

# 装配式铝合金人行天桥结构设计及性能分析\*

Structural Design and Performance Assessment of Prefabricated Aluminum Pedestrian Bridge

付志君<sup>1,2</sup>, 罗柱<sup>1</sup>, 冯鹏<sup>2</sup>

(1. 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510500; 2. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084)

**摘要:** 铝合金人行天桥因质量轻、强度高、经久耐用等优势而得到广泛应用, 传统的天桥结构设计方法存在分析模型过度简化导致结果偏差较大的问题。基于此, 本文给出了一种装配式铝合金人行天桥的结构设计方法, 用于提高结构设计分析结果的准确性和可靠性。以珠海市某天桥为例, 建立该天桥的精细化有限元分析模型, 并对其强度、刚度和自振频率进行验算。结果表明: 基本组合荷载作用下桁架梁的应力最大, 且最大拉应力和最大压应力分别为设计强度的 15.5% 和 14%, 人群荷载与恒载作用下桁架梁的应力接近; 天桥的最大挠度为最大竖向挠度允许值的 28%, 天桥的宽跨比是最小允许宽跨比的 3.8 倍; 天桥侧向和竖向固有频率分别为最小允许值的 1.92 倍和 1.87 倍, 均满足规范要求。

**关键词:** 装配式; 铝合金; 天桥; 结构设计; 性能

中图分类号: TU997

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 04-0117-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.04.021

FU Zhijun<sup>1,2</sup>, LUO Zhu<sup>1</sup>, FENG Peng<sup>2</sup>

(1. Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co., Ltd., Guangzhou 510500, China;  
2. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Aluminum alloy pedestrian overpasses have been widely used due to their advantages of light weight, high strength, and durability. However, traditional bridge structure design methods suffer from the problem of excessive simplification of analysis models, leading to significant deviation in results. To this end, this paper introduces a method for the structural design of the prefabricated aluminum pedestrian bridge. Taking a certain pedestrian bridge in Zhuhai as an example, a refined finite element analysis model of the bridge was established, and its strength, stiffness, and natural frequency were verified. The results showed that the stress of the truss beam was the highest, and the maximum tensile stress and maximum compressive stress were 15.5% and 14% of the design strength respectively, under the basic combination load. The stress of the truss beam under crowd load and dead load was similar; The maximum deflection of the overpass was 28% of the maximum allowable vertical deflection, and the width to span ratio of the overpass was 3.8 times the minimum allowable width to span ratio; The lateral and vertical natural frequencies of the pedestrian bridge were 1.92 times and 1.87 times the minimum allowable values, respectively, all of which met the requirements of the specifications.

**Keywords:** prefabricated; aluminum; bridge; structural design; performance

\* 基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目资助 (U2106219); 国家自然科学基金面上项目资助 (51978379)。

作者简介: 付志君 (1990—), 男, 博士 (后), 研究方向: 韧性城市、智慧水利等。

收稿日期: 2023-12-02

## 道桥技术

## 0 引言

随着城市建设的发展,过街人行天桥的架设也越来越多。轻型结构人行天桥主要包括两大类:铝合金和钢结构<sup>[1-4]</sup>。与钢结构相比,铝合金人行天桥具有持久耐用、防腐维护成本低、质量轻、强度高、安装高效、造型灵活多变、绿色环保、回收利用率高等特点,故铝合金人行天桥在城市建设中逐渐受到推广应用。

国内外学者通过理论分析、节点试验、数值分析等手段对天桥性能展开了初步研究,并得到一些成果。Dey 等<sup>[5]</sup>对三座天桥的振动特性和性能展开试验研究,对比分析了基于天桥动力响应预测模型的模拟结果与试验结果,结果表明,这些预测模型仅仅适用于人行基频与桥梁自振频率相同的情况;Wen 等<sup>[6]</sup>详细介绍了一座两跨连续铝合金桁架拱桥的结构设计,包括选取材料类型、截面设计、构件连接和桥梁支座设计,同时,对比分析了铝合金和钢结构人行天桥的性能,结果表明铝合金人行天桥对行人质量更加敏感,结构设计中考考虑行人质量是非常必要的;张彪<sup>[7]</sup>采取试验与数值分析相结合的方法,对铝合金桥面板的疲劳性能展开研究,对比不同截面桥面板的疲劳极限,评估其疲劳损失及寿命。

