

文章编号: 1673-3363-(2015)02-0310-07

# 混凝土水化热对白垩系地层井壁与 冻结壁温度影响的实测研究

李博融, 奚家米, 杨更社, 陈新年, 屈永龙

(西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要** 在西部白垩系地层煤矿立井冻结法凿井施工过程中, 通过分析2个代表性水平层位温度的现场监测数据, 得到了冻结凿井期间外壁及冻结壁温度变化的基本规律。研究表明: 外壁浇筑后即出现温度迅速增长阶段, 两监测层位在1.5 d内温度上升幅度最大可达68.4 °C, 且粗粒砂岩受水化热影响的温度上升速率大于细粒砂岩; 大量水化热使两监测水平保持了较长的正温养护时间, 对外壁混凝土早期强度增长有利; 同时, 释放的水化热使冻结壁出现大范围升温以至局部融化(融化深度达305 mm), 对冻结壁的强度造成不利影响。通过分析和探讨水化热对井壁及冻结壁的影响规律, 对西部白垩系地层井筒冻结工法设计与施工具有重要意义。

**关键词** 温度; 水化热; 冻结壁; 外壁; 监测

**中图分类号** TD 265.3 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.02.022

## Research on the effect of concrete heat of hydration on temperature of the outer wall and frozen wall in Cretaceous strata

LI Borong, XI Jiami, YANG Gengshe, CHEN Xinnian, QU Yonglong

(College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract** In the process of coal mine shaft freezing sinking construction in Cretaceous strata, through analyzing the monitored data of two representative horizontal layers, the basic law of the temperature variations of the outer wall and the freezing wall has been obtained. Research shows that the temperature increases rapidly after the outer walls have been poured; the temperature of the two horizontal layer rises up to 68.4 °C in 1.5 d, and the coarse sandstone's temperature rising rate of hydration heat effect is faster than that of fine grained sandstone. Amount of hydration heat makes the positive temperature maintenance of the two monitoring levels longer, which can benefit concrete strength at its early growth of the out wall concrete. Meanwhile, the heat causes the frozen wall wide-range temperature rise and partial melting (melting depth reaching 305 mm), which causes negative impact on the strength of frozen wall. The analysis and investigation of the hydrated heat of concrete effect has instructive significance to shaft freezing design and construction in Cretaceous strata.

**Key words** temperature; heat of hydration; frozen wall; the outer wall; monitoring

收稿日期: 2013-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272340); 陕西省自然科学基金项目(2011JM5002)

作者简介: 李博融(1983—), 男, 陕西省咸阳市人, 博士研究生, 从事岩土工程稳定性评价理论与计算方面的研究。

通信作者: 奚家米

E-mail: 752690842@qq.com

Tel: 029-83858186

近年在煤炭开采过程中，矿井建设逐步向深厚冲积层发展，在深厚表土层或岩层中建设井筒，冻结法是穿越不稳定厚表土层或基岩的有效施工方法。目前，对冻结规律、冻结技术的研究多集中在第三系和第四系的深厚冲积层<sup>[1-4]</sup>。西部地区煤炭资源丰富，分布有多个大型煤田，随着浅埋煤层可开采量的日益减少以及开采难度的加大，该地区的许多矿区面临由浅埋向深埋的转型<sup>[5]</sup>。然而，白垩系地层在西部地区分布广泛，岩层软弱且不稳定，强度低、遇水软化，且含水较大，这对西部地区冻结法凿井的关键技术提出挑战。因而这一地区冻结法凿井的应用必然面对白垩系地层冻结温度场的探索<sup>[6-7]</sup>。

外壁混凝土水化热温度场与冻结壁温度场相互产生影响，即水化热导致壁后冻土升温以至局部融化，降低了冻结壁强度，使变形加剧；同时，冻结壁本身冷冻效应向井壁传递使混凝土正温养护时间缩短，影响其早期强度增长。因此，进行冻结凿井期间外壁与冻结壁温度的实测研究一直是冻结凿井工程中研究的重点<sup>[6,8-10]</sup>。本文就甘肃庆阳地区新庄煤矿回风立井白垩系地层冻结法凿井工程中外壁浇筑混凝土水化热对冻结壁的影响，结合现场实测进行分析探讨，为白垩系地层井壁设计及安全性评价提供依据。

