



移动扫码阅读

曾鑫. 蒸汽热网散热损失计算及其影响因素分析[J]. 能源环境保护, 2021, 35(4): 80-84.

ZENG Xin. Calculation of heat loss of steam heating network and analysis of its influencing factors[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(4): 80-84.

蒸汽热网散热损失计算及其影响因素分析

曾 鑫

(中煤科工清洁能源股份有限公司, 北京 100013)

摘要:为满足长距离蒸汽热网设计和运营需求,分析了不同保温材料的散热性能,采用蒸汽热网散热计算模型研究了保温厚度、蒸汽温度、环境温度和风速对管道保温效果的影响。结果表明:综合考虑价格和导热系数,离心玻璃棉更适合用于蒸汽管道保温;DN 300和DN 400管道保温厚度由80 mm增加至300 mm时,散热量下降幅度分别为79.1%和78.4%;DN 300管道保温厚度分别为80 mm和180 mm,蒸汽温度由300 °C降低至140 °C,散热量分别减少65.3%和65.5%;DN 300管道保温厚度为80 mm和180 mm,环境温度由-20 °C升高至30 °C时,散热量分别降低9.2%和8.9%,风速由0增大到8 m/s时,散热量分别增加3%和1.2%。

关键词:集中供热;蒸汽热网;散热损失;影响因素分析

中图分类号:X382

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)04-0080-05

Calculation of heat loss of steam heating network and its influencing factors

ZENG Xin

(China Coal Technology & Engineering Clean Energy Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: In order to meet the design and operation requirements of long-distance steam heating network, the heat dissipation performance of different insulation materials was analyzed. The influences of insulation thickness, steam temperature, ambient temperature and wind speed on the thermal insulation of pipeline were studied based on the heat dissipation calculation model of steam heating network. The results showed that considering the price and thermal conductivity, centrifugal glass wool was more suitable for the thermal insulation of steam pipes. When the insulation thickness of DN 300 and DN 400 pipelines increased from 80 mm to 300 mm, the heat dissipation decreases by 79.1% and 78.4%, respectively. When the steam temperature was reduced from 300 °C to 140 °C, the heat dissipation of DN 300 pipeline with insulation thickness of 80 mm and 180 mm was reduced by 65.3% and 65.5%, respectively. For DN 300 pipelines with insulation thickness of 80 mm and 180 mm, when the ambient temperature increased from -20 °C to 30 °C, the heat dissipation decreased by 9.2% and 8.9%, respectively. When the wind speed increased from 0 to 8 m/s, the heat dissipation increased by 3% and 1.2%, respectively.

Key Words: Central heating; Steam heating network; Heat loss; Analysis of influencing factors

0 引言

做好工业领域节能减排工作是落实“碳达峰、碳中和”的重要举措之一,同时对于推动我国清洁

低碳能源消费方式具有积极意义^[1-2]。集中供热是一种高效、节能的能源环保技术,与传统分散独立式的自建锅炉供热相比,可以显著提高能源利用效率,减少污染物排放总量,且具有良好的经济

收稿日期:2021-05-13;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:中煤科工清洁能源股份有限公司科技创新创业基金项目(CE-KY-CX-2021-04)

作者简介:曾鑫(1987-),男,湖南衡阳人,助理研究员,主要从事煤炭清洁高效利用和集中供热研究。E-mail:zengxin@cctegec.com

效益,已在国内外广泛应用^[3-5]。

随着经济的快速发展,工业生产对于热能的需求逐渐增大,集中供热呈现集中化和大型化发展趋势。热用户通过蒸汽热网同热源(大型电厂或区域集中供热中心)连接以实现供热。热用户和热源往往相距较远,通常大于 10 km,甚至可以超过 30 km,已经远高于传统以蒸汽作为介质的 8~10 km 供热半径^[6]。长输蒸汽热网输送技术近十年获得了快速推广和应用,已经实现输送距离由常规的 8~10 km 延长至 30 km,甚至可以输送更远。长输热网技术在蒸汽输送过程中温降可控制在每公里降低 5~7 °C(设计负荷 40%以上),压降能做到每公里降低 0.02~0.03 MPa^[7]。在现有技术条件下,集中供热管网的散热损失仍占输入总热量的 8%~15%左右^[8],也有文献报道输送过程中的散热损失可达 25%以上^[9]。蒸汽管道保温研究是蒸汽热网设计的基础,同时有利于实现降低散热损失目的。

