

纳米气凝胶在熔盐吸热器保温设计中的应用

程虎^{1,2} 臧平伟^{1,2} 奚正稳^{1,2} 孙登科^{1,2}

1. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 成都 611731; 2. 东方电气东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001

摘要: 本文简述了熔盐吸热器保温设计现状, 介绍了纳米气凝胶的发展状况, 并通过纳米气凝胶和常规保温材料保温方案的对比, 总结了纳米气凝胶在熔盐吸热器保温设计中的优势, 分析了当前存在的问题。本文的介绍为国内开展此项工作的同行提供参考。

关键词: 熔盐吸热器; 气凝胶; 保温

中图分类号: TK513.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2018)04-0076-04

Application of Aerogel in Heat Insulation Design of Molten Salt Heat Receiver

CHENG Hu^{1,2}, ZANG Pingwei^{1,2}, XI Zhengwen^{1,2}, SUN Dengke^{1,2}

(1. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China;

2. Dongfang Boiler Group Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China)

Abstract: This paper describes the status of the insulation design of molten salt receiver, and introduces the development status of aerogel. Through comparing aerogel and the conventional scheme, this paper summarizes advantages of aerogel in insulation design of the molten salt receiver, also analyzes the problems existing in the current. The introduction of this paper provides reference for colleagues in this field.

Key words: molten salt heat receiver; aerogel; heat insulation design

1 吸热器保温设计概况

熔盐吸热器作为塔式熔盐太阳能光热电站的核心设备, 用于将定日镜场聚焦得到的高热流密度太阳能转化为工质热能。吸热器如图 1 所示, 主要由吸热管屏、进出口集箱、集箱管接头、支撑钢结构等组成。吸热器运行温度很高, 部分管屏壁面温度接近 700 ℃。为降低吸热器散热损失, 提高电站效率, 必须要对其进行保温处理。

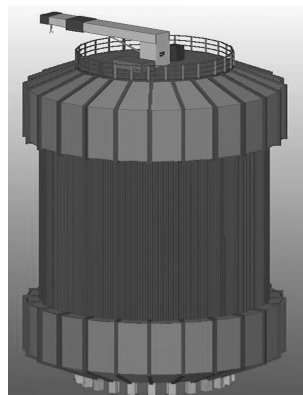


图 1 吸热器外形图

收稿日期: 2018-09-14

作者简介: 程虎(1988-), 男, 2011年毕业于合肥工业大学光信息科学与技术专业, 本科, 工程师。现在东方锅炉股份有限公司技术中心从事太阳能光热发电技术的研发与设计工作。

臧平伟(1977-), 男, 2015年毕业于浙江大学热动专业, 工程硕士, 高级工程师。现在东方锅炉股份有限公司技术中心从事太阳能热发电系统设计及设备研发工作。

塔式熔盐太阳能光热电站常用传热介质—太阳盐(60% NaNO_3 + 40% KNO_3)凝固点较高,大于 $220\text{ }^\circ\text{C}$,需要对吸热器做电伴热设计,保证熔盐正常流动;另外,为了减轻高温熔盐对吸热器零部件造成的热冲击,也需要将其壁温维持在较高的温度。熔盐吸热器一般置于 $180\sim 210\text{ m}$ 的高塔之上,在高空冷空气强对流作用下保温结构外表面热损失将增大,严重时将导致电伴热系统无法将熔盐吸热器预热到设计要求温度。

为了同时兼顾电伴热、熔盐的防凝要求,采用常规保温材料做保温设计时保温厚度往往很厚。而常用的耐高温保温材料比如硅酸铝耐火纤维,容重大,导致保温结构重量在吸热器系统重量占比较大。在吸热器功率比较小的情况下保温材料重量甚至能超过吸热器本体重量。而顶部荷载过大给吸热塔的设计、建造造成了极大的压力,提高了电站建造成本。吸热器支撑钢结构属于高耸结构,吸热器本体与支撑钢结构的连接是设计重点也是难点。在有限的空间内,减薄保温厚度提高空间利用率,进一步减轻顶部荷载,将给钢结构的设计工作带来积极影响。

因此,在保证吸热器效率的前提下尽可能的减薄保温厚度、减轻保温荷载,是吸热器保温设计的重点,具有重大意义。

2 纳米气凝胶简介

纳米气凝胶(简称气凝胶)是一种分散介质为气体的凝胶材料,是由胶体粒子或高聚物分子相互聚积构成的一种具有网络结构的多孔性固体材料,该材料中孔隙的大小在纳米数量级。常温下热导率可低至 $0.012\text{ W/m}\cdot\text{K}$,孔隙率高达 99% ,孔洞的典型尺寸为 $1\sim 100\text{ nm}$,比表面积高达 $1000\text{ m}^2/\text{g}$,密度可低至 0.003 g/cm^3 [1]。

气凝胶最初由美国斯坦福大学的 Kistler 于 1931 年利用溶胶-凝胶方法及超临界干燥技术制得。根据其组成成分,一般可分为氧化物气凝胶(SiO_2 、 Al_2O_3 气凝胶等)、有机炭气凝胶(RF、MF、PF 等先驱体气凝胶经热处理后所得气凝胶)和碳化物气凝胶(SiC 、 TiC 气凝胶等)三大类,此外还有一些多组分气凝胶,比如 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}-$