## 1 新庄煤矿风井工程地质概况

新庄矿井井田位于甘肃宁县西南部，该井筒设计深度966.6 m，其中包括井筒井颈14 m、井筒952.6 m，净直径7.5 m，净断面积44.2 m<sup>2</sup>。表土段及基岩风化带采用冻结法施工，冻结深度910 m。冻结段井壁为钢筋混凝土双层井壁，混凝土强度等级为C40~C80。井筒穿越表土层厚度210.38 m，由黏土、砂砾层组成。

根据钻孔资料，该井筒揭露的地层无反转情况，自上而下分别为第四系、白垩系下统志丹群、侏罗系中统安定组、侏罗系中统直罗组、侏罗系中统延安组等，风井中心钻孔的地层情况见表1。

根据水文地质详查报告，风井地层自上而下划分为4个主要含水层组：① 第四系孔隙潜水含水层：上部以粉土为主，透水性较好，中下部以砂质黏土为主，形成弱含水层。② 白垩系下统华池组砂岩孔隙、裂隙承压水含水层：岩性以砂、泥岩不等厚互层为主，裂隙不甚发育，富水性较弱，对井筒开凿影响不大。③ 白垩系下统志丹群砂岩孔隙、

裂隙承压水含水层：岩性以砂岩为主，局部夹薄层泥岩，胶结欠佳，较疏松，含水性较好。该含水层为煤<sub>8</sub>层的间接顶板充水含水层，厚度大、富水性强、水压大，属强赋水含水层。④ 侏罗纪中统直罗组、延安组砂岩孔隙、裂隙承压水含水层：该含水层段和隔水层呈互层状，是一个复合含水层，属弱富水岩层。

表1 地层参数

Table 1 Parameters of earth rock and soil

地层		风井中心钻孔		岩石名称
系统	组段	累深/m	层厚/m	
第四系	Q	210.38	210.38	粉土、黏土
白垩系 下统 K <sub>1</sub>	华池组	413.65	203.27	泥岩
	洛河组	864.26	660.99	砂岩
侏罗系 中统 J <sub>2</sub>	安定组	895.58	234.59	细粒砂岩
	直罗组	927.17	692.58	砂质泥岩
	延安组	973.27	280.69	砂质泥岩煤

可以看出，新庄煤矿风井所处地层的岩性多为砂岩、砂质泥岩等强度较低的岩石，并且井筒所处地层属于富水地区，含水层数量较多，按井筒净直径7.5 m计算，含水层涌水量在32.08~443.21 m<sup>3</sup>/h之间。冻结凿井过程中，外壁混凝土水化热的释放势必导致壁后冻土升温融化，随着冻结厚度的减小，冻结壁强度随之降低。因此，研究富水软岩地层冻结凿井施工过程中混凝土水化热对冻结壁的影响规律显得尤为重要。

## 2 冻结壁、井壁径向温度测试方案

监测外层井壁及壁后软岩的温度，进行温度场分析，随时掌握冻结壁和外层井壁的平均温度和强度，可为冻结壁稳定性分析、井帮和外层井壁稳定性分析、井壁养护状况评价等提供依据<sup>[7,11]</sup>。根据新庄煤矿风井井筒揭露的水文地质情况，在煤<sub>8</sub>层开采后形成的导水裂隙很有可能达到白垩系下统志丹群砂岩孔隙、裂隙承压水含水层，地下水沿裂隙可进入煤矿床，成为直接充水含水层，是未来煤矿充水的重要含水层。因此，冻结凿井过程中2个代表性温度场监测层位均选择在强赋水含水层白垩系下统洛河组，具体见表2。

