

地面储煤堆(矸石山)自然发火蓄热高温区域的热棒深部移热技术

马砺^{1,2,3}, 李贝^{2,3}, 邓军^{1,2,3}, 李珍宝^{2,3}, 张莹⁴

1. 西安科技大学西部煤矿安全教育工程研究中心, 西安 710054
2. 西安科技大学西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 西安 710054
3. 西安科技大学能源学院, 西安 710054
4. 西安科技大学继续教育学院, 西安 710054

摘要 地面煤堆和矸石山自燃的问题是煤炭开采和储运过程中遇到的诸多难题之一。热棒在无源冷却系统中具有强大的热量传输能力, 为防止煤堆(矸石山)因蓄热而导致自燃, 提出了使用热棒加快煤堆热量散失速率, 破坏蓄热环境, 进行深部移热的方法, 防止煤堆(矸石山)自燃。重点讨论专用热棒在煤堆自然发火蓄热高温区域移热实践中面临的设计方法、基础参数、性能、实施装备和工艺等方面的技术难题, 并给出解决思路。

关键词 煤堆; 矸石山; 自然发火; 热棒; 深部移热

中图分类号 TD75

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.17.012

Deep Heat Transfer Technology Using Thermal Probe in High Temperature Region of Coal Storage Pile (Gangue Hill) Spontaneous Combustion

MA Li^{1,2,3}, LI Bei^{2,3}, DENG Jun^{1,2,3}, LI Zhenbao^{2,3}, ZHANG Ying⁴

1. Engineering Research Center of West-China Coal Mine Safety, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China
2. Key Laboratory of Western Mine Exploration and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China
3. College of Energy Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China
4. College of Continuation Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract The spontaneous combustion of coal storage pile and waste dump is one of the unresolved problems encountered in coal mining and transportation. Thermal probe has a powerful heat transfer capability in a cooling system without external energy. In order to prevent spontaneous combustion of coal storage piles (hillock) due to regeneration, a method using thermal probe to remove heat in coal storage pile is proposed, which damages the regeneration environment to prevent coal fire. In this paper, the characteristics of spontaneous combustion of coal pile are analyzed in detail, and the latest applications and research practices of heat pipe in other industries are also included. Compared with other traditional technologies on coal fire prevention, several advantages of heat pipe in coal fire controlling are described. Technical problems of specific thermal probe, design methods, basic parameters, performance, equipment and implementation technology are discussed. And several measurements are given for its application and promotion, which may enrich the technical means of prevention and control in coal spontaneous combustion.

Keywords coal storage pile; gangue hill; spontaneous combustion; thermal probe; deep heat transfer

收稿日期: 2014-02-21; 修回日期: 2014-04-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51134019); 陕西省重点科技创新团队计划项目(2012KCT-09); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0932); 国家自然科学基金青年项目(51204135)

作者简介: 马砺, 副教授, 研究方向为矿山重大灾害及其防治、安全技术及工程, 电子信箱: malifuture@126.com

引用格式: 马砺, 李贝, 邓军, 等. 地面储煤堆(矸石山)自然发火蓄热高温区域的热棒深部移热技术[J]. 科技导报, 2014, 32(17): 76-80.

煤炭作为中国的主体能源,其生产和消费量多年来均位居世界第一。西北地区是中国主要的煤炭生产基地,煤炭产能约占全国的72%。2010年全国煤炭产量32.4亿t,以排矸量占原煤生产量的10%估算,排矸量约为3.2亿t^[1]。资料表明,中国约有50%的煤矿存在自然发火危险^[2],不仅在煤矿井下,而且在地面露天开采的煤层、矿山、发电厂、码头、集运站等储煤场的煤炭储存、运输过程中也时常发生煤炭自燃。煤堆自燃不仅危害煤炭储运设备安全、降低煤的品位、浪费资源、污染环境,严重的还会引发事故,造成巨大损失。据不完全统计,全国规模较大的矸石山有2600多座,占地1.2万多hm²,目前仍以每年1亿t的速度增长,因自燃而常年烟雾缭绕^[3,4]。随着社会安全环保意识的不断增强,鉴于当前煤火防治手段的局限性,本文提出基于热棒深部移热的煤堆自燃防治新技术,对丰富煤自燃防治技术手段具有重要指导意义。

