

# 盾构机作业舒适性探讨与应用措施分析

杨威文 游耀广

(广州市市政集团有限公司工程总承包分公司 广东 广州 510000)

**摘要:**随着经济水平的持续提升,城市化发展速度越来越快,交通压力随之增加,对城市地铁及综合管廊修建也成为主要任务之一。但在施工过程中,盾构机以及其他各项设备的应用,能够形成湿热环境,并产生诸多不良影响,降低作业效率,严重影响作业人员身心健康,所以有必要采取合理的冷却措施,以改善湿热环境和降低不良影响的发生率。基于此,针对当前国内隧道施工热环境的整体情况进行分析,提出盾构机通风冷却系统应用建议,希望为盾构机舒适性作业改善提供参考。

**关键词:**城市地铁;盾构机通风冷却系统;高温;作业舒适性

## 1 隧道施工环境现状

盾构机在城市地铁、管廊施工中占据重要地位,一般来说,其总装机功率在1500kW以上,作业中能够持续产生大量热量,隧道施工处于地下,空气流通效果较差,施工环境中具有湿度大、灰尘多的特点,特别是多雨地区或多雨季节,地铁施工环境中湿热问题十分显著。当前诸多发达国家中,针对地铁隧道施工在安全、健康方面提出了严格管理规范,要求对盾构机进行应用时,必须全面配置降温、消防及应急逃生设备,具有较高人性化水平,但是根据我国对于盾构机的应用情况来看,虽然在《铁路隧道施工规范》中明确规定,隧道施工过程中环境温度不可在28℃以上,但是实际施工过程中,大多数项目都未能满足该要求,施工人员时常在35℃以上高温高湿环境中进行连续数小时工作,设备、人身安全不能得到有效保障,管理效果及人性化水平均相对较为薄弱。所以,“如何为隧道施工环境降温”成为了当前隧道施工中重点问题之一。为了对这一问题进行有效解决,有必要合理应用冷却系统,因此,对城市地铁盾构机冷却系统应用进行充分探讨具有重要意义。

## 2 盾构机作业部高温原因

对盾构机冷却系统出现高温原因进行分析,更有利于对其高温情况进行控制。根据分析,盾构机冷却系统出现高温主要原因如下:(1)内循环水泵流量与实际需求不匹配,导致冷却水不能顺利实现热量交换,将热量带往隧道外;(2)油箱体积太小,或是油箱内的油量过少,冷却水不能顺利将热量带走,热量聚积在油内,导致润滑系统热量无法被带走;(3)需要进行冷却处理位置过多,部分位置未通冷却水,仅靠隧道内空气冷却,造成作业区空气温度升高;(4)冷却水水温过高,管路长度过长,不能有效起到降温作用,特别是在夏季高温天气之中,冷却水池散热效果差。

## 3 隧道施工高温高湿环境的危害及降温必要性

### 3.1 施工人员身体健康受到严重影响

在湿热环境中劳动,人体汗液蒸发速度极慢,也就极易导致施工人员出现闷热感受,若环境温度在35℃以上,同时环境湿度在70%以上,施工人员则会受到一定程度生理伤害,例如体温调节机制发生故障导致人体体温上升以及水盐代谢紊乱等,各项情况均能够导致施工人员生理功能受到影响。

### 3.2 生产安全及工作效率受到影响

在高温高湿施工环境之中,施工人员体力消耗速度极快,也就难以保障生产效率的稳定,同时,以26℃为标准温度,空气温度每高于标准温度1℃,生产效率即下降约8%,原因在于,高温高湿环境易导致人体中枢神经系统失调,并引起严重疲劳感及精神恍惚现象,在一定程度上增加事故发生概率,设备使用安全及寿命也受到影响。情况严重时,甚至可能发生火灾。根据相关调查统计结果显示,在40℃的环境中开展施工工作,事故发生率为30℃工作环境的3.6倍。

