

国内熔模铸造型壳焙烧炉的应用现状及节能进展

◎冯胜山(湖北工业大学机电研究设计院电话:027-87862593 Email:fss8172@126.com)

摘要:介绍了近年来国内熔模铸造型壳焙烧炉在加热方法、炉型结构、保温材料等方面的技术改进、创新及其节能效果,指出黑体炉衬材料与蓄热式高温空气燃烧技术相结合的加热炉是熔模铸造型壳焙烧炉的重点发展方向。

关键词:型壳;焙烧;节能

熔模铸造工艺中型壳焙烧的主要目的是:除去型壳中的水分、残余蜡料、盐分等挥发物,使型壳在浇注时具有良好透气性;使粘结剂、耐火材料等物质之间进行热物理化学反应,改变物相的组成与显微组织;建立高温强度,减少液态合金与型壳的温差,提高充型能力。型壳焙烧是熔模铸造的主要工序之一,也是耗电最多的工序。

型壳焙烧炉应满足如下要求:能源消耗量低;炉内温度分布均匀;型壳装炉、出炉方便;防腐性能好;电热元件维修方便;炉型适应性广,既适合小批量生产,也适合大批量生产。

目前用来焙烧型壳的加热设备,按所用能源分类,有电炉、油炉、煤(煤气)炉;按炉型的结构分类,有箱式炉、台车炉、反射炉、棱式炉等。

长期以来,国内精密铸造行业最常见的精铸型壳焙烧炉是箱式电阻炉。普通箱式电阻炉采用金属电阻丝加热,其优点是温度易于控制,但是存在如下弊端:

(1)能耗大,生产效率低。箱式电阻炉每焙烧一炉需4~5h,耗电约300KW·h。(2)升温慢,难以与炼钢炉容量相匹配。若在焙烧过程中电炉丝烧断,则升温十分缓慢,每提高100℃约需1h左右,既浪费电力,又耽误时间。(3)装炉、出炉极为不便,操作笨重。(4)污染环境。箱式电阻炉由于没有烟巷和烟囱,在型壳焙烧过程中由水分、硬化液以及粘附在型壳上的模料所产生的蒸气和酸性废气,只有通过炉门逸出,造成设备腐蚀,也污染车间生产环境。(5)电热元件维修困难。电阻丝及炉底板常因腐蚀性气体的侵蚀而失效,影响生产。烧断的电炉丝需待炉子冷却后才能修复。

为了维持生产能力,一般生产厂要设置多台大功率箱式电阻炉,致使型壳焙烧工序成为高耗能的“电老虎”,使型壳焙烧成本居高不下。因此,型壳焙烧炉的节能改造一直是铸造节能工作的重点之一。

近十年来,国内熔模铸造型壳焙烧炉在加热方法、炉型结构、保温材料等方面进行了一些技术改进与创新,节能技术获得了较快发展,型壳焙烧炉的节能效果和使用性能也得到了显著改善。

1 硅碳棒电阻型壳焙烧炉

目前有一些企业,特别是小批量生产企业,采用硅碳棒替代金属电阻丝加热的电阻焙烧炉。硅碳棒电阻焙烧炉比金属电阻丝加热焙烧炉的使用寿命长,并可从外面直接更换硅碳棒,无须停炉冷却等待,可以满足连续生产要求,降低烟尘、炉渣排放,使环保节能、清洁生产水平显著提高。对于水玻璃型

壳工艺或复合工艺,由于焙烧释放出的酸性物质对电加热管腐蚀比较快,所以采用硅碳棒代替电阻炉丝有更好的效果。

硅碳棒电阻炉与传统的电阻丝加热方式比较,当加热元件损坏时,不需停炉一天以上,等炉温冷却下来再更换加热元件,而是热炉更换,且只需5min左右,从而保证了生产的连续性。硅碳棒发热元件具有良好的化学稳定性,抗酸能力强,耐急冷急热,高温下不易变形。

硅碳棒嵌在工作室顶部与两侧,其接线端伸出炉外,通过可控硅及智能PID温度控制仪调整工作电压来设定炉温。炉体的内墙由异型硅砖及保温砖组成,四壁及顶部为硅酸铝纤维、氧化镁及碳化硅等,外层为保温层及空气夹层,保温效果好。因硅碳棒为电阻发热元件,整个炉体只保留出气口,没有传统意义上的烟囱,热量不易损失,因此热效率可达90%以上。

硅碳棒电阻炉炉温可达1300℃以上。它虽然比燃油及燃气炉升温速度稍慢,但通过炉室的合理匹配,完全可与快速熔炼炉配套,即选用两倍容量的硅碳棒电阻焙烧炉与一台快速熔炼炉匹配,可确保型壳完全烧透。

2 红外电阻型壳焙烧炉

红外电阻炉的技术核心是以优质红外涂料为基础的红外电阻带和红外复合炉衬。节能机理是加强热能的定向辐射,使热量更多地为工件吸收,较少地从炉壁散热损失;同时采用陶纤内贴面,减少蓄热、散热损失。

