

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.10.027

球墨铸铁管摩阻系数取值敏感性研究

朱智伟, 邵新正, 于 军

(河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450000)

摘 要: 基于不确定度评价理论对大口径球墨铸铁管的水力摩阻系数进行了现场检测。对水力摩阻系数的影响因素,包括管径(D)、流速(v)、水温(T)、当量粗糙度(k),进行敏感性分析。检测及分析结果表明,管径的变化范围较大,由此引起的摩阻系数变化也最大,在 DN80 ~ DN2 600 的管径范围内,曼宁糙率系数(n)从 0.008 5 增至 0.010 8;海澄-威廉系数(C_h)从 142 增至 150。工程设计若不考虑管径的影响,取固定的摩阻系数值,沿程水头损失计算误差最大可分别达到 54%(谢才-曼宁公式)和 10%(海澄-威廉公式)。建议工程设计优先采用达西公式和柯尔勃洛克-怀特公式进行水力计算,采用 $k=0.10$ mm 作为水泥砂浆内衬球墨铸铁管的设计值。

关键词: 球墨铸铁管; 摩阻系数; 现场检测; 敏感性分析

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)10-0147-07

Sensitivity Study on Friction Coefficient of Ductile Iron Pipe

ZHU Zhi-wei, SHAO Xin-zheng, YU Jun

(Henan Water & Power Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Based on the uncertainty evaluation theory, the hydraulic friction coefficient of large diameter ductile iron pipe was measured in situ. The influence factors of hydraulic friction coefficient, including pipe diameter D , velocity v , water temperature T and equivalent roughness k , were analyzed. The results show that the pipe diameter D varied widely, and the resulting friction coefficient changed the most. In the range of DN80 - DN2 600, Manning roughness coefficient n increases from 0.008 5 to 0.010 8, and Hazen-Williams coefficient C_h increases from 142 to 150. If the influence of pipe diameter D is not considered in engineering design, the maximum calculation error of head loss along the pipeline can reach 54% (Chezy-Manning formula) and 10% (Hazen-Williams formula) respectively with fixed friction coefficient. It is suggested that Darcy's formula and Colebrook-White formula should be used in engineering design for hydraulic calculation, and the equivalent roughness $k=0.10$ mm should be used as the design value of ductile iron pipelined with cement mortar.

Key words: ductile iron pipe; friction coefficient; field test; sensitivity analysis

球墨铸铁管具有强度高、韧性好、承受局部沉陷能力较强、抗震性能好、耐腐蚀、使用寿命长、施工安装方便、安全可靠等优点,在供水工程中应用广泛。为了提高球墨铸铁管的抗腐蚀性和耐磨性,延长管道使用寿命,降低管道内壁的粗糙度,提高输水效率,降低工程运行维护成本,通常在球墨铸铁管内壁涂覆不同的涂层材料,工程中常见的内涂层有水泥

砂浆内衬、水泥砂浆内衬环氧封面层、环氧陶瓷内衬、聚氨酯内衬等。

球墨铸铁管的摩阻系数(包括达西摩阻系数 λ , 曼宁糙率系数 n , 海澄-威廉系数 C_h , 当量粗糙度 k)是工程设计的重要技术参数之一,其取值结果直接影响水力计算成果的精度,在一定的压力和输送流量下,摩阻系数取值影响到工程的总体布局、设计

规模、投资乃至运行费用。因此,开展大口径球墨铸铁管摩阻系数的现场检测及敏感性分析,丰富现有管道摩阻系数原型观测资料,对于球墨铸铁管的设计和选型具有重要的意义。

1 研究现状

管道沿程损失的水力计算是输水工程设计的重要环节之一,管道摩阻系数取值的结果直接影响水力计算成果的精度,进而影响到工程的总体布局、规模、投资乃至运行费用,为此在长期的生产实践中总结出许多有效的经验公式。

以某供水工程为研究对象,基于不确定度评价理论对大口径球墨铸铁管的水力摩阻系数进行了现场检测,研究了不同流速下($v = 0.27 \sim 0.37 \text{ m/s}$) DN800 水泥砂浆内衬球墨铸铁管的海澄-威廉系数 C_h 和曼宁糙率系数 n 的变化规律,采用 $k = 0.10 \text{ mm}$ 可以满足水力设计要求。之后,对水力摩阻系数的影响因素,包括管径 D 、流速 v 、水温 T 、当量粗糙度 k ,进行敏感性分析,得出了 DN80 ~ DN2 600 管径范围内的海澄-威廉系数 C_h 和曼宁糙率系数 n 的变化规律,为球墨铸铁管的设计和选型提供了可靠依据。