热棒深部移热技术从设想转变为在煤堆(矸石山)自燃防控实践中现场应用,不仅要研究热棒的设计方法,设计适用于煤堆和矸石山散热的专用热棒,还需研究热棒在煤体介质中的散热性能参数、工程实施装备、现场施工工艺及技术、漏风条件下热棒的排布规律,并通过实验验证获得基础数据。

1 地面煤堆的自燃特性

煤自燃是一个复杂的物理化学变化过程。根据煤氧复合理论,煤与空气接触发生氧化反应,氧化放热速率大于散热速率,自热引起煤温上升,最终导致自燃。其关键有2点:1)热量的自发产生;2)热量的逐渐积聚^[5]。煤自燃过程大体可以划分为潜伏期、自热期和燃烧期3个阶段。自燃必须同时具备以下条件:1)具有自燃倾向性,煤的氧化放热性能;2)连续的供氧条件,实际放热强度和总放热量;3)良好的蓄热环境,松散煤体、以破碎状态存在^[2]。

煤堆自燃是由于煤化程度、水分、粒度、环境温度、风流渗透和煤堆形状等内因和外因共同作用的结果。文献[6]表明,煤化程度越低,粒度越小,自燃倾向性越高。水分既有降温抑制煤自燃的作用,又有催化加速煤自燃的作用,具体根据实际情况而定。温度与煤自燃有直接的影响,环境温度越高,则煤初始温度越高,煤越易自燃。张瑞新等^[7]研究表明,煤堆内部与表面温度的变化是一个动态的逆向过程,表面温度与环境温度成正比,内部温度与环境温度成反比。风流渗透对煤堆自燃供氧,其影响的情况较复杂,动力源主要有2方面,1)温差引起的火风压;2)风速产生的动压。

在自然堆积状况下,可将煤堆分为冷却带、氧化带和窒息带。地面储煤堆发生自燃的部位既不在煤堆的表面,也不在煤堆深部,煤堆最初的自热高温区域有一定的深度范围,随着煤体自发升温,耗氧速度增大,高温区域向空隙率大、供氧充分的地点移动^[8]。研究表明,地面储煤堆内部温度均较高,其高温区域(氧化带)在2~4 m的范围内,自热层深度低于4 m,自燃层深度低于2.5 m^[9-11]。

2 热棒技术原理及特点

2.1 热棒技术原理

热棒是一种利用液汽转换对流和循环来实现热量传输的系统,是无源冷却系统中热量传输效率最高的装置。它具有传热能力大、传热温差小、启动温度低、均温性能好以及单向传热和安全经济等特点。在土木工程领域,尺寸一般较大,称为热棒,如果承受荷载,也称为热桩。

热棒是由一根密封钢管抽真空后内部充以工质制成,其结构如图1所示。钢管上部有翅片,称之为冷凝段,置于大气中;下部埋入煤体中,称为蒸发段。蒸发段与冷凝段之间的温差为热棒提供动力,热棒内部工质吸热蒸发成气体,在气压差作用下上升至冷凝段,与较冷的管壁接触放出汽化潜热冷凝成液体,在重力作用下,冷凝后的工质沿管壁流回蒸发段再吸热蒸发,热棒工作原理如图2所示。如此往复循环,可对煤自然发火蓄热区域深部热源中的热量进行转移并加以利用,从而降低煤体温度,加快高温区域热量散失,破坏蓄热环境,以防止煤炭与空气接触蓄热升温直至自燃,从而达到防火的目的。