表2 温度监测层位

Table 2 Temperature monitoring of the horizon

序号	埋设层位		外层井壁	
	水平/m	岩性	壁厚/mm	混凝土标号
1	-612	粗粒砂岩	550	C60
2	-841	细粒砂岩	550	C60

不同于一般温度监测中只布置 1 个测孔, 新庄煤矿风井在监测时, 两监测层位沿冻结井筒径向向东、南、西、北十字形均匀布置测温孔, 外壁测点埋设沿壁厚方向由井壁内缘向外, 壁后冻土内的温度测点由井帮表面向冻结壁内钻孔(垂直于井帮)布设。4 个方向测孔的布设较单一方向布设测孔, 提升了监测数据分析成果的全面性、可靠性, 能更准确分析井壁筑壁过程中外壁水化热温度场与冻结壁温度场的相互影响规律。每个监测层位的 4 个测温孔分别沿径向布置 6 个测点: 冻结壁、外层井壁分别布置 3 个(1, 2, 3 号)、3 个(4, 5, 6 号)测点, 如图 1。其中 3, 4 号测点均布置在“两壁”界面 50 mm 处, 5 号测点分别位于内、外层井壁的中间部位, 1~2 号测点和 2~3 号测点的距离分别为 350 mm 和 200 mm, 4~5 号和 5~6 号测点的距离相等。

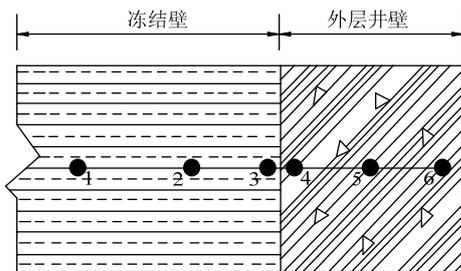


图 1 径向测点布置图

Fig.1 Radial arrangement of measuring points

每个测点选用“铜-康铜热电偶”温度传感探头, 采用远程控制数据采集仪进行长时间监测。测点埋设时, 冻结壁内测点的埋设沿井帮表面向冻结壁内钻进深度 600 mm 的钻孔, 设置 3 个测点后回填与所处岩性一致的碎土, 轻捣密实; 外层井壁 3 个测点导线沿径向绑扎在钢筋上。所有测点埋设时都需要采取防护措施, 防止绑扎钢筋和浇筑混凝土过程中被破坏。

整个监测过程开始于外壁浇筑, 持续至套壁即本层位下方约 12 m 处停止。

### 3 监测数据及分析

#### 3.1 外层井壁温度

分别采集 2 个水平层位同一监测时段各测温孔的测点数据, 记录温度最大值、最小值并计算温差值, 如图 2, 3 所示。

由 2 个水平在浇筑外壁后的降温曲线可以看出, 各监测水平不同径向监测数据曲线的变化趋势基本一致, 且都具有较明显的阶段性:

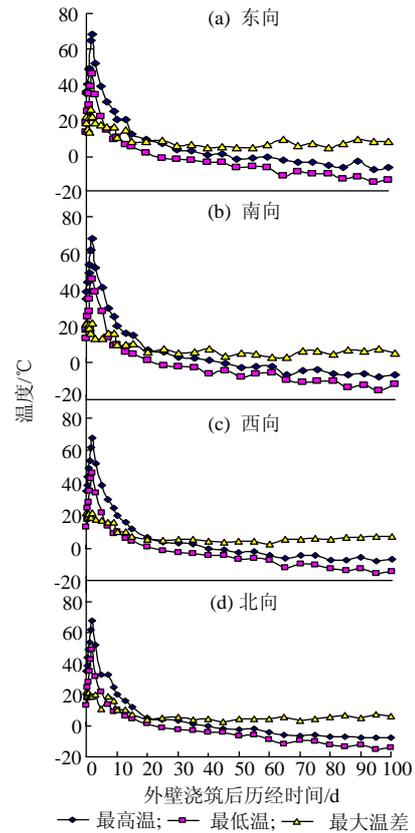


图 2 第一水平(-612 m)外壁温度-时间变化曲线  
Fig.2 The first layer(-612 m) temperature - time curve

