



铸造工业的感应加热

第五讲 感应熔炼电炉设计和感应器参数计算（下）

李韵豪

编者按：本刊从2020年第1期开始连续12期连载李韵豪撰写的《铸造工业的感应加热》系列讲座，主要涉及目前铸造工业应用最多的中频无心感应电炉，介绍各类铸铁、钢，以及有色金属中铝、铜及其合金感应熔炼炉和保温炉的选型，电炉的设计以及感应器参数的计算；金属坩埚、石墨坩埚的设计以及感应器参数的计算；专题讨论感应电炉的供电系统及变频电源主电路的计算、谐波治理和功率因数提高问题；各类无心感应电炉的耐火材料、筑炉工艺、感应电炉循环水系统的设计；感应电炉的环境因素、电气电磁安全防护、环境保护问题等，内容浓缩了作者几十年的宝贵从业经验，对铸造工厂感应电炉熔炼设备的规划、选型、操作、维修和管理，提供非常实用的参考与借鉴，敬请关注。

6 感应熔炼电炉的炉衬

炉衬是感应器线圈与被熔金属之间的填充物，是感应熔炼电炉的一个重要部件。

GB/T 10067.1—2019《电热和电磁处理装置基本技术条件 第1部分：通用部分》第5.1.6条中规定：炉衬所用材料和制品除应具有必要的耐火度和保温性能外，还应有较高的机械强度、较好的耐急冷急热性能、良好的电气绝缘性能、较小的热膨胀系数、足够的化学稳定性和良好的施工性能。炉衬的厚度应合理，以减少热损失，提高热效率，又不

过度增加其蓄热量和降低感应加热的电效率。它们应根据使用条件合理选择并分别符合其产品标准的规定。在条件适用时，应尽量采用低热导率和蓄热量的耐火纤维、纳米孔硅质材料制品和泡沫轻质砖等。与熔体直接接触的炉衬部分，在使用中应相互不起反应。GB/T 10067.31—2013《电热装置基本技术条件 第31部分：中频无心感应炉》的第5.2.4条坩埚及其炉衬中规定：炉衬的捣筑、烘烤和烧结等应严格按耐火材料厂商提供的工艺操作；炉衬厚度应符合设计尺寸。

6.1 炉衬的结构

(1) 炉衬 炉衬从被熔金属到感应器线圈分为两层：耐火层和绝缘层。但目前国内多数厂家在耐火层和绝缘层之间还有用石棉布充当“隔热层”。

耐火层由耐火材料打结经烘烤、烧结形成。耐火材料过去定义为耐火度不低于1580℃的一类无机非金属材料，但后来人们发现仅凭耐火度并不能全面描述耐火材料的特性。当前定义：凡物理与化学性质允许其在高温环境下使用的非金属材料（并不排除含有一定比例的金属）称为耐火材料。耐火材料的定义在行业中并不统一。例如，美国标准：根据其化学与物理性质可以用它来制作暴露于温度高于538℃环境中的结构与器件的非金属材料；日本标准：能在1500℃以上温度下使用的定形耐火材料以及使用温度为800℃以上的不定形耐火材料、耐火泥浆与耐火隔热砖。

