

昌波水电站长大引水隧洞施工期 通风方式研究

陈 阳, 余志超

(中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘 要:昌波水电站引水隧洞总长约 22.1 km, 单洞长约 11.1 km, 在 2、3 号施工支洞控制段中独头掘进最大长度分别达到了 3.31 km、3.70 km(含支洞长度), 且主洞开挖断面直径达到 14.2~15.0 m。通过施工期需风量计算, 增设通风井可有效减少隧洞送风距离, 但通风井长度较长且仅在部分隧洞段施工时运行, 因此在施工通风设计方案中是否增设通风井成为通风设计的关键问题。通过混合式机械通风、风道式通风两个方案经济技术比选, 选定风道式通风方案更具经济技术合理性, 为以后类似工程设计提供参考。

关键词:长大隧洞; 施工通风量; 通风方式; 通风费用

中图分类号:TV554

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2024)04-0107-06

Study on Ventilation Methods during the Construction Period of Long and Large Headrace Tunnel of Changbo Hydropower Project

CHEN Yang, YU Zhichao

(PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang Guizhou 550081)

Abstract: The total length of the headrace tunnel in Changbo Hydropower Project is about 22.1 km, with each single tunnel length of about 11.1 km. In the control section of the adit 2 # and adit 3 #, the maximum length of one-way excavation reached 3.31 km and 3.70 km (including adit length), respectively, and the diameter of the excavation section of the main tunnel has reached 14.2 m~15.0 m. Through the calculation of the air demand for the construction period, the additional ventilation shafts can effectively reduce the distance of tunnel air supply, but the long lengths of ventilation shafts only operate during partial tunnel construction. Whether to add additional ventilation shafts has become a key issue in ventilation design. This article compares in the economic and technical aspects for mixed mechanical ventilation and duct ventilation, and the duct ventilation scheme is selected as more economically and technically reasonable, which can provide reference for similar engineering designs.

Keywords: Long tunnels; Construction ventilation volume; Ventilation methods; Ventilation costs

1 工程概况

昌波水电站枢纽总体布置为“首部枢纽+左岸引水隧洞+地下厂房”, 引水隧洞共两条, 单洞长约 11.10 km, 轴线间距 60 m, 引水隧洞进口底板高程 2 355.00 m, 隧洞纵坡 1.39‰~1.41‰, 隧洞为内径 13 m 的圆形断面, 全断面采用钢筋混凝土衬砌。引水隧洞共布置 5 条施工支洞进行施工, 分别为 1~5 号施工支洞。

2 施工需风量计算

隧洞开挖采用钻爆法施工, 断面分为上下两层开挖, 洞内采用无轨运输, 根据《水电工程施工组织设计规范》NB/T 10491—2021 及《水利水电工程施工组织设计手册》中地下工程施工通风相关要求对隧洞开挖需风量计算。

2.1 计算原则

开挖时需要的通风量应根据下列原则分别计算, 并取其中最大数值^[1]。

收稿日期: 2024-05-15

- (1)按洞内同时工作的最大人数,每人供给3.0 m³/min 的新鲜空气计算;
- (2)按爆破后 20 min 内将工作面的有害气体排出或冲淡至允许浓度计算,每千克炸药爆破产生的有害气体折合成 40 L 一氧化碳气体;
- (3)洞内使用柴油机械施工时,按每千瓦 4 m³/min 通风量稀释,并与同时工作的人员所需的风量相加计算;
- (4)计算的通风量,按最大和最小容许风速需风量进行复核。

2.2 计算方法

(1)隧洞作业人数需风量按下式计算:

$$V_1=k_1qm$$

式中: q 为每人每分钟需要的新鲜空气量, m³/min; k_1 为风量备用系数,取 1.1~1.15; m 为同时最多工作人数。则 $V_1=1.15\times20\times3=69$ m³/min。

(2)爆破排气需风量按下式计算:

$$V_2=\frac{7.8}{t}\times\sqrt[3]{G\times(Sc)^2}$$
$$c=15+\frac{G}{5}$$

式中: t 为爆破后通风时间,min; G 为单次开挖爆破炸药用量,kg; S 为单次开挖断面面积,m²; c 为通风换气长度,m。该次单位炸药用量 1.0 kg/m³,平均循环进尺 4.0 m,平均开挖断面面积 $S=83.7$ m²。则单次开挖爆破炸药用量约 $G=335$ kg, $V_2=7.8/20\times\sqrt[3]{335\times(83.7\times82)^2}=978$ (m³/min)。