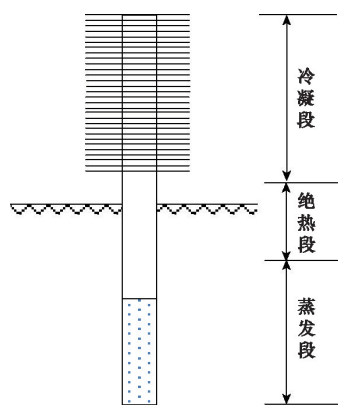


图1 热棒结构

Fig. 1 Thermal probe

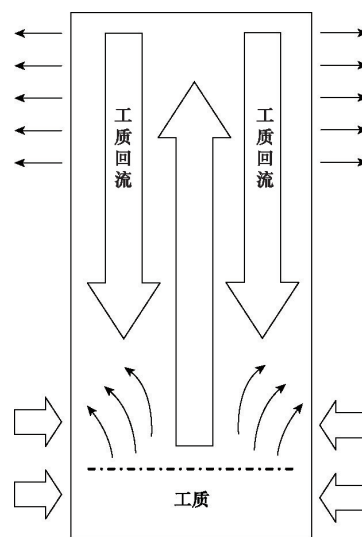


图2 热棒工作原理

Fig. 2 Sketch of working principle

热棒传热能力可以表示为^[12,13]

$$\begin{cases} Q(F, \alpha, \Delta T, t) = \alpha \cdot F \cdot \Delta T(t) & \Delta T > 0 \\ Q(F, \alpha, \Delta T, t) = 0 & \Delta T \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, Q 为热棒的传热能力; F 为热棒的传热面积; $\Delta T(t)$ 为 t 时刻煤堆与环境温差, $\Delta T(t) = T_{\text{煤堆}}(t) - T_{\text{环境}}(t)$; $T_{\text{煤堆}}(t)$ 为 t 时刻煤堆内部温度; $T_{\text{环境}}(t)$ 为 t 时刻外界环境温度, 一般取大气环境温度; α 为空气的侧对流传热系数。

假定在 t 时刻, 煤体与热棒蒸发段之间的传热热阻为 $R_a(t)$, 重力热棒内部热阻为 $R_b(t)$, 热棒冷凝段散热热阻为 $R_c(t)$, 则 dt 时间内热棒的产冷量增量 $dQ_y(t)$ 为

$$dQ_y(t) = \frac{T_{\text{煤堆}}(t) - T_{\text{环境}}(t)}{R_a(t) + R_b(t) + R_c(t)} dt \quad (2)$$

积分可得 t 时刻时重力热管瞬时产冷量表达式为

$$Q_y(t) = \int \frac{T_{\text{煤堆}}(t) - T_{\text{环境}}(t)}{R_a(t) + R_b(t) + R_c(t)} dt \quad (3)$$

若取热棒工作时间为 τ , 这段时间内煤堆内平均温度为 $T_{\text{煤堆}}$, 平均气温为 $T_{\text{环境}}$, 煤体与热棒蒸发段之间的平均传热热阻为 R_a , 重力热棒内部的平均热阻为 R_b , 热棒冷凝段散热的平均热阻为 R_c , 则热棒的总产冷量为

$$Q_y = \frac{T_{\text{煤堆}} - T_{\text{环境}}}{R_a + R_b + R_c} \tau \quad (4)$$

由式(4)可知, 热棒的产冷量与煤堆与环境温差 ΔT 及热棒的工作时间呈正比, 与热棒热阻呈反比。产冷量不仅与热棒的结构有关, 还与松散煤体的粒度、孔隙率、热物理特性、气温和煤堆内部温度有关。

2.2 热棒其他行业的研究应用实践

1) 热棒在寒区工程、冻土路基中的研究应用。青藏铁路建设过程中沿线经过数百公里的冻土地带, 冻土因热稳定性

差, 极易因外界热干扰而发生融沉, 导致路基沉降。通过对热棒路基结构的实验研究, 表明清水河段天然地面热棒有效传热半径为 1.5 m, 最大传热影响范围为 2.16 m^[14]; 安多段冷却半径大于 2.5 m^[15], 路基冻土上限可抬升 0.8~1.2 m^[16]。热棒在寒区工程中的应用可有效保护冻土, 改善路基热稳定性。

2) 热棒在荒漠化治理中的研究。陈良才等^[17]利用热棒自然制冷作用对沙化土地起到“增湿”、“保湿”功能, 减缓沙土内水分的损失, 探索沙化地区土壤和植被的水分补给新方法。得出不同沙层, 从沙土浅层(20 mm 深)到中层(80 mm 深)相对降温幅度增加, 从中层到深层(120 mm 深以下), 相对降温幅度减少^[18]。