“隔热层”处于耐火层与绝缘层之间，采用比打结料的热导率更低、蓄热量更少的材料，出发点是为了减薄炉衬，减少打结料的消耗，弥补耐火层耐火材料阻热能力不足，便于筑炉时固定漏炉报警用不锈钢丝网制成的“第二电极”，便于用炉衬顶出机构拆解炉衬。目前，国内多数铸造厂筑炉仍在使用石棉布（这种由石棉纤维纺织而成的布，石棉含量大于96%，一般厚度1~3mm）。由于石棉在加工过程中的粉尘能引起肺、胸膜间皮瘤等疾病，国际癌症研究中心（IARC）早已将其定为致癌物。我国已禁止使用闪石类石棉，国内全面禁用石棉类制品只是时间问题。由于石棉布韧性较差，筑炉时很容易破损。更重要的是，耐火层与绝缘层之间有了隔热层后，由于隔热层的热导率低，使烧结后的耐火层（从液态炉料由内到外分为烧结层、半烧结层、未烧结层）的温度梯度发生改变，会引起与绝缘层及感应器线圈相邻的未烧结层厚度减小。液态炉料温度越低，对温度梯度的影响越大。未烧结层厚度减少，会使炉衬耐火层寿命缩短，给炉子使用带来安全隐患。实际上，除非某些高温合金需要采用低热导率的隔热层外，只要炉衬的耐火层厚度按规范设计，无论是酸性、碱性还是中性耐火材料，其热导率足以隔热，即使是高温合金，主要起隔热作用的也还是耐火层，“隔热层”也只起一个辅助作用。

绝缘层采用云母纸，其介电强度8kV/mm，热导率0.2W/(m·K)，使用温度上限约900℃，厚度一般0.3~0.5mm。绝缘层紧贴已均匀涂抹耐火胶泥的感应器线圈，它主要作用是增强炉衬的电绝缘，防止感应器线圈“漏电”。由于它较薄，对耐火层的温度梯度不会产生影响。另外，这层云母纸韧性较好，便于炉衬顶出机构拆解炉衬。

(2) 耐火胶泥涂层 为使线圈整体化，支撑感应器线圈，增强绝缘，并吸收振动，防止其在使用及在拆除炉衬时变形，尤其是对有顶出机构的炉体，为导向和防止线圈被擦伤、损坏线圈表面的绝缘层，在感应器线圈内表面涂覆一层称之为“耐火胶泥”的线圈浆料。耐火胶泥以致密电容刚玉为骨料，基质中加入活性氧化铝粉，以纯铝酸钙水泥作为结合剂。如采用推出机构拆除旧炉衬时，耐火胶泥涂层应做成上大下小“倒锥形”内表面，将加水搅拌好的涂料嵌入线圈匝间。

耐火胶泥涂层平均厚度10~20mm。耐火胶泥涂覆工作一般在生产厂出厂前完成，在铸造厂现场筑炉前需测量耐火胶泥涂层对地绝缘电阻（应不小于2MΩ）。耐火胶泥涂层是炉衬安全的最后一道屏障。作为炉子的永久衬，其使用寿命几乎可以与感应器线圈相同，每次重新筑炉前检查并对破损局部稍加修补即可^[17, 18]。

6.2 炉衬耐火层对耐火材料的要求

感应熔炼电炉炉衬的两边——金属液与感应器线圈之间有一定的电压差（通常为几十到数百伏特），因此要求耐火层的耐火材料必须有一定的绝缘性能。但它的绝缘电阻也不能太大，否则会使磁力线穿过耐火层时产生更多的磁损。因此，在保证一定绝缘电阻的情况下，耐火材料的电阻可以小些。原则是：既保证不被电击穿，又能满足提高效率的要求。因为耐火材料一旦确定，该材料的电阻率就定了，耐火层绝缘电阻的大小只与耐火层的厚度有关，所以应合理确定炉衬耐火层的厚度，以阻挡液态炉料的高温，保证炉衬能安全工作，同时也是为了保证它有合适的绝缘电阻值。

耐火层的工作条件十分恶劣，因此耐火材料必须具备以下条件：矿物学上晶相性能优良，具有足够高的耐火度和高温强度；热膨胀系数小，无异常膨胀，不易剥落、龟裂；与熔融金属、炉渣、精炼

剂及其他在熔炼时存在的物质不易产生化学反应；能经受住熔液高温冲刷；能承受熔液高温时的压力和机械磨损以及加料时产生的冲击吸收能量；抵抗电磁振动力（飞利浦公司曾测量线圈的振动值，发现炉衬产生裂纹、开裂、影响寿命的关键是振幅的大小）；不会对熔液有冶金方面的不良影响，易施工，易修补，烧结性能好，资源储量丰富以及价格低廉等。