(3)柴油机械废气稀释需风量按下式计算:

$$V_3=MK_1K_2\sum_{i=1}^nN_i$$

式中: M 为稀释单位功率柴油机械废气需风量, m³/min; K_1 为内燃机平均负荷率; K_2 为内燃机同时利用率; $\sum_{i=1}^nN_i$ 为内燃机同时在洞内工作的柴油机械的总额定功率,kW。根据钻爆开挖工序中出渣时间、弃渣运距等因素,隧洞开挖单个工作面柴油机最大功率按同时 3 台 20 t 自卸汽车(中环动力 BJZ3364)、1 台 3 m³ 装载机(徐工 ZL50G)工作考虑, $V_3=4\times0.7\times0.8\times(3\times186+162)=1\,612.8$ m³/min。考虑叠加 10 人同时

工作的人员所需的风量为 1 647.30 m³/min。

(4)允许最小风速通风量按下式计算:

$$V_4=60v_{\min}S$$

式中: $v_{\min}$ 为洞内允许最小风速,m/s,取 0.15 m/s; S 为单次开挖断面面积,m²。 $V_4=60\times0.15\times83.7=753.3$ m³/min。

开挖时需风量取上述计算最大值,取柴油机械废气稀释需风量 $V_0=1\,647.30$ m³/min。

2.3 高海拔地区所需风量修正

《水电工程施工组织设计规范》中通风量计算需计入高程修正系数,规范推荐柴油机械通风量高程修正系数为 1.2~3.9;唐浩^[2]等在两河口水电站某隧洞通风计算中海拔高程 2 782.00 m,高程修正系数取 1.143;苟红松^[3]研究表明:高原条件下隧洞施工内燃机作用时通风量可通过对单位功率通风量最小值进行要求,对海拔 2~3 km 时供风量不宜小于 3.5 m³/(min·kW);该项目平均海拔高度约 2 400 m,综合考虑后高程修正系数取 1.2,通风量 $Q_5=1.2\times1\,647.30=1\,976.76$ m³/min。

3 通风方案初拟

地下工程开挖中,常规的通风方式有自然通风、机械通风和风道式通风。自然通风适用于长度小于 50 m 的隧洞;机械通风中分为送入式、吸出式、混合式,送入式和吸出式适用于长度小于 200 m 的隧洞,混合式适用于长大洞;风道式通风利用导洞、导井、钻孔进行自然通风,适用于长大洞。该隧洞施工通风难点在于引水 2、3 号施工支洞及两条支洞间主洞施工段,引水 2、3 号施工支洞长度分别为 1.12、1.96 km,对应控制主洞段长度分别为 2.13、1.68 km,两主洞间横洞长度为 0.06 km,隧洞施工独头掘进最大长度分别为 3.31、3.70 km,可采用混合式机械通风或风道式通风,当采用风道式通风时,可根据风道位置结合机械通风布置。工程布置示意图见图 1。