3) 热棒在油气开采中的研究应用。吴晓东等^[19]利用热棒在采油井筒中的伴加热技术, 提升井口原油温度, 改善稠油流动性, 降低采油成本。经过井筒热管伴热方式采油后^[20], 华北油田楚 32# 井井口原油温度由 23℃ 提升至 40℃。

4) 热棒在低温储存方面的研究应用。为避免粮食在储存时局部粮温过高, 引起霉变而造成储量损失。韩东等^[21]研究了热棒对梗米堆的传热特性, 得出单根热棒对梗稻堆的温度影响半径约 75 mm, 最大降温幅度达到 35.1%; 双热棒间距小于 150 mm 时, 对梗稻堆温度影响分布呈“马鞍”状。

煤炭着火后其温度最高可达上千度, 煤堆或矸石山自然发火前期, 其内部温度也可高达 100~200℃, 煤堆内外温差可为热棒工作提供动力。热棒以其强大的散热能力, 通过破坏蓄热环境防止煤堆热量积聚, 进而对煤堆自燃进行防控, 故其作为煤火防治领域新的技术手段亟待研究和开发。

2.3 热棒技术移热降温特点

现在煤自燃防控方法, 如表 1 所示, 主要从自燃的要素,

表 1 现有煤自燃防控方法

Table 1 Prevention and control methods for coal spontaneous combustion

方法	具体简介	原理	优势	弊端
阻隔法	保护层覆盖煤堆表面、水灰浆涂层等	破坏供氧条件	隔绝空气, 阻隔漏风通道	工艺复杂, 大范围施工较难
移除法	一旦煤堆着火, 立即用推土机或铲车翻开或移除	移除高温热源	防止自燃引发的煤火进一步扩大	使用范围较小, 工程量大, 开挖接触新鲜空气, 易复燃, 难操作
散热法	煤堆限高、改变煤堆形状、增大煤堆间距、缩短煤炭周转期	加强散热、破坏蓄热条件	可以降低煤自燃, 费用少	占地, 对库存有影响, 煤炭价格波动对企业影响较大
阻化法	煤堆喷洒高聚物分子阻化剂	降低煤体氧化能力	阻化效果好	影响煤质
降温法	固态 CO ₂ 放置在煤仓中或注入惰性气体抑制自燃	降低煤体温度、降低氧气浓度	工艺简单	成本过高, 适用范围小, 无法用于露天煤堆
水治法	向煤堆洒水防止煤堆自燃	降温、阻隔空气	工艺简单, 水容易获得	耗水量大, 水易流失, 水在一定程度上会促进煤体自燃
注浆法	向煤堆注入配置浆液	隔氧、降温	工艺简单、廉价、封闭煤体间隙, 降温	局部范围控制, 影响后期利用, 易流失

即可燃物、供氧、蓄热条件着手研究煤堆自燃防控。通过抑制或降低煤的自燃倾向性、隔绝空气或破坏蓄热环境来防止煤炭自燃的发生,方法有涂洒阻化剂、消除热源、煤堆涂保护层、散热法、水治法、隔绝煤堆氧气的供给等。大量实践证明,隔氧—洒水降温—改变煤堆形状加强散热—减少煤堆堆放时间—破坏煤堆蓄热环境的煤自燃综合防控技术能有效防止煤堆自燃。其中,破坏煤体蓄热环境和有效降低煤堆的供氧能力是治理煤堆自燃的关键环节^[22]。热棒作为散热能力强大的元件,通过确定合理间距,在煤堆上布置并插入热棒,理论上可以起到破坏煤堆蓄热环境,降低高温区域(氧化带)的温度,防止煤堆自燃的作用。

与传统的方法相比,利用热棒对煤堆(矸石山)自燃高温蓄热区域进行深部移热,强化煤堆(矸石山)散热,破坏蓄热环境,防控煤堆自燃具有如下优势^[23-26]:

1) 导热性高。热棒具有优良的导热性,传热、导热效率高,其当量导热系数较纯银、纯铜高数百至数千倍,故可快速、稳定地将煤堆中的热量转移出来。

2) 容易启动。传热温差小,热棒的蒸发器与冷凝器仅有 $0.1 \sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 温差时,即可启动工作,一般煤堆内部温度均较高,自热氧化带温度比空气至少高 50°C ,故在煤堆的氧化带,热棒可以启动工作。