红外电阻带是先把电阻带弯曲成连续波纹形,再扭平并贴在炉衬内表面,然后在电阻带面向炉膛的表面涂上红外涂料。红外复合炉衬是多层炉衬,在轻质砖上内贴一层陶瓷纤维,陶纤表面涂上红外涂料。红外涂料除加强热量辐射外,还可提高陶纤的强度、耐火度,防止其粉化、焦化。红外复合炉衬及红外电阻带结构示意图如图1所示^[1]。

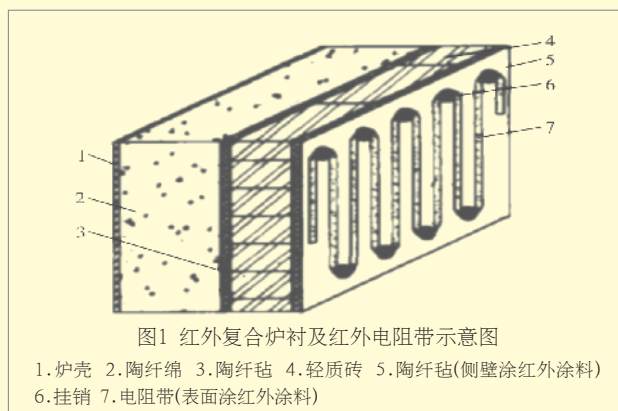


图1 红外复合炉衬及红外电阻带示意图

1. 炉壳 2. 陶纤绵 3. 陶纤毡 4. 轻质砖 5. 陶纤毡(侧壁涂红外涂料)
6. 挂销 7. 电阻带(表面涂红外涂料)

普通红外涂料一般由碳化硅或铁红与水玻璃混合而成，它们在600℃下有一定红外作用。而中温电炉的使用温度为800~950℃，要求在2.5μm左右波长段具有高的光谱发射率，普通红外涂料就难以满足要求。如果骨料采用多种氧化物高温反应烧结成反型尖晶石结构，粘结剂采用铝铬硅复合溶胶，则可满足中温炉要求。

优质红外涂料的热辐射率高，热吸收率也高，若直接涂在重质耐火砖上，在加强辐射传热的同时也有促进散热的负作用。如果炉壁用轻质砖，再内贴陶瓷纤维，红外涂料涂在陶纤上，由于轻质砖特别是陶纤的导热率低，涂料热吸收高这个因素就会受到抑制。加热元件本身工作温度总是比工件炉壁温度高，它只会发射热，不会吸收热，因而在加热元件表面上红外涂料，只有积极作用，没有消极影响。

电阻带一侧上涂料，一侧不上，热量辐射有涂料侧多，无涂料侧少，使热量定向辐射。好的涂料与金属加热元件的粘结强度度高，可以在1200℃淬水多次不剥落。

红外电阻炉具有如下特点：

(1)节能。天津某厂的一台保护气氛推杆炉，可比单耗为182.6kW·h/t，远低于ZBJ01033-89规定的一等炉要求(≤370kW·h/t)，耗能达到当前国际先进水平。一般升温时节能50%~60%，保温时节能30%~40%。

(2)升温速度快。升温快就省时，提高工效，原来每昼夜开二炉的可以开三炉。用户反映：提高工效带来的实际效益，超过了节电效益。

(3)炉温均匀。采用红外技术，由于加强了辐射传热，炉温均匀度明显提高。某航空机械厂3台炉子的炉温分布差分别为±6℃、±6.5℃、±8℃以内。

(4)使用寿命长。红外涂料是从防护涂料发展而来的，所以红外涂料对加热元件和炉衬起保护延寿作用。上海交通大学将这种涂料涂在氮化炉的内壁后，其老化寿命提高了5~10倍。

用红外电阻炉焙烧型壳有特殊优点，除了升温快、温度均匀以外，还可促进水分挥发和粘结剂固化。这是因为红外电磁波的波长与水分子振动的波长相近，会加强水分子振动，摆脱型砂的束缚挥发出去。此外，红外可以部分透入铸型内部，使铸型表里受热较为均匀，不致产生外表烤焦而内部焙烧不足的现象。

3 燃煤贯通式型壳焙烧炉

燃煤贯通式型壳焙烧炉的结构特征是：型壳装在耐热装料盘上，在机械推杆的推动下，连续不断地进入炉内；焙烧好的型壳亦相应地被推出炉门，由过渡小车运往熔炼炉前浇注。炉膛长度方向设计成3段：低温段(炉温200~300℃)、中温段(炉温300~600℃)、焙烧段(炉温600~900℃)。燃烧室设置在焙烧段，优先对焙烧段的型壳进行强制对流加热。中温段和低温段则依靠贯通炉中的高温烟气的余热加热。焙烧段炉顶采用硅酸铝耐火纤维组合成型顶结构，压低拱高而形成扁拱，强化火焰对型壳的对流及辐射。