2 工程检测设计

该供水工程采用泵站加压供水,干线全长约 31.701 km。起点为泵站出水管,中心线高程 49.74 m,桩号 F0 + 000;终点中心线高程 41.55 m,桩号 F31 + 701.4。供水干线采用直径为 0.9 ~ 0.8 m 的水泥砂浆内衬球墨铸铁管,设计引水流量 0.426 ~ 0.564 m^3/s 。球墨铸铁管水力性能检测选取供水干线约 3.85 km 管道(见图 1),直径为 DN800,管线较为平顺,沿程无分水口,纵向最大转角 1.15°,最大平面转角 31.22°。

管线平面和纵断面布置见图 2。



图 1 检测管段线路示意

Fig. 1 Schematic diagram of detection pipeline



图 2 检测管段平面和纵断面布置

Fig. 2 Plane and profile layout of detection pipeline

3 工程检测结果分析

3.1 工程检测结果

DN800 水泥砂浆内衬球墨铸铁管不同工况的输水流量和上、下游测压管水头见表 1。

表 1 流量和压力原型测量结果

Tab. 1 Flow and pressure prototype measurements

工况	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$		17#测压管水头/m		21#测压管水头/m		水头损失/m	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
1	0.136 8	0.001 9	6.061	0.005	5.750	0.006	0.311	0.007
2	0.137 1	0.002 1	6.057	0.004	5.745	0.005	0.312	0.006
3	0.167 6	0.002 0	3.776	0.011	3.325	0.009	0.451	0.012
4	0.167 4	0.002 2	3.739	0.012	3.294	0.013	0.444	0.018
5	0.167 3	0.001 6	3.712	0.008	3.271	0.008	0.441	0.011
6	0.174 4	0.004 2	3.633	0.012	3.204	0.012	0.429	0.015
7	0.180 4	0.005 5	3.591	0.012	3.168	0.012	0.422	0.015
8	0.187 9	0.001 8	3.555	0.012	3.138	0.011	0.417	0.015

3.2 摩阻系数及其不确定度

依据摩阻系数公式计算该段管道的海澄-威廉系数 C_h 、曼宁糙率系数 n ,以及当量粗糙度 k ,结果

见表2。

摩阻系数包含管件接头、纵向和平面转角等产生的局部水头损失影响。

表2 水力摩阻系数计算

Tab.2 Calculation of hydraulic friction coefficient

工况	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	管径 D/m	管长 L/m	水头损失 H_f/m	流速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	水力坡降 $J/(\text{m} \cdot \text{km}^{-1})$	C_h	n	k/mm
1	0.136 8	0.804 4	3 850.0	0.311	0.269	0.081	141.2	0.011 5	0.238
2	0.137 1	0.804 4	3 850.0	0.312	0.270	0.081	141.2	0.011 5	0.235
3	0.167 6	0.804 4	3 850.0	0.451	0.330	0.117	141.5	0.011 3	0.212
4	0.167 4	0.804 4	3 850.0	0.444	0.329	0.115	142.5	0.011 2	0.186
5	0.167 3	0.804 4	3 850.0	0.441	0.329	0.115	143.0	0.011 2	0.175
6	0.174 4	0.804 4	3 850.0	0.429	0.343	0.111	151.3	0.010 6	
7	0.180 4	0.804 4	3 850.0	0.422	0.355	0.110	157.9	0.010 1	
8	0.187 9	0.804 4	3 850.0	0.417	0.370	0.108	165.5	0.009 7	

随着流速 v 增大,海澄-威廉系数 C_h 从 141 增至 165,曼宁糙率系数 n 从 0.011 5 减至 0.009 7。由于试验流速较小,水流处于紊流过渡区,采用柯尔勃洛克-怀特公式(Colebrook-White)计算的当量粗糙度 $k=0.20 \text{ mm}$ 的不确定度较大。不同当量粗糙度 k 条件下的曼宁糙率系数 n 和海澄-威廉系数 C_h 计算结果与检测结果分别见图3、4。