### 3.3 隧道降温的必要性

根据上文可了解到,高温高湿工作环境能够造成多种危害,所以针对地铁隧道施工环境开展降温工作十分必要,不仅能够有效保障施工人员身体健康,促使其工作效率得到提升,同时还可有效降低事故发生率,有利于提升施工单位市政单位管理及人性化水平,推动社会发展。

## 4 隧道冷却降温的应用策略

### 4.1 个体保护散热降温

施工的人员均穿戴冷却帽、冷却背心,或借助矿泉水瓶以及塑料袋等,灌水冷冻成为冰块,以作为个体防护措施。

### 4.2 冰块吸热降温

冰块在融化过程中吸收热量,同时冰水混合物能够与其周边空气通过温差对热量进行传递。

### 4.3 喷雾洒水吸热降温

将高压水和高压风共同与喷雾器进行连接,在施工环境中开展喷雾洒水作业,以起到降温的效果。

#### 4.4 柜式空调降温

借助空调机组将冷却空气输送至各局部区段中,并将冷凝器热量向非空调区进行排放,由此,能够对施工环境中的湿气和热量进行迁移,在一定程度上起到改善地铁环境作用。

#### 4.5 增加风量降温

将盾构机应用于地铁隧道施工过程中,针对其进行降温处理,主要需要借助其自身除渣系统、水系统以及通风系统在运行过程中排出大量热量。对于施工环境温度来说,进行通风为主要处理措施,原因在于,通风能够对施工人员温度感知起到直接影响作用。

#### 4.6 通风制冷降温

采用制冷机与空冷器结合降温模式,即应用制冷设备冷却施工环境空气。主要包括制冷系统、冷却水系统、冷冻水系统以及空气冷却系统。

在空气冷却系统之中,首先需要制冷系统供给冷冻水,将冷冻水置于保温冷冻水箱之中,再通过冷冻水泵将冷冻水输送到空气冷却器之中,以促使风流温度下降,在此过程中冷冻水升温,并能够通过相应管路回到制冷系统中重新被制冷,空冷器位置通常在盾构机尾部台车中,随着掌子面持续推进,空冷器能够不断向前移动。

#### 4.7 各制冷方式对比

个体保护、冰块、喷雾洒水适合应用于个体以及局部的临时降温,降温范围以及效果均较有限,但是操作过程简捷,成本较低。

柜式空调适合应用于局部降温,风量较为有限,耗能较大,但不需提供单独通风系统,隧道内热量并未带到隧道外,其热量只是隧道内局部转移。由于压缩机的运转,隧道内多出了热源点。

增大风量适合应用于产热量相对较低场合,降温效果不显著,但不需设置其他降温设备。隧道较长时,送风功率损失大。

制冷机与空冷器结合适合应用于冷却水制备条件良好、对降温要求较高的场合,需要大量应用冷却水,保养维护工作较为复杂,投入较大,但能够精准控制温度,且连续性、稳定性均良好。

在开展地铁隧道施工过程中,施工环境需要大范围连续降温,以此为基础,制冷机与空冷器结合可满足地铁施工环境降温要求,而盾构机自身具有循环冷却水系统,设备安装简单方便,所以对于盾构机来说,将制冷机与空冷器结合作为通风冷却主要模式。

### 5 实际应用

以广州市市政集团海瑞克 S1153 盾构机加装制冷系统为实例,探究盾构机通风冷却系统应用。该盾构机将开挖一条长为 1172 米地铁隧道。

#### 5.1 通风方案的选择

通风模式为压入式通风,将主风机设置于洞外,于盾构机后方设置与主风机配套二次风机,借助风管将新鲜空气输送至工作面,同时加快污浊空气向外排出速度。

#### 5.2 通风风量的设置

根据国内外相关规范、标准:

(1) TB10204—2002《铁路隧道施工规范》,其中对隧道施工环境中温度和风速应达到的标准进行了规定,要求在隧道施工过程中:“风速在全断面开挖时不小于 0.15 m/s”。

(2) 国际隧协《Guidelines for Good Occupational Health and Safety Practice in Tunnel Construction》要求空气的供给量或从作业面的排出量为:在任何时候全断面隧道或竖井的最小平均风速应在 0.3 ~ 2m/s。

(3) 美国的《煤炭矿井通风法规》要求平均风速为 0.30m/s,这个速度是基于全断面来说的,而不考虑设备挤占空间,并且 0.30 m/s 是最低限度。从控制粉尘方面要求风速为 0.61m/s,因为研究证明这一风速能很好地控制粉尘。

海瑞克 S1153 土压盾构机配套的风量为 7m<sup>3</sup>/s,开挖隧道拼装管片后内直径为 5.4m,则隧道内风速为 0.305m/s,考虑到台车上设备挤占空间,则在施工作业区域风速将会高于 0.305m/s。所以,本机通风系统无需改造。

#### 5.3 外加制冷量计算

盾构隧道内产热形式:①(装机)功率产热  $q_1$ ;②作业人员产热  $q_2$ ;散热(携带热量出洞)形式:①外部循环水散热  $q_3$ ;②出渣散热  $q_4$ ;③通风制冷量  $q_5$ ;④洞内土层传热  $q_6$ 。

根据能量守恒定律,即盾构机掘进热平衡计算原理:

表 1 实测掘进参数表

冷却水 进水温度 $t_{w1}$ (°C)	冷却水 出水温度 $t_{w2}$ (°C)	作业区 温度 $t_w$ (°C)	送风 温度 $t_a$ (°C)	地层 温度 $t_{t1}$ (°C)	出土 温度 $t_{t2}$ (°C)	送风量 $W_a$ (m <sup>3</sup> /h)	冷却水 流量 $W_w$ (kg/h)
32.5	34	34.5	31	26	30	25200	50000

$$q_1+q_2=q_3+q_4+q_5+q_6$$

盾构机未加装空调时,掘进智慧城综合管廊 K3-1 至 K3 隧道时,正值广州夏天,开挖一环平均为 1 小时,开机时间与出土时间各占一半。2021 年 7 月 3 ~ 20 日实测掘进中各参数数据平均值见表 1。

按广州地铁统计与作业中实际出土计量,此类型盾构机每环出渣量约为 150t,根据广州地铁土层主要物理学参数建议表(见表 2),广州地铁土层含水量大于 13.2%,从作业舒适性考虑,以 13.2% 作为含水量下限计算值。则设定其中渣土干重量为  $150 \times (1-0.132) = 130.2$  (t),水重为  $150 \times 0.132 = 19.8$  (t)。