贯通式炉型炉膛长而横截面小，同一截面的炉温相对比较均匀，因此型壳装料盘的上下层温差明显减小。在整个焙烧过程中，型壳经历逐渐从低温到中温，直至焙烧的过程，彻底摒弃了箱式电阻炉“急火猛烧”的不良焙烧方式。焙烧炉内空气过剩系数选择偏大值，使炉气持续保持氧化性气氛，有利于型壳挥发物的不断析出和高温物化反应的进行，能显著改善型壳的高温力学性能，提高焙烧质量。

燃烧方式采用下饲式机械加煤明火反烧。这种燃烧方式可使从炉层挥发出来的可燃气体在上升到氧化层时充分燃烧。由于火自上而下燃烧，煤层得到充分预热，不存在还原层，燃烧工况稳定，烟尘少。

燃煤贯通式型壳焙烧炉的主要特点是有利于热量的充分利用和实现规模生产。上海市机械制造工艺研究所开发的节能型燃煤贯通式型壳焙烧炉结构见图2^[2]。

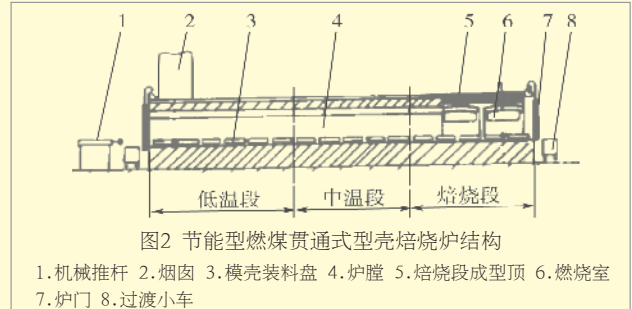


图2 节能型燃煤贯通式型壳焙烧炉结构

1. 机械推杆 2. 烟囱 3. 模壳装料盘 4. 炉膛 5. 焙烧段成型顶 6. 燃烧室 7. 炉门 8. 过渡小车

该炉的主要技术性能指标如下。

炉膛尺寸：0.9m×11.5m(宽×长)；工作温度：950℃(焙烧段)；燃料：烟煤；燃料消耗量：40kg/h；加煤方式：下饲式机械加煤；型壳装料盘数：16盘；型壳焙烧生产率：每小时出炉型壳4盘，可浇注钢水400~600kg。

节能型燃煤贯通式型壳焙烧炉在浙东某些精铸厂取得了令人满意的节能效果。某精铸厂建成节能型焙烧炉1台，配套使用2台150kg可控硅中频熔炼炉(实际每炉出钢水230~250kg)，三班制生产。现实际每天耗煤0.7t，每t成品铸件约耗煤175kg。原配用的4台45kW箱式电阻炉全部停用。过去4台箱式电阻炉年耗电约70万度。经测算，焙烧炉改造后年节约电费和维修费达30万元以上，其中还不包括由于提高型壳焙烧质量而降低铸件废品率所产生的经济效益。

为了充分利用高温烟气余热，环形燃煤型壳焙烧炉应运而生，可实现节能和高质量模组焙烧的统一。使用环型焙烧炉并且同时供应两台中频炉的壳型后，每炉熔钢时间控制在45min左右，按每20~25min出壳一次的节奏生产，那么壳型的焙烧时间可达到80min，其中700~800℃预热段20min，900~1000℃准高温段20min，1100℃以上高温段40min。与过去壳型由常温到1100℃仅焙烧45min相比，质量大有提高，同时由于预热段和准高温段都是利用烟气余热，又采用节能喷嘴，每日连续工作的煤耗总量下降30%。某厂过去每日完成40炉次，耗煤2吨；现在每日可完成50炉次，耗煤1.5吨，单炉煤耗由50公斤下降到30公斤(下降40%)，中频炉电耗由于缩短等待浇注时间而下降12%。

4 转窑式煤气型壳焙烧炉

采用煤气发生炉将煤转化成煤气,可提高能源利用率,降低成本和排放,降低能耗达到30%以上^[3]。

如果说硅碳棒电阻炉适用于中小精铸工厂,那么转窑式煤气焙烧炉则适合规模、产量较大精铸工厂使用。

转窑式煤气焙烧炉外壳采用钢结构焊接而成,炉膛由优质高铝砖砌制,炉壳与炉膛之间加有优质高铝岩棉作为保温材料,炉体顶部亦铺贴高铝岩棉保温材料,以防止散热。炉门及其周边采用耐热材料制成,炉门内填充高纤维材料,具有炉门不变形、隔热密封效果好等优点。

炉内转盘式结构设计,可使型壳进入焙烧炉后经过预热、热交换、焙烧等多段温区,避免了型壳的急热。

转窑式煤气焙烧炉虽在结构上具备烟道较长、烟气与型壳接触充分等优点,但燃料在燃烧过程中,会排出废气,废气会带走热量,随着炉温的增高,带走的热量增多,烟气热量得不到充分利用。为了解决这一问题,采用钢铁厂尾气排放的节能经验,开发设计了一款适合自制水煤气使用的新式烧嘴。

