

岩土热物理指标试验方法总结及影响因素分析

王璐佳 汪传斌

广州地铁设计研究院股份有限公司

摘要: 目前在地铁通风节能设计及冻结法设计施工过程中, 岩土热物理指标起到了尤为重要的作用, 本文总结了目前室内试验中常用的热物理指标测试方法及各种方法的优缺点, 并归纳总结了广州地区常见岩土层的热物理指标。同时总结分析了热物理指标的影响因素, 并提出相关建议。

关键词: 热物理指标; 导热系数; 比热容; 导温系数
【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2021.23.022

引言

在地铁建设过程中, 区间联络通道等常常采用冻结法施工, 目前设计及施工过程关注的重点在冷媒对地层渗透性及抗剪强度指标的影响^[1-2], 由于岩土的热物理指标难以精准测定, 故对于地层的热容量及冷却过程的热平衡常采用经验法, 为保证工程的安全性, 在实际设计及施工过程中往往保守考虑, 造成一定的资源浪费。

另外在地铁运行中, 区间隧道通风运行能耗量约占地铁工作时全部能量消耗的10%~15%, 其中通过隧道壁及周边岩土层吸收的热力约为25%~30%^[1]。可想而知, 如果能充分利用隧道周围岩土体的热传导特性, 就能够有效降低地铁通风系统的能量消耗, 提高能耗效益。《地铁设计规范》也规定, 地下部分的通风与空调系统, 当计算排除余热所需的风量时, 应计算隧道和车站传至地层周围土壤的传热量^[3]。因此, 在室内试验中准确得到热物理

指标参数, 对地铁建设有着非常重要的作用。

一、常用的热物理指标测算方法对比

岩土的热物理指标主要包括导热系数、比热容、导温系数三个指标。导热系数又称为“热导率”, 反映物质的热传导能力, 是指当温度垂直向下梯度为1℃/m时, 单位时间内通过单位水平截面所传递的热量。导热系数一般用λ表示, 单位为W/(m·K)。比热容也是热力学中常用的一个物理量, 表示物质提高温度所需热量的能力, 也就是指单位质量的某种物质升高(或下降)单位温度所吸收(或放出)的热量, 比热容一般用C表示, 单位是KJ/(kg·K)。导温系数又称热扩散系数, 是物体中某一点的温度的扰动传递到另一点的速率的度量, 表示岩土体在升温或冷却时, 各部分温度趋于一致的能力, 通常用α表示, 单位是(m²/h)。

三个指标之间的关系为:

$$\alpha = \frac{3.6\lambda}{\rho C} \quad (1)$$

式中ρ为岩土材料密度, 单位为kg/m³。

目前室内试验中测定热物理指标的方法主要有热线法、瞬态平面热源法、热平衡法, 另外实际运用中还有平板热流计法^[4]、差式扫描量热法(DSC法)^[5]。各种测试方法有着各自的适用条件及优缺点。

各种测试方法的主要优缺点如下表1:

表1 常用热物理指标测试方法对比表

分类	测定指标	优点	缺点
热线法	导热系数	方法简便, 实验室可大规模采用	试验结果受到试验基体影响, 灵敏度低
平面热源法	导热系数 导温系数	方法简便, 实验室可大规模采用	对样品的平整度要求较高, 测试砂土及岩石样品时准确度低
热平衡法	比热容	制样方便, 操作简单	平衡终点选择困难, 不适合含水量、孔隙比较高的岩土样
平板热流计法	导热系数	制样方便, 操作简单	测试周期长, 对试验环境要求高。
差式扫描量热(DSC)法	比热容 导热系数	仪器自动化程度高、恒温范围广、精度高	适用于烘干、粉碎几十毫克岩土样, 无法测定天然土样。

我国目前在城市轨道交通岩土工程勘察规范中仅指出岩土热物性指标的室内测定, 可采用面热源法、热线法或热平衡法, 但对各种方法具体如何操作没有详细规定^[3]。在其工程行业内, 如水利工程、交通工程、铁路工程等的勘察规范中, 仅仅指对多年冻土的导热系数试验有操作规程。在地质行业岩石物理力学性质试验规程中对岩石导热系数测定方法(热线法)和岩石比热容测定方法(DSC法)做了规定^[6]。由于目前我国城市轨道交通工程中, 尚无统一的天然岩土热物理指标测试方法标准及操作规程, 导致给岩土热物理指标的准确测定、测

试量值的统一、成果应用带来不便。

二、广州地区常见地层的热物理指标

结合广州地区多年的地铁建设经验, 采用热平衡法及平板热流计法能够较快速的测试出岩土体的导热系数及比热容, 再根据公式(1)计算出导温系数。广州地区常见岩土体的热物理指标统计如下表2:

根据数据分析可知, 热物理指标的离散性较大。其主要原因为岩土属于非均质的多孔介质, 影响其导热系数的因素非常多, 包括岩土体的化学组分、矿物晶体结构、岩体结构、土体粒度、孔隙率、含水率、温度