(1) 作业人员产热

表 2 广州地铁土层主要物理力学参数建议数值表

岩土 分层	岩土 名称	含水量 w (%)	天然 密度 ρ (g/cm <sup>3</sup> )	孔隙比 e	孔隙度 n (%)	塑性 指数 I <sub>p</sub>	液性 指数 I <sub>L</sub>	压缩 系数 α <sub>0.1-0.2</sub> (MPa <sup>-1</sup> )	压缩 模量 E <sub>s0.2</sub> (MPa)	直接快剪强度		固结快剪强度		无侧限 抗压强度 q <sub>u</sub> (KPa)	土的 泊松比 μ	基床 反力系数 K <sub>m</sub> (MPa/m)	静止侧 压力系数 K <sub>0</sub>	地基承 载力标 准值 f <sub>t</sub> (KPa)	渗透 系数 K (m/d)
										粘聚力 c (KPa)	内摩擦 角 φ (°)	粘聚力 c (KPa)	内摩擦 角 φ (°)						
(1)	杂填土	14.5	2.13	0.53	36.0										30				
(2-1)	淤泥质土	58.0	1.61	1.49	59.9	15.44	2.30	1.14	2.13	6.61	6.78	19.9	15.2		0.42	10	0.72	60	
(2-2)	淤泥质砂层	24.9	1.86	0.82	44.34					6.53	10.6				0.25	5	0.33	100	1.02
(3-2)	冲、洪积砂层	13.2	2.12	0.46	31.5							0	36.0		0.25	25	0.33	140	1.10
(4)	冲、洪积土层	31.7	1.95	0.904	47.1	15.3	0.33	0.34	4.68	36.6	12.0	50.4	22.4	121.3	0.32	50	0.47	200	
(5-1)	残积土(可塑、稍密)	25.4	1.93	0.774	43.5	14.0	0.23	0.45	3.67	37.4	13.0	46.6	18.4	103	0.30	70	0.43	230	
(5-2)	残积土(硬塑、中密)	23.9	1.96	0.712	41.4	12.3	0.25	0.41	3.91	42.2	14.5	45.3	19.3	108	0.28	100	0.39	260	
(6)	岩石全 风化带	20.5	2.01	0.633	38.7	10.7	0.16	0.37	3.91	42.6	17.4	54.6	20.8	145	0.25	150	0.33	290	

盾构机井下作业人数为 10 人，在 34.5℃ 条件下，作业人员在重度劳动条件下产热为：

$$q_2 = 0.5(q_{pa} + q_{pi})p$$

$$= 0.5(160 + 370) \times 10$$

$$= 2650$$

$$= 2.65(\text{kW})$$

式中：p 为作业人数；q<sub>pa</sub> 为重度作业条件下显热热量，W；q<sub>pi</sub> 为 34.5℃ 重度作业条件下湿热量，W。

(2) 外部循环水散热 q<sub>3</sub>

$$q_3 = 0.5C_w(t_{w2} - t_{w1})W_w$$

$$= 0.5 \times 4.186 \times (34 - 32.5) \times 50000$$

$$= 565110$$

$$= 156.98(\text{kW})$$

式中：C<sub>w</sub> 为水比热容，4.186 (kJ/kg℃)；W<sub>w</sub> 为冷却水重量，kg；t<sub>w1</sub>、t<sub>w2</sub> 为冷却水进、出水温度，℃。

(3) 渣土带出热量

$$q_{41} = C_t(t_{12} - t_{11})W_t$$

$$= 1.01 \times (30 - 26) \times 19800$$

$$= 525960.4$$

$$= 146.1(\text{kW})$$

式中：C<sub>t</sub> 为渣土比热容，1.01 (kJ/kg℃)；W<sub>t</sub> 为渣土重量，kg；t<sub>11</sub>、t<sub>12</sub> 为地温、渣土出洞温度，℃。

$$q_{42} = C_w(t_{12} - t_{11})W_{tw}$$

$$= 4.186 \times (30 - 26) \times 130200$$

$$= 331506$$

$$= 92.1(\text{kW})$$

式中：C<sub>w</sub> 为水比热容，4.186 (kJ/kg)；W<sub>tw</sub> 为水重量，kg；t<sub>11</sub>、t<sub>12</sub> 为地温、渣土水出洞温度，℃。

(4) 通风制冷量

$$q_5 = 0.5C_a(t_w - t_a)W_a$$

$$= 0.5 \times 1.294 \times (34.5 - 31) \times 25200$$

$$= 57061.4$$

$$= 15.9(\text{kW})$$

式中：C<sub>a</sub> 为空气比热容，1.294，kJ/m<sup>3</sup>℃；W<sub>a</sub> 为风量，m<sup>3</sup>；t<sub>w</sub>、t<sub>a</sub> 为作业区、送风平均温度，℃。

(5) 通过管片环向传导热量

$$q_6 = 0.5 \times 2\pi \times l \times \lambda (t_w - t_{t1}) / \ln(r_2/r_1)$$

$$= 0.5 \times 2 \times 3.14 \times 70 \times 1.28 \times (27 - 24.6) / \ln(3/2.7)$$