该烧嘴能在极短时间内把常温空气加热。被加热的高温空气进入炉膛后,卷吸周围炉内的烟气形成一股含氧量低于20%的稀薄贫氧高温气流,同时往稀薄高温空气附近注入燃料,燃料在贫氧状态下实现燃烧。与此同时,炉膛内燃烧后的热烟气经过另一个烧嘴排空,将高温烟气的热量储存在另一个烧嘴内。工作温度不高的换向阀以一定的频率进行切换,常用的切换周期为30~200s。两个烧嘴分别处于储热与放热交替工作状态。现在绝大多数工厂使用的箱式炉,排烟温度在900℃以上;而转窑式焙烧炉烟道排烟温度<150℃,可获得良好的节能效果。

转窑式煤气焙烧炉与新式烧嘴的结合,从根本上提高了加热炉的能源利用率,特别是对低热值脏燃料(如脏煤气)的合理利用,既减少了污染物(高炉煤气)的排放,又节约了能源。另外,新的燃烧方式强化了加热炉内的炉气循环,炉内的温度场均匀,提高了加热质量。

采用新式烧嘴装配的转窑式煤气焙烧炉焙烧型壳,不仅焙烧时间延长,炉内温度梯度场均匀,且焙烧型壳质量好,经测试,吨钢水耗煤250kg以下,与传统箱式炉相比节能60%以上。

如改用天然气代煤气,可进一步节能降耗,减少废气污染。

5 燃油型壳焙烧炉

燃油型壳焙烧炉的特点是:焙烧温度高,升温速度快,能满足红壳浇注和快速熔炼的工艺要求。

福建省机械科学研究院研制的新型燃油焙烧炉的结构特点是:(1)采用室式加热结构,型壳可装箱或不装箱焙烧,炉门为升降式结构,升降简便,气密性较好,设备不易损坏,而且维修、使用均很方便。(2)喷油嘴采用三级雾化,并使气流旋转,因此雾化质量好,在合理的空气量与油量配比下,可以得到充分燃烧,而且结构简单,不易堵塞,点火较容易,使用和维修也方便。两个喷嘴经过合理布置,改善了炉内气流的

运动,避免了加热“死角”,使炉内各点温度更均匀。另外,火焰不直接喷射型壳,避免了由此而引起的型壳局部过热。

(3)采用下排烟方式,一方面有利于减轻或避免型壳出现上下部分冷热不均现象,另一方面可利用烟气余热,使热量利用率显著提高。(4)由于油的燃烧值高,所以型壳的加热速度快、焙烧时间短,能达到快速要求。炉温的控制范围大,可以升温至1300℃以上。(5)这种炉型结构紧凑,热量损失少,热效率高,能源消耗量减少。

武汉机械工艺所研制的YL15-11型箱式燃油型壳焙烧炉,不仅节约能源,降低型壳焙烧成本,提高铸件质量,降低废品率,而且由于燃料充分燃烧,可减少炉体腐蚀,改善车间环境。

为了使燃油型壳焙烧炉高效节能,在设计时必须注意以下几个问题:(1)炉膛的设计必须使燃烧气流有利于型壳及炉衬、炉底的吸热,尽量减少排烟热损失。燃气对流应使型壳中水分及废气通过烟巷、烟囱排至炉外。(2)燃烧机必须达到燃料雾化充分,风量、风压匹配合理。焙烧炉内气流应呈弱氧化性,促使粘附在型壳上的模料再燃烧。这不仅增加炉内热量,同时减少了由于模料不完全燃烧造成的环境污染。(3)对于连续运行的焙烧炉,在炉体设计时应保证良好的保温效果。炉体热惰性可以大一点,尽量减少炉体散热。(4)炉温控制系统应可靠。为适应不同产品需要,有自动点火控温和手动点火控温两种方式。(5)炉膛的容积应与炼钢炉容量匹配。

广东某铸造厂使用YL15-11型油炉取代RX75-9电阻炉焙烧型壳,进行了生产考核,有关数据见表1^[4]。

表1 箱式燃油炉与箱式电阻炉规格及经济技术参数对比

规格及经济技术参数	YL15-11 油炉	RX75-9 箱式电阻炉
工作区尺寸(长×宽)(m)	1×1.2	1.2×0.6
工作区面积(m ²)	1.2	0.72
炉子使用最高温度(℃)	1000	900
每炉电耗(kW·h)	2	135~180
每小时油耗(kg/h)	15	
焙烧一炉型壳所需时间(h)	0.5~0.75	3~4
焙烧一炉费用(元)	电 1.1 油 35.4	75~100
	合计 36.5	
每炉型壳钢水注入量(kg)	180~230	150~180
生产1t精铸件用于焙烧型壳的费用(元)	365	750~1000

(注:表中费用数据为1995年计算结果)

从表1可看出:使用油炉可使精铸件的生产成本降低600~800元/吨。如车间每年生产100t精铸件,可节约开支6~8万元,一年即可收回油炉的投资。由于红壳浇注比冷壳浇注提高铸件成品率的经济效益还没有计算在内。