$\text{C}-\text{O}$ 、硅酸铝气凝胶等 [2]。

气凝胶材料具备的高孔隙率以及纳米网络骨架相互连接所形成的介孔结构,决定了其具备极好的隔热性能。气凝胶的网络胶体颗粒尺寸为 $3\sim 20\text{ nm}$,孔径小于空气分子的平均自由程 $50\sim 60\text{ nm}$,因而在气凝胶孔内没有空气对流;气凝胶具有极高的孔隙率,固体所占体积比很低,因而导热系数小;同时气凝胶的多孔网络结构对热辐射具有“无穷隔热板效应”,对热辐射的遮挡效率很高,这些因素使得气凝胶成为目前世界上热导率最低的固体材料之一 [3]。由气凝胶制成的保温毡具有良好的性能指标:超强的保温性;超强的耐温性;超强的防火性,高温火焰燃烧无任何有毒气体和烟雾排放;超薄超轻性等等。

由于前期气凝胶的生产工艺较为复杂,造价偏高,气凝胶虽有良好的保温隔热性能其应用还仅限于航空航天等高端领域,随着气凝胶研究的深入和制备技术的发展,目前也逐渐开始应用于新能源、石油化工、建筑保温等领域。

3 吸热器保温设计要求

3.1 保温结构设计要求

保温结构由保温材料及保护层组成,为了减少运行过程中吸热器热损失,吸热管屏要求采用适当的材料彻底保温,使吸热器处于设计点运行温度,厚度要保证其效率。保温结构的设计关系到保温效果、投资费用、使用年限等问题。通常保温结构要满足以下条件:

(1) 保证管屏损失不超过标准热损失,在标准热损失允许范围内,保温层越薄越好。

(2) 有足够的机械强度,在自重、振动、风雪等条件下,不能被破坏。

(3) 在使用寿命内保持完整,使用过程中不允许烧坏、腐烂、剥落。

(4) 有较好的保护层,避免使管屏受到腐蚀。

(5) 保温结构所产生的应力不能传递到管屏上。

(6) 保温结构所需材料容易采购。

(7) 施工操作简单,维护检修方便。

目前吸热器的保温结构基本形式为:管屏—

保温层—防水保护层。保温层与保护层之间用金属件连接，这样使管屏、保温层、保护层牢固地结为一体，大大提升了吸热器管屏的保温效果。

3.2 保温材料的选用

保温材料的选用要本着因地制宜、节能降耗的原则。合理选择保温材料，可以提高施工质量，改善吸热器工作条件，延长保温结构寿命，实现光热电站的安全、经济运行。目前国内吸热器保温设计常用的材料有矿渣棉、岩棉、绝热硅酸铝及其制品等。

3.3 保护层材料的选用

我国的光热电站大量分布在高寒、大风沙的西北的地区，常年在恶劣的环境条件下运行。经过风吹、日晒、雨淋等侵蚀，保温外护结构3~5年便会损坏。一旦外护层破坏，水很容易渗入保温层内部，保温层一旦受潮，就失去了干态时的优良隔热性能，导致热损增大，运行就会偏离最佳工况，因此，吸热器保温层外必须设置完善的保护层，起到遮风、挡雨、防水和防潮等作用。常见的保护层材料有抹面材料、玻璃丝布、金属护壳等。

4 吸热器保温方案对比

本文以塔式熔盐光热电站常配备的圆周式吸热器为例，分别计算：(1)硅酸铝耐火纤维+岩棉复合结构；(2)纳米气凝胶+岩棉复合结构，并进行比较。

4.1 设计条件

设计条件如下：

(1)在20℃的环境温度和1 m/s的风速下(考虑到最高表面温度为40℃)，最大损失应小于200 W/m²。

(2)吸热器管屏壁温600℃；保温长度21 930 mm，保温宽度3 870 mm。

(3)保温计算按平板计算。

4.2 3种保温材料的性能参数

如表1所示用于计算的3种保温材料参数。

4.3 计算依据^[4]

保温层厚度按式1和2计算

$$\delta_1 = \frac{1000\lambda_1(t-t_b)}{\alpha(t_s-t_a)} \quad (1)$$

表1 保温材料的性能参数

	纳米气凝胶	硅酸铝耐火纤维	岩棉
70℃	0.018	0.056	0.044
400℃	0.024	0.122	0.103 4
500℃	0.027	0.158	0.121 4
600℃	0.031	0.194	—
700℃	0.035	0.23	—
最高使用温度/℃	850	800	600
密度 kg/m ³	230	128	100

$$\delta_2 = \frac{1000\lambda_2(t_b-t_s)}{\alpha(t_s-t_a)} \quad (2)$$

保温结构外表面散热损失按式3计算，

$$q = \frac{t-t_a}{\frac{\delta_1}{1000\lambda_1} + \frac{\delta_2}{1000\lambda_2} + \frac{1}{\alpha}} \quad (3)$$

