下降趋势,说明过量纯碱破坏泥浆的胶体结构,削弱其承载与悬浮能力。

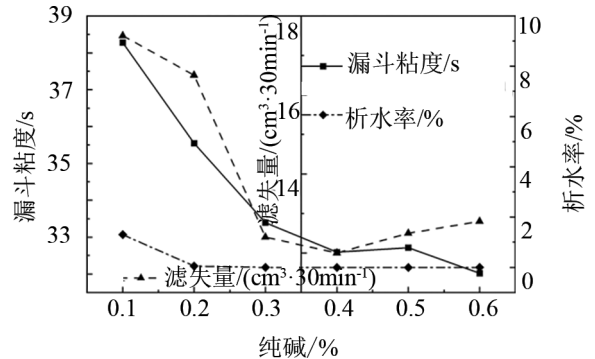


图3 纯碱含量-泥浆性能影响曲线

Fig. 3 Soda ash content-slurry performance influence curve

如图4所示,CMC的加入显著增强了泥浆的粘度和结构强度。随着CMC含量从0.2%增至1.2%,泥浆的漏斗粘度由30.83 s提升至35.63 s,泥浆滤失量每30 min由27.0 cm<sup>3</sup>降至13.8 cm<sup>3</sup>,析水率由5.4%降至0%。CMC作为高分子增稠剂,其分子链在水中伸展并形成氢键网络,有效提升了泥浆的持水性和造壁性。当CMC含量达到0.8%时,各项性能指标趋于最优,继续增加CMC对滤失量的改善不再显著,反而可能导致泥浆过于粘稠,影响其施工流动性。

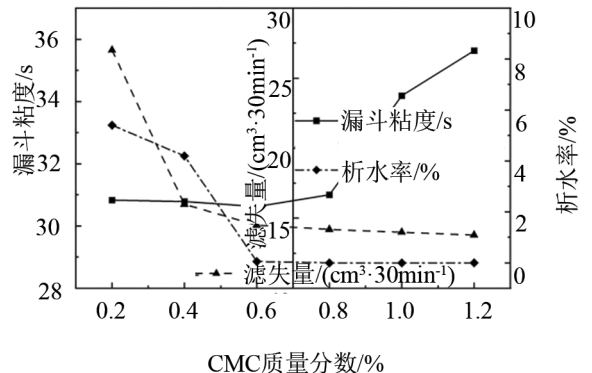


图4 CMC含量-泥浆性能影响曲线

Fig. 4 CMC content-slurry performance influence curve

基于上述试验结果,在结合经济性综合考虑后将取初始配比为膨润土:纯碱:CMC = 10%:0.4%:0.8%。在确定初始配比后加入高分子材料黄原胶,观察黄原胶含量对泥浆性能的影响将试验结果整理于图5中,泥浆漏斗随着黄原胶质量分数的增加粘度逐渐增大,泥浆滤失量随黄原胶质量分数的增加逐渐减小,析水率在添加黄原胶后始终保持为0。值得注意的是,在黄原胶含量达到0.5%后,各项指标并未继续因黄原胶含量的添加而发生明显改变,因此在后续工程推广使用中可将黄原胶添加量确定在0.5%左右。

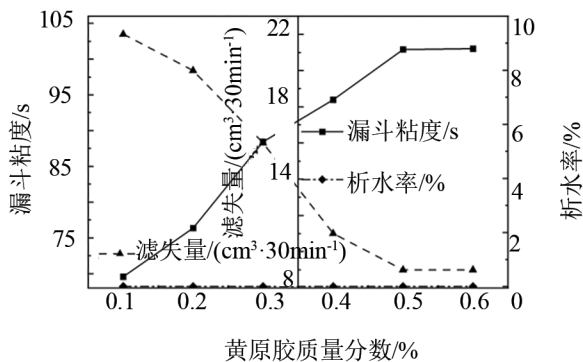


图5 黄原胶含量-泥浆性能影响曲线

Fig.5 Huangyuan gum content-slurry performance influence curve

通过试验证明,在加入黄原胶后泥浆的率失量由15%降至9%(降幅40%),说明泥浆的造壁性显著增强;泥皮厚度由1.5 mm增至2.5 mm(增幅66%),泥浆外观呈“果冻型”,说明该型泥浆在阻止浆液向土体渗透性能有显著提升;漏斗粘度由80 s增至101.35 s(增幅26%),动切力与静切力显著提升,这源于黄原胶独特的假塑性及交联效应,赋予泥浆良好的悬浮能力和触变性;该特性尤其有利于顶管暂停期间维持泥浆套的结构完整,防止沉降。当黄原胶含量达到0.5%时,泥浆中形成的空间网络结构趋于完善,性能达到最佳状态;继续增加黄原胶,其分子链相互重叠,新增作用位点有限,对性能的提升幅度显著减小,表明其改性效果存在明确的饱和点。

## 4 结论

本研究通过单一变量试验系统评价了黄原胶改性减阻泥浆的性能,确定其最优配比,主要结论如

下:

1) 通过单一变量试验明确了膨润土、纯碱、CMC与黄原胶对泥浆性能的影响规律,确定了各组分适宜掺量范围,为高性能减阻泥浆的配制提供了量化依据。

2) 黄原胶能有效提升泥浆粘度与触变性,显著抑制水分滤失并增强泥皮厚度,从而改善泥浆综合性能。

3) 通过配比优化,提出了黄原胶改性泥浆的最优配合比(膨润土10%、纯碱0.4%、CMC0.8%、黄原胶0.5%),该配比显著提升了泥浆综合性能,滤失量降低40%,泥皮厚度增加66%,漏斗粘度提高26%,有效应对了复杂地层中泥浆套稳定性不足的问题。

本研究存在以下两方面局限:其一,未对泥浆在长期动态循环条件下的性能演变进行系统测试,不利于该泥浆直接应用于实际工程;其二,未明确泥浆在实际工程中应用的效果。未来可结合现场实际工况,开展泥浆在循环剪切作用下的长期耐久性试验,并依托具体矩形顶管工程项目进行现场中试验验证,系统监测泥浆套的形态保持与摩阻力变化,从而全面评估黄原胶改性泥浆在不同温度、压力及地质环境中的稳定性与适应性,为其工程推广应用提供坚实的数据支撑。

## 参考文献:

- [1] 王宝. 市政工程建设中的顶管工程技术应用研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(4): 82.
- [2] 贺涛涛. 市政给排水施工中顶管施工技术应用研究[J]. 绿色环保建材, 2018, 12(9): 181.
- [3] 安关峰. 矩形顶管工程技术指南[M]. 北京: 北京建筑工业出版社, 2021: 6.
- [4] 刘常利, 张占胜, 张浩, 等. 超大断面矩形顶管隧道触变泥浆减阻控制技术[J]. 建筑机械化, 2022, 43(5): 43.
- [5] 王旭, 李超, 刘宇, 等. 长距离岩石顶管泥浆配比优化及减摩效果分析[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(3): 1235.
- [6] 王越, 任振, 王少萍, 等. 砂砾地层泥浆渗透成膜过程仿真研究[J]. 科技和产业, 2023, 23(21): 227.
- [7] 王保田. 高含水率淤泥的固结特性与改良技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [8] 高增奎, 张睿钦, 王先甲, 等. 膨润土种类及黄原胶含量对减阻泥浆性能的影响[J]. 土木工程与管理学报, 2024, 41(1): 19.

- [9] 胡凯,李文,李胜,等. 不同外加剂对顶管施工用减阻泥浆的性能影响[J]. 建筑施工,2022,44(4):842.
- [10] 徐煌华,崔广芹. 承压水地层地下连续墙成槽施工稳定性研究[J]. 内蒙古科技大学学报,2023,42(3):301.
- [11] CHANG I L, CHO G C, TRAN T P A. Water-retention properties of xanthan-gum-biopolymer-treated soils[J]. *Environmental Geotechnics*,2023,1:44.
- [12] 李选. 矩形顶管摩阻力特性及减阻泥浆性能试验研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2024.
- [13] 楼佳浩. 砂砾石地层矩形顶管减摩泥浆成套质量与泥浆固化处理研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2025.

(责任编辑:张利萍)

(上接第60页)

- [9] ZHANG C, YANG T, YANG J. Image recognition of wind turbine blade defects using attention-based mobile-Netv1-YOLOv4 and transfer learning[J]. *Sensors*,2022,22(16):6009.
- [10] HUANG C, CHEN M, WANG L. Semi-supervised surface defect detection of wind turbine blades with YOLOv4[J]. *Global Energy Interconnection*, 2024,7(3):284.
- [11] DENG L, GUO Y, CHAI B. Defect detection on a wind turbine blade based on digital image processing[J]. *Processes*,2021,9(8):1452.
- [12] ZHANG L, FENG Z. Thermal and RGB images work better together in wind turbine damage detection [J]. *International Journal of Computers*,2025,23(4):3752.
- [13] LI X, HE Y Z, WANG H J, et al. Thermal inspection of subsurface defects in wind turbine blade segments under the natural solar condition[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,2024,71(11):11488.
- [14] LIU C, ZHANG C, GE X, et al. MMC-YOLO: a light-weight model for real-time detection of geometric symmetry-breaking defects in wind turbine blades[J]. *Symmetry*,2025,17(8):1183.
- [15] DING X, ZHANG X, HAN J, et al. Diverse branch block: building a convolution as an Inception-like unit [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*,2022,41(12):8837.
- [16] LI H, LI J, WEI H, et al. Slim-neck by GSConv: A lightweight-design for real-time detector architectures [J]. *Journal of Real-Time Image Processing*,2024,21(3):1.
- [17] LIN T Y, DOLLÁR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection[C]//*Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. Honolulu: IEEE,2017:2117.
- [18] LIU S, QI L, QIN H, et al. Path aggregation network for instance segmentation[C]//*Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. Salt Lake City, UT: IEEE,2018:8759.

(责任编辑:师宝萍)