6.3 炉衬耐火层用耐火材料的分类

感应熔炼电炉炉衬耐火层用的耐火材料一般分为酸性、碱性、中性耐火材料。这样分类是根据耐火材料与酸性、碱性熔渣反应情况来划分的。

酸性耐火材料通常指酸性氧化物（硅砂）的SiO₂含量大于93%的耐火材料，它的主要特点是在高温下能抵抗酸性熔渣的侵蚀，但易于与碱性熔渣起反应。

碱性耐火材料指碱性氧化物（镁砂），如氧化镁或以氧化镁和氧化钙为主要成分的耐火材料，此类材料耐火度较高，纯氧化镁的熔点高达2570℃，抵抗碱性熔渣能力强。

在高温下与酸性或碱性熔渣都不易起明显反应的耐火材料是中性耐火材料，如以中性氧化物Al₂O₃为主体的耐火材料。石墨类坩埚也往往归类于中性耐火材料。

不同材质的炉料使用不同的耐火材料，除了与熔炼工艺、温度等特性有关外，还与炉料的元素含量有关。

熔炼不要求去除S、P的碳素钢、低合金结构钢及高硅钢等，宜采用酸性耐火材料，这是因为硅砂取材方便，价格较低廉，且坩埚使用寿命也比碱性耐火材料高很多。当要求合金中的S、P含量较低时，则必须使用碱性耐火材料炉衬，为减少S、P含量创造高碱度条件。

用酸性耐火材料会在钢中熔有细小的SiO₂夹杂，使合金的塑性、韧性指标下降，故熔炼高铬、高镍钢以及镍基合金时要选用碱性耐火材料。熔炼高锰钢用的耐火材料也不能用酸性耐火材料，由于锰的氧化物为碱性，因此与SiO₂产生易熔硅酸盐，会严重减少炉衬的使用寿命。高钨钢、不锈钢以及某些特殊钢也都要使用碱性耐火材料炉衬。熔炼与氧亲和能力比硅强的钢或合金时，活性元素将酸性耐

火材料和炉渣中的SiO₂还原出来而进入合金中，坩埚腐蚀严重，因此熔炼此类含活性材料的钢或合金时都要选择碱性耐火材料。

有色金属中铜、铝及合金的化学活性很强，易与耐火材料发生反应，渗透性好，因此应采用以Al₂O₃为主要成分的中性耐火材料。高温不锈钢、高熔点高合金钢，还有某些特殊钢、合金等挂渣较严重的炉衬，也宜采用中性耐火材料^[19-21]。

6.4 筑炉、炉衬耐火层的烧结

(1) 感应熔炼电炉的筑炉 感应熔炼电炉的炉底、炉盖、炉领、炉嘴及炉衬的耐火层应分别采用不同的耐火材料，筑炉前首先确定不同部位耐火材料的数量。炉底等部位由于形状简单，因此较好确定。炉衬耐火层用料数量较大，且炉衬壁厚不同，并带有锥度，给确定耐火材料的用量带来困难。

炉衬耐火层用料可用公式(56)计算：

$$G = K \gamma \pi (D_{21} + \delta_2) \delta_2 / 1000 \quad (56)$$

式中 G ——耐火层打结料重量(kg/m)；

D_{21} ——炉衬平均直径(即坩埚钢模外径，mm)；

δ_2 ——耐火层平均壁厚(mm)。由于耐火层带锥度，其壁厚上薄下厚，这里取其平均壁厚；

K ——调节系数，计算出的耐火材料用量与实际用量之比。经过不同炉容数次记录的结果， K 值就可以总结出来；

γ ——耐火层打结料的体积密度(g/cm³)。

需说明的是，由于耐火材料都有气孔，包括全部气孔在内的单位体积耐火材料的质量，就是该材料的体积密度。厂家提供的耐火材料密度，一般都是体积密度。不同成分耐火材料的体积密度不同(一般在3g/cm³左右)，可由厂家提供。致密耐火浇注料的体积密度测定按YB/T 5200—1993执行(黑色冶金行业标准)。该标准现行在用，2015年复审。