虽然国内外学者对天桥进行了一些研究,但有限元分析模型中大多未考虑材料的本构关系、支座刚度等的影响。本文建立天桥的精细化有限元分析模型,对强度、刚度和自振频率进行验算,验证了本文设计铝合金人行天桥的合理性。

## 1 人行天桥设计

## 1.1 工程概况与结构设计

珠海市迎宾北路过街铝合金人行天桥,跨越迎宾北路,桥位道路西侧紧邻山体,东侧为居民生活区。根据 CJJ 69—1995《城市人行天桥与人行地道技术规范》<sup>[8]</sup>确定作用于天桥上的人行荷载。天桥设计基准期为 50 年,设计使用年限为 30 年,桥下净空高度需满足最低 5 m 要求。天桥设计安全等级为一级,结构设计重要性系数为 1.1,耐久性标准环境类别 I 设计,抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度为

0.1g, E1 地震作用的调整系数为 0.35。设计基本风速为 50 年一遇、10 m 高度处、10 min 平均最大风速  $V_{10} = 37.4 \text{ m/s}$ 。

对天桥进行结构设计,主桥横向布置为 0.37 m (桁架) + 4.2 m (人行道) + 0.37 m (桁架)。主桥上部结构采用 2 m × 23.5 m 跨径的连续铝合金桁架梁。其中,桥面(含人行道及栏杆扶手)宽 4.2 m,桥面两侧分别布置一片高 2.3 m 的铝合金纵向主桁架,两片主桁架间的横向连接系采用高 1.2 m 的铝合金桁架,其上铺设铝合金挤压板形成桥面。主梁桁架在中、边墩位置通过支座支撑于盖梁上。主桥桥面纵坡为双向 2% 人字坡,结构本身设计自带纵坡形式;主桥面横坡为 0。天桥如图 1 所示,截面尺寸见表 1。

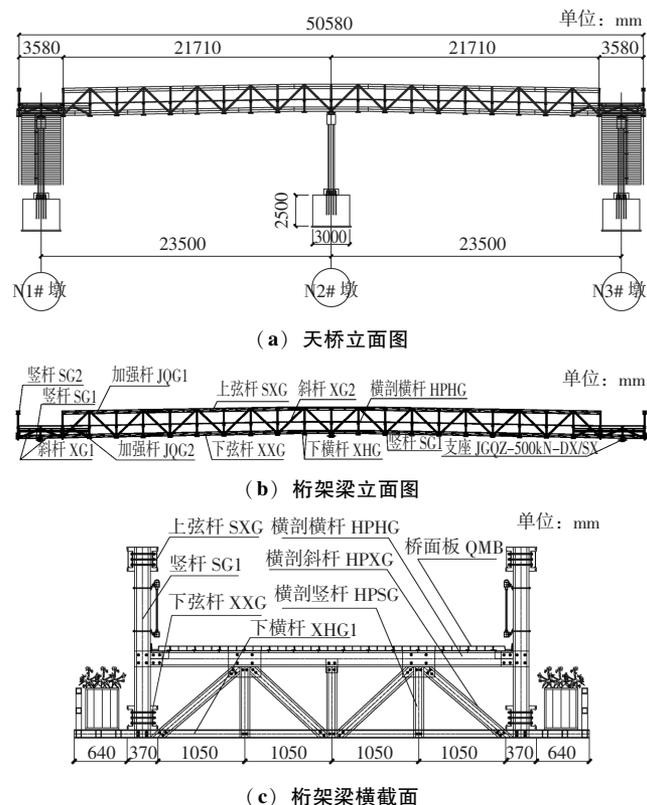


图 1 天桥结构设计

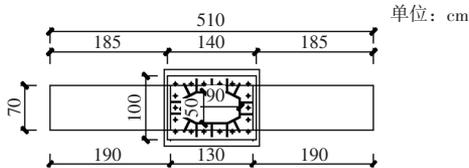
Fig. 1 Structural design of pedestrian bridge