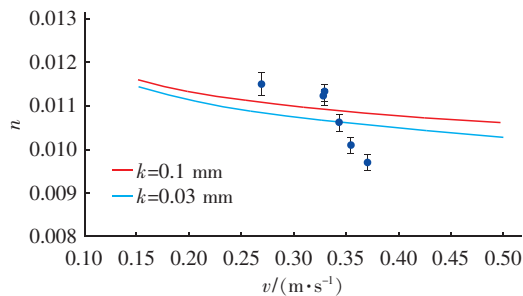


图3 曼宁糙率 n 检测结果

Fig.3 Test results of Manning roughness n

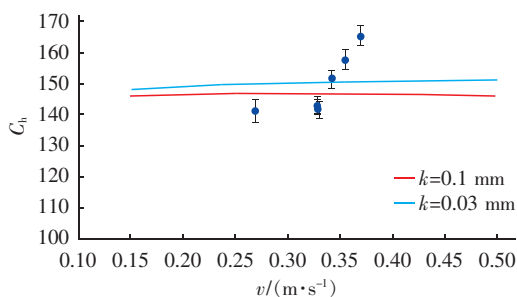


图4 海澄-威廉系数 C_h 检测结果

Fig.4 Test results of Hazen-Williams coefficient C_h

由图3、4可知,对于较为平顺的清水输送管道采用 $k=0.10 \text{ mm}$ 可以满足工程设计要求。

4 摩阻系数取值的敏感性分析

管道摩阻系数取值与相对粗糙度 k/D 和水流雷诺数 Re 有关,即与管道的流速 v 、管径 D 、当量粗糙度 k 和水的黏滞度 γ 等有关。以柯尔勃洛克-怀特公式为标准,依据各摩阻系数间关系,分析不同因素对球墨铸铁管摩阻系数的敏感性影响程度。

4.1 当量粗糙度 k

流速 v 和管径 D 一定时,管道的当量粗糙度 k 增大,相对粗糙度(k/D)增大,水力坡降 J 、达西摩阻系数 λ 和曼宁糙率 n 值增大,海澄-威廉系数 C_h 减小,各摩阻系数相对变化率遵循关系见下式:

$$\frac{\Delta J}{J} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 2 \frac{\Delta n}{n} = -1.852 \frac{\Delta C_h}{C_h} \quad (1)$$

图5为DN2 400,水温 15°C ,流速 $0.3 \sim 4.0 \text{ m/s}$,当量粗糙度 k 分别为 0.010 、 0.020 、 0.030 mm 的各摩阻系数。随着当量粗糙度 k 变化,各摩阻系数的相对变化率随流速的增大而增大。对于采用旋转喷涂工艺生产的内壁光滑、均匀的水泥砂浆内衬球墨铸铁管,法国圣戈班穆松桥、日本久保田、新兴铸管股份有限公司分别进行了实验室检测,结果表明其当量粗糙度 $k \approx 0.03 \text{ mm}$ ($v=1.0 \text{ m/s}$ 时,相较于 $k=0 \text{ mm}$ 的光滑管水头损失增加 $4\% \sim 7\%$,且随着管径减小而增大)。实际工程需要考虑弯管、接头、分叉、连接管件、阀门等的局部水头损失影响,以及长期运行后由于水质、冲刷、黏附等引起的管壁粗糙度变化。对于管件较少且较为平顺的清水输送管道,考虑一定的水头损失裕度,推荐采用 $k=0.10 \text{ mm}$ 作为设计值($v=1.0 \text{ m/s}$ 时,较 $k=0.03 \text{ mm}$ 水