在蒸汽输送过程中应采取必要措施降低温降,减少能量损失、防止蒸汽凝结而影响管道的运行安全。目前,采用常规保温方法后管道每公里温降约为 15 °C,已无法满足长输要求,需要采用更为高效的保温措施以进一步降低管道温降^[8]。一直以来,研究者重点关注绝热材料和保温层厚度的研究,很少开展针对外部条件对保温性能的研究。郑彦渊^[10]研究表明,选择合理的蒸汽管道保温材料对于减少管道热损失,具有重要的意义。王士永^[11]等通过实体模型、计算机数值模和工程应用,建议在保温结构中增加敷设铝箔反射层,可以使散热量减少 5%左右。保温厚度和导热系数对保温热阻影响较大,当管道内保温层的导热系数大于外层保温层时,保温总热阻将出现一个极值点,该点对应的内保温层厚度为临界绝缘厚度^[12]。高建强等^[13]总结了蒸汽热网管损及其影响因素,蒸汽温度、压力和环境温度会影响蒸汽热网管损。王娟^[14]从蒸汽过热度的角度分析了其对热网管损的影响,为降低管损提供了理论基础和指导。

长输蒸汽热网技术是行业发展趋势,其对蒸汽管道保温设计和保温效果提出了更高的要求。精准了解保温材料性能和导热系数是科学合理开展长输蒸汽热网设计的基本条件。材料保温厚度、蒸汽温度、环境温度、风速会影响蒸汽热网管损,亟需开展上述因素的影响分析以优化保温设

计,进而降低热网管损。本文根据长输蒸汽热网设计和运营需求,综合比较不同保温材料性能和导热系数,进一步细化研究保温厚度、蒸汽温度和环境温度等因素对管道散热损失的研究,以期对蒸汽热网设计和节能运行提供指导。

1 保温散热计算模型

所研究的蒸汽管道由工作管道、多层保温层和金属外护层组成。蒸汽管道的散热计算是蒸汽热网设计的重要内容,其包含有不同的传热方式,其从内到外依次为:蒸汽与管道内壁的对流换热、管道材料的热传导、保温层保温材料的热传导、管道保温外层与环境的对流换热和辐射换热。其散热模型如式 1 所示。

$$q = \frac{T_0 - T_a}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (1)$$

式中, q 为每平米管道长度的热损失量, W/m; T_0 为管道的外表面温度, °C; T_a 为环境温度, °C; R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 分别为蒸汽与管道内表面换热的热阻,管壁热阻、保温层热阻和管道保温金属外护层表面热阻, K·m/W。

管道本身导热性极好,其热阻远小于其他热阻,本文忽略了管内的表面热阻与工作管壁的导热热阻,假定管道外壁面温即等于蒸汽温度。在稳态情况下,通过蒸汽管道管壁和保温层的热流量是相同的,其数值等同于保温外层的散热量。根据式稳态导热的原理,可写出该蒸汽保温管道的导热热流量公式如 2 和 3 所示^[15]。

$$q = \pi D_1 Q \quad (2)$$

$$Q = \frac{T_0 - T_a}{\frac{D_1}{2\lambda} \ln \frac{D_1}{D_0} + \frac{1}{\alpha_s}} \quad (3)$$

式中, Q 为每平方米保温层表面积的热损失量, W/m²; λ 为保温材料在平均温度下的导热系数, W/(m·K); α_s 为保温层外表面与周围空气的换热系数, W/(m²·K)。