常用的台车燃油炉与箱式燃油炉性能对比如表2^[5]。

表2 台车燃油炉与箱式燃油炉性能对比

序号	名称	台车炉	箱式炉
1	装炉量(组)	100~190	24~30
2	燃烧能力(kg/h)	30	15
3	冷炉升温时间(h)	4	1.3
4	每吨铸件耗油量(kg/h)	393	262
5	环保	差	良

型壳在烧过程中,有大量的挥发物排出。如果排气不畅,酸性的烟气容易腐蚀车间的设备,污染工作环境。箱式燃油焙烧炉由于炉体材料使用高铝轻质耐火砖,减少炉体的蓄热和散热,加上箱式炉的整体密封性比台车炉好,相比之下箱式炉比台车炉热效率高,且其上排气结构有利于烟气的顺利排放。从表2数据分析可知:箱式燃油焙烧炉每生产1吨精铸件可节约131kg柴油,有利于节能减排。

此外,在炉型结构及其节能方面,近年来还涌现出一些新的改进。例如:不少产量较大的精铸企业采用环形燃油回转炉,并应用节能喷油器,大幅度降低了燃料消耗,其节能效果达到50%左右。为了充分利用热量,降低尾气的排放温度,有工厂将原来的单室箱式焙烧炉改为双室焙烧炉,对尾气热量进行循环利用。宁波万冠公司开发出将浇注后铸件散发的大量热能利用到型壳预焙烧上的专用炉窑,这是节能上的创举。

6 新型节能炉衬材料

6.1 硅酸铝耐火纤维

硅酸铝纤维是近年来发展很快和应用很广的一种新型节能保温材料。它以焦宝石为主要原料,经过熔化、成纤、喷粘接剂、成形、固化等工序制成。我国的硅酸铝棉工业经过30多年的发展,硅酸铝棉及其制品的生产和应用已形成了完整系列,生产技术已接近国际水平。

硅酸铝耐火纤维及其制品的主要特性如下(参见表3)。

(1)耐高温:高铝纤维的长期使用温度可达1250℃,普通硅酸铝纤维为900~1000℃。(2)导热率低:它与一般隔热砖相比,导热率要低30%以上。(3)重量轻:耐火纤维制品的容重,仅为一般耐火砖的1/5~1/10,因此纤维制品代替耐火砖砌筑窑炉,可节约钢材2/5~1/2,大大减轻窑炉的重量和体积。(4)热容小:耐火纤维的热容低于其保温层,可使窑炉升温快,热耗小,节约燃料或电力40%~50%,大大提高窑炉的周转率。(5)化学稳定性好:除氢氟酸和强酸侵蚀外,其他如蒸气、油类和其他酸碱类等材料均不侵蚀。(6)易加工、运输安装方便:如砌筑窑炉保温层比一般保温砖节省人力55%以上。

表3 耐火纤维制品的理化性能

项目	高铝纤维	普通硅酸铝纤维
Al ₂ O ₃ (%)	>69	>45
Al ₂ O ₃ +SiO ₂ (%)	>98	>96
Fe ₂ O ₃ (%)	<0.55	>1.2
K ₂ O+Na ₂ O(%)	<0.3	>0.5
导热系数(1000℃)(kJ/m·h·℃)	<0.629	0.796
安全使用温度(℃)	1250	1000
纤维直径(μm)	3~6	4~7

硅酸铝纤维及其制品以其优良的绝热保温性能、方便快捷的施工方式被广泛应用于各类高温窑炉的保温,在铸造行业也得到了越来越广泛的应用。目前国内许多工厂已将其裱贴于炉衬内表面,在电阻炉上应用,可节能40%以上;在火焰炉上使用,节能20%以上。在窑炉上也有采用全纤维结构的。所谓全纤维结构,即在炉膛的炉墙、炉顶、炉门处均不用耐

火砖砌筑,而是在钢质炉体骨架上直接铺设硅酸铝耐火纤维材料(高铝纤维砖、毯、板)。据第一重型机器厂介绍:新建的1台6×17m全纤维炉与1台6.8×12m耐火砖砌筑炉比较,炉重减轻3/4,钢材节约2/5,造价节省40%,节能效果达30%。

在现有各种电阻炉和其他窑炉内壁裱贴硅酸铝纤维毯,不论是连续作业还是间歇式作业,均可提高升温速度,减少升温时间,节能效果良好。一般裱贴厚度至少为10mm。

RJX-15-9型电阻炉裱贴硅酸铝纤维和未裱贴硅酸铝纤维保温层温度和电损比较见表4、5^[6]。数据表明:采用裱贴法改炉后,炉墙内衬的平均温度下降率与电耗节省率基本一致。

表4 电炉内衬和保温层温度比较

项目	内衬平均温度(℃)		保温层平均温度(℃)	
	升温至800℃	在800℃保温8h	升温至800℃	在800℃保温8h
未贴硅酸铝纤维	500	623	114	259
贴10mm厚硅酸铝纤维	213	449	36	180
平均温度下降率	57.5%	27.9%	69.3%	30.4%