4 通风方案设计

4.1 混合式机械通风方案

根据类似工程经验,结合张东明^[4]等在锦屏二级水电站引水隧洞施工中通风距离超过 2.6 km,因废气排出效率问题,在通风方案中将射流

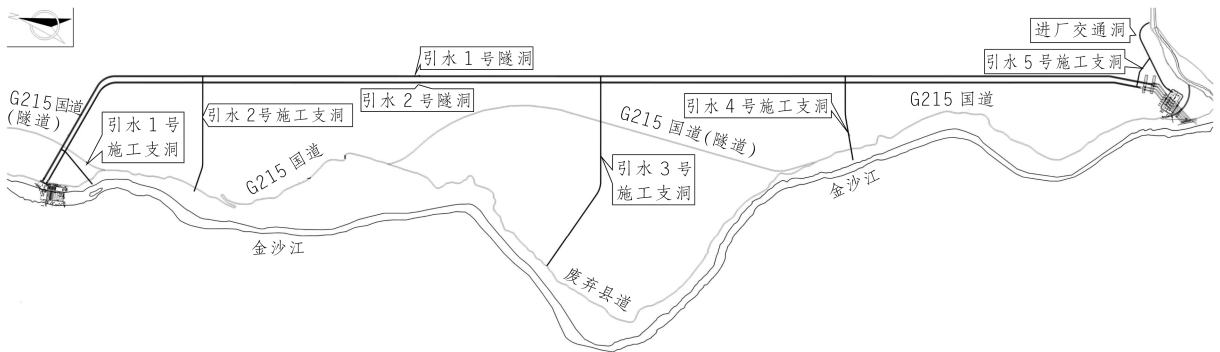


图 1 工程布置示意图

风机变更为轴流抽风机等案例,则该次通风方案为:在 2、3 号施工支洞口各布置两台轴流风机,一台用于送入新鲜空气,一台用于抽出废气,且在距 2 号施工支洞口 1.65 km 处和距 3 号施工支洞口 1.85 km 处各布置两台轴流风机用于串联接力,支洞口处风机和接力风机采用同功率,送入风机连接采用橡胶软管,吸出风机连接采用塑料硬管。

(1)风机选型。风机选型主要依照风机工作风量和风机工作风压确定。根据《水利水电工程施工组织设计手册》,通风机(送入)的工作风量应为施工所需通风量和风道的漏风量之和,通风机(送入)的工作风量:

$$V_m = \left(1 + \frac{PL}{100}\right)V_0$$

式中: P 为百米漏风率; L 为风管长度,m; V_0 为工作面最大需风量, m^3/min 。3 号支洞口风机及接力风机(送入)的工作风量 $V_m = (1 + 1.5\% \times 1850/100) \times 1\,976.76 = 2\,525.31 \text{ m}^3/\text{min}$,即为 $42.09 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

风机工作风压包含沿程摩擦风压损失和局部风压损失(包括进出口、转弯段等局部风压损失)。风机工作风压:

$$h_m = h_f + h_p$$
$$h_f = \frac{\lambda LU}{A^3} V_m V_0$$

式中: h_f 为沿程摩擦风压损失,Pa; h_p 为局部风压损失,Pa,可按沿程风压损失的 20%~30%,距离较长时,取小值; λ 为风带摩擦系数,取 0.002 $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$; U 、 A 为风带周长、面积,根据类似工程经验,送入风机连接采用 1.8 m 橡胶软管,风带周长、面积为 5.65 m、2.54 m^2 ;则 $h_f = 0.002$

$\times 1\,850 \times 5.65/2.54^3 \times 42.09 \times 32.75 = 1\,762.49 \text{ Pa}$,局部风压损失 $h_p = 0.2 \times 1\,762.49 = 352.50 \text{ Pa}$,3 号支洞口风机及接力风机(送入)的工作风压 $h_m = 1\,762.49 + 352.50 = 2\,114.99 \text{ Pa}$ 。

通风机电动机容量:

$$N = \frac{V_m h_m \gamma}{102 \eta_1 \eta_2} B$$

式中: γ 为空气重率,取 $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$; η_1 为静压效率,与产品性能相关,取 50%; η_2 为机械传动效率,直接传动时取 1.0; B 为电动机容量储备系数,取 1.2。则 3 号支洞口风机及接力风机(送入)的电动机容量 $N = 42.09 \times 211.50 \times 1.2/(102 \times 0.5 \times 1.0) \times 1.2 = 251.34 \text{ kW}$ 。同理可得 2 号支洞口风机及接力风机(送入)的工作风量为 $2\,466.01 \text{ m}^3/\text{min}$,工作风压为 $1\,842.04 \text{ Pa}$,通风机的电动机容量为 213.76 kW 。

根据功率计算成果,3 号支洞口风机及接力风机(送入)选用隧洞施工专用轴流通风机 SDF(B)-4-NO13 型风机,配用电机功率 $132 \text{ kW} \times 2$;2 号支洞口风机及接力风机(送入)选用隧洞施工专用轴流通风机 SDF(B)-4-NO12.5 型风机,配用电机功率 $110 \text{ kW} \times 2$;根据类似工程经验,抽出式风机的功率小于送入式风机,2、3 号支洞口风机及接力风机(抽出)选用隧洞施工专用轴流通风机 SDF(B)-4-NO10.5 型风机,配用电机功率 $45 \text{ kW} \times 2$;送入橡胶软管和吸出塑料硬管直径皆采用 1.8 m。