δ_1 ——复合保温内层厚度，mm

δ_2 ——复合保温外层厚度，mm

λ_1 ——复合保温内层材料热导率(导热系数)，W/(m·K)

λ_2 ——复合保温外层材料热导率(导热系数)，W/(m·K)

α ——保温结构外表面传热系数，W/(m²·K)

t ——设备和管道外表面温度，℃

t_a ——环境温度，℃

t_b ——复合保温内外层界面处温度，℃

t_s ——保温结构外表面温度，℃

4.4 计算结果

计算结果见表2。

表2 计算结果

方案	材质	厚度 mm	外表面温度℃	热损失 W/m ²	总重 kg/m ²
1	硅酸铝耐火纤维 +	320	31.1	169	52.96
	岩棉	120			
2	纳米气凝胶 +	30	29.3	165	28.25
	岩棉	220			

在满足设计要求下的前提下，方案2每m²的保温材料重量、保温厚度接近方案1的一半，说明纳米气凝胶的应用可以很大程度的降低保温厚度和减轻系统重量。

4.5 应用实例

在某项目中，吸热器保温采用了气凝胶材料，

保温结构为：纳米气凝胶隔热板 + 高温岩棉 + 彩涂钢板(见图2、图3)；与采用硅酸铝耐火纤维毯 + 岩棉 + 彩涂钢板的常规复合结构相比，单块管屏的保温结构重量减少了约 500 kg。不仅减轻了吸热器荷载，且增加了吸热器背部有效空间，产生了积极的经济效益。

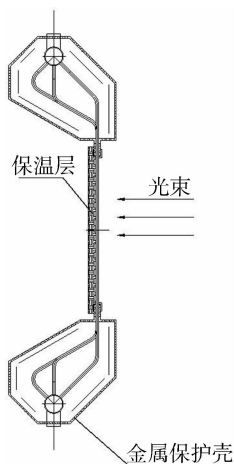


图2 保温结构图(部分结构未显示)

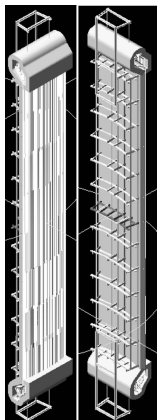


图3 单个模块保温模型图

5 存在的问题

5.1 纳米气凝胶材料保温系统设计的研究尚待完善

纳米气凝胶材料不同于现有常用的保温材料，其特殊的材料性能决定了其保温系统设计也具有特殊性。现阶段，在大多数应用场合中，设计者只是简单的把传统保温结构中的硅酸铝耐火纤维毯等常规材料替换成了纳米气凝胶材料，并没有针对纳米气凝胶材料的特性做结构改进，比如：保温材料的固定方式等等。从现场实际应用情况看，传统的双层保温材料复合的结构普遍存在保

温材料下沉的情况。主要是由于该保温结构不能使内外层保温材料结合成一个有机的整体，长期使用后，受设备振动、人为踩踏等影响，导致保温材料发生变形、滑移，影响保温效果。

5.2 拓宽气凝胶制品种类规格

吸热器保温设计时，在满足设计要求的同时要达到减重、减薄的目的，纳米气凝胶保温层厚度一般需要在 20~50 mm。目前已经在其它领域应用的纳米气凝胶制品厚度一般为 10 mm^[5]，超过此厚度时可以采用多层复合工艺使其满足设计要求。但是气凝胶层与气凝胶层复合后的力学安全性可能存在不确定性，且施工工艺复杂。一旦处理不当就会产生缝隙，受设备振动等影响后缝隙增大，热损失加剧，致使保温结构导热系数增大，保温效果变差。因此，在气凝胶生产过程中直接制备更多规格的产品，将有助于气凝胶在保温上的推广应用。

6 结语

纳米气凝胶材料在吸热器保温系统中应用的优势在于，与无机类保温材料相比，纳米气凝胶具有更低的导热系数，使用较少的纳米气凝胶材料就能实现较厚传统保温材料的效果，能有效的减薄保温层厚度，减轻保温重量。而保温材料厚度的降低，不仅可以增加吸热器背部空间，更加有利于吸热器的支撑设计，还将减轻保温金属件的重量。这些都将能够降低整个吸热器系统的自重，进一步减轻吸热塔基础荷载，提高结构安全性，降低电站建设成本。

参考文献：

- [1] 张鑫, 王毓薇, 白志鸿等. 纳米气凝胶与常用管道保温材料的性能对比[J]. 油气储运, 2015, 34 (01): 77-80
- [2] 吴晓栋, 崔升等. 耐高温气凝胶隔热材料的研究进展[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2015, 29(5): 102-108
- [3] 彭程, 吴会军, 丁云飞. 建筑保温隔热材料的研究及应用进展[J]. 节能技术. 2010, 28 (04): 332-335
- [4] DL/T5072-2007 火力发电厂保温油漆设计规程
- [5] 程颀, 成时亮, 阮丰乐, 辛春华. 气凝胶材料在墙体保温系统中的应用[J]. 新型建筑材料, 2012, 39 (09): 80-83