3) 方便检测。通过热棒的散热情况监测煤堆(矸石堆)的内部温度,判断其自燃部位、程度和阶段。

4) 方便施工。热棒在煤堆中施工时,只需勘查清楚煤堆温度场分布、部位和范围,找出自热高温区域,通过合理设计热棒的分布间距,可有效转移煤堆深部热量。

5) 缩短工期。矸石堆自燃较严重时,利用热棒技术深部移热协助注浆或者加湿维护防渗等工艺,提高矸石山治理效果,缩短治理工期。

6) 无能耗。热棒传热无需外界提供能量,工作稳定、可靠,插入煤堆氧化带后基本不需要维护。

7) 费用低。热管移热工程不需要注浆材料,费用要比深层注浆灭火工程费用低得多,且热棒可以重复利用,节约成本,一般热棒的使用寿命在10年以上。

3 存在的难题与解决对策

煤堆自然发火受多方面因素影响,用热棒对其进行移热施工处理,工程上需要考虑如下工艺及难题,掌握煤堆温度场分布、圈定自然发火蓄热高温区域、确定专用热棒参数、布置合理的热棒插入密度、计算热棒插入煤堆深度、估算移热需要的时间、开发专用施工设备 and 应用工艺等,这些问题的解决依托于热棒在煤体介质中移热性能的研究。热棒的气液两相对流换热过程十分复杂,其性能不仅取决于气温、风速等气候条件,同时还受煤堆形态、煤堆内部温度场、煤体容重、煤质、煤体粒径、漏风强度和含水量等的影响。在热棒作用下,煤堆散热和产热平衡,热量不再积聚导致温度升高引发自燃,可对煤堆自燃起到有效防控^[27-30]。综上,面临的难题

主要有:

1) 目前国内还未见到类似适用于煤堆自然发火蓄热高温区域移热的专用热棒产品。解决思路是,设计煤堆和矸石山自燃防控专用热棒,确定热棒在煤体中散热的最佳设计参数(内部工质、充液率、壁厚、管材、内外径、冷凝段、蒸发段、绝热段长度),对煤堆或者矸石山中自然发火蓄热高温区域实行深部热量转移,并通过实验验证,模拟研究真实煤堆高温区域环境在不同温度梯度下热棒的换热效率、产冷功率,评价热棒在煤自然发火蓄热高温区域中实际散热的工作状态和工作效率。

2) 缺少在煤堆和矸石山等煤体介质移热中基础性能方面的研究。目前国内外学者在寒区和冻土地带对热棒的研究较多,在煤体介质的传导热方面却少有报道。解决思路是,研究热棒在不同热流量、迎面风速、温差、含水量,不同煤种、粒度大小、漏风强度和不同倾斜角度条件下对煤自然发火蓄热高温区域的移热能力,并对其移热效果进行科学评估;研究热管表面的温度分布情况,探析煤体升温过程中不同煤温条件下热棒表明的等温性能曲线。

3) 热棒在煤堆自然发火蓄热高温区域的深部移热过程中面临诸多技术难题。煤体导热系数低、煤堆内部温度场分布机理不明确、高温区域部位的判定难度大、自燃程度的界定以及煤堆温度监测局限等原因等,使得热棒的应用面临诸多难题。解决思路是,研究热棒在煤堆中的降温(制冷)半径,并确定其有效冷却半径;探究热棒对煤堆内部温度场的影响,数值模拟其降温范围、传热效果,分析热棒在煤体中的冻结指数与冻结半径关系;研究热棒对煤体中不同距离高温区域(热源)的散热效果,定量研究煤自燃高温蓄热区域距离与热棒散热效率之间的关系。

4) 热棒在应用中受煤堆和矸石山的性质、形状、场地以及环境等影响,现场施工难度大。热棒施工要方便,后期便于回收,施工工艺的难度也是影响其推广的重要因素。解决思路是,进行施工工艺研究,研究热棒在现场应用过程中的实施装备和实施方法。