表5 电炉升温至800℃保温8h的电耗比较

项目	升温至800℃所需时间(min)	升温至800℃所需电量(kW·h)	在800℃保温8h所需电量(kW·h)	升温与保温共耗电量(kW·h)
未贴硅酸铝纤维	173	46.8	51.4	98.2
贴10mm厚硅酸铝纤维	69.0	18.3	49.2	67.4
节省电耗率	60.1%	61.1%	4.3%	31.4%

6.2 多晶莫来石耐火纤维

多晶莫来石耐火纤维是一种新型超轻质耐高温绝热材料,由莫来石(Mullite)微晶体构成,并集晶体材料和纤维材料特性于一体,有极好的耐热稳定性,长期使用温度可达1500℃,熔点达1840℃,其导热率是传统耐火砖的1/6,容重只有其1/25,加热收缩率(1500℃×24h)≤2%,可广泛应用于工业窑炉内衬绝热,是高温窑炉节能降耗的理想材料。

某大型企业的82m²台车式热处理炉在大修时采用多晶莫来石纤维进行技术改造。整个炉顶采用全纤维复合结构,该炉炉顶长14米、宽7米,在施工时将顶分成九块盖(复合纤维结构)。纤维安装完毕后,吊在炉顶上组装而成,炉顶纤维总厚度180mm,其中采用40mm的PMF-100系列堆块作工作面,粘帖在高铝纤维的纵断面上(120mm)约120m²,整个炉顶看不到锚固件结构,避免了散热损失。炉墙采用单层贴面式,粘帖30mm厚的PMF-100系列材料。这样整个炉衬全部为PMF结构。由于采用了PMF新型超轻质材料,从而使炉体结构轻型化。炉顶重量12吨,与原炉顶(磷酸盐耐热混凝土预制块)112吨相比重量降低了83%,其结构简单,绝热效果非常好。该炉仅用钢材20吨,与原炉钢材用量37.3吨相比减少了45%。该炉经五年的生产实践证明:PMF炉衬使炉子升温速度加快,节能效果显著,处理同样的工件,新旧炉燃耗相差38%,近240m²炉衬的PMF粘帖牢固,完好无损,仍保持其绝热效果。

将多晶莫来石纤维及制品应用于某陶瓷隧道窑,节油率达29%。

6.3 高温红外辐射涂料^[7]

对于以辐射传热为主的工业炉,在炉衬表面应用高温红外辐射涂料可提高炉内参与辐射传热的物体表面辐射系数,显著改善炉内传热过程,达到节能、增效的目的。红外线通常是指波长在2.5~1000 μm 范围内的电磁波,该电磁波能够被物体吸收使物质内部质点产生共振,从而使物体温度上升。

高温红外辐射节能涂料一般由辐射粉体基料、粘结剂和载液组成。辐射粉体基料提供高辐射性能,粘结剂使涂料牢固地粘结在基体表面。有时在涂料中还加入烧结剂,其目的是促进涂料在高温时的烧结,提高涂层致密度和强度,改善涂料辐射性能。

早期红外辐射涂料主要以碳化硅、氧化锆、锆英砂等单质或化合物为辐射成分,以简单无机盐为粘结剂;现在,红外辐射涂料的辐射成分由多种物质或化合物通过特殊的材料复合工艺制成,其粘结剂为多种微粉、溶胶及化学粘结剂组成的复合溶体。目前,红外辐射涂料的粉体基料主要是金属氧化物的复合物和碳化物,主要有 Cr_2O_3 、 TiO_2 、 ZrO_2 、 Fe_2O_3 、 MnO_2 、 NiO 、 CoO 、 CuO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 La_2O_3 、 CeO 、 SiC 等。对于低温干燥炉窑使用的红外辐射涂料,常用的粘结剂为水玻璃和磷酸盐水溶液;对于中高温红外辐射涂料的粘结剂,常用的为多种微粉或溶胶,一般为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 微粉或溶胶。

红外辐射涂料的节能机理在于:

(1)能增加基体表面黑度,增强基体表面对热源传来热量吸收后的辐射传热,而反射部相应减少(见表6)。炉窑内衬用耐火材料常温下的黑度一般为0.6~0.8,随着炉温的升高,会大幅度下降,而红外辐射涂料能减缓这种下降,有时甚至可以使其升高(见图3)。

表6 炉内壁黑度与吸热后能量分布

炉内壁黑度	传导热损失(%)	反射能量(%)	辐射能量(%)
0.35	5	65	30
0.70	5	30	65
0.90	5	10	85

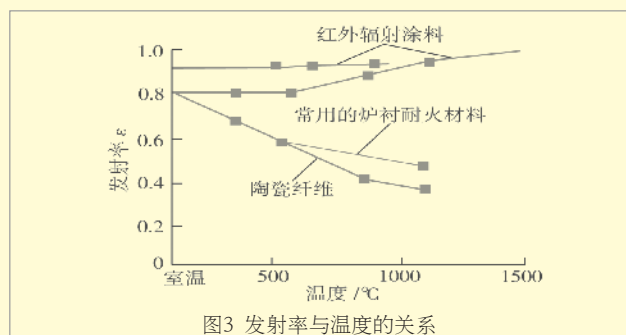


图3 发射率与温度的关系

(2)由于基体表面的吸收和辐射作用,改变了传热区内热辐射的波谱分布,将热源发出的间断式波谱转变成了连续波谱,从而促进被加热物体吸收热量。

(3)据Wien位移定律,随着温度的升高,辐射峰值波长会向短波段移动;又据Planck定律计算可知,高温辐射能量

大多数集中在1~5 μm 波段,如1000 $^{\circ}\text{C}$ 和1300 $^{\circ}\text{C}$ 时,会分别有76%和85%的辐射能量集中在这一波段内,而一般的耐火材料在这一波段的发射率很低,对高温辐射不利,红外辐射涂料可以弥补这一不足(见图4)。