主桥中墩、边墩均采用钢结构盖梁和立柱,钢墩顶与盖梁固结,内灌 C35 混凝土,下接 4.3 m × 3.0 m × 2.5 m 钢筋混凝土扩大基础。其中 N3 墩底因中分化层较深,为保证地基承载力满足要求,承台下接 2 根直径 1 m 钻孔灌注桩。主桥墩柱如图 2 所示。

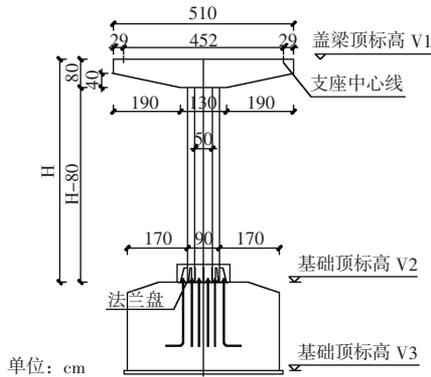
表 1 构件截面尺寸汇总

Table 1 Summary of components cross-sectional dimensions /mm

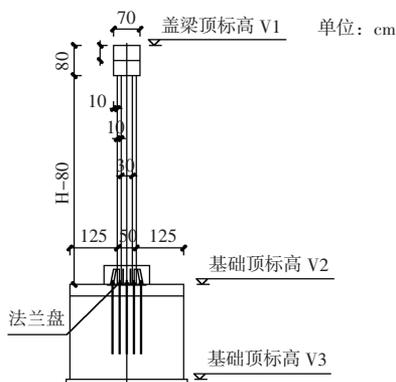
构件编号	长度	构件尺寸	壁厚
SXG		290 × 90 × 21 × 46	46/21
XXG		290 × 90 × 21 × 46	46/21
SG1	1050	190 × 120 × 20	20
SG2	2300	190 × 120 × 20	20
XG1	1900	190 × 120 × 20	20
XG2	3100	190 × 120 × 20	20
JQG1	5871	290 × 90 × 21 × 46	46/21
JQG2	1611	190 × 120 × 20	20
XHG	6220	100 × 100 × 10	10
HPHG	4200	190 × 120 × 20	20
HPSG	890	120 × 120 × 20	20
HPXG	1400	120 × 120 × 20	20



(a) 平面图



(b) 横桥向立面图



(c) 纵桥向立面图

图 2 主桥桥墩

Fig. 2 Main bridge pier

## 1.2 材料选用

盖梁、立柱均采用 (Q345qC) 钢材, 材料化学

成分及机械性能应符合 GB/T 714—2015 《桥梁用结构钢》<sup>[9]</sup> 中的有关规定。桥面板和梯道踏步板采用 T5 铝合金, 其他主要受力杆件采用 T6 铝合金<sup>[10]</sup>, 其力学性能和物理性能分别见表 2 和表 3。主桥支座采用球型支座, 其性能符合 GB/T 32836—2016 《建筑钢结构球型支座》<sup>[11]</sup> 的要求。梯道主桥支座采用板式橡胶支座。

表 2 铝合金材料力学性能

Table 2 Mechanical property of aluminum alloy material

铝合金类型	屈服强度 /MPa	极限承载力 /MPa	焊接影响区强度折减系数
6063-T5	150	190	0.5
6082-T6	260	310	0.5

表 3 铝合金材料物理性能

Table 3 Physical property of aluminum alloy material

性能指标	取值	备注
密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	2710	
弹性模量/GPa	69	
切变模量/GPa	25	
线性膨胀系数/℃	$2.3 \times 10^{-5}$	20 ~ 1000 ℃
热传导性 / [W / (m · K)]	180	200 ℃
比热容 / [J / (kg · K)]	897	0 ~ 1000 ℃
电阻率 / (Ω · m)	$3.8 \times 10^{-8}$	200 ℃
电导率 / (% IACS)	46	200 ℃
熔解范围/℃	580 ~ 650	