4 结论

1) 从煤自然发火的途径、影响因素、煤堆自燃温度场结构以及防控思路和现有防控方法等方面阐述了煤堆(矸石山)自燃特性。

2) 结合煤堆(矸石山)自燃特性及热棒原理,分析了热棒在煤堆(矸石山)自然发火高温蓄热区域深部移热过程中体现出来的优良的导热性、启动温差小、无须提供动力等优点。

3) 提出了专用热棒在煤堆自然发火蓄热高温区域移热实践中面临的设计方法、基础参数、性能、实施装备和工艺等方面的技术难题及解决思路。

参考文献(References)

[1] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 煤炭工业发展“十二五”规划

- [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2012.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The 12th Five-Year Plan of coal industry development [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2012.
- [2] 鲍庆国, 文虎, 王秀林, 等. 煤自燃理论及防治技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002.
Bao Qingguo, Wen Hu, Wang Xiulin. The theory of coal spontaneous combustion and control techniques[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2002.
- [3] 陈文敏, 杨金和, 詹隆, 等. 煤矿废弃物综合利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
Chen Wenmin, Yang Jinhe, Zan Long, et al. The comprehensive utilization technology of coal waste[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [4] 张力, 姜泽宁. 矿区煤矸石的综合治理[J]. 应用技术, 2010, 10(1): 46-48.
Zhang Li, Jiang Zening. The comprehensive control of gangue hill in mine[J]. Application Technology, 2010, 10(1): 46-48.
- [5] 邓军, 肖昉, 张辛亥, 等. 煤火灾害防治技术的研究与应用[J]. 煤矿安全, 2012, 12(S1): 58-61.
Deng Jun, Xiao Yang, Zhang Xinghai, et al. Research and application of coal fire disaster prevention and control technology[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 12(S1): 58-61.
- [6] 王光友, 吴国光, 张永建, 等. 煤堆自燃影响因素及防治[J]. 能源技术与管理, 2008, 6(1): 70-72.
Wang Guangyou, Wu Guoguang, Zhang Yongjian, et al. Factors and prevention of coal pile spontaneous combustion[J]. Energy Technology and Management, 2008, 6(1): 70-72.
- [7] 张瑞新, 谢和平. 煤堆自然发火的试验研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(2): 168-171.
Zhang Ruixin, Xie Heping. Experimental study of the propensity of coal stockpiles to spontaneous combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(2): 168-171.
- [8] 文虎. 煤自燃全过程实验模拟及高温区域动态变化规律的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(4): 689-693.
Wen Hu. Experiment simulation of whole process on coal self-ignition and study of dynamical change rule in high-temperature zone[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(4): 689-693.
- [9] 韩宏彬. 火电厂煤场自燃的形成特征及防控方法[J]. 中国电力, 2013, 46(4): 98-103.
Han Hongbin. Characteristic and prevention of spontaneous combustion in power plant coal yard[J]. Electric Power, 2013, 46(4): 98-103.
- [10] 覃涛, 李学刚, 王志, 等. 煤堆自燃分析及防范措施[J]. 电力技术, 2010, 19(9): 59-61.
Qin Tao, Li Xuegang, Wang Zhi, et al. Analysis of spontaneous combustion of coal pile and preventive measures[J]. Electric Power Technology, 2010, 19(9): 59-61.
- [11] 李树刚, 徐精彩. 地面储煤堆自燃规律的实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2000, 19(3): 229-231.
Li Shugang, Xu Jingcai. Experimental study of spontaneous combustion rule of ground coal storage pile[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2000, 19(3): 229-231.
- [12] 徐舜华. 青海省柴木铁路冻土低温热棒应用条件和效果研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
Xu Shunhua. Study on application conditions and cooling effect of heat pipe in permafrost regions of chaidier-muli railway in Qinghai Province [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.
- [13] 盛振兴. 热管自然制冰技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
Sheng Zhenxing. Research on technology of ice making by heat pipe utilizing natural cold resource[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [14] 李永强. 青藏铁路多年冻土区热棒路基的设计计算[J]. 铁道工程学报, 2007, 110(11): 32-36.
Li Yongqiang. Design and calculation of thermal probes subgrade along Qinghai-Tibet railway in permafrost area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, 110(11): 32-36.
- [15] 徐兵魁, 熊治文. 青藏高原多年冻土区热棒路基设计计算[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 17-22.