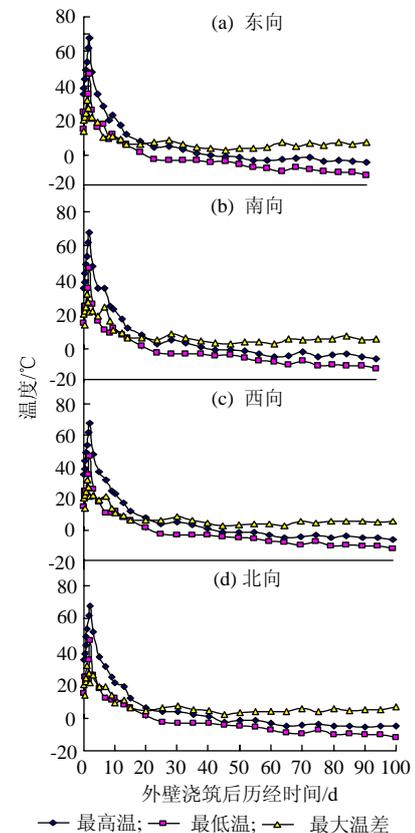


图 3 第二水平(-841 m)外壁温度-时间变化曲线  
Fig.3 The second layer(-841 m) temperature - time curve

1) 温度激增阶段: 浇筑混凝土 1.5 d 左右, 温度达到峰值, 此时外壁内部温差急剧变大。

2) 线性降温阶段: 受水化热影响出现温度峰值以后约 8 d, 近似于线性降温, 内部温差减小。

3) 非线性曲线降温阶段: 此阶段发生在浇筑混凝土后约 9~25 d, 降温曲线呈非线性, 降温速率减小, 内部温差趋于缓和。

4) 均匀缓慢降温阶段: 发生于浇筑后约第 25 d 开始直至套设内壁之前, 温度下降速率趋于缓和, 内部温差变化趋于平稳。

此外, 在急剧升温阶段, 第一水平粗砂岩层中各测孔最晚达到 65 °C 需要 1.48 d, 而第二水平细砂岩层 4 个测孔达到 65 °C 所需时间介于 1.51~1.58 d 之间, 即粗粒砂岩升温速率大于细粒砂岩; 这是因为白垩系地层中粗砂较细砂导热系数更大、热传导更好。

为了分析温度的径向变化规律, 取浇筑后 30 d 作为监测时段绘制 2 个水平的典型温度分布曲线如图 4 所示(同一水平不同方向温度径向变化规律基本一致, 故两水平只列出同方向测孔数据进行分析)。

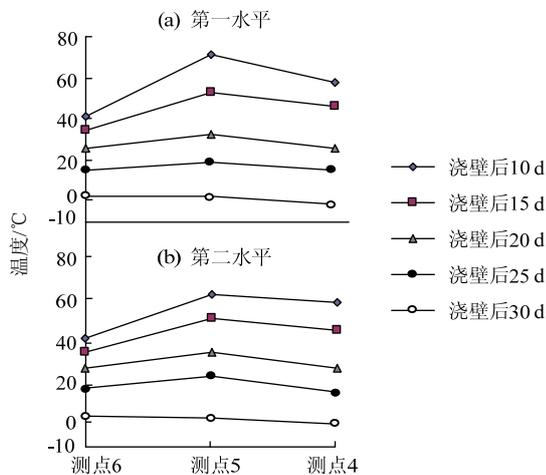


图4 温度径向分布(东向)  
Fig.4 Radial temperature distribution

由图 4 可见, 2 个水平径向温度变化规律近似一致。外壁浇筑后的 10 d 里, 径向温度的分布出现明显的峰值, 由于测点数量较少, 可大致判断井壁内部测点 5 处附近某点温度值最大, 表面测点 6 及测点 4 温度值较低。温度峰值出现的位置距离井壁内表面为壁厚的 0.6 倍左右, 并且测点 6 比测点 4 温度值高出 15 °C 左右。

从浇筑完外壁 10 d 开始, 3 个测点径向温度逐

渐趋于近似线性分布, 井壁的内外表面温差逐步减小至 4 °C, 至 30 d 时, 温度分布基本完全呈线性。此时可以认为是冻结管的盐水循环使得冷量输入超越水化热占据主导地位。

虽然只有 2 个监测水平, 但基于监测思路和监测方法的准确性, 通过仔细分析 2 个水平测温孔数据, 仍然可以得到外井壁浇筑后其温度变化具有如下规律:

1) 水化热热量高, 温度激增: 这个阶段出现在浇筑后的 1.0~1.5 d, 直至达到温度峰值, 第一水平外壁最高温度为 67.6 °C 左右, 第二水平外壁最高温度为 68.4 °C 左右。比较 2 个水平, 这里一部分原因是虽然随着深度的增加, 壁厚和混凝土等级没有增加(表 2), 配合比和水泥用量也未发生变化, 即热源没有增加; 但随着深度增加, 井帮温度降低、井筒内风流速在减小, 热量损失随之减小。