## 2 建模与结构分析

### 2.1 有限元建模

铝合金人行天桥为两跨简支梁桥, 选取桁架梁及桥墩为分析对象, 基于 Midas Civil 有限分析软件, 建立铝合金人行天桥的有限元分析模型。桁架梁中的上弦杆、下横杆、横剖斜杆等采用梁单元模拟, 桥面板采用板单元模拟。构件之间的连接采用刚接。根据 GB/T 32836—2016 《建筑钢结构球型支座》<sup>[11]</sup> 确定桥梁支座的平动刚度和转动刚度等。桥墩中钢立柱、钢盖梁、加劲板、立柱混凝土等均采用纤维截面, 其中混凝土本构可参考 GB/T 50010—2010 《混凝土结构设计规范》<sup>[12]</sup>, 钢材本构关系采用各项同性应变硬化的 Giuffrè–Menegotto–Pinto 模型。由于主桥桥墩基础采用钢筋混凝土扩大基础, 故可将桥墩与基础视为固接。基于以上讨论, 建立铝合金人行天桥三维有限元分析模型, 如图 3 所示。

## 道桥技术

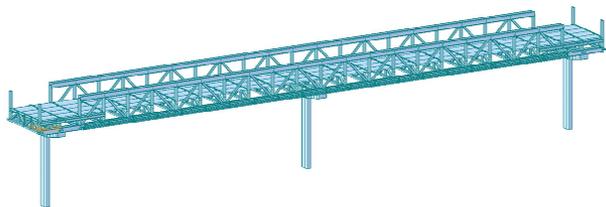


图3 有限元分析模型

Fig. 3 Finite element analysis model of the studied pedestrian bridge

## 2.2 强度验算

桁架梁强度验算需考虑恒载（自重、二期荷载等）、风荷载和人群荷载。天桥为简支梁桥，设置的活动支座及伸缩缝允许其自由伸缩，故暂不考虑整体升降温对构件内力的影响。珠海市风荷载按 50 年一遇、10 m 高度处、10 min 平均最大风速  $V_{10} = 37.4 \text{ m/s}$  选取。根据 CJJ 11—2011 《城市桥梁设计规范》<sup>[12]</sup> 选取人群荷载。采用以下基本组合进行强度验算：

$$LG = 1.1 \times (1.2 \times DL + 1.1 \times 0.75WL + 1.4 \times PL) \quad (1)$$

$$PL = \left[ 4.5 - 2 \times \frac{L-20}{80} \right] \times \frac{20 - \omega_p}{20} \quad (2)$$

式中： $DL$  为恒载； $WL$  为风荷载； $PL$  为人群荷载； $L$  为桁架梁的总长度； $\omega_p$  为半幅天桥桥面宽度。分别计算结构在恒载、风荷载、人群荷载和基本组合荷载作用下的应力，结果见表 4。

表4 桁架梁应力汇总

Table 4 Stress summary of the truss girder /MPa

荷载	最大拉应力	最大压应力
恒载	10.54	-10.69
人群荷载	10.18	-11.23
风荷载	6.02	-6.02
基本组合	33.72	-30.43

由表可知，基本组合荷载作用下构件的应力最大，最大拉应力和最大压力分别为 33.72 和 30.43 MPa。由 T/CECS 471—2017 《铝合金人行天桥技术规程》<sup>[10]</sup> 可知，桁架梁中采用 6082-T6 铝合金的抗拉（压）强度设计值为 217 MPa，即最大拉应力和最大压应力分别为铝合金抗拉（压）设计强度的 15.5% 和 14%，桁架梁设计强度冗余度大，满足强度要求。

人群荷载作用下的最大拉应力和最大压应力分别是恒载作用下应力的 0.966 倍和 1.05 倍，该结果可归因于铝合金桁架梁自重较小，恒载作用下的应力跟人群荷载作用下的应力接近，这与传统的钢结

构桥梁区别较大。风荷载作用下的最大拉应力和最大压应力分别为恒载作用下应力的 57.1% 和 56.3%，该结果进一步说明，铝合金桁架梁自重较轻，结构设计中风荷载作用不可忽略。