Xu Bingkui, Xiong Zhiwen. Design calculation of heat pipe subgrade in permafrost regions of Qinghai-Tibet plateau[J]. China Railway Science, 2006, 27(5): 17-22.
- [16] 杨永平, 魏庆朝, 张鲁新, 等. 青藏铁路多年冻土地区热管路基三维数值分析[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(2): 20-24.
Yang Yongping, Wei Qingchao, Zhang Luxin, et al. 3D numerical study on the thermosyphon used in embankments in permafrost regions of qinghai-tibet railway[J]. China Railway Science, 2005, 26(2): 20-24.
- [17] 李俊文. 插入热管对沙土传热特性影响的初步研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Li Junwen. Study on influence of heat transfer in sand inserted heat pipe [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007.
- [18] 陈良才, 李俊文. 用热管技术增大夜晚沙土降温幅度的实验研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(7): 82-88.
Chen Liangcai, Li Junwen. Experiments of lowering the temperature of sandy soil speedily at night by heat-pipe technology[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007, 35(7): 82-88.
- [19] 王淑彦, 成庆林, 韩洪升, 等. 井筒重力热管传热特性的研究[J]. 节能技术, 2013, 31(1): 46-60.
Wang Shuyan, Cheng Qinglin, Han Hongsheng, et al. Study of heat transfer characteristic in gravity heat pipe of wellbore[J]. Energy Conservation Technology, 2013, 31(1): 46-60.
- [20] 吴晓东, 张玉丰, 韩国庆, 等. 井筒重力热管室内实验与矿场试验研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(1): 140-142.
Wu Xiaodong, Zhang Yufeng, Han Guoqing, et al. Laboratory experiment and field test of gravity heat pipe[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2008, 30(1): 140-142.
- [21] 韩东, 彭涛, 李强. 重力热管对梗稻堆的温度分布影响试验研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(4): 114-117.
Han Dong, Peng Tao, Li Qiang. Influence of gravity heat pipes on temperature distribution in a rice bulk[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(4): 114-117.
- [22] 曾强, 王德明, 蔡忠勇. 煤火研究与治理进展[J]. 矿业安全与环保, 2011, 38(1): 72-75.
Zeng Qiang, Wang Deming, Cai Zhongyong. Progress of study and control of coal fire[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2011, 38(1): 72-75.
- [23] 潘卫东, 连逢愈, 邓宏艳, 等. 寒区工程中热棒技术的应用原理和前景[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S2): 2673-2676.
Pan Weidong, Lian Fenyue, Deng Hongyan, et al. Application principle and prospect of thermal probe technique in cold region engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2673-2676.
- [24] 刘挺. 热虹吸管热回收装置传热特性及应用研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
Liu Ting. Research on heat transfer characteristics and application of thermosyphon heat recovery devices[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.
- [25] Singh S S. Optimal micro heat pipe configuration on high performance heat spreaders[D]. San José: San Jose State University, 2009.
- [26] Armijo K M. Heat Pipe performance enhancement with binary mixture fluids that exhibit strong concentration marangoni effects[D]. California: University of California, Berkeley, 2011.
- [27] 李永强. 青藏铁路多年冻土区热棒直径对降温效果和产冷量的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 503-508.
Li Yongqiang. Influences of diameter of thermal probes on effect of decreasing earth temperature and producing cold quantity along Qinghai-Tibet railway in permafrost area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 503-508.
- [28] 樊云龙. 多年冻土地区热棒路基温度场研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
Fan Yunlong. Study on the temperature field of thermal probe subgrade in the permafrost regions[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [29] 杨永平. 热管技术及其在多年冻土工程中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 698-706.
Yang Yongping. Thermosyphon technology and its application in permafrost[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 698-706.
- [30] 曹元平. 热棒在青藏铁路试验段中的应用[J]. 路基工程, 2003(6): 31-34.
Cao Yuanping. Application of heat club in test section on Qinghai-Tibet railway[J]. Subgrade Engineering, 2003(6): 31-34.

(责任编辑 吴晓丽)