2) 井壁各测点温度差异大: 第一水平的最大温差基本处于 16.2 °C, 而第二水平的最大温差约 20.4 °C。这是由于随着深度的增加, 井帮温度及环境温度都在降低, 即边测点温度下降明显, 使得最终温差变大, 极易出现井帮温度裂缝。

3) 深度越大, 正温养护时间越短: 通过分析井壁边测点进入 0 °C 的时间, 得到两水平外壁全断面正养护时间分别为 24.8 d 和 20.2 d; 通过分析井壁中测点进入 0 °C 的时间, 得到全断面进入负温状态的时间分别为 35.4 d 和 26.6 d。即随着地层深度的增加, 井帮及环境温度都在下降, 外井壁的正温养护时间缩短。

由以上外井壁的温度变化特点不难看出, 2 个监测水平外壁混凝土进入全断面正温养护所需时间第二水平最短为 20.2 d, 而全断面进入负温状态最短要在 26 d 以后, 可见 2 个监测水平在浇筑混凝土后, 低温并不能影响早期强度的增长, 不会出现冻害问题。但值得注意的是, 外井壁全断面进入负温以后, 混凝土的强度增长极其缓慢甚至于停止<sup>[2]</sup>, 所以要求确保在外壁进入负温以前混凝土就达到其设计强度, 对于新庄煤矿回风井筒笔者建议外壁混凝土在浇筑后 20 d 内达到设计强度, 以保证设计承载力。

总之, 对于外壁混凝土水化热的问题, 可以通过控制水化热总量和热量释放速率来降低壁内最大温差, 尤其注意确保混凝土的正温养护时间<sup>[12]</sup>, 避免过早进入负温状态, 影响到混凝土早期强度的

增长。

### 3.2 冻结壁温度

根据监测数据，两水平冻结壁内测点的典型温度变化曲线如图 5, 6 所示。

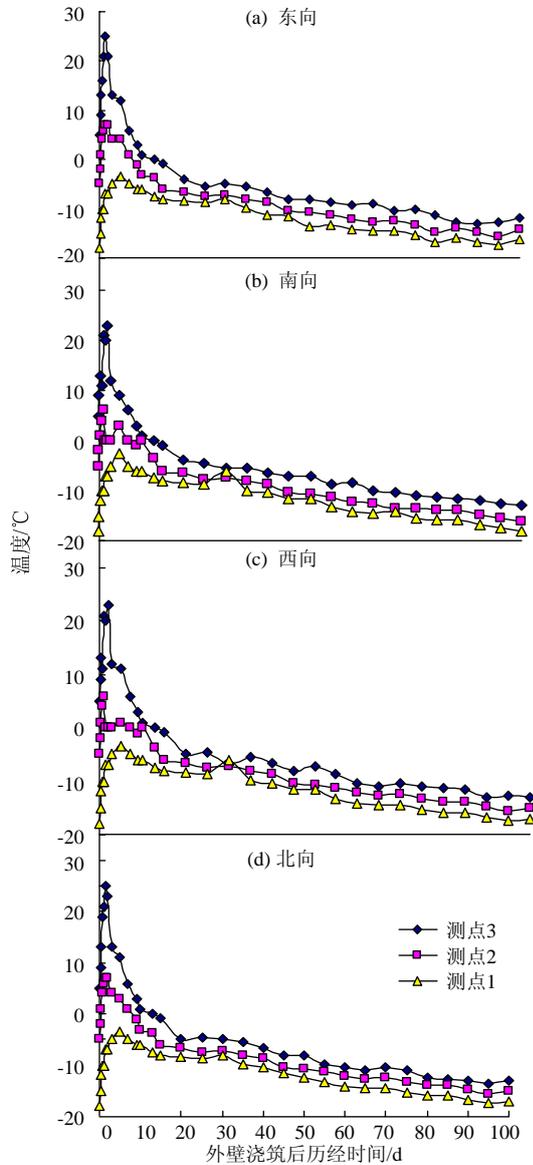


图 5 第一水平(-612 m)冻结壁温度-时间变化曲线  
 Fig.5 The first layer(-612 m) frozen wall temperature-time curves