## 2.3 刚度验算

为保证行人行走在铝合金人行天桥上的舒适性，对其刚度进行验算。对于铝合金桁架梁桥，现行标准 CJJ 69—1995 《城市人行天桥与人行地道技术规范》<sup>[8]</sup> 中规定，在人群荷载作用下，其竖向最大挠度不超过  $L/600$ （ $L$  为计算跨径）。人群荷载作用下的最大竖向挠度允许值为 39.17 mm。恒载和人群荷载作用下，桁架梁的挠度分别为 8.15 和 10.97 mm，铝合金人行天桥最大挠度为最大竖向挠度允许值的 28%，满足规范要求，即舒适性得到了保证。CJJ 69—1995 《城市人行天桥与人行地道技术规范》<sup>[8]</sup> 中也规定，当恒载与人群荷载同时作用下，若桁架梁最大竖向挠度不超过  $L/1600$ ，可不设置预拱度。经计算，恒载与人群荷载同时作用下铝合金桁架梁的挠度是不设预拱度时最大竖向挠度允许值的 1.3 倍，即需设置预拱度，结构设计中考虑了预拱度。需注意，对于铝合金人行天桥，CJJ 69—1995 《城市人行天桥与人行地道技术规范》<sup>[8]</sup> 中规定，桁架简支梁和桁架连续梁的边跨，宽度与跨度之比不宜小于 1/20。铝合金桁架梁的宽度是跨度的 0.19，满足规范要求。

## 2.4 自振频率验算

CJJ 69—1995 《城市人行天桥与人行地道技术规范》<sup>[8]</sup> 中规定，对于铝合金人行天桥，侧向和竖向固有频率分别不得小于 1.2 和 3 Hz。有阻尼体系与无阻尼体系的自振频率存在以下关系：

$$\omega_d = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (3)$$

式中： $\omega_d$  为有阻尼体系的自振频率； $\omega$  为无阻尼体系自振频率； $\xi$  为阻尼比。根据 CJJ 69—1995 《城市人行天桥与人行地道技术规范》<sup>[8]</sup>，铝合金人行天桥的阻尼比取 0.9%，而 Guo 等<sup>[14]</sup> 建议铝合金空间网架结构的阻尼比取 3.3%，选取两者之间的较大值计算有阻尼体系的阻尼比  $\omega_d = 0.999\omega$ ，即可忽略阻尼对结构自振频率的影响，可将天桥按无阻尼结构体系进行特征值分析。

采用子空间迭代法计算天桥的自振频率，假设

结构的自由度为  $n$ 。广义特征值问题可用下式表示:

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\varphi} = \lambda\mathbf{M}\boldsymbol{\varphi} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{K}$  和  $\mathbf{M}$  分别为结构体系的刚度矩阵和质量矩阵;  $\lambda$  为特征值;  $\boldsymbol{\varphi}$  为对应的特征向量。特征值按如下顺序排列:

$$0 < \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_p \quad (5)$$

且应满足下式:

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\varphi}_i = \lambda_i\mathbf{M}\boldsymbol{\varphi}_i \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_j = \delta_{ij} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i = \lambda_i \delta_{ij} \quad (8)$$

子空间迭代法的基本公式如下:

$$\mathbf{K}\bar{\mathbf{X}}_{k+1} = \mathbf{M}\mathbf{X}_k \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_{k+1}^* = \bar{\mathbf{X}}_{k+1}^T \mathbf{K} \bar{\mathbf{X}}_{k+1} \quad (10)$$

$$\mathbf{M}_{k+1}^* = \bar{\mathbf{X}}_{k+1}^T \mathbf{M} \bar{\mathbf{X}}_{k+1} \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_{k+1} \mathbf{Q}_{k+1} = \mathbf{M}_{k+1} \mathbf{Q}_{k+1} \mathbf{A}_{k+1} \quad (12)$$

