

MJS 加固水泥土热物理特性研究

杨平¹, 陈驰¹, 张存², 何文龙¹

(1. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308)

摘要 目的 研究 MJS 加固水泥土的热物理特性, 解决 MJS 与冻结止水联合加固冻结设计的水泥土热物理参数取值问题. 方法 通过自制冻结温度测试系统测定 MJS 水泥土冻结温度, 通过 ISOMET 便携式热特性分析仪测定导热系数及容积热容量, 采用 SHR-6 型水泥水化热测定仪测定水化热. 结果 MJS 水泥土冻结温度随水泥掺量增大而降低, 随龄期增长先降低后升高再降低, 冻结温度在 $-0.64 \sim -1.40^{\circ}\text{C}$; 冻结与常温 MJS 水泥土导热系数均随龄期增长及水泥掺量增大而减小; 常温 MJS 水泥土容积热容量随龄期增长而减小、随水泥掺量增大先减小后增大, 冻结 MJS 水泥土容积热容量随龄期增长及水泥掺量增大而缓慢减小; 随水泥掺量增大, MJS 水泥土水化放热速率峰值提高, 而到达放热速率峰值的时间均为水化 15 h 左右; 水化热在 28 d 龄期内, 随龄期增长和水泥掺量增大而增大, 龄期 28 d 时, 水泥掺量由 40% 每增加 1%, 水化热增加 0.95%. 结论 MJS 水泥土热物理参数受水泥掺量及龄期影响较大, 人工冻结加固方案设计应充分考虑水泥掺量和龄期的影响.

关键词 MJS 水泥土; 冻结温度; 导热系数; 容积热容量; 水化热

中图分类号 TU411.2

文献标志码 A

Study on Thermal Physical Properties of MJS Cement Soil

YANG Ping¹, CHEN Chi¹, ZHANG Cun², HE Wenlong¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, China, 210037; 2. China Railway Liuyuan Group Co. Ltd., Tianjin, China, 300308)

Abstract: The thermal physical properties of MJS reinforced cement soil were studied to solve the cement soil thermophysical parameter problem of the freezing design in MJS and frozen water stop combined reinforcement method. The freezing temperature of MJS cement soil was measured by the self-made freezing temperature testing system. The thermal conductivity and volumetric heat capacity were measured by ISOMET portable thermal characteristic analyzer, hydration heat with SHR-6 cement hydration heat tester. The freezing temperature of MJS cement soil decreases with

the increase of cement content, and decreases firstly, then increases and finally decreases with the increase of age. The freezing temperature ranges from -0.64°C to -1.40°C . The thermal conductivity of frozen and normal temperature MJS cement soil decreases with the increase of age and cement content. At room temperature, the volume heat capacity of MJS cement soil decreases with the increase of age, and it decreases firstly and then increases with the increase of cement content. The volume heat capacity of frozen MJS cement soil decreases slowly with the increase of age and the increase of cement content. With the increase of cement content, the heat release rate peak of cement soil hydration increases. The time to reach the peak of exothermic rate is about 15h of hydration. Hydration heat increases with the increase of age and cement content during the 28d period. At the age of 28 days, for every 1% increase in cement content from 40%, the hydration heat of cement soil increase by 0.95%. The cement content and age affect the thermal physical properties of MJS cement soil greatly, so they should be fully considered in the design of the artificial freezing method.

Key words: MJS cement soil; freezing temperature; thermal conductivity; volumetric heat capacity; the hydration heat

随着我国轨道交通项目的快速发展,更多新建线路需要穿越已建线路,往往会遇到新建车站下穿既有车站的复杂问题^[1-3].在承压富水砂层中,车站密贴下穿工程极易出现坍塌和涌水,施工难度巨大. MJS 水泥土桩水平加固效果较好,可有效控制地层沉降变形^[4-8],同时采用人工冻结法在富水地层中进行止水,可大大降低坍塌和涌水的风险^[9-10].而 MJS 桩水泥掺量较高,一般在 40% 以上,热物理特性与常规土体差异较大,且由于水泥导热性能较差,大体积 MJS 桩水泥水化放热使桩内外形成温差和温度应力,易对加固结构造成不利影响.目前对 20% 以下水泥掺量水泥土的热物理特性^[11-12]、冻融特性^[13-15]已有研究,对水泥水化放热机理及影响因素也进行了广泛地研究^[16-20],但对 MJS 水泥土热物理特性尚缺乏研究.笔者通过试验对 MJS 水泥土热物理特性进行研究,可为南京地铁中胜站下穿工程及其他采用 MJS 加固+冻结法辅助止水工程的施工方案设计提供参考.

1 试验

1.1 试验材料

试验土样取自南京河西地区绿溢大厦基

坑,与中胜站下穿车站为同一粉细砂地层,土体各参数如表 1 所示.试验所用水泥为海螺牌 42.5 普通硅酸盐水泥.