头损失增加约 8% ~ 14%)。某供水工程检测结果初步印证了该取值的可靠性。

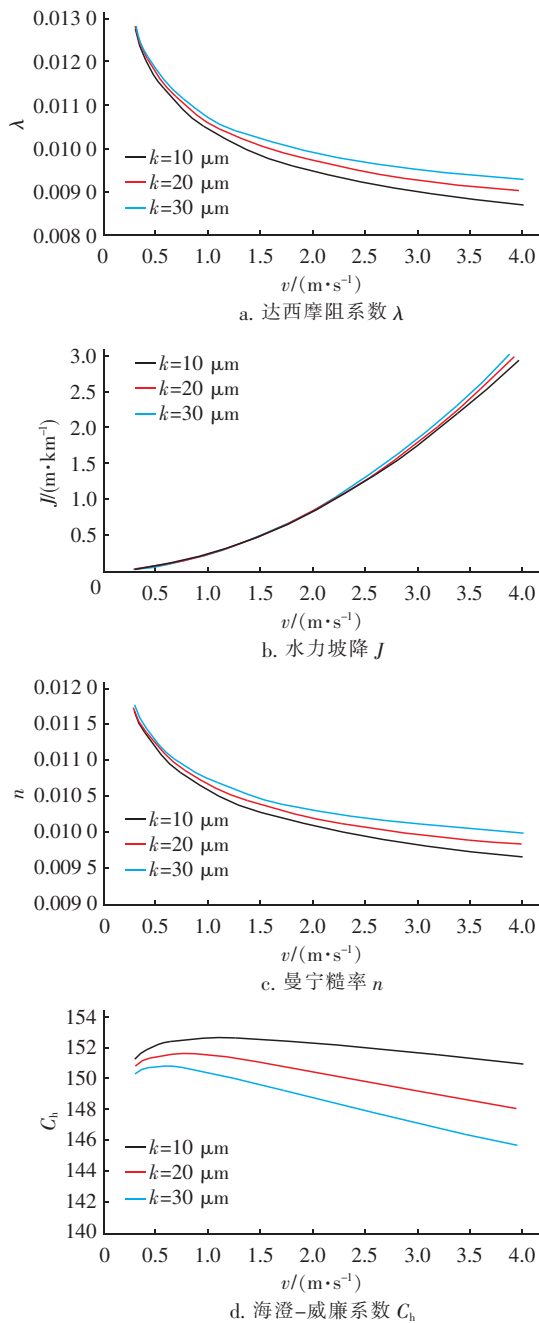


图5 不同当量粗糙度的摩阻系数换算

Fig. 5 Friction coefficient conversion of different equivalent roughness

4.2 管径 D

图6为当量粗糙度 $k = 0.030 \text{ mm}$, 流速范围为 $0.3 \sim 4.0 \text{ m/s}$, DN80 ~ DN2 600 不同管径的摩阻系数计算结果。由图6可知:管道的当量粗糙度 k 一定时,在相同流速 v 和水温下,管径 D 增加,相对粗