表2 广州常见地层热物理指标统计表

岩土类别	含水率 ω (%)	密度 ρ (g/cm ³)	导热系数 λ W/(m·k)	比热容 C KJ/(kg·K)	导温系数 α (m ² /h)
素填土	2.2~35.4	1.46~2.56	0.71~2.73	0.51~1.89	0.0001~0.0047
淤泥	26~183	1.27~2.04	0.64~2.02	0.71~2.38	0.0006~0.0027
淤泥质土	25.1~98.1	1.39~2.14	0.73~3.22	0.89~2.32	0.0009~0.0059
冲洪积粉细砂	15.1~34.8	1.53~2.31	0.91~3.43	0.48~2.05	0.0016~0.0069
冲洪积中粗砂	15.1~25.5	1.47~2.42	0.73~3.79	0.33~2.09	0.0015~0.0095
冲洪积砾砂	15.4~25.3	1.2~2.35	0.48~3.73	0.62~1.93	0.0008~0.0079
冲洪积粉质黏土	7.8~53.7	1.37~53.7	0.71~3.80	0.35~2.35	0.0008~0.0071
碎屑岩残积土	16.3~37.8	1.77~2.16	1.16~2.84	0.97~1.72	0.0013~0.0050
残积砂质黏性土	15.2~48.4	1.43~2.21	0.96~3.60	0.71~2.19	0.0013~0.0076
全风化带	6.1~48.5	1.45~2.75	0.74~2.83	0.53~1.89	0.0010~0.0063
强风化	0.1~10.8	1.68~2.77	0.52~2.16	0.40~1.00	0.0010~0.0052
微风化	0.06~4	2.33~3.04	0.55~2.59	0.31~0.99	0.0010~0.0055

等^[7]，第四系地层中岩土的含水率和孔隙率是影响热物理指标的主要因素。常见岩土材料的导热系数及比热容如下表3:

表3 常见岩土材料的热物理指标

岩土类型	导热系数 λ (W/m ² ·°C)	比热容C (KJ/kg·°C)
水 (20°C)	0.608	4.18
空气	0.0224	1.00
干砂	4.8	0.79
干土	0.2	0.84
石英	7.7	0.75
长石	2.25	0.71

由上表可知，对于空气的导热系数与土颗粒的导热系数差别较大，对岩土体的导热系数影响较为严重，而水对于岩土材料的比热容具有显著的影响。根据相关研究导热系数的计算公式^[8] (2) 及比热容的计算公式^[9] (3) :

$$\lambda = \left[\frac{\omega \gamma_s}{\rho_w (1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s})} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\gamma_d \lambda_s + \frac{\gamma_d \omega}{\rho_w} \lambda_w + (1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} - \frac{\gamma_d \omega}{\rho_w}) \lambda_a \right] + \left[1 - \frac{\omega \gamma_s}{\rho_w (1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s})} \right]^{\frac{1}{2}} \lambda_a \quad (2)$$

$$C = \frac{C_d m_d + C_w m_w + C_a m_a}{m} \quad (3)$$

式中 ω 为含水量； γ_d 、 γ_s 分别为别为干土容重及土的比重； λ_s 、 λ_w 、 λ_a 分别为土颗粒、水、空气的导热系数； ρ_w 为水的密度。 C_d 、 C_w 、 C_a 分别为干土、水、空气的比热容； m_d 、 m_w 、 m_a 分别为干土、水、空气质量。

由表3及式 (2) 及式 (3) 可知岩土材料天然孔隙比、含水量及饱和度是决定其热物理指标的关键因素，同一种岩土试验，在不同的含水率及饱和度的情况下，测试得到的岩土热物理指标也有差异。即便相同的含水率的重塑土样与原状土样，由于其土骨架结构不同，也

会导致岩土热物理指标测试结果不同，故试验样品的天然状态尤为重要。

三、结语

(1) 热物理指标对于冻结法施工、地铁隧道通风设计的节能设计有着重要的意义。

(2) 目前国内尚未有明确的操作规程指导岩土热物理试验，目前常用的各种方法均存在着一定的缺陷，需进一步试验研究。

(3) 岩土材料为多孔介质，影响热物理指标的因素较多，岩土的孔隙比及含水量是最为重要的影响因素，故在热物理指标的测定过程中，试验的天然状态尤为重要。

参考文献

- [1] 王敏, 王晓华, 孙闯. 新建路隧道联络通道冻结法设计与施工[J]. 民营科技, 2010 (1): 51-52.
- [2] 康小虎. 竖井冻结法设计与施工[J]. 甘肃水利水电技术, 2014 (4): 54-57.
- [3] GB 50117-2013 《地铁设计规范》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [4] 李慧芝, 赵亚品. 室内岩土热物理指标的试验方法及试验要点的探讨[J]. 铁道勘察. 1672-7479 (2013) 01: 62-63.
- [5] 赵秀峰, 曹景洋, 罗惠芬. 岩土热物理性质室内测试方法探讨[J]. 安徽地质. 1005-6157 (2016) 01: 61-65.
- [6] 蒋守红, 石文艳. 差示扫描量热仪(DSC)使用中应注意的一些问题[J]. 企业技术开发, 2013, 32 (22): 33 ~ 35.
- [7] 许模, 王迪, 蒋良文, 等. 岩土体导热系数研究进展[D]. 地球科学与环境学报, 2011, 33 (4): 421-427.
- [8] 刘为民, 何平, 张钊. 土体导热系数的评价与计算[J]. 冰川冻土, 2002, 24 (6): 770-773.
- [9] 彭友君, 彭博. 岩土热物理指标的分析计算[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12 (1): 38-43.