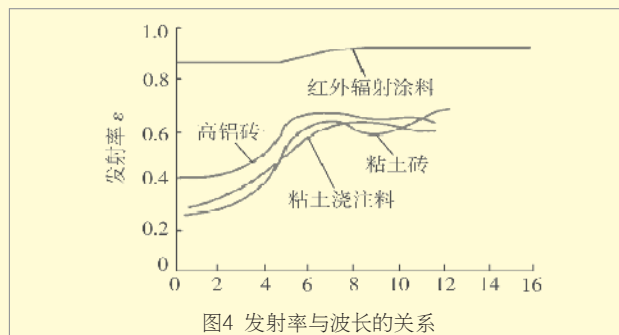


图4 发射率与波长的关系

中科院上海硅酸盐研究所在国内最早从事远红外辐射涂料技术的研究和推广,先后研制成功HS、HY、HE、HK、SK和HT型等六种系列的远红外涂料。它们是一类具有选择性辐射性能的涂料,可加涂在金属或陶瓷基体上,使用温度范围为60 $^{\circ}\text{C}$ ~1800 $^{\circ}\text{C}$,主要性能已达到美国、日本等国同类产品的领先水平。该系列涂料已在几百家单位六千余台加热炉、锻造炉上应用,平均节能5%左右。

南京航空航天大学研制成功一种高温红外涂料,其辐射基材为 Fe_2O_3 和 MnO_2 ,比例由20%到80%变化,并采用 Co_2O_3 、 CuO 、 MnO 为助烧剂。该涂料在沈阳黎明发动机公司1台138kW的高温电阻炉上应用,空炉室温升到1200 $^{\circ}\text{C}$,时间由14h缩短至6.5h,耗电由1932kWh降到897kWh,节电64%;在南京晨光机器厂2台75kW的台车炉上使用,与旧炉相比节电57%。

江苏武进江南特耐保温材料厂开发出一种高温高发射率红外辐射喷涂料。该涂料涂在工业炉窑内壁上,能使炉膛温度升高,炉窑外壁温度及烟气温度下降,从而达到提高其热效率、节能和延长炉窑使用寿命的目的。该涂料可耐1200 $^{\circ}\text{C}$ ~1500 $^{\circ}\text{C}$ 高温并耐燃气冲刷,法向全发射率为0.85~0.93。经某厂加热炉实际使用,节能约6%。

北京科技大学研制了BJ-I红外节能涂料。该涂料由耐火粉料、烧结剂、增黑剂、粘合剂及悬浮剂等10多种组份组成。BJ-I红外节能涂料分别在加热炉、陶瓷隧道窑等进行应用实验,取得了良好效果,涂层发射率稳定,节能达8%以上。

武汉钢铁集团以 Fe_2O_3 、 CuO 、 MnO_2 、 Co_2O_3 、 CeO 等过渡金属氧化物为主要原材料,选择锂辉石、堇青石为膨胀调节剂,采用 SiO_2 溶胶、 CrO_3 化学试剂、 $\rho\text{-Al}_2\text{O}_3$ 微粉、 Cr_2O_3 微粉为结合剂,开发了适应铁铬铝金属基体和耐火材料基体的高抗热震性红外辐射涂料。该红外辐射涂料在武钢机械制造公司小型台车式电加热热处理炉上的应用表明,采用红外辐射涂料后,炉子升温时间由原来的3.5h缩短为3h,即升温时间缩短14.3%;在武钢轧辊公司燃气热处理炉上应用结果表明,升温速度快,节能率可达30%,还提高了炉衬表面的结合强度,改善了炉衬的表面抗冲刷能力,延长了炉衬的使用寿命。

6.4 黑体炉衬

当前加热炉领域都致力于发展轻质保温材料(其典型代表就是“全纤维炉”),认为越轻越节能,实际并非完全如此。如果材料过轻,会导致其强度、荷重软化点等技术指标不能匹配。因此炉衬材料轻型化是有限度的。

如果在炉衬材料轻型化的基础上采用“黑体”技术,即在轻型化炉衬压制成型、真空成型或浇注、捣打过程中,在其面向炉膛一侧设置合适参数值的“黑体”元件,再经适当加工处理,可获得新型的黑体炉衬^[8]。用这种黑体炉衬建造炉窑和改造现有炉窑,在各种炉窑特定的使用条件下,黑体元件均能发挥其优异功能,实现炉窑“优质、高效、低耗、环保”要求,促进我国炉窑技术装备进步。黑体炉衬材料在耐火保温材料领域开辟了一片新天地,可节能20%~30%。