糙度(k/D)减小,水力坡降 J 和达西摩阻系数 λ 减小,而曼宁糙率 n 值和海澄-威廉系数 C_h 值均增加。

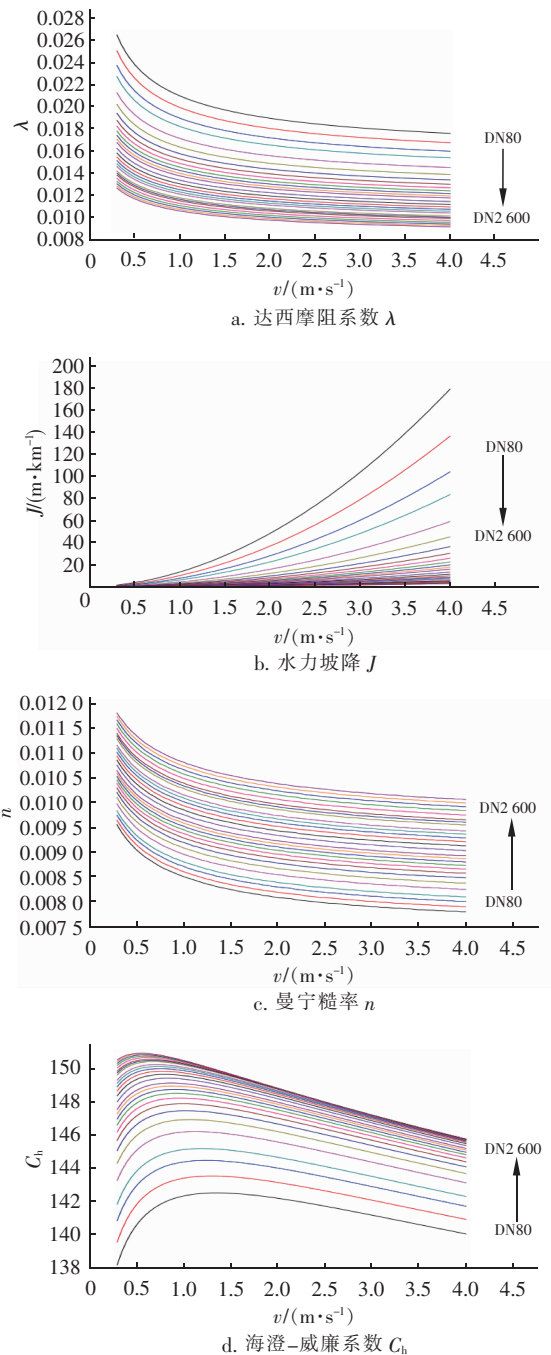


图6 $k = 0.030 \text{ mm}$ 不同管径摩阻系数换算

Fig. 6 Friction coefficient conversion of different pipe diameters ($k = 0.030 \text{ mm}$)

工程设计阶段,曼宁糙率系数 n 和海澄-威廉系数 C_h 取值如不考虑管径 D 的影响,对所有管径取固定值,则根据各摩阻系数相对变化率关系式

(1),沿程水头损失计算误差最大可分别达到54%(谢才公式)和10%(海澄-威廉公式)。由此可见,管径 D 对海澄-威廉系数 C_h 的影响要小于对曼宁糙率 n 的影响,海澄-威廉公式比谢才-曼宁公式更适用于管道的水力计算。

在管径 D 、流速 v 等条件不变的条件下,曼宁糙率 n 值增大,水力坡降 J 和达西摩阻系数 λ 也增大,结合管径 D 、水力坡降 J 和曼宁糙率 n 之间的变化关系,并由谢才公式求导可得:

$$\frac{dJ}{J} = 2 \frac{dn}{n} - \frac{16}{3} \frac{dD}{D} + \frac{dQ}{Q} \quad (2)$$

表3 管径 D 、水力坡降 J 和曼宁糙率 n 之间的变化关系

Tab.3 Relationship among diameter D , hydraulic gradient J and Manning roughness n

D/mm	D 变化率/%	n	n 变化率/%	$J/(\text{m} \cdot \text{km}^{-1})$	J 变化率/%	备注
DN1 000		0.010 0		0.638		$k=0.03 \text{ mm}$
DN900	-10	0.009 9	-1	0.722	+10.7	
DN1 100	+10	0.010 1	+1	0.570	-13.2	$v=1.0 \text{ m/s}$

工程设计中应考虑管径 D 对摩阻系数取值的影响。

当量粗糙度 k 分别为0.03、0.10 mm,流速 $v=1.0 \text{ m/s}$ 时,曼宁糙率 n 和管径 D 的关系如图7所示。

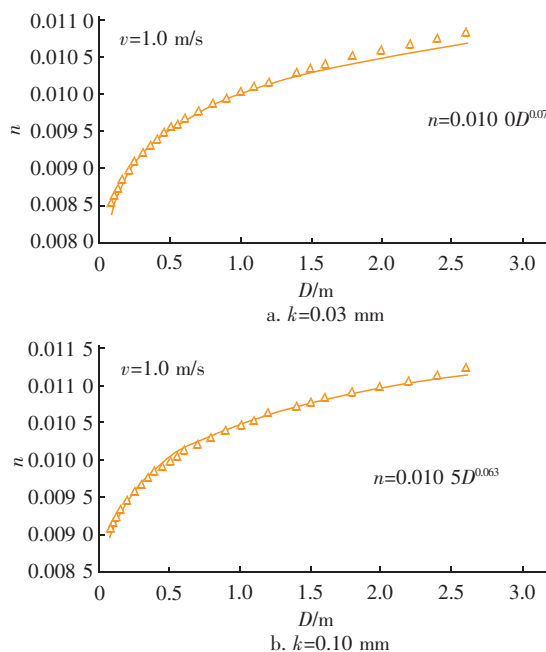


图7 曼宁糙率 n 和管径 D 的关系

Fig.7 Relationship between Manning roughness n and pipe diameter D

当量粗糙度 k 分别为0.03、0.10 mm,流速 $v=1.0 \text{ m/s}$ 时,海澄-威廉系数 C_h 和管径 D 的关系如

式(2)表明,水力坡降 J 不仅受曼宁糙率 n 的影响,而且受管径 D 和流量 Q (或流速 v)的影响,水力坡降 J 随着曼宁糙率 n 的增大而增大,但随着管径 D 的增大而减小;由于管径 D 变化引起的曼宁糙率 n 值的相对变化率要远小于 D 的相对变化率,因此,水力坡降 J 总是随着管径 D 的增大而减小,验证并解释了“同种管材,管径 D 越大,曼宁糙率 n 越小”的现象^[1]。