$$\mathbf{X}_{k+1} = \bar{\mathbf{X}}_{k+1} \mathbf{Q}_{k+1} \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{X}$  为迭代矩阵 ( $n \times q$  阶矩阵);  $\mathbf{Q}$  为近似振型;  $\mathbf{A}$  为特征值的对角矩阵。结构体系的频率和振型即可按下式求出:

$$\mathbf{K}^* \mathbf{Q} - \omega^2 \mathbf{M}^* \mathbf{Q} = 0 \quad (14)$$

根据经验, 结构体系的前  $p$  阶频率与  $q$  个试探向量的关系满足下述关系式:

$$q = \min [2p, p + 8] \quad (15)$$

采用上述方法对铝合金人行天桥的自振频率进行计算, 得出天桥的侧向和竖向固有频率分别为 2.3 和 5.6 Hz, 满足规范要求, 因此, 天桥设计较为合理, 行人舒适性得以保证。

### 3 结论

针对传统的天桥结构设计方法存在分析模型过度简化导致结果偏差较大的问题, 本文开展了铝合金人行天桥设计方法研究, 以某天桥为例验证了所提方法的可行性和有效性, 主要结论如下:

(1) 采用纤维截面对铝合金人行天桥的墩柱进行模拟, 通过计算支座的 6 个自由度的刚度确定有限元软件中弹性连接所需参数, 对天桥进行精细化建模, 可更加准确地模拟天桥在实际运营中的性能, 同时为天桥的动力弹塑性分析奠定基础。

(2) 基本组合荷载作用下天桥的应力最大, 且

最大拉应力和最大压应力分别为铝合金设计强度的 15.5% 和 14%, 铝合金桁架梁设计强度冗余度大。铝合金桁架梁自重较轻, 人群荷载与恒载作用下的应力接近, 同时, 需要考虑风荷载的影响, 尤其对于台风频发的沿海地区, 结构设计时需要验算台风引起桁架梁向上的掀起力及其位移等。

(3) 铝合金人行天桥的最大挠度为最大竖向挠度允许值的 28%, 满足规范要求。恒载与人群荷载同时作用下铝合金桁架梁的挠度是不设预拱度时最大竖向挠度允许值的 1.3 倍, 即需设置预拱。天桥的宽跨比是最小允许宽跨比的 3.8 倍, 满足规范要求。

(4) 铝合金人行天桥的阻尼比较小, 可按无阻尼结构体系进行自振频率与振型分析。子空间迭代法采用多个线性无关向量反迭代, 选择合适的迭代精度, 结果完全满足工程需求。天桥侧向和竖向固有频率分别为最小允许值的 1.92 倍和 1.87 倍, 满足规范要求。

### 参 考 文 献

- [1] DAS S K, KAUFMAN J G. Aluminum alloys for bridges and bridge decks [C]. Orlando: The Minerals, Metals & Materials Society, 2007.
- [2] SALEEM M A, MIRMIRAN A, XIA J, et al. Experimental evaluation of aluminum bridge deck system [J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17 (1): 97-106.
- [3] ZHANG Y, QIU J F, BAI H. Application and research progress of aluminum alloy bridge decks [C]. Changsha: Trans Tech Publications Ltd., 2012.
- [4] ANNAN C D, CORMIER M, FAFARD M. Anchorage design solution for attaching an approved traffic barrier to multivoid aluminum bridge decks [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147 (7): 04021097.
- [5] DEY P, SYCHTERZ A, NARASIMHAN S, et al. Performance of pedestrian-load models through experimental studies on lightweight aluminum bridges [J/OL]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21 (8): C4015005.
- [6] WEN Q J, REN Z J. Structural analysis of a large aluminum alloy truss double-arch bridge [J/OL]. Structures, 2021, 29 (4): 924-936.
- [7] 张彪. 6082-T6 铝合金材料疲劳试验及桥梁结构应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [8] 城市人行天桥与人行地道技术规范: CJJ 69—95 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [9] 桥梁用结构钢: GB/T 714—2015 [S]. 北京: 中国标准出版

## 道桥技术

社, 2015.