由图 5, 6 可见，2 水平 8 个测温孔，除第一水平西向测孔、第二水平南向测孔出现监测数据局部丢失，其余测孔温度测量均成功开展。各监测层位测温孔数据，同一水平不同径向曲线走势大致相同，且各对应测点在同一监测时段内的温度变化范围较稳定，说明外壁水化热在井帮沿各个方向均匀传递至壁后冻土。这为研究外壁与冻结壁温度场变化规律提供了全面可靠的理论分析依据，克服了单一

测温孔如果发生数据丢失就不得不中止监测，且只能对单一方向进行监测的弊端。

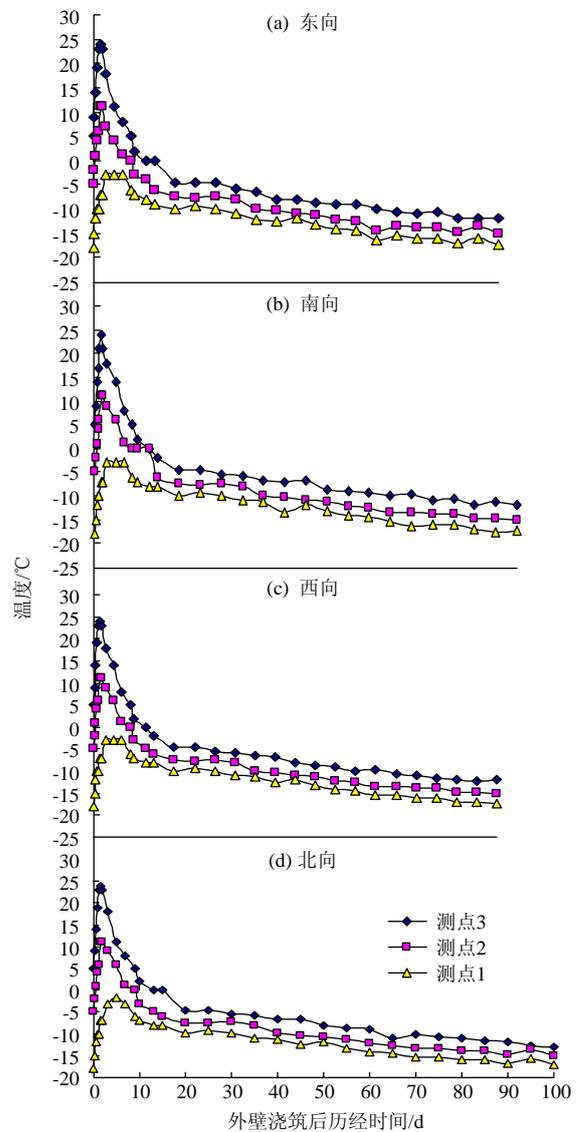


图 6 第二水平(-841 m)冻结壁温度-时间变化曲线  
 Fig.6 The second layer (-841 m) frozen wall temperature - time curves

通过分析图表，外壁浇筑后冻结壁升温明显，2 个水平：测点 3 处，最高温度分别达 25.2 °C 和 27.1 °C；距离井帮 250 mm 的测点 2 温度增长分别为 11.6 °C 和 14.3 °C；而距离井帮最远的测点 1 在 2 个水平监测数据接近于 -3 °C，此点未被融化。这表明外壁在浇筑之后，冻结壁的融化深度超过了 250 mm，根据测点布置及温度变化速率可大致推算两水平冻结壁最大融化深度。2 个层位具体冻结壁温度变化重要监测数据如表 3 所列。

由表 3 数据可以看出：2 个水平冻结壁水化热影响融化区的出现分别在 8.6 d 和 7.2 d 完成，最大

融化深度分别为 285 mm 和 305 mm, 融土回冻完成时间分别为 18.5 d 和 19.7 d。此外, 两水平距离井帮 600 mm 的测点 1 处最大升温分别为 -4.3 °C 和 -3.2 °C, 均未达到 0 °C 以上。这更进一步说明 2 个水平层位的最大融土深度介于 250~600 mm 之间, 但水化热对冻结壁的影响不会局限在这个范围内。