表 1 粉细砂参数

| Table 1 Silty fine sand parameters | | | | |
|--|----------|-----------|---|--|
| 密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 相对 密度 | 含水率/ % | 比热容/ ($\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$) | 导热系数/ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$) |
| 1.84 | 2.63 | 25.63 | 1.2 | 1.6 |

采用扰动土,将取回的土料分批放入烘箱进行烘干、碾碎,并用 2 mm 筛子筛过后置于袋中密封备用,土料级配曲线如图 1 所示.

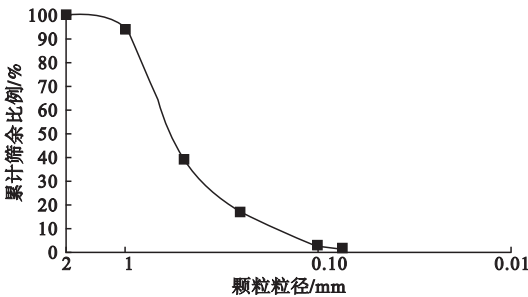


图 1 级配曲线

Fig. 1 Grading curve

按原始含水率配置扰动土,按水灰比 1:2 配置水泥浆,将配置好的水泥浆按 40%、45%、50%、60% 和 70% 不同掺量分别加入扰动土中,5 种不同水泥掺量水泥土试样密度如表 2 所示.

表2 水泥土密度

Table 2 The density of cement soil

| 水泥掺量/% | 密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) |
|--------|--------------------------------------|
| 40 | 1 977.64 |
| 45 | 1 996.55 |
| 50 | 2 009.18 |
| 60 | 1 948.11 |
| 70 | 1 941.93 |

1.2 试验过程与方法

对5种不同水泥掺量和1 d、2 d、3 d、5 d、7 d、14 d、28 d的7个不同龄期条件下MJS水泥土热物理特性试验,包括冻结温度、导热系数和容积热容量;以水泥掺量作为单因素进行28 d水化热试验研究,以获得水泥土水化放热规律。

冻结温度试验采用自行研制的装置进行,满足《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)国家标准.装置由低温箱、电脑、数据采集系统等组成,采用长度5 cm,内径3 cm的PVC管进行制样(见图2)。

导热系数和容积热容量测定采用欧洲产ISOMET热特性分析仪.先在常温20℃下测定水泥土试样导热系数和容积热容量,接着将试样放入-10℃的环境箱内冻结,恒温24 h后再测定冻土的导热系数和容积热容量。

水化热试验采用SHR-6型水泥水化热测定仪进行,该仪器为直接法测定水泥水化热.微机设置自动控制水化热数据的采集,可自动实时显示多通道温度曲线和水化放热曲线,并计算出不同龄期内的总热量值。

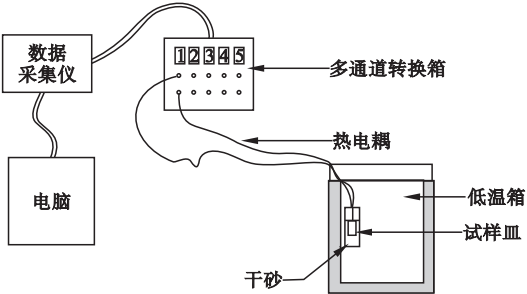


图2 冻结温度试验原理图

Fig. 2 Schematic diagram of freezing temperature test

2 结果与分析

2.1 冻结温度

土体冻结可分为过冷、跳跃、恒定及下降4个阶段.图3为水泥掺量50%、龄期14 d条件下,水泥土冻结过程中温度随时间的变化曲线,曲线水平段对应的温度即为水泥土的冻结温度。

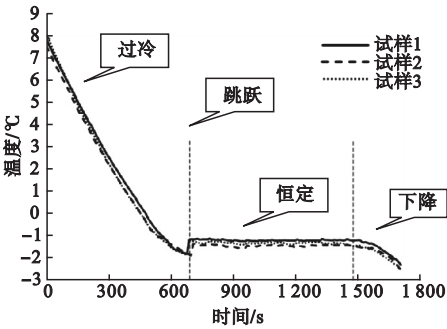


图3 冻结温度曲线

Fig. 3 Curve of freezing temperature

图4为不同龄期下冻结温度与水泥掺量关系拟合曲线.拟合关系式的相关系数均大于0.9,二者的相关性较好.不同龄期下水泥土冻结温度随水泥掺量增加均呈近似线性降低.水泥掺量较小时,不同龄期水泥土冻结温度差异较小,随水泥掺量的增大,龄期对水泥土冻结温度变化影响增大,当水泥掺量达到70%时,不同龄期冻结温度差值最大达69%.龄期越长,冻结温度与水泥掺量直线斜率越大,即冻结温度受水泥掺量影响更大。