管径 D 、水力坡降 J 和曼宁糙率 n 之间的关系如表3所示。

图8所示。

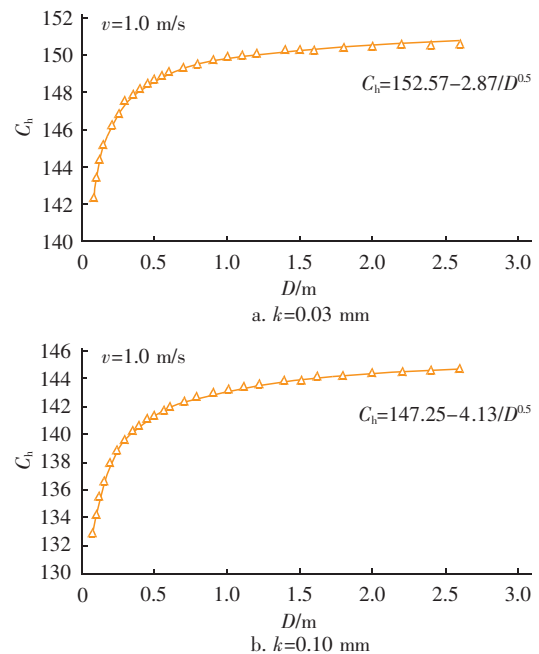


图8 海澄-威廉系数 C_h 和管径 D 的关系

Fig.8 Relationship between Hazen-Williams coefficient C_h and pipe diameter D

4.3 流速 v (流量 Q)

管道流速 v (流量 Q)增大,相同管径和水温下的雷诺数 Re 增大,管道相对粗糙度(k/D)一定时,水力坡降 J 增大,达西摩阻系数 λ 和曼宁糙率 n 值减小,海澄-威廉系数 C_h 则呈先增大后减小的抛物线形。水流进入紊流粗糙区后,达西摩阻系数 λ 仅与

管道的相对粗糙度(k/D)有关,此时达西摩阻系数 λ 和曼宁糙率 n 为常数。

实际供水工程管道内流速通常不超过 3.0 m/s ^[2],水流多处于紊流过渡区,当供水流速较小时,所采用的曼宁糙率系数 n 应略有加大。当量粗糙度 $k=0.03 \text{ mm}$ 时,不同管径情况下, $v=1.0 \text{ m/s}$ 时的曼宁糙率 n 比 $v=2.0 \text{ m/s}$ 时的增大约 4.3% ,见图9(a)。当量粗糙度 $k=0.10 \text{ mm}$ 时,不同管径情况下, $v=1.0 \text{ m/s}$ 时的曼宁糙率 n 比 $v=2.0 \text{ m/s}$ 时的增大约 2.7% ,见图9(b)。美国水行业协会(AWWA)技术手册《M9 混凝土压力管》曾建议: $v=0.9 \text{ m/s}$ 时采用 $n=0.011$; $v=1.5 \text{ m/s}$ 时采用 $n=0.010$ 。该建议小流速时曼宁糙率 n 值的增幅约 10% ,偏大,且没有考虑管径 D 的影响。