通常在管道保温经济厚度、最大允许散热损失量下的厚度、外表面散热损失量、管道外表面温度和现场保温外表面温度校核计算中,涉及到的保温层外表面与周围空气的换热系数按式 4 计算^[16]。需要特别指出的是,该式为综合换热系数,已考虑管道外层与环境的对流换热和辐射换。

$$\alpha_s = 1.163 \times (10 + 6\sqrt{\omega}) \quad (4)$$

式中, ω 为风速, m/s。

2 散热计算和结果分析

2.1 保温材料性能分析

长距离蒸汽热网输送技术的发展,对于蒸汽管道保温设计和保温效果提出了更高的要求。保温材料导热系数是保温设计的核心参数之一,关系到保温厚度、保温性能和保温投资等,因此,精准了解材料的导热系数是准确合理开展保温设计的基本条件。目前,蒸汽管道保温常用的材料主要有传统的保温材料,如岩棉、离心玻璃棉和硅酸铝,新型保温材料中纳米气凝胶应用较多。图 1 是上述 4 种保温材料在平均温度 100~200 °C 下的导热系数分布曲线。从曲线走势来看,导热系数均随温度的升高而增大。从导热系数数值来看,硅酸铝导热系数最大,其次是岩棉,然后是离心玻璃棉,纳米气凝胶最小。随着温度的升高,纳米气凝胶的导热系数变化幅度相对较小。

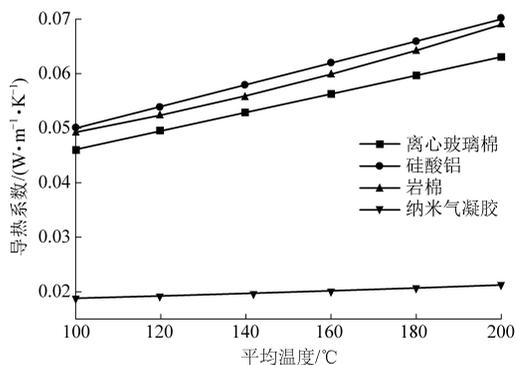


图 1 四种保温材料的导热系数随温度的变化^[16-17]

Fig.1 Variation of thermal conductivity of four insulation materials with temperature^[16-17]

对于蒸汽管道保温设计,国家规范对常年运行设备管道最大允许散热损失量有着严格的规定^[15],当温度为 300 °C 时,对应的每平方米保温层表面积散热损失为 167 W/m²。经计算, DN 300 (外径 325 mm) 管道在蒸汽温度为 300 °C、环境温度 20 °C、无风条件下,岩棉、离心玻璃棉和硅酸铝达到最大允许散热损失量保温要求的厚度分别为 78.7 mm、74.6 mm 和 81.1 mm,而纳米气凝胶只需 29.6 mm 即可满足保温要求,厚度不到传统保温材料的一半。因此,在节省保温材料用量上,纳米气凝胶较其他三种保温材料具有显著优势。但是,纳米气凝胶的市场价格远贵于传统的保温材料,因此,纳米气凝胶更适合用于对保温空间有严格要求的场景,也可以和传统保温材料复合使用并敷设于内层。综合考虑价格和导热系数,离心

玻璃棉更适合用于蒸汽管道保温。

2.2 保温厚度对管道保温的影响

蒸汽管道保温材料厚度是保温设计的关键参数,其基本要求是设计选择的保温厚度满足散热量符合国家规范对管道最大允许散热损失量要求。以蒸汽热网常见的 DN 300 和 DN 400 蒸汽管道为例,采用离心玻璃棉作为保温材料,计算蒸汽温度 300 °C、环境温度 6 °C、风速为 0 时管道散热量,结果如图 2 所示。厚度变化对散热量影响较大,当保温厚度为 80 mm, DN 300 和 DN 400 的每平方米保温层表面积的热损失量分别为 159.1 W/m² 和 165 W/m²,保温厚度增加至 300 mm, DN 300 和 DN 400 散热量分别减少至 33.2 W/m² 和 35.6 W/m²,下降幅度分别为 79.1% 和 78.4%。随着保温厚度的增加, DN 300 和 DN 400 散热量的降幅逐渐变小,因此,保温厚度的选取应综合考虑经济因素。此外,在相同的保温厚度下,管径越小,散热量越低。