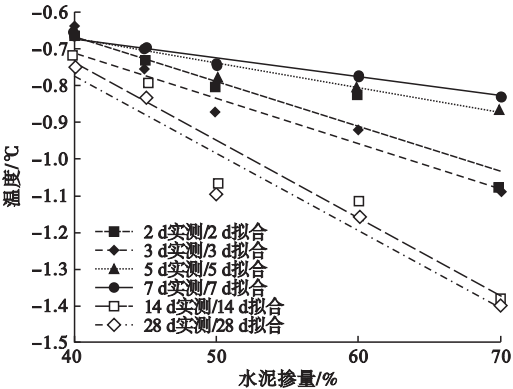


图4 不同龄期下冻结温度与水泥掺量关系曲线
Fig. 4 Curve of freezing temperature and cement incorporation ratio at different ages

图5为不同水泥掺量下冻结温度与龄期关系曲线。冻结温度呈非线性变化,随龄期增长均先降低后升高再降低,分为3个阶段。分析水泥水化过程:通过扫描电镜和电化学等方法研究发现,水泥水化过程并非单一的液相或固相水化反应,而是同时存在凝结(固相)和结晶(液化)两种反应结构。水化初期溶解-结晶过程占主导,在水化后期,由于扩散作用难于进行,因此局部化学反应占主导。当水泥掺量较大,达到40%及以上时,水泥作为胶结材料的效果减弱,水化反应对土体特性的影响提高,因此冻结温度与龄期关系曲线出现非正相关的变换过程。

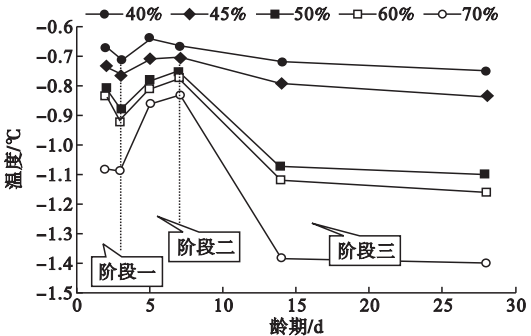


图5 不同水泥掺量下冻结温度与龄期关系曲线
Fig. 5 Curve of freezing temperature and age at different cement content

阶段一:水化反应初期,溶解-结晶过程占主导,熟料矿物溶解于水中,水体浓度提高,冰点降低,同时生成水化物使部分自由水转化为结合水,含水率降低,相变释放潜热减少,此时冻结温度随龄期增大呈下降趋势。阶段二:水化反应一段时间后,水化物开始大量析出,导致溶解于水中的熟料矿物浓度相对降低。同时水化物一直处于过饱和状态而不断析出,因此水溶液整体浓度下降,冻结温度发生小幅度升高。即图5显示除40%掺量冻结温度在5d龄期时达到最高外,高水泥掺量时7d龄期附近冻结温度为最高。阶段三:水化反应后期,水化物大量结晶胶结,扩散作用难于进行,此阶段水化反应主要为局部化学反应,土体中水化物溶液浓度变化对冻结温

度影响较小。随龄期增大,土体含水量降低,过冷阶段土体温度下探较深,同时相变释放潜热量显著降低,因此土体冻结温度迅速降低。

2.2 导热系数

导热系数反映物质热传导能力,水泥的加入和冻结作用,在改变土体成分的同时也影响土体导热系数。图6为常温不同水泥掺量导热系数与龄期关系曲线。导热系数随龄期增长均呈对数规律减小,龄期较短时,导热系数随龄期增大变化速率较快,随龄期增长,导热系数变化速率减小。28d养护龄期内,40%~70%水泥掺量的水泥土导热系数下降8.6%~15.8%,水泥掺量越高,水泥土导热系数随龄期变化越快。

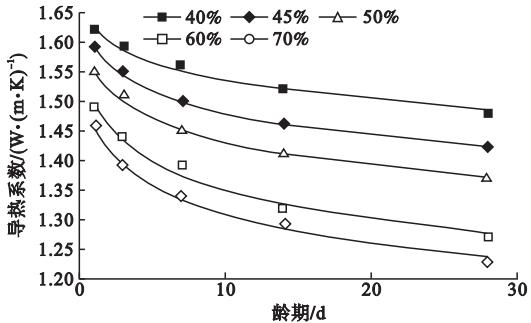


图6 常温不同水泥掺量导热系数与龄期关系曲线
Fig. 6 Curve of thermal conductivity and age at different cement content at room temperature