4.2 风道式通风方案

风道式通风方案中主要考虑在 2、3 号施工支洞间的引水隧洞洞段中的横通洞顶部设置两条通风竖井,分别用于送入新鲜空气和排出废气^[5]。该段隧洞埋深约 160~850 m。在引水隧

洞桩号引 3+000.00 附近的沟道埋深相对较小,在沟道范围内引水隧洞上游为印支期黑云母花岗岩,下游为薄~极薄层状云母片岩夹石英片岩,黑云母花岗岩在节理发育程度、岩性、裂隙、断层等分布存在明显优势,则竖井位置选在黑云母花岗岩分布范围内,初步选择引水隧洞 K2+912 为通风竖井位置,隧洞埋深为 212 m,通风竖井位置选取示意图见图 2,按照类似工程经验,该次通风竖井直径为 2.5 m,竖井分

为井口段、井身段、井底段,井口段及井底段采用钢筋混凝土结构进行衬砌防护,部分不稳定井身段采用“喷射混凝土+钢筋网”支护,竖井采用反井钻机一次开挖成型,开挖支护工期约 4 个月。

通风竖井位于连接两条引水隧洞的横通洞顶部,竖井需等横通洞贯通后施工,根据工程进度和送风距离等因素,参照混合式通风方案设计方

案,风道式通风布置方案见表 1。

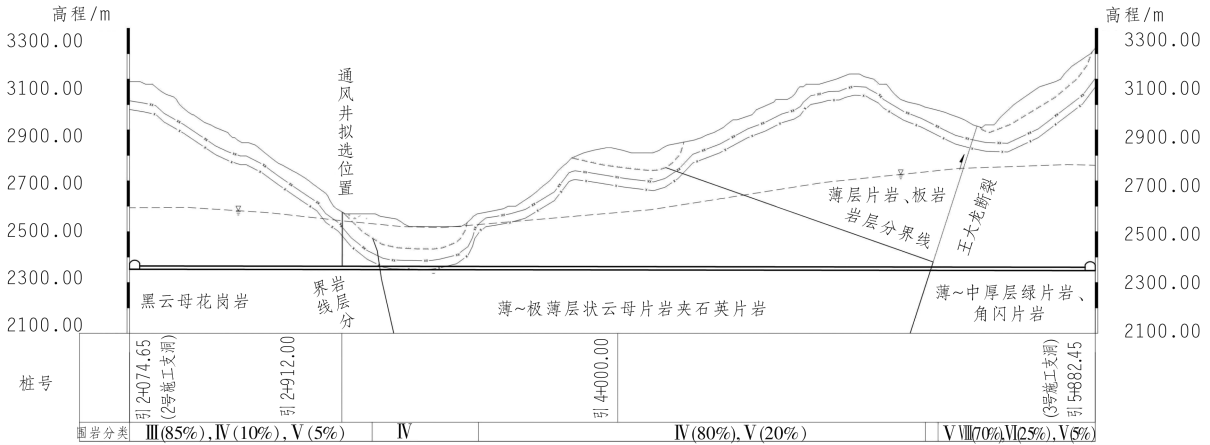


图 2 通风竖井位置选取示意图

表 1 风道式通风布置方案表

通风路径	施工内容	送风距离 /m	风机布置方式
2 号施工支洞	K2+070~K3+200 上半洞开挖	1 126~2 246	洞口布置 200 kW×2 轴流式风机(送入)和 75 kW×2 轴流式风机(抽出)
通风竖井	K3+200~K4+500 上半洞开挖; K2+070~K4+500 下半洞开挖及衬砌	0~838;0~1 588	竖井处布置 110 kW×2 轴流式风机(送入)和 1 台 37 kW 射流风机(抽出);2 条引水隧洞各布置 1 台 37 kW 射流风机(抽出)
3 号施工支洞	K4+500~ K5+882 上、下半洞开挖及衬砌	1 960~3 342	洞口布置 110 kW×2 轴流式风机(送入)和 45 kW×2 轴流式风机(抽出);在距离洞口 1 670 m 处布置同功率轴流式风机串联接力