- [10] 铝合金人行天桥技术规程: T/CECS 471—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [11] 建筑钢结构球型支座: GB/T32836—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [12] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

- [13] 城市桥梁设计规范: CJJ 11—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [14] GUO X, ZHANG J, ZHU S, et al. Damping characteristics of single-layer aluminum alloy reticulated spatial structures based on improved modal parameter identification method [J/OL]. Thin-Walled Structures, 2021, 164: 107822.

(上接第 101 页)

下降了 46.7%；底板隆起的速度下降到 4.9 mm/d，下降了 46.9%。巷道两帮及顶底板变形量分别为 133.2、175.5 mm。采用优化支护方案后，巷道断面的收敛量明显减少，巷道的收敛速度也得到有效抑制。

(2) 现场试验得出，采用优化支护方案后，巷道围岩收敛速率减小，收敛量均在允许变形范围内，有效控制了软煤层巷道围岩的稳定性。

### 参 考 文 献

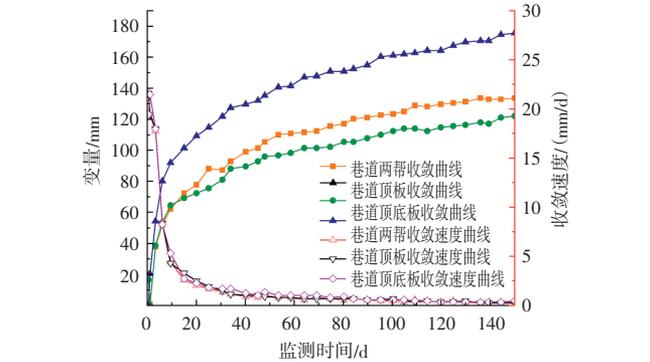


图 6 巷道的收敛量和收敛速度曲线

Fig. 6 Convergence volume and convergence velocity curves for the lane

## 6 结论

通过现场实验、理论分析和数值模拟，分析了深部松软多节理巷道失稳机理，并在软岩巷道稳定性控制理论分析的基础上，提出了“超前管棚 + 长锚索 + W 钢带/工字钢 + 双层网”优化支护方案，得出以下主要结论：

(1) 基于三软煤层巷道围岩控制理论，提出了“超前管棚 + 长锚索 + W 钢带/工字钢 + 双层网”优化支护方案，并通过数值模拟验证了该方案的合理有效性。

- [1] 任硕, 李中伟, 周文凯. 煤矿松散煤层破碎顶板巷道支护技术研究 [J]. 能源与环保, 2022, 44 (12): 39–44.
- [2] 张新蕾. 基于岩体力学参数的巷道锚杆支护应力数值模拟 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (2): 39–43.
- [3] 袁超. 深部巷道围岩变形破坏机理与稳定性控制原理研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017.
- [4] 王伟. 巷道围岩稳定性分析及锚杆支护效果评价研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2016.
- [5] 高占峰. 开采扰动下深井松软岩层巷道围岩变形特征及防控技术研究 [J]. 能源与环保, 2023, 45 (8): 263–271.
- [6] 毕颖, 赵政文. 冲击高应力膨胀破碎软岩大变形巷道控制机理研究 [J]. 煤矿安全, 2022, 53 (7): 174–180.
- [7] 任硕, 李中伟, 周文凯. 煤矿松散煤层破碎顶板巷道支护技术研究 [J]. 能源与环保, 2022, 44 (12): 39–44.
- [8] 余伟健, 王卫军, 黄文忠, 等. 高应力软岩巷道变形与破坏机制及返修控制技术 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (4): 614–623.
- [9] 张勇, 谢铨, 孙特, 等. 深埋软岩巷道底鼓破坏机制及控制对策研究 [J]. 煤炭工程, 2022, 54 (12): 50–55.
- [10] 朱乐章, 黄北海, 丁可. 极松软易破碎综放面巷道“降钻锚注平”支护技术 [J]. 煤炭工程, 2023, 55 (3): 47–51.
- [11] 李景涛, 段燕伟. 基于多级锚固承载层的软岩巷道支护技术研究 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2023, 33 (4): 542–547.
- [12] 刘远. 重复动压下煤巷群围岩分区加固方法研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (2): 130–135.