图7为常温不同龄期导热系数与水泥掺量关系曲线。

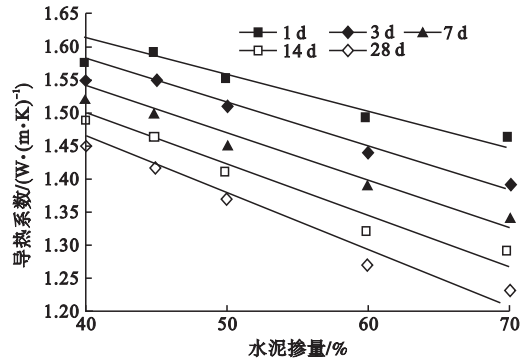


图7 常温不同龄期导热系数与水泥掺量关系曲线
Fig. 7 Curve of thermal conductivity and cement content at different ages at room temperature

导热系数随水泥掺量增大均呈近似线性规律降低,变化规律与低掺量水泥土的变化规律相似,但变化量比低掺量水泥土大^[11]. 龄期越短,导热系数随水泥掺量变化量越小,1 d 龄期下,变化量为 0.16 W/(m·K),是 28 d 龄期导热系数变化量的 66.7%.

图 8 为 45% 水泥掺量下导热系数与龄期关系曲线. 图 9 为 14 d 龄期下导热系数与水泥掺量关系曲线. 分析可得冻结状态下水泥土导热系数亦随龄期增长呈对数规律减小,随水泥掺量增大呈近似线性减小,变化规律与常温水泥土类似,但冻结水泥土导热系数大于常温水泥土,两者比值在 1.1~1.2.

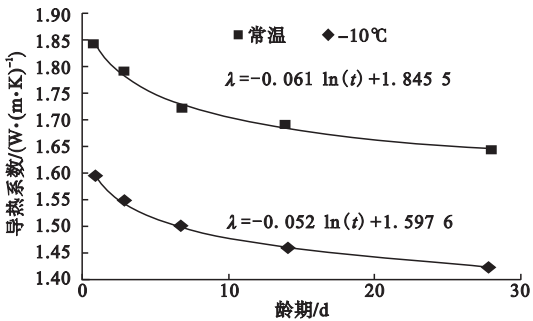


图 8 45% 水泥掺量下导热系数与龄期关系曲线

Fig. 8 Curve of thermal conductivity and age at 45% cement content

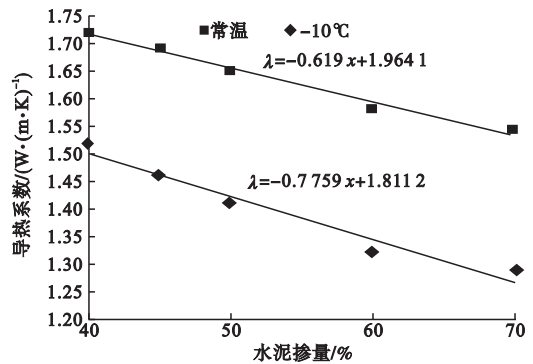


图 9 14 d 龄期下导热系数与水泥掺量关系曲线

Fig. 9 Curve of thermal conductivity and cement content at age of 14 d

冻结后水泥土导热系数显著提高是因为土体中水相变成冰,冰的导热系数约为水的 4 倍. 同时,水泥土导热系数随龄期增减小是

因为水化反应消耗土体水分.

冻结水泥土导热系数随水泥掺量变化规律与常温水泥土类似,这是因为低温环境下水泥水化反应速率降低,冻结水泥土与同龄期下的常温水泥土相比,仅存在水相变成冰的差异,土体结构差异较小.

2.3 容积热容量

单位体积的土体温度改变 1℃ 所需的热量称为容积热容量,它是表示土体蓄热能力的指标. 容积热容量越小,土体温度变化越灵敏,水泥土硬化周期内,水化反应持续放热,导致土体温度上升,研究水泥土容积热容量,对精确预测土体温度具有重要意义. 图 10 为常温不同水泥掺量下容积热容量与龄期关系曲线. 容积热容量随龄期增长呈对数规律降低. 除 50% 水泥掺量水泥土容积热容量明显偏小外,同一龄期下不同水泥掺量水泥土容积热容量相近.

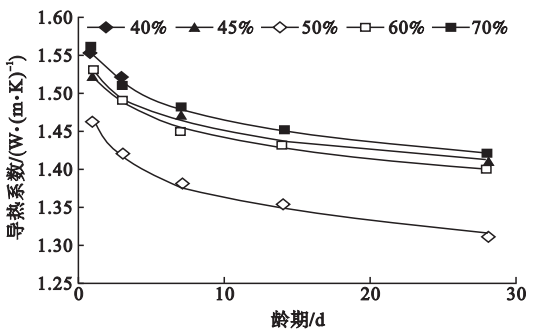


图 10 常温不同水泥掺量下容积热容量与龄期关系曲线

Fig. 10 Curve of volumetric heat capacity and age at different cement content at room temperature

图 11 为常温不同龄期下容积热容量与水泥掺量关系曲线. 容积热容量随水泥掺量增大先减小后增大,对应 50% 掺量存在一个最低值,这符合低掺量水泥土容积热容量随水泥掺量增大呈近似线性减小的规律^[11]. 水泥掺量大于 50% 时,随水泥掺量增大,水泥土容积热容量增大,增长速率先快后慢,当水泥掺量达到 70% 时,各龄期水泥土容积热容量与 40% 水泥掺量条件下基本持平.