5 通风费用估算

5.1 通风时长计算

隧洞工程施工主要含隧洞开挖、混凝土衬砌、固结及回填灌浆等,固结及回填灌浆与混凝土衬砌同期施工且需风量相对较小,但隧洞开挖和混凝土衬砌中不同工序的需风量存在明显差异,且不同围岩类别下同一工序所需时间也存在差异,则需分别考虑不同工序中的通风量和通风时长。在隧洞开挖和混凝土衬砌过程中,爆破通风排烟和稀释出渣车内燃机废气时通风量需求较大,其他工序通风量需求相对较小,为简化计算,根据通风量需求将通风时段分为排烟出渣时段和普通通

风时段;且通风风机按每月运行 25 d,每天运行 20 h 计算。根据地质勘探情况及类似工程经验,针对 2、3 号施工支洞控制的引水 1、2 号隧洞施工段,得到围岩类别、施工总时长、单个循环进尺时长、排烟出渣时长、普通通风工况时长等参数,隧洞施工单进尺通风时长计算参数见表 2,混合式通风方案时长计算见表 3。

同理可得风道式通风方案中各个通风路径的排烟出渣时长和普通通风时长,2 号施工支洞排烟出渣总时长 2 198 h,普通通风总时长 4 358 h;3 号施工支洞排烟出渣总时长 5 866 h,普通通风总时长 16 408 h;通风竖井排烟出渣总时长 7 930 h,

普通通风总时长 23 783 h。

5.2 通风费用估算

通风方案费用主要由通风设施土建费用、风机及风管设备购置安装费和风机运行费组成。为简化运行费计算,结合其他工程经验,风机运行情况如下:按送风距离将引水隧洞洞段划分为近通风口洞段和远通风口洞段。(1)近通风口洞段:排烟出渣时段洞口风机全功率运行,接力风机不运

行。普通通风时段洞口风机半功率运行,接力风机不运行。(2)远通风口洞段:排烟出渣时段洞口风机全功率运行,接力风机全功率运行。普通通风时段洞口风机半功率运行,接力风机半功率运行;风道式通风方案风机运行方式类似混合式机械通风方案,电力消耗量(kW · h)=风机额定功率(kW)×1 h×综合系数 k ,该次计算中综合系数 $k=0.9$ 。通风方案费用估算见表 4。

表 2 隧洞施工单进尺通风时长计算参数表

围岩类别	上半洞开挖			下半洞开挖			混凝土衬砌	
	总时长 /h	排烟出渣时长 /h	普通通风时长 /h	总时长 /h	排烟出渣时长 /h	普通通风时长 /h	总时长 /h	普通通风时长 /h
Ⅲ类围岩	23	4.2	18.8					
Ⅳ类围岩	17	2.5	14.5	21	6	15	75	75
Ⅴ类围岩	13	1.7	11.3					

表 3 混合式通风方案时长计算表

名称	围岩类别	长度 /m	上半洞开挖		下半洞开挖		混凝土衬砌	
			月进尺 /(m/月)	施工总时长 /h	月进尺 /(m/月)	施工总时长 /h	月进尺 /(m/月)	施工总时长 /h
2 号支洞控制段	Ⅲ类围岩	813	100	4 067				
	Ⅳ类围岩	1 113	70	7 949	140	7 593	96	11 073
	Ⅴ类围岩	200	40	2 496				
3 号支洞控制段	Ⅲ类围岩	433	100	2 167				
	Ⅳ类围岩	965	70	6 894	140	6 007	96	8 760
	Ⅴ类围岩	284	40	3 544				
合计	2 号支洞控制段排烟出渣总时长 /h			8 815	3 号支洞控制段排烟出渣总时长 /h			7 179
	2 号支洞控制段普通通风总时长 /h			24 363	3 号支洞控制段普通通风总时长 /h			20 194

表 4 通风方案费用估算对比表

编号	项目名称	费用 /万元		备注
		混合式机械通风方案	风道式通风方案	
1	通风竖井	—	150.00	—
2	轴流风机购置及安装	326.00	376.00	—
3	排风散烟管道购置及安装	327.30	253.06	—
4	运行费	—	—	—
4.1	2 号支洞风机耗电量	847.68	104.51	电价按 95%电网供电,5%柴油机供电构成,单价为 0.965 元/(kW · h)
4.2	3 号支洞风机耗电量	796.44	489.69	
4.3	竖井口风机耗电量	—	607.82	
	合 计	2 297.42	1 981.07	相差 316.35 万元