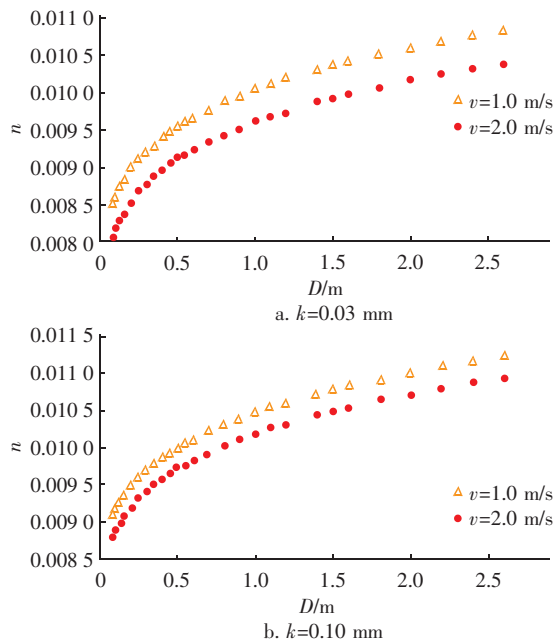


图9 曼宁糙率 n 随管径和流速的变化

Fig.9 Variation of Manning roughness n with pipe diameter and flow velocity

图10为当量粗糙度 $k=0.03、0.10 \text{ mm}$ 不同管径的海澄-威廉系数 C_h 值。

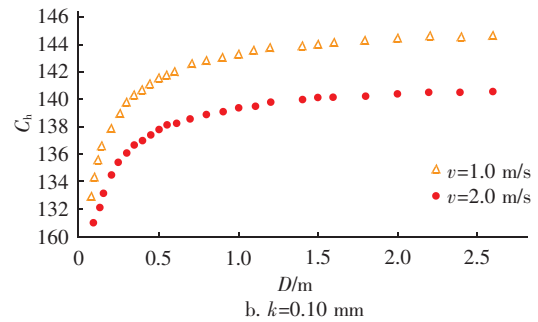
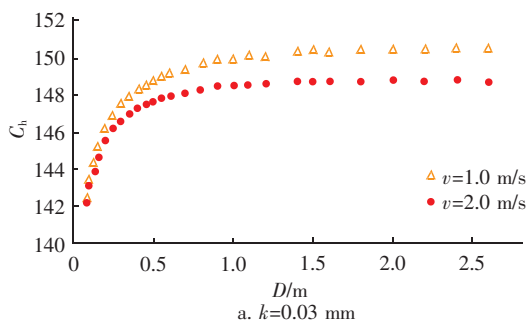


图10 海澄-威廉系数 C_h 随管径和流速的变化

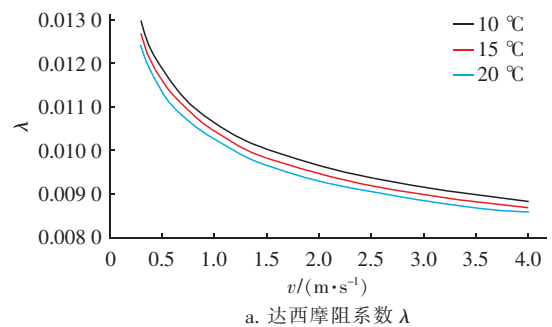
Fig.10 Variation of Hazen-Williams coefficient C_h with pipe diameter and flow velocity

当 $k=0.03 \text{ mm}$, $v=1.0 \text{ m/s}$ 时的 C_h 比 $v=2.0 \text{ m/s}$ 时的增大约 $0.09\% \sim 1.13\%$,且随管径增大而增大;当 $k=0.10 \text{ mm}$, $v=1.0 \text{ m/s}$ 时的 C_h 比 $v=2.0 \text{ m/s}$ 时的增大约 $2.35\% \sim 2.74\%$ 。

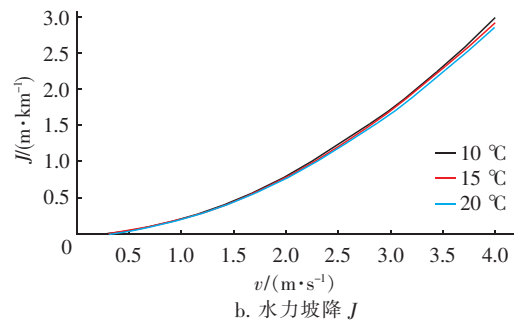
4.4 水温 T (运动黏滞系数 γ)

水流的运动黏滞系数 γ 随水温 T 升高而减小。管道相对粗糙度(k/D)一定时,相同流速和管径下,温度 T 升高,运动黏滞系数 γ 减小,水流雷诺数 Re 增大,水力坡降 J 、达西摩阻系数 λ 和曼宁糙率 n 减小,海澄-威廉系数 C_h 增大,各摩阻系数相对变化率关系遵循式(1)。