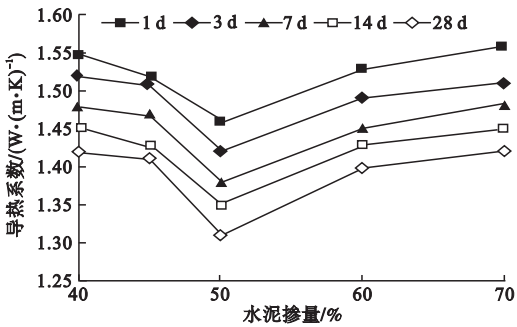


图 11 常温不同龄期下容积热容量与水泥掺量关系曲线

Fig. 11 Curve of volumetric heat capacity and cement content at different ages at room temperature

不同龄期下,50%水泥掺量水泥土容积热容量均最小,这是因为:水泥土作为一种多相介质材料,容积热容量具有按各物质成分质量加权平均的性质.水泥土中水的容积热容量最大($4.2\text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$),其次为固体颗粒($2.0\sim 3.0\text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$),气体容积热容量极小($1.3\text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$).水泥土含水率高,孔隙中空气少,对容积热容量的影响微小,所以孔隙水对水泥土的容积热容量变化起主导作用.因水泥土固体颗粒成分稳定,因此密度可以反映水泥土密实度和孔隙率.

图 12 为水泥土密度与水泥掺量关系曲线,水泥掺量小于 50% 时,水泥熟料和水化物填充土体孔隙,土体密度提高,孔隙率降低,水泥掺量大于 50% 时,随水泥掺量加大,颗粒级配变差,土体孔隙增多,密度随之减小.水泥土含水率与孔隙率呈正相关,因此

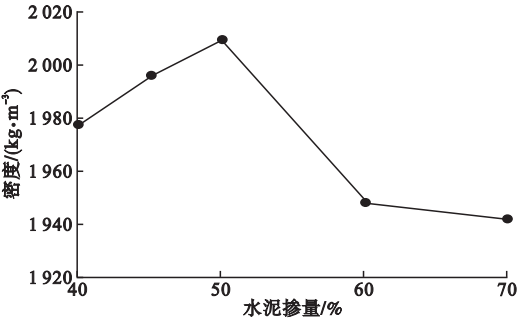


图 12 水泥土密度与水泥掺量关系曲线

Fig. 12 Curve of cement soil density and cement content

50% 水泥掺量水泥土含水率最低,密度最大,容积热容量最小.

图 13 为 45% 水泥掺量下容积热容量与龄期关系曲线,容积热容量随龄期增大呈对数规律降低,与同一条件下常温水泥土容积热容量变化规律类似,但其变化幅度较小,且容积热容量小于常温水泥土.

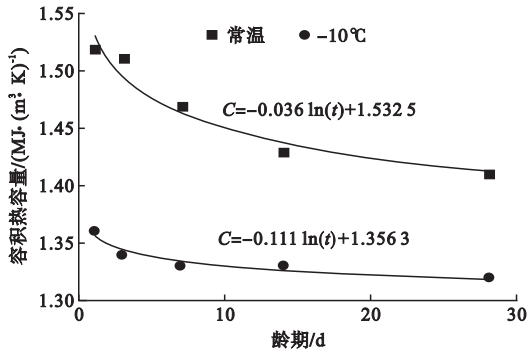


图 13 45% 水泥掺量下容积热容量与龄期关系曲线

Fig. 13 Curve of volumetric heat capacity and age at 45% cement content

组成水泥土的物质中,水的容积热容量远大于其他矿物成分,对水泥土容积热容量变化起主导作用,除水化最初的一段时间外,水泥土含水率变化缓慢,因此随龄期增大水泥土导热系数均呈对数规律减小.又因为冰的容积热容量($2.3\text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$)比水($4.2\text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$)小,冻结水泥土中水相变成冰,所以冻结水泥土容积热容量小于同一条件下常温水泥土.

图 14 为 14 d 龄期下容积热容量与水泥掺量关系曲线,冻结水泥土容积热容量随水泥掺量增大略有下降,水泥掺量从 40% 增大到 70%,冻结水泥土容积热容量仅减小 0.75%,而常温水泥土容积热容量随水泥掺量变化较为显著.

因为低温环境下水泥水化反应速率降低,且 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 土中自由水冻结成冰,冰的容积热容量接近于土,所以冻结水泥土容积热容量随龄期和水泥掺量变化幅度均小于常温水泥土.