表3 测温孔温度测试结果  
Table 3 The temperature test results

监测水平	冻结壁融化最大距离/mm	产生最大融化距离时间/d	融土回冻时间/d	测点1处最大升温/°C
第一水平 (-612 m)	285	8.6	18.5	-4.3
第二水平 (-841 m)	305	7.2	19.7	-3.2

分析监测数据发现, 虽然两水平各测温孔测点温度增长幅度反映了外壁水化热对冻结壁温度的影响程度, 即距离井帮越近, 升温幅度越大; 但需要清楚的是, 尽管 2 个水平冻结壁融化深度仅为 285~305 mm, 但径向升温范围远不止于此。如果以升温幅度 2 °C 作为显著升温标准, 发现两水平冻结壁显著升温范围超过 1.6 m。壁后冻土的大范围升温以至融化, 对于冻结壁的变形稳定性及外壁受力都是很不利。

#### 4 结论

新庄煤矿风井历经 260 d 的冻结施工, 安全穿越 864.26 m 的白垩系强赋水软弱岩层。冻结法凿井过程中, 在白垩系下统洛河组 2 个危险砂岩层开展了上部已成型井壁段的温度现场监测, 对外壁及井壁的安全状况进行了分析讨论, 为矿井井筒的安全施工决策提供了科学依据。主要得出以下结论:

1) 外壁浇筑完混凝土即出现水化热现象。浇筑后首先出现温度迅速增长阶段, 2 个监测层位在 1.5 d 内温度最大上升幅度可达 68.4 °C; 第二水平较第一水平由于深度增加, 井帮温度及环境温度都在降低, 使得第二水平温差变大, 极易出现井帮温差裂缝。

2) 混凝土水化热的释放影响外井壁全断面的正温养护时间, 通过 2 个水平温度监测发现了深度越大, 正温养护时间越短。大量水化热使各测试水平保持了较长的正温养护时间, 对外壁混凝土早期强度增长有利。就 2 个监测水平来看, 随着深度的增加, 水化热影响越大; 这是由于白垩系地层导热系数大、热传导性好, 外壁浇筑混凝土水化热能够

较快地传递到冻结壁内部, 且粗粒砂岩受水化热影响的温度上升速率大于细粒砂岩。

3) 水化热的释放使冻结壁产生了局部融化, 2 个水平的融化深度达到 285~305 mm; 外壁混凝土水化热同样使冻结壁出现大范围的升温圈, 以升温幅度 2 °C 作为显著升温标准, 发现两水平冻结壁显著升温范围超过 1.6 m。外壁浇筑混凝土, 使得冻结壁内温度最高达 27 °C, 不仅如此, 大范围的升温圈对冻结壁的正温影响时间也比较长, 这对冻结壁的强度和变形性质造成不利的影。

水化热效应就冻结法凿井而言有利也有弊: 大量水化热的释放使外壁保持了较长的正温养护时间, 对外壁混凝土早期强度增长有利; 同时, 释放的水化热使冻结壁出现大范围升温以至局部融化, 对冻结壁的强度造成不利影响。应当依据理论研究, 合理控制水化热总量以及释放效率, 使其既能保证井壁混凝土早期强度的快速增长, 又能减小水化热对壁后冻土强度以及井帮温差裂缝等的不利影响, 为冻结法凿井的安全性评估提供保证。

#### 参考文献:

- [1] 姜浩亮. 混凝土水化热对井壁与冻结壁的影响研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2007.
- [2] 宋雷, 杨维好, 李海鹏, 等. 郭屯煤矿主井冻结法凿井信息化监测技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 19-23.  
SONG Lei, YANG Weihao, LI Haipeng, et al. Monitoring of freezing shaft sinking in ultra-deep alluvium of Guotun Coal Mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 19-23.
- [3] 许影, 汪仁和. 混凝土井壁水化热对白垩系侏罗系地层冻结壁的影响[J]. 煤炭工程, 2011(12): 565-570.  
XU Ying, WANG Renhe. Hydrated heat of mine shaft concret liner affected to mine shaft freezing wall in Cretaceous Jurassic strata[J]. Coal Engineering, 2011(12): 565-570.
- [4] 王衍森, 李炳胜, 张开顺, 等. 冻结井外壁温度场的数值模拟方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 316-320, 325.  
WANG Yansen, LI Bingsheng, ZHANG Kaishun, et al. Numerical simulation about temperature field of outer shaft lining during freezing sinking[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(3): 316-320, 325.
- [5] 王涛, 岳丰田, 檀鲁新, 等. 白垩系地层冻结温度场实测与数值模拟分析[J]. 煤炭技术, 2009(3): 121-123.  
WANG Tao, YUE Fengtian, TAN Luxin, et al. Analysis of actual measure and numerical simulation for freeze