图11为DN200,当量粗糙度 $k=0.010 \text{ mm}$,流速 $0.3 \sim 4.0 \text{ m/s}$,水温分别为 10 ($\gamma=1.3097 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)、 15 ($\gamma=1.1447 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)、 20 ($\gamma=1.0087 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)时的各摩阻系数变化。



a. 达西摩阻系数 λ



b. 水力坡降 J

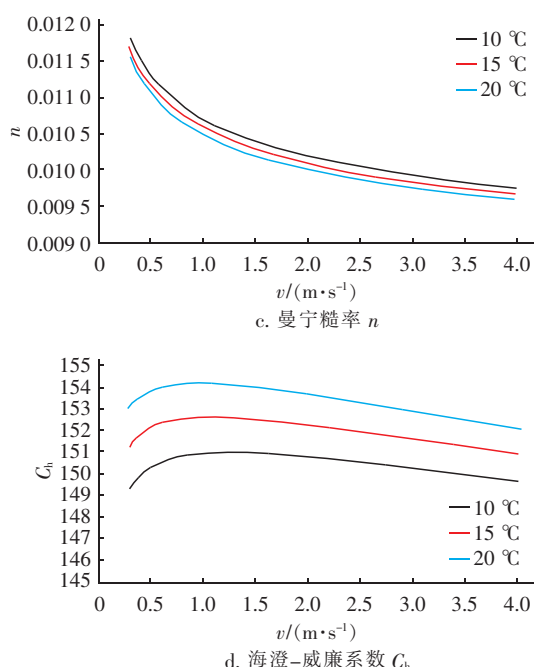


图11 不同水温的摩阻系数换算

Fig. 11 Friction coefficient conversion at different water temperature

随着水温变化,各摩阻系数的相对变化率随流速的增大而减小。

5 结论

① 在检测流速 $v = 0.27 \sim 0.37$ m/s 范围内,海澄-威廉系数 C_h 从 141 增至 165,曼宁糙率系数 n 从 0.011 5 减至 0.009 7,当量粗糙度 $k \approx 0.20$ mm (相对标准不确定度 41%)。依据摩阻系数随流速的变化规律,结合试验检测结果,对于管件较少且平顺的清水输送管道采用 $k = 0.10$ mm 可以满足水力设计要求。

② 基于柯尔勃洛克-怀特公式,得出管道摩阻系数随管径 D 、流速 v 、水温 T 、当量粗糙度 k 的敏感性变化规律。上述因素中管径 D 的变幅最大,其对摩阻系数取值的影响也最大。

③ 当量粗糙度 $k = 0.03$ mm、流速 $v = 1.0$ m/s 时,管径由 DN80 变化到 DN2 600,曼宁糙率系数 n

从 0.008 5 增大到 0.010 8,增幅 27%;海澄-威廉系数 C_h 从 142 增大到 150,增幅 5.6%。工程设计若不考虑管径 D 的影响,对所有管径取固定的摩阻系数值,沿程水头损失计算误差最大可分别达到 54% (谢才-曼宁公式) 和 10% (海澄-威廉公式)。

④ 工程设计中管线的水头损失预留 10% 的裕度,则达西摩阻系数 λ 需增大约 10%,曼宁糙率 n 需增大约 5%,海澄-威廉系数 C_h 需减小约 5.4%。

⑤ 理想试验条件下,水泥砂浆内衬球墨铸铁管的当量粗糙度 $k \approx 0.03$ mm。对于管件较少且较为平顺的清水输送管道,考虑一定的水头损失裕度,推荐采用 $k = 0.10$ mm 作为设计值,流速 $v = 1.0$ m/s 时,相应的曼宁糙率 n 的经验拟合关系为 $n = 0.010 5 D^{0.063}$,海澄-威廉系数 C_h 的经验拟合关系为 $C_h = 147.25 - 4.13/D^{0.5}$ 。

参考文献:

- [1] 水利部. 预应力钢筒混凝土管道技术规范: SL 702—2015 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
Ministry of Water Resources. Technical Specifications of Prestressed Concrete Cylinder Pipe: SL 702 - 2015 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2015 (in Chinese).
- [2] 住房和城乡建设部. 室外给水设计标准: GB 50013—2018 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Standard for Design of Outdoor Water Supply Engineering: GB 50013 - 2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018 (in Chinese).

作者简介: 朱智伟 (1981—), 男, 河南郑州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利水电工程设计研究工作。

E-mail: 30074866@qq.com

收稿日期: 2021-01-18

修回日期: 2021-02-20

(编辑: 衣春敏)