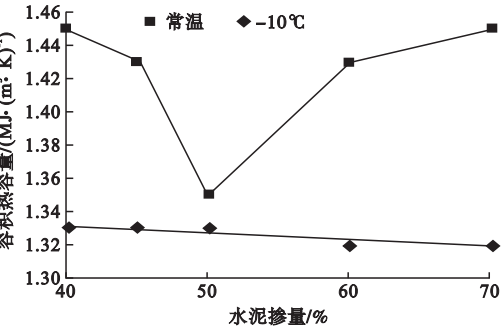


图 14 14d 龄期下容积热容量与水泥掺量关系曲线

Fig. 14 Curve of volumetric heat capacity and cement content at age of 14d

2.4 水化放热

2.4.1 水化放热速率

图 15 为硅酸盐水泥水化放热曲线. 根据放热速率可分为 5 个典型的水化反应阶段: I 预诱导期; II 诱导期、III 加速期、IV 减速期、V 稳定扩散期.

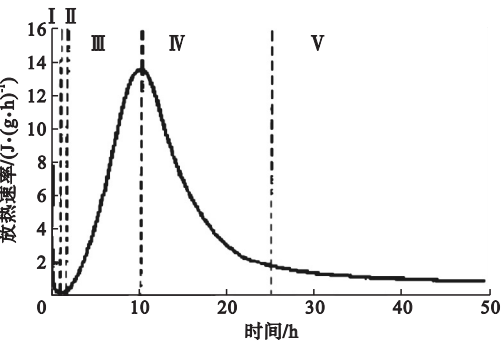


图 15 硅酸盐水泥水化放热曲线

Fig. 15 Exothermic curve of Portland cement hydration

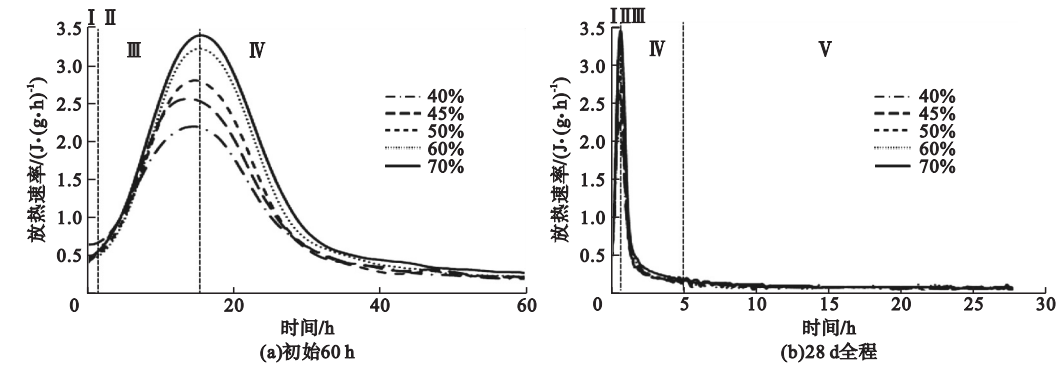


图 16 不同水泥掺量水泥土水化放热速率与龄期关系曲线

Fig. 16 Curve of the hydration heat release rate and age of cement soil at different cement content

图 16 为不同水泥掺量水泥土水化放热速率与龄期关系曲线. 从图 16(a)可知,不同水泥掺量水泥土水化初始 60h 水化放热速率随龄期的变化规律,不同水泥掺量水泥土的水化放热趋势大致相同,但速率不同. 水化开始时处于 I 预诱导期, C_3S (硅酸三钙) 表面水化导致水泥迅速水化放热,放热速率较大. 此后放热速率降低,处于 II 诱导期,水化反应减弱,主要发生离子浓度改变. 由于 MJS 水泥土水化前两阶段的持续时间很短,在水化开始后的几分钟内完成,且试验持续时间较长,数据记录间隔为 30 min,所以图 16(a)中未能明显地反映出水化前两个阶段的放热速率差异. II 诱导期后水泥水化反应速率加快,处于 III 加速期,放热速率迅速提高至峰值,此后水化放热速率降低,进入 IV 减速期,一段时间后处于 V 稳定扩散期;水泥土水化放热的 5 个阶段所对应的时间点与水泥的不同,总体时间段均大于水泥水化放热时间. 从图 16(a)还可知,随水泥掺量增大,水泥土水化放热速率的峰值提高,放热速率峰值范围为 2.2 ~ 3.4 J/(g·h). 但不同水泥掺量水泥土水化放热速率到达峰值的时间较为接近,为水化 15 h 左右,原因是砂土的矿物成分较为稳定,不参与水化反应,水泥土水化反应过程仅消耗水泥熟料和水,水泥熟料和水在水泥土中充分混合,反应速率受水泥含量的影响较大,导致水泥土水化放热峰值随水泥掺量

增大而提高,且达到峰值的时间较为接近.从16(b)可知,5 d后水泥土水化放热速率较小,进入V稳定扩散期,不同水泥掺量水泥土水化放热速率较为接近且均低于 $0.2\text{ J}/(\text{g}\cdot\text{h})$,此后水泥土水化一直处于V稳定扩散期.