6 结 语

昌波水电站引水隧洞在 2、3 号施工支洞控制段中独头掘进最大长度分别达到了 3.31 km、3.70 km(含支洞长度),通过施工作业面需风量、

通风方案拟定比选、通风费用估算,得出风道式通风方案比混合式机械通风方案费用节省 316.35 万元,费用节省比例达 13.7%,且考虑到竖井通风方案在隧洞内环境温度降低等方面仍有较好的

效果,虽通风竖井相对较长和运行时段有限,但风道式通风方案优势较为明显,在后续长大引水隧洞施工通风设计中,积极采用风道式通风是经济合理的。

参考文献:

[1] 湛少英.长距离大断面水工隧洞掘进施工通风技术解析[J].四川水利,2021(增2):11-14.

[2] 唐浩,郑宏雷.两河口水电站某隧道通风方案及造价分析[J].黑龙江水利科技,2009,37(2):45-47.

[3] 苟红松,李永生.高海拔地区隧道施工通风风量计算及风机选型研究[J].隧道建设,2012,32(1):53-56.

[4] 张东明,王媛.锦屏水电站引水隧洞群长距离通风问题研究[J].人民黄河,2012,34(6):128-130.

[5] 武艳红.地下洞室群施工排烟竖井辅助通风的设计[J].四川水利发电,2020,39(6):71-75.

作者简介:

陈 阳(1995-),男,重庆梁平人,工程师,学士,从事水利水电工程施工组织设计方面的研究工作;

余志超(1982-),男,湖北孝感人,正高级工程师,硕士,从事水利水电工程施工组织设计方面的研究工作.

(编辑:吴永红)

(上接第 100 页)

压力钢管按承载能力极限状况设计,工况与荷载组合情况见表 5。

(4)计算结果。压力钢管管壁厚度复核计算

表 6 压力钢管管壁厚度复核计算成果表

部位	钢管内径 /m	设计内水压力 /MPa	单位围岩弹性抗力 /(MPa/cm)	设计壁厚取值(含锈蚀厚度) /mm
钢衬起点至厂房 上游侧 20 m	8.5	1.26	50~20 (计入围岩抗力的埋管)	28
厂房上游侧 20 m 范围	8.5	1.28	0 (不计围岩抗力的埋管)	28

表 7 压力钢管抗外压稳定复核计算成果表

计算截面	钢管内径 /m	管壁厚度 /mm	设计外压 /MPa	加劲环环间管壁抗外 压稳定安全系数		加劲环自身抗外压 稳定安全系数	
				计算 安全系数	规范规定的 最小安全系数	计算 安全系数	规范规定的 最小安全系数
钢衬起点至 厂房上游侧 20 m	8.5	28	0.73	4.10	1.8	2.07	1.8
厂房上游侧 20 m 范围	8.5	28	0.73	4.10	2.0	2.07	2.0

4 结 语

根据工程地形地质、枢纽布置条件,提出不同的压力管道布置思路,竖井布置方案除施工难度较大外,水力条件、快速门设计、工程投资等方面均优于缓坡布置方案,因此选择竖井式布置方案。并针对选定的布置进行压力管道结构设计,设计思路可供类似工程参考。

参考文献:

[1] 国家能源局,水电站压力钢管设计规范:NB/T 35056—2015[S].北京:中国电力出版社,2016.

[2] 杨海红,官忠瑞,邓拥军.黄登水电站压力钢管设计[J].水力发电,2019,45(06):26-30,55.

[3] 水电水利规划设计总院.水工设计手册(水电站建筑物)[M].北京:中国水利水电出版社,2013.

[4] 住房和城乡建设部.水工建筑物荷载标准:GB/T 51394-2020[S].北京:中国计划出版社,2020.

[5] 伍鹤皋,周彩荣,付山,等.埋藏式压力钢管加劲环抗外压稳定分析方法探讨[J].水力发电学报,2015,34(12):19-23.

作者简介:

罗佩玉(1991-),女,重庆綦江人,工程师,工学硕士,从事水工设计工作;

刘 朋(1994-),男,山东菏泽人,工程师,工学硕士,从事水工设计工作.

(编辑:吴永红)