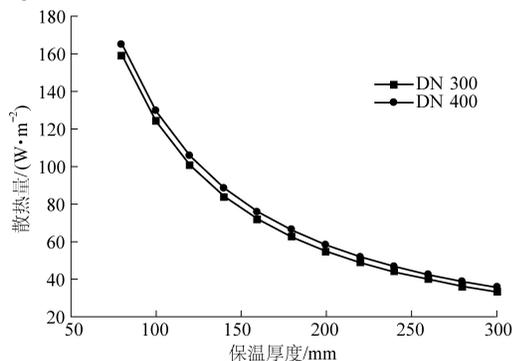


图 2 散热量随保温厚度的变化

Fig.2 Variation of heat dissipation with the insulation thickness of pipes

2.3 蒸汽温度对管道保温的影响

一方面,蒸汽在输送过程中因对外散热,其温度逐渐降低,另一方面从按需供热的角度,可以选择性的调整供应蒸汽的温度,蒸汽温度的变化势必会影响管道散热。图 3 为 DN 300 管道保温厚度分别为 80 mm 和 180 mm、环境温度 6 °C 时,不同蒸汽温度对蒸汽热网散热的影响。图中数据显示,两种保温厚度下的蒸汽管道散热量均随蒸汽温度的降低而减小,其中保温厚度 180 mm 时散热量由 300 °C 的 62.3 W/m² 减小至 140 °C 的 21.5 W/m²,降低约 65.5%;保温厚度 80 mm 时散热量由 300 °C 的 159.1 W/m² 减小至 140 °C 的 55.2 W/m²,降低约 65.3%。蒸汽热网输送过程中,随着输送长度的延伸蒸汽温度会逐渐降低,因此,从节约投资角度,保温厚度不宜保持不变,建议根据详细计算

结果分段选取并适当减小保温厚度,以实现投资和节能综合收益最优。

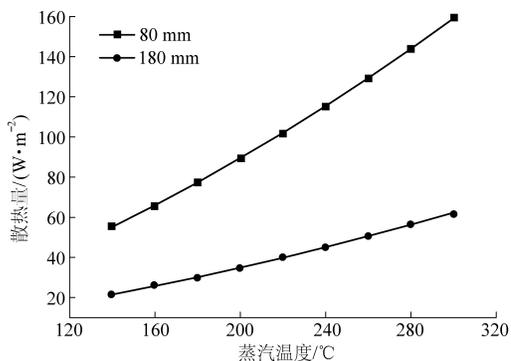


图3 散热量随蒸汽温度的变化

Fig.3 Variation of heat dissipation with steam temperature

2.4 环境温度对管道保温的影响

环境温度是保温设计的基础数据,在管网日常运营中会对蒸汽热网损失产生影响。DN 300 管道当保温厚度分别为 80 mm 和 180 mm,在蒸汽管道温度为 300 °C、无风的情况下,环境温度变化对蒸汽热网散热的影响见图 4。图中数据显示,环境温度升高会减少散热损失量,其中保温厚度为 80 mm,环境由 -20 °C 升高至 30 °C 时,散热量从 166.6 W/m² 降低至 151.3 W/m²,降幅 9.2%。对比保温厚度为 180 mm,散热量从 65.1 W/m² 降低至 59.3 W/m²,降幅 8.9%。计算结果表明,环境温度升高保温厚度为 80 mm 和 180 mm 的管道的散热损失量降幅相当。