2.4.2 水泥土水化热

图17为不同水泥掺量水泥土水化热曲线.水化初期不同水泥掺量水泥土水化热均随龄期增长而迅速增大,且水泥掺量越大,水化热增大速率越大.随龄期增长,水泥土水化热差异逐渐显现,1 d后不同水泥掺量水泥土水化热差值迅速增大,5 d后水化热随龄期增长幅度较小,不同水泥掺量水泥土水化热差值基本保持稳定.龄期28 d时,水泥掺量由40%每增加1%,水化热平均增长0.95%.

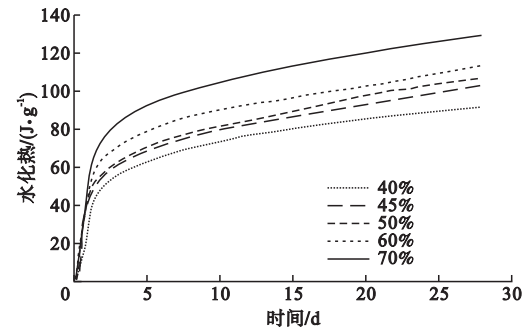


图17 不同水泥掺量水泥土水化热曲线

Fig. 17 Curve of hydration heat of cement soil with different cement content

3 结 论

(1)水泥土冻结温度随龄期增长先降低后升高再降低,除40%掺量冻结温度在5 d龄期时达到最高外,高水泥掺量时7 d龄期附近冻结温度为最高,冻结温度为 $-0.64\sim -1.40\text{ }^{\circ}\text{C}$;随水泥掺量增大冻结温度呈近似线性降低,龄期较大时,最低可达 $-1.40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

(2)常温和冻结条件下水泥土导热系数变化规律类似,随龄期增长呈对数规律减小,随水泥掺量增大近似线性减小;同一条件下,

冻结水泥土导热系数大于常温水泥土,两者比值在 $1.1\sim 1.2$.

(3)常温水泥土容积热容量随龄期增长呈对数规律降低,随水泥掺量增大先减小后增大,掺量为50%时存在最低容积热容量,主要受水泥土孔隙中水的影响;不同条件下,冻结水泥土容积热容量变化较小,随龄期增大呈指数规律减小,随水泥掺量增大呈近似线性减小.

(4)随水泥掺量增大,水泥土水化放热速率峰值提高,放热峰值的龄期较为接近,均为水化15 h左右;水泥土水化热随龄期增长而增大,水泥掺量越大相同龄期下水泥土水化热越高,龄期28 d时,水泥掺量由40%每增加1%,水化热增长0.95%.

参考文献

[1] 陶连金,安军海,边金,等.密贴下穿地下工程施工新工艺“CRD+多重预顶撑”研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(1):97-103.
(TAO Lianjin, AN Junhai, BIAN Jin, et al. Study on a new technology of “CRD + multiple top bracing” applied in closely-attached intersecting underground structures[J]. Journal of Hunan university (natural sciences), 2015, 42(1):97-103.)

[2] 杜文,王永红,李利,等.双层车站密贴下穿既有隧道案例分析及隧道沉降变形特征[J].岩土力学,2019,40(7):2765-2773.
(DU Wen, WANG Yonghong, LI Li, et al. Case study on double-deck subway station under crossing and analysis of filed monitoring about this case [J]. Rock and soil mechanics, 2019, 40(7):2765-2773.)

[3] 姜宝臣.广州地铁海珠广场站换乘设计与实施[J].隧道建设,2017,37(4):486-493.
(JIANG Baochen. Design and construction of Haizhu square interchange station of Guangzhou metro [J]. Tunnel construction, 2017, 37(4):486-493.)

[4] TONON F. ADECO full-face tunnel excavation of two 260 m² tubes in clays with sub-horizontal jet-grouting under minimal urban cover [J]. Tunnelling and underground space technology, 2010, 26(2):253-266.

[5] 陈仁朋,张品,刘湛,等.MJS水平桩加固在盾构下穿既有隧道中应用研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(7):103-110.
(CHEN Renpeng, ZHANG Pin, LIU Zhan, et al. Application study of MJS horizontal column reinforcement in shield tunneling [J].