按式(56)计算出的是耐火层每米的用量，再乘以炉衬的高度，耐火层用料的总质量就计算出来了。

(2) 炉衬耐火层烧结工艺 对新打结炉衬耐火层烧结的目的是减小体积变化率，提高致密性，使其具有较高的强度。

耐火层烧结可使室温下耐火材料的接触面出现液相熔合,以形成连续的烧结致密体。烧结的热源一般由坩埚钢模加热供给。经过烧结后的炉衬耐火层,其烧结结构从金属液由内到外可分为烧结层、半烧结层、未烧结层,如图8所示。烧结温度-时间曲线一般由耐火材料厂家提供。烧结层是耐火层的工作层,直接与炉料熔液及熔渣接触,受其侵蚀及冲刷。因急冷急热变化造成的炉体胀缩产生的内应力和金属熔炼的静压力也施加在这一层面,因此要求烧结层强度相对要高、密度要大。烧结层的颗粒之间应全部熔化,使烧结形成的致密体均匀完整。烧结层的厚度与烧结温度有关。烧结分低温烧结与高温烧结,以熔化钢为例,低温烧结的温度为熔炼时钢液的温度;所谓高温烧结是指烧结温度高于钢液温度,为1800~1900℃,用感应加热石墨型芯或碳质烤炉料可达到这个温度。低温烧结的烧结层厚度较薄,而经高温烧结的烧结层较厚。因此,调整烧结温度的高低,就可以确定烧结层的厚度。

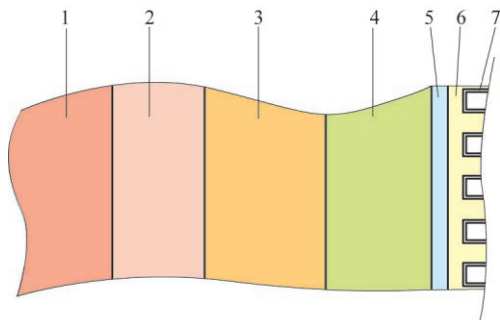


图8 炉衬耐火层烧结结构

1.液态炉料 2.烧结层 3.半烧结层 4.未烧结层 5.绝缘层(云母纸)
6.耐火胶泥涂层 7.感应器有效线圈、水冷圈等

半烧结层是烧结层和未烧结层之间的过渡层,其作用是对烧结层产生的内应力和液态炉料的静压力有个缓冲带,阻止烧结层内产生的裂纹向外延伸。

未烧结层是半烧结层与炉衬绝缘层之间不经烧结的缓冲层,它的作用是缓冲烧结层、半烧结层因体积胀缩造成的影响,防止在烧结层、半烧结层产生裂纹,不致于使金属液到达感应器线圈而造成穿炉事故,同时也起着一定的隔热、绝缘作用。

铸铁、钢的熔炼温度与炉子耐火材料的烧结温度接近,耐火层具有自烧结功能,炉衬内表面的烧结层损坏后,半烧结层可逐步转化为烧结层。

7 感应熔炼电炉作业现场的测温

7.1 热电偶测温

将两种不同材料的导体(或半导体,下文所涉及的“导体”也都包含有半导体)焊接在一起组成闭合回路,当两个焊接点温度不同时,回路中将产生热电动势,这种物理现象称为热电效应,又称为塞贝克效应。热电特性是物质普遍具有的一种物理特性。这两种不同材料导体组成的回路称为热电偶。只有热电特性曲线线性好、稳定性好、热电动势率大以及耐蚀性好的导体才可用于热电偶。组成热电偶的导体称为热电极,其中一根叫正极(SP),另一根叫负极(SN)。热电偶的两个焊接点中,置于被测温度 T 的一端称之为测量端或热端,而置于 T_0 的一端称之为参比端或冷端。参比端的温度要求保持恒定。热电偶的热电动势随着测量端温度的升高而增大,其大小与热电偶材料和热电偶两端温度有关,而与热电偶的长度、直径无关。对热电特性在一定范围内一致的热电偶用分度号来命名,用单个大写英文字母表示。热电极的化学成分相同的热电偶其分度号也相同。