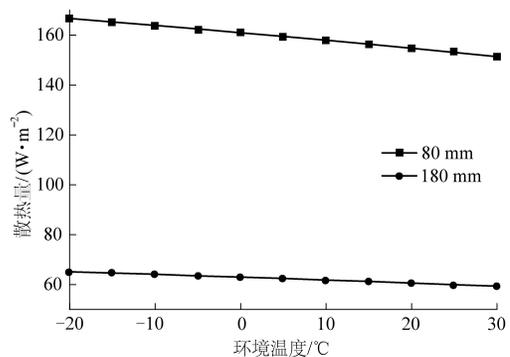


图4 散热量随环境温度的变化

Fig.4 Variation of heat dissipation with ambient temperature

2.5 风速对管道保温的影响

风速的变化会直接影响保温层外表面与周围空气的换热系数,最终对管道散热量产生影响。图 5 为 DN 300 管道当保温厚度分别为 80 mm 和 180 mm,蒸汽温度 300 °C,环境温度 6 °C 时,不同风速条件下蒸汽热网散热的计算结果。从图中可以看出,随着风速增加,散热损失量逐渐增大,当风速由 0 增大到 8 m/s 时,保温厚度为 80 mm 的

管道的散热量由 159.1 W/m² 升高至 163.9 W/m²,而保温厚度为 180 mm 的管道的散热量由 62.3 W/m² 升高至 63.0 W/m²。计算结果显示,保温厚度为 80 mm 和 180 mm 的管道因风速增大散热量增幅差异相对较大,其中保温厚度 80 mm 增幅 3%,保温 180 mm 增幅 1.2%,说明增加保温厚度可降低因风速增加引起的散热损失增幅,从而减小环境因素对保温效果的影响。

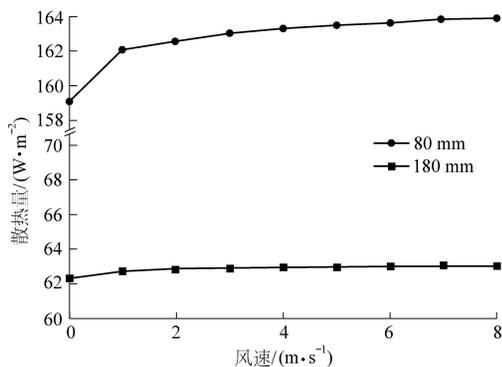


图5 散热量随风速的变化

Fig.5 Variation of heat dissipation with wind speed

3 结论与展望

3.1 结论

研究了不同保温材料的散热性能,并采用蒸汽热网散热计算模型,基于离心玻璃棉保温材料,研究了保温厚度、蒸汽温度、环境温度和风速对管道保温的影响,主要结论如下。

(1) 在节省保温材料用量上,纳米气凝胶较岩棉、离心玻璃棉和硅酸铝三种保温材料具有显著优势。综合考虑价格和导热系数,离心玻璃棉更适合用于蒸汽管道保温。

(2) 保温厚度增加,散热损失下降较为明显。采用离心玻璃棉保温, DN 300 和 DN 400 管道保温厚度由 80 mm 增加至 300 mm 时,散热量下降幅度分别为 79.1% 和 78.4%。保温厚度增加过程中,散热损失量的降低幅度逐渐减小,因此,保温厚度的增加量应综合考虑经济因素。

(3) 蒸汽温度对管道散热量影响显著,且温度降低会减少散热损失量。DN 300 管道保温厚度分别为 80 mm 和 180 mm,蒸汽温度由 300 °C 降低至 140 °C,散热量分别减少 65.3% 和 65.5%。从节约投资角度,管道设计保温厚度宜分段选取并适当减小保温厚度,以实现投资和节能综合收益最优。

(4) 环境温度升高会减少散热损失量, DN 300 管道保温厚度为 80 mm 和 180 mm 的管道散热损

失量降幅相当,分别为9.2%和8.9%。风速提高会增加散热损失量, DN 300 管道保温厚度为80 mm的管道的散热损失量增幅大于保温厚度为180 mm,其中保温厚度80 mm 增幅3%,保温180 mm增幅1.2%,说明增加保温厚度可降低风速增加对散热损失的影响。