- Journal of Hunan university (natural sciences), 2018, 45 (7): 103 - 110.)
- [6] 钱王苹, 漆泰岳, 乐弋舟, 等. 盾构隧道下穿高速铁路的安全因素分析及应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14 (11): 2282 - 2289. (QIAN Wangping, QI Taiyue, LE Yizhou, et al. The analysis and application of safety factors of shield-underneath high-speed railway [J]. Journal of railway science and engineering, 2017, 14 (11): 2282 - 2289.)
- [7] 张文博, 张康, 陈卫军. MJS 工法在富水砂层隧道密贴下穿既有车站工程中的应用[J]. 现代城市轨道交通, 2018 (10): 35 - 38. (ZHANG Wenbo, ZHANG Kang, CHEN Weijun. Application of MJS method in construction of rich water sand layer tunnel under existing station [J]. Modern urban transit, 2018 (10): 35 - 38.)
- [8] 周朋. MJS 工法在砂卵石地层盾构近距离下穿运营地铁隧道的应用[J]. 都市快轨交通, 2018, 31 (6): 122 - 128. (ZHOU Peng. Application of MJS method in traversing under the operating metro line near the sand gravel layer [J]. Urban rapid rail transit, 2018, 31 (6): 122 - 128.)
- [9] 袁云辉, 杨平. 人工冻结技术在矿山法隧道中的应用技术研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33 (9): 82 - 86. (YUAN Yunhui, YANG Ping. Research on the application of artificial freezing technology inside the tunnel with subsurface excavation [J]. Journal of railway engineering society, 2016, 33 (9): 82 - 86.)
- [10] 盛应平. 软土地层地铁车站浅埋冻结暗挖法施工方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22 (6): 138 - 142. (SHEN Yingping. Analysis on metro station construction with shallow-buried frozen excavation method in soft soil stratum [J]. Urban mass transit, 2019, 22 (6): 138 - 142.)
- [11] 王许诺, 杨平, 彭玉龙. 水泥土冻结温度及热物理参数试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34 (6): 96 - 100. (WANG Xunuo, YANG Ping, PENG Yulong. Test research to freezing point and the thermal physical parameters of freezing cement soil [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2012, 34 (6): 96 - 100.)
- [12] 胡俊, 唐益群, 张皖湘. 水泥改良前后土体热物理参数试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12 (5): 1198 - 1204. (HU Jun, TANG Yiqun, ZHANG Wanxiang. Experimental study on the thermo-physical property of pre and post cement-soil [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2016, 12 (5): 1198 - 1204.)
- [13] 董慧, 胡俊, 刘勇. 冻融水泥土力学特性试验研究[J]. 森林工程, 2015, 31 (5): 114 - 117. (DONG Hui, HU Jun, LIU Yong. Experimental study on mechanical properties of freeze-thaw cement-treated soil [J]. Forest engineering, 2015, 31 (5): 114 - 117.)
- [14] 鲍俊安, 杨平, 张翔宇. 水泥土融沉特性的试验研究[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2013, 37 (5): 97 - 102. (BAO Junan, YANG Ping, ZHANG Xiangyu. Experimental study on thaw subsidence properties of cement-improved soil [J]. Journal of Nanjing forestry university (natural sciences edition), 2013, 37 (5): 97 - 102.)
- [15] 陈四利, 史建军, 于涛, 等. 冻融循环对水泥土力学特性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22 (2): 343 - 349. (CHEN Sili, SHI Jianjun, YU Tao, et al. Effect of freezing-thawing cycle on the mechanical behaviors of cemented soil [J]. Journal of basic science and engineering, 2014, 22 (2): 343 - 349.)
- [16] BULLARD J W, JENNINGS H M, LIVINGSTON R A, et al. Mechanisms of cement hydration [J]. Cement and concrete research, 2011, 41 (12): 1208 - 1223.
- [17] HAN J G, WANG K J, SHI J Y, et al. Influence of sodium aluminate on cement hydration and concrete properties [J]. Construction and building materials, 2014, 64: 342 - 349.
- [18] 朱鹏飞, 宫经伟, 唐新军. 大体积混凝土胶凝材料体系水化放热规律研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35 (6): 111 - 116. (ZHU Pengfei, GONG Jingwei, TANG Xinjun. Law of hydration heat of mass concrete cementitious materials [J]. Journal of yangtze river scientific research institute, 2018, 35 (6): 111 - 116.)
- [19] 谭广柱, 刘书贤, 张弛, 等. 大体积混凝土温度应力场变化分析[J]. 土木工程与管理学报, 2013, 30 (1): 20 - 24. (TAN Guangzhu, LIU Shuxian, ZHANG Chi, et al. Analysis on temperature stress field change of mass concrete [J]. Journal of civil engineering and management, 2013, 30 (1): 20 - 24.)
- [20] 曹园章, 郭丽萍, 薛晓丽. NaCl 和 Na₂SO₄ 对水泥水化机理的影响[J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2019, 49 (4): 712 - 719. (CAO Yuanzhang, GUO Liping, XUE Xiaoli. Effects of sodium chloride and sodium sulfate on hydration process [J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2019, 49 (4): 712 - 719.)

(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)