热电偶执行的标准:GB/T 16839.1—2018《热电偶 第1部分:电动势规范和允差》;JB/T 9238—1999《工业热电偶技术条件》。

按热电特性,现已有多个标准化的分度号和具有专门用途的非标热电偶。国际电工委员会(IEC)推荐的工业用标准热电偶见表8。

热电偶的选择:首先,根据被测液态炉料的温度来选择适用的热电偶。当温度 $<1000^{\circ}\text{C}$ 时,可优先选K型热电偶, $<1300^{\circ}\text{C}$ 时,可选K型或N型热电偶;当测量温度在 $1000\sim1400^{\circ}\text{C}$ 时,可选S型或R型热电偶;当测量温度在 $1400\sim1800^{\circ}\text{C}$ 时,应选B型热电偶;当测温上限超过 1800°C 时,应考虑钨铼系列热电偶。目前,钨铼系列热电偶常用的有钨铼3-钨铼25和钨铼5-钨铼26两种,这两种热电偶长期使用温度 $2000\sim2400^{\circ}\text{C}$,短期使用温度可达 3000°C 。推荐测温范围为 $0\sim3000^{\circ}\text{C}$ 。

其次,选型时还应考虑不同等级的允差(允许偏差),根据工艺需要,选择合适的允差值。

热电偶的两个热电极焊接要牢固、彼此之间绝缘。补偿导线与热电偶参比端的连接方便可靠,保

表8 国际电工委员会（IEC）推荐的工业用标准热电偶

名称	分度号	测温范围/℃	最高使用温度/℃		热电极		适用气氛	稳定性
			长期	短期	SP（正极）	SN（负极）		
铜-康铜	T	-270~350	—	—	Cu	Cu55%、Ni45%	O、N、R、V	-170~200℃，优
铁-康铜	J	-40~760	—	—	Fe	Cu55%、Ni45%	O、N、R、V	<500℃，良； >500℃，差
镍铬-康铜	E	-270~1000	—	—	Ni90%、Cr10%	Cu55%、Ni45%	O、N	中等
镍铬硅-镍硅	N	-270~1260	1000	1200	Ni84%、Cr14%、Si2%	Ni95%、Si5%	O、N、R	良
铂铑-铂铑硅（铂）	K	-270~1300	1000	1200	Ni90%、Si10%	Ni97%、Si3%	O、N	中等
铂铑10-铂	S	-40~1600	1300	1600	Rh10%、Pt90%	Pt	O、N	<1400℃，优； >1400℃，良
铂铑13-铂	R	-40~1600	1300	1600	Rh13%、Pt87%	Pt	O、N	
铂铑30-铂铑6	B	200~1800	1600	1800	Rh30%、Pt70%	Rh6%、Pt94%	O、N	<1500℃，优； >1500℃，良

注：1.热电极的合金成分为质量分数。

2.表中适用气氛中，O为氧化气氛，N为中性气氛，R为还原气氛，V为真空。

护套管能保证热电偶与被测液态炉料充分隔离。

7.2 红外测温仪测温

作为接触式测温，热电偶（通过保护套管）直接与被测液态炉料接触，不受中间介质的影响，测量精度较高，测量范围几乎可以全部覆盖常用金属的熔化温度。虽然热电极通过保护套管与液态炉料需要充分的热交换，经过一定时间才能达到热平衡，存在测温延迟现象，但由于这种接触式测温构造简单，操作方便，受现场环境因素干扰少，因此在铸造厂至今仍得到广泛的应用。