表 3 盾构机作业区温度及冷却系统相关参数表

冷却水 进水温度 t <sub>w1</sub> (°C)	冷却水 出水温度 t <sub>w2</sub> (°C)	作业区 温度 t <sub>w</sub> (°C)	送风 温度 t <sub>a</sub> (°C)	地层 温度 t <sub>t1</sub> (°C)	出土 温度 t <sub>t2</sub> (°C)	送风量 W <sub>a</sub> (m <sup>3</sup> /h)	冷却水 流量 W <sub>w</sub> (kg/h)
32.5	34	27	31	26	27.5	25200	50000

$$= 17.7(\text{kW})$$

式中：λ 为普通混凝土传热系数，1.28 (W/m·k)；r<sub>1</sub>、r<sub>2</sub> 为管片环内外径，3m、2.7m；t<sub>w</sub>、t<sub>t1</sub> 为管片内外环表面温度，34.5℃、26℃。

(6) 盾构机装机功率所产生的热量

根据热平衡公式，(装机) 功率产热 q<sub>1</sub> = 外部循环水散热 q<sub>3</sub> + 出渣散热 q<sub>4</sub> + 通风制冷量 q<sub>5</sub> + 洞内土层传热 q<sub>6</sub> - 作业人员产热 q<sub>2</sub> = 426(kW)。

若在以上环境条件下，将盾构作业区的温度降为 27℃。因渣土与作业区也存在热交换，但盾构机出土时间短，并堆积于土斗内，因此渣土将高于作业区的温度 0.5 ~ 1℃，将得到表 3 的参数。

通过以上公式计算可得将有 200 (kW) 左右的热平衡差，这些将是制冷机与空冷器需带走的热量。

5.4 设备选型

根据以上计算，选用 RCWE75HA(B) 型水冷涡旋机组，制冷量为 242.5kW。空气冷却器可以被分为两个不同的类型，分别是接触式空气冷却器和表面式空气冷却器。其中，前者需要通过水和空气直接接触，使风流得到冷却，其中水受到污染可能性较大，且易导致喷嘴堵塞，形成污垢包裹蒸发器换热管，甚至可能导致换热管发生堵塞。后者冷水在管内，需要空气通过管壁与其进行换热，从而实现风流的冷却，该类型空冷器具有系统简捷、规格较多且移动便捷等多方面优势，所以当前已经得到了广泛应用。

## 6 结语

盾构机作业区热平衡为动态过程与作业地区、地层条件、隧道深度有很大关系,因此必须根据实际作业条件进行计算。首次使用机型,可根据将装机功率的20%~30%作为热功率,计算其在设计条件下制冷功率。

从实际来看,当前我国地铁隧道施工中安全配套措施以及人性化仍然相对较为落后,但同时也正在向好的方向发展,毕竟在34℃左右环境作业,对人体健康有很大危害。并且,对于地铁盾构机来说,制冷机与空冷器结合模式很适合在其中应用,具有较高推广价值。需要注意的是空冷器具有较大通风阻力,可能在二次风机进风口位置形成负压,并导致二次风机正常运行受到影响,所以应对于空冷器的位置应进行优化,以促使盾构机通风冷却系统应用效果得到提升。

### 参考文献:

[1] 陈亚军,彭云涌,吕涛,等.一种利用盾构循环冷却水降温的隧道通风系统[P].CN210660172U.2020.

[2] 武雷峰.城市地铁施工盾构机进、出站时的预防涌水涌砂措施[J].价值工程,2011,30(12):2.

[3] 王春风.浅析地铁通风系统的优化措施及发展趋势[J].山东工业技术,2019(4):1.

[4] 郑建业,陈传武,卢刘扬,等.一种盾构机多线路水循环冷却控制系统[P].CN108868795A.2019.