所谓“黑体”,是指能够吸收辐射能的物体。理想黑体的吸收率和发射率均为1。成都某节能技术公司根据黑体理论,将黑体的概念加以技术化,制成集增大炉膛面积、提高炉膛黑度和增加辐照度三项功能于一体的工业标准黑体元件,其黑度(全发射率)达到0.96(1078K)。

根据热射线的能量分布Lambert定律,热源向空间各方向发射的辐射能按余弦规律分布,即法线方向的能量最多,

切线方向的能量为零;在此两方向之间任一位置的辐射能大小,与该位置同法线方向夹角的余弦成正比;在切线与法线之间,越靠近法线方向的热射线,辐射能越多。

黑体元件在炉膛内以0.96的高吸收率,可迅速吸收射向它的漫射状的热射线,自身热量增加并积累后,温度升高,随即转化成具有高发射功能的新“热源”。黑体元件同样又以0.96的比率,按设定的方向,定向地、不断地向工件发射热射线。就这样,黑体元件将漫射状的热射线从无序调控到有序,直接射向工件,提高了热射线的到位率,使工件单位面积上吸收的辐射能增加,即辐照度增大,显著减少热量通过炉衬的蓄热和散热损失。

采用黑体炉衬的各种加热炉的使用效果如下:电阻炉、燃气炉节能20%~30%;燃油炉、燃煤炉节能18%~25%;生产率提高10%~20%;炉衬寿命延长1倍以上;改善炉温均匀性;减少废气排放。黑体炉衬可广泛用于箱式、台车式、井式等各类电阻炉和燃料炉。

7 蓄热式高温空气燃烧加热炉

蓄热式高温空气燃烧技术(High Temperature Air Combustion,简称HTAC)是近年来热工领域中最令人瞩目的新技术之一。该技术具有高效节能和低污染的双重优越性。

表7 高温空气燃烧技术与传统燃烧技术的比较

项目名称	传统燃烧	高温空气燃烧	应用效果
炉膛温度	提高有限	显著提高	传热效率高,加热速度高,炉子尺寸可减小
脉冲燃烧特性	每控制段的烧嘴能力同时升降	每个烧嘴不受相邻烧嘴能力的影响	强化炉气循环,缩短加热时间,节能
炉内温差	150~200℃	20~50℃	提高加热质量,减少氧化烧损
预热空气温度	250~550℃	900~1200℃	节能30%以上
热惰性	大,不适应出炉温度的频繁变化	小,适应不同出炉温度的频繁变化	实现自由生产
CO ₂ 排放	自然排放	可减少30%	减少CO ₂ 排放
燃烧噪音	90~110db	70~80db	降低噪音

高温空气燃烧技术改变了传统燃烧方式,主要表现为:空气经过陶瓷蜂窝体的助燃,被预热至1000℃以上,以适当的速度喷入炉膛,在高速气流卷吸、搅拌作用下与炉内燃烧产物混和,空气中21%的氧被稀释,在低氧浓度(最低5%~6.5%)流体中燃烧。

高温空气燃烧技术与传统燃烧技术的比较如表7所示。

蓄热式高温空气燃烧系统包括一对装有蓄热体的燃烧器和一套换向系统(包括换向阀及控制系统)以及相关管路系统,它周期性换向操作,是集烧嘴、蓄热室、排烟器为一体,同时具备组织燃烧、空气预热、烟气排放三种功能的燃烧系统。

蓄热式燃烧系统根据其蓄热体的不同分为RCB(Regenerative Ceramic Burller陶瓷蓄热式燃烧系统)和HRS(High-cycle Regenerative Combustion System高频蓄热式燃烧系统)。RCB蓄热体一般采用 $\phi 15\sim 20\text{mm}$ 耐火球,比表面积 $200\sim 250\text{m}^2/\text{m}^3$,换向时间3min左右。HRS

蓄热体一般采用蜂窝体,以100格孔/in²为例,其比表面积在 $1300\text{m}^2/\text{m}^3$ 以上,换向周期30s。

HRS与RCB比较,有以下几点不同之处:

①HRS系统热效率达80%以上,比RCB约高10%;②HRS系统的蜂窝体内空气通道规则,压力损失小,约为RCB的1/3;③HRS换向频繁,使炉内温度更为均匀,但同时也增加了换向系统的负担;而RCB系统对换向阀门的要求就较低;④RCB系统的耐火小球易清洗,可重复使用,所以相对更换率偏低。

蓄热式高温空气燃烧系统正常工作时,两只燃烧器分别处于两种不同工作状态(即燃烧或蓄热状态)。原理如图5。

如图5中的状态I所示,由鼓风机供给的助燃空气经换向系统进入右侧蓄热室。预热后的空气在烧嘴喷口处与燃料混合,并从喷口喷出燃烧。燃烧产物对炉内物料加热后进入左侧喷口,并通过左侧蓄热室进行热交换,将大部分热