与热电偶测温不同，非接触式的红外测温仪是通过液态炉料表面的红外辐射强度与温度的关系来检测温度的。红外测温不与液态炉料接触，没有接触式测温受耐高温材料制约的问题，不受测温上限的限制，测温范围广。测温时也不会破坏被测物体的温度场，反应速度快，灵敏度高，测温精度可达0.1℃的温度分辨率。

红外线是介于可见光与微波之间的电磁波，任何物体只要其温度高于绝对零度（-273℃），就存在分子或原子无规则热运动而不断地向空间辐射电磁波，其中就包括波段位于0.76~1000 μm的红外线。通过对物体自身辐射的红外能量的测量，便能准确地测量它的表面温度，这就是红外辐射测温所依据的理论基础。红外测温仪一般由光学系统、光电探测器、信号放大器及信号处理、显示输出等部分组成。光学系统汇聚的其视场内的目标红外辐射能量聚集在光电探测器上并转变为相应的电信号，

该信号经过放大器和信号处理电路，并按仪器内的算法和目标发射率校正后转变为被测目标的温度值。红外测温仪分为单色测温仪和双色测温仪：单色测温仪与单个波段内的辐射量成比例；双色测温仪与两个波段的辐射量之比成比例^[22, 23]。

近年来，已经有越来越多的铸造厂熔炼现场用红外测温仪测量液态炉料温度。由于红外测温是项新技术，目前现场使用红外测温仪测量液态炉料温度主要存在以下两个方面的问题。

（1）红外测温仪的操作

1）合理选择测温仪测温范围：根据液态炉料温度确定测温仪的测温范围，并非测温范围越宽越好。测温范围越窄，监控温度的输出信号分辨率就越高，精确度就越高，测温值也就越准确。

2）选择具有峰值（最高温度值）保持功能的测温仪：使用时在菜单里选中“峰值保持”项。这是因为所测温度为目标温度最大值时，就更接近目标温度实际值。

3）发射率的校准问题：发射率表征液态炉料辐射红外线的的能力，它是同种液态炉料、同波长被测量物体与黑体的单色辐射度之比，也称比辐射率。铸铁、铁、钢的液态发射率见表9。

表9中提供的铸铁、铁、钢的发射率是仅供参考的近似值。不同牌号的铸铁、铁、钢，即使采用同一测温仪进行测量，不同的测量距离和角度（入射角）、现场环境（气溶胶态、气态污染物、电磁干扰等）中任意一个因素都会影响液态炉料的发射率

表9 铸铁、铁、钢的液态发射率

类别	波长/ μm				
	1	1.6	3.9	5	8~14
	液态发射率				
铸铁 (液态)	0.35	0.3~0.4	0.2~0.3	0.2~0.3	0.2~0.3
铁 (液态)	0.35	0.4~0.6	n.r	n.r	n.r
钢 (液态)	0.35	0.25~0.4	0.1~0.2	0.1~0.2	n.r