[5] 盛晓文,黄翔,李鑫,等.地铁直接蒸发冷却通风降温系统适应性区域划分[R].成都.铁路暖通年会.2014.

[6] 黄翔,盛晓文,孙铁柱,等.地铁站用蒸发冷却新风与局部机组相结合的通风空调系统[P].CN, CN202613589U.2012.

[7] 曹成兵.双模盾构通风和冷却系统的改进方法与实践[J].中国市政工程,2020(5):6.

**作者简介:** 杨威文(1981.11-),男,广东广州人,本科,工程师,研究方向:系统设计及机电管理;游耀广(1995.11-),男,福建人,本科,工程师,研究方向:机电设备管理。

(上接第59页)

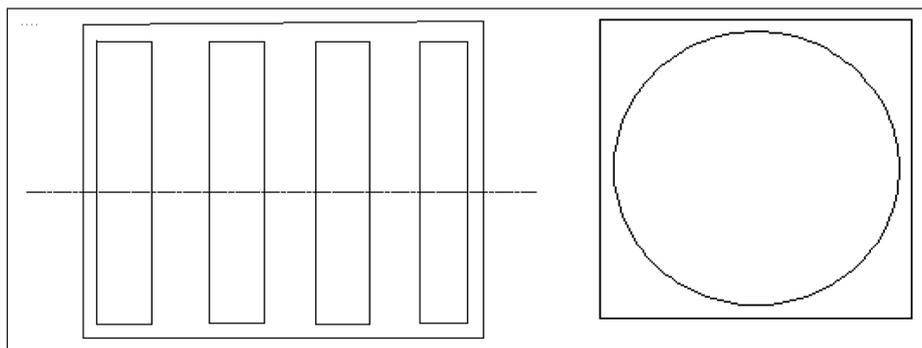


图9 结构方案(二)截面空间布局

和挡药板上升时非常迅速,可能引起药物的散出;销与下齿和上齿接触都属于冲击载荷,故销容易损坏。

### 方案二:

(1)空间布局:四个药盒同一中心线相互叠加如图9示。其中,截面的空间占有率: $3.14 \times 60^2 \div 120 \times 120 = 78.5\%$ 。

(2)零部件加工装配状况:零件总体数量较少、箱体和箱盖均可用数控铣床加工、转轴要求有较高的表面光滑度,药盒需要拆散成两部分加工,但都可以在铣床上加工,装配较简单。

(3)可靠性能:药盒承受间歇平稳载荷,只要保证电机转动无误就能保证药盒不会产生误差;药盒为半封闭状态,可保证药物的质量;故装置有良好的性能。

## 6 结语

从功能齐全,操作简单,安全可靠、满足个性、加工成本和向智能化发展趋势等多方面考虑,方案(二)各方面表现出优越性较强烈于方案(一)。

### 参考文献:

[1] 机械设计手册编委会.机械设计手册[M].北京:机械工业出版社.2004.

[2] 成大先.机械设计手册.机械设计手册[M].北京:机械工业出版社.2004.

[3] 苏厚合,黄俊贤,黄圣杰.Pro/E2001年中文版入学指南[M].北京:科学出版社.2009.

[4] 于运满.精密间歇机构[M].北京:机械工程出版社,2000.

[5] 王成焘.现代机械设计—思想与方法[M].上海:科学技术文献出版社.1999.

[6] 苏厚合,黄俊贤,黄圣杰.Pro/E2001年中文版入学指南[M].北京:科学出版社.2006.

[7] 林清安.Pro/E wildfire 2.0 零件装配与参品设计[M].北京:电子工业出版社.2005.

[8] 葛建中,朱强,安宗权.Pro/E wildfire 3.0 中文版工程图设计实例[M].北京:清华大学出版社.2007.

**作者简介:** 龙敦鹏(1990.03-),男,汉族,湖南郴州人,讲师,本科,研究方向:职业教育。