3.2 展望

(1)加强新型保温材料保温效果研究。近年来,铝箔玻纤布和铝箔气泡复合材料等新型保温材料已广泛应用于蒸汽热网保温,并取得了一定节能效果,但效果评估多集中于定性分析。从设计角度来看,目前尚缺乏定量的试验数据或修正计算公式,以相对精准的计算新型材料应用后的散热损失减少量,便于更加科学的设计蒸汽热网保温。

(2)丰富蒸汽热网空间散热量分布研究。传统的设计一般假设蒸汽热网管道在圆周方向的温度是一致的。从实际现场测量来看,新建的蒸汽热网在圆周方向的温度分布是不均匀的,例如整体呈现顶部温度较高,底部温度较低。实际温度分布同理论上的差异,对管道整体保温设计是有影响的。通过对蒸汽热网空间散热量分布的研究,未来可对局部散热量高的区域做适当保温加强设计。

(3)开展吸热外护层材料的研发工作。在相同的外部环境条件下,具有良好太阳能吸热性能的外护层材料,有望降低蒸汽管网的散热量。开展吸热外护层材料研发工作,将其成果应用于室外架空蒸汽热网保温,从节能角度具有一定前景。

参考文献

[1] 杨裕生. 科技创新助推“双碳”达标 [N]. 中国科学报,

2021-04-19 (3).

- [2] 郭扬, 吕一铮, 严坤, 等. 中国工业园区低碳发展路径研究 [J]. 中国环境管理, 2021, 13 (1): 49-58.
- [3] 范常浩, 梁娟娟. 基于智慧城市的供热系统余热利用优化研究 [J]. 能源环境保护, 2020, 34 (1): 77-81.
- [4] 杨允. 我国小型热电联产政策解读与发展方向分析 [J]. 煤质技术, 2020, 35 (1): 1-5.
- [5] 董智. 燃煤与燃气热源技术在热电联产项目中比选应用 [J]. 煤质技术, 2020, 35 (4): 58-64.
- [6] 张全斌. 超长距离蒸汽供热技术探析 [J]. 区域供热, 2018 (2): 114-118+138.
- [7] 刘华隽. 供热管网保温性能测试及应用评价 [D]. 南京: 南京师范大学, 2020: 9-10.
- [8] 岳师华, 李苏泷, 温成. 基于变导热系数的蒸汽长距离输送模拟 [J]. 节能技术, 2019, 37 (6): 525-529.
- [9] 刘运雷. 蒸汽管网散热损失计算分析与负荷预测研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009: 2-3.
- [10] 郑彦渊. 长输蒸汽管道保温需注意的几个问题 [J]. 四川化工, 2015, 18 (6): 49-51.
- [11] 王士永, 吴建青. 长距离供汽管道保温优化的研究及应用 [J]. 炼油设计, 2002 (12): 29-33.
- [12] 岳师华, 李苏泷, 张峰. 多层保温结构的管道热阻及经济性分析 [J]. 建筑热能通风空调, 2020, 39 (10): 46-48.
- [13] 高建强, 曹浩, 危日光, 等. 供汽管网凝结水量及其影响因素仿真研究 [J]. 热力发电, 2021, 50 (3): 70-76.
- [14] 王娟. 供热管网中蒸汽过热度对管损的影响 [J]. 电力科学与工程, 2018, 34 (3): 75-78.
- [15] GB 50264—2013. 工业设备及管道绝热工程设计规范 (附条文说明) [S].
- [16] 《动力管道设计手册》编写组. 动力管道设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 638-643.
- [17] 林冲, 张蓉艳, 赵科仁. 气凝胶绝热毡在管道保温领域中的应用 [A]. 国家仪表功能材料工程技术研究中心、厦门大学、台湾材料科学学会. 第二届海峡两岸功能材料科技与产业峰会 (2015) 摘要集 [C]. 重庆: 中国仪器仪表学会仪表材料分会, 2015: 2.