- temperature field in Cretaceous stratum[J]. *Coal Technology*, 2009(3): 121-123.
- [6] 王衍森, 黄家会, 杨维好, 等. 特厚冲积层中冻结井外壁温度实测研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2006, 35(4): 465-472.  
WANG Yansen, HUANG Jiahui, YANG Weihao, et al. Temperature measurement of outer shaft wall during freezing sinking in deep alluvium[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2006, 35(4): 465-472.
- [7] 吴王青, 李栋伟, 马乾坤. 白垩系地层冻结壁温度和压力实测分析[J]. *煤炭科技*, 2012, 38(3): 58-61.  
WU Wangqing, LI Dongwei, MA Qiankun. Cretaceous strata frozen wall temperature and pressure measurement analysis[J]. *Coal Technology*, 2012, 38(3): 58-61.
- [8] 黄家会, 杨维好, 李峰, 等. 立井井壁温度变化规律实测研究[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2007, 26(3): 360-362.  
HUANG Jiahui, YANG Weihao, LI Feng, et al. Field measurement research on temperature changing law of vertical shaft lining[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2007, 26(3): 360-362.
- [9] 阮静, 叶见曙, 谢发祥, 等. 高强度混凝土水化热的研究[J]. *东南大学学报*, 2001, 31(3): 53-56.  
RUAN Jing, YE Jianshu, XIE Faxiang, et al. Study of heat of hydration on high strength concrete[J]. *Journal of Southeast University*, 2001, 31(3): 53-56.
- [10] LI Dongwei, LIU Haiyan, FAN Juhong. Experimental research on the mechanical parameters of frozen pipes under low temperature[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 194-196: 895-898.
- [11] 杨更社, 吕晓涛. 富水基岩井筒冻结壁砂质泥岩力学特性试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(4): 492-496.  
YANG Gengshe, LYU Xiaotao. Experimental study on the sandy mudstone mechanical properties of shaft side-walls under the frozen conditions[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(4): 492-496.
- [12] 杨平, 郁楚侯, 张维敏, 等. 冻结壁与外壁温度和受力实测研究[J]. *煤炭科学技术*, 1999, 27(4): 32-35.  
YANG Ping, YU Chuhou, ZHANG Weimin, et al. Research on temperature and sit measurement of frozen wall and outer shaft wall[J]. *Coal Science and Technology*, 1999, 27(4): 32-35.

(上接第 309 页)

- ZHANG Yidong, LI Jingping. Inquiring into the carrying capacity of supporting structure inside coal roof of roadway supported by bolt[J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, 24(6): 605-608.
- [10] 孙利辉, 杨本生, 杨万斌, 等. 深部巷道连续双壳加固机理及试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(5): 686-691.  
SUN Lihui, YANG Bensheng, YANG Wanbin, et al. Reinforcement mechanism and experimental study on continuous double shell of deep roadway[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(5): 686-691.
- [11] 余伟健, 高谦, 朱川曲. 深部软弱围岩叠加拱承载体强度理论及应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(10): 2134-2141.  
YU Weijian, GAO Qian, ZHU Chuanqu. Study of strength theory and application of overlap arch bearing body for deep soft surrounding rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(10): 2134-2141.
- [12] 宋宏伟, 牟彬善. 破裂岩石锚固组合拱承载能力及其合理厚度探讨[J]. *中国矿业大学学报*, 1997, 26(2): 33-35.  
SONG Hongwei, MU Binshan. Research on load capability and rational thickness of a reinforced broken rock arch[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1997, 26(2): 33-35.
- [13] 张益东. 锚固复合承载体承载特性研究及在锚杆支护设计中的应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.