注：n.r表示不推荐使用。

值。因此，红外测温仪发射率值的确定，以现场同标准热电偶进行比对后的修正值为准。

由于单色测温仪的发射率和双色测温仪的坡度系数的定义有别，表9中的发射率值不适用于校准双色测温仪坡度系数。

根据维恩位移定律，被测温度较高时应尽可能采用短波波段。以铸铁（液态）发射率为例，选择 $1\mu\text{m}$ 的短波波长，发射率在0.35左右。在用户现场对红外测温仪发射率进行校准时，通常采用两种方法：一种是在检定时，将黑体辐射源作为检定红外测温仪专用辐射热源，用高精度红外测温仪作为温度标准，在同一距离、同一入射角通过比较的方法校准；另一种是使用热电偶校准。由于S型热电偶（铂铑10-铂热电偶）测温范围宽（ $-40\sim 1600^\circ\text{C}$ ）、测量精度高、物理化学稳定性好，以及耐热性、抗氧化、耐蚀性良好，具有较优越的精确度（二等允许偏差： $0\sim 600^\circ\text{C}$ 为 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ ， $600\sim 1700^\circ\text{C}$ 为 $\pm 0.0025|t|^\circ\text{C}$ ），再现性好，因此可作为校准测温仪的标准热电偶。用二等允许偏差的铂铑10-铂S型热电偶测液态炉料某一点，再用红外测温仪同时测相同点，然后调整发射率，使红外测温仪的温度与热电偶所测的温度一致，此时的发射率即为被测液态炉料的发射率，这种方法属于“在线校准”。液态炉料温度超过 1600°C 的某些铸铁、钢熔炼现场使用B型（铂铑30-铂铑6）热电偶，或采用钨铼系列如W-Re5/26（钨铼5-钨铼26）、W-Re3/25（钨铼3-钨铼25）热电偶等，但只要用户信任，也可用其他类型的热电偶作为标准来校准红外测温仪的读数。

国内某些红外测温仪生产厂家开发出方便在线校准发射率的仪器，用测温仪对准被测液态炉料，按设置键进入菜单选择界面，将刚实测的温度值暂存，选择菜单到“辐射系数”界面，此界面第一行

显示为实测温度，第二行显示为发射率，此时只需按界面上的“+”、“-”键，使第一行显示的实测值与用标准热电偶所测值达到一致，则校准结束，最后按退出键即可。

4) 距离系数：红外测温仪的距离系数就是光学分辨力，它是红外测温仪探头到炉料液面之间距离与被测目标直径之比。如果红外测温仪在远离被测目标使用，而被测目标直径又小，就应选择高光学分辨力的红外测温仪来保证测温的准确性。液态炉料测温时，红外测温仪探头正对炉口，由于被测目标面积很大，只要距离系数大于30:1，红外测温仪都适合使用。

5) 测温探头与炉料液面的入射角：无论是铸铁、铁还是钢，液态时的发射率都较小，一般都在0.35附近（波段为 $1\mu\text{m}$ ）。原则上当发射率低于0.9时，测温探头一定要垂直被测物体表面。但为避免炉口正上方的高温烘烤，红外测温仪现场安装时只能倾斜一个角度。当测温探头与液面入射角固定后，再通过调低发射率进行在线校准。但在任何情况下，测温探头与液面入射角都不得大于 30° （入射角是指红外测温仪探头入射光线与入射液面法线的夹角）。

(2) 环境因素的影响

1) 气溶胶态污染物和气态污染物对红外测温的影响：液态炉料表面的红外辐射能量是经过空间传输到炉口上方的测温探头的。感应熔炼过程中会产生大量气溶胶态和气态污染物。气溶胶是指沉降速度可以忽略的固体或液体颗粒的悬浮体（烟尘、粉尘）；气态污染物是指含硫、氮、碳氧等化合物。炉子上方的气溶胶态及气态污染物会干扰、影响测温精度。由于气溶胶态污染物与气态污染物的分子半径与红外波长相差不多，对红外辐射具有强烈的散射作用，因此要尽可能营造一个清晰度较高的环

境进行测温, 才能将污染物对测温精度的影响降到最低。

近年来, 随着铸造厂环保力度加大, 熔炼作业现场采用排烟、除尘装置后, 气溶胶态、气态污染物的浓度降到国标规定的限值以下, 某些铸造厂甚至达到 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 以下, 这就为使用红外测温仪测温提供了满足要求的环境条件。

2) 炉渣对红外测温的影响: 炉料熔化后, 炉子表层会覆盖一层炉渣, 因此要用红外测温仪测温, 就必须将炉渣扒开, 使液态炉料暴露在测温探头的视线之下。红外测温仪测得的是液态炉料的表层温度, 但由于炉料的电磁搅拌作用, 则表层温度可视为是炉料的真实温度。

3) 现场环境光线强度的变化对红外测温的影响: 铸造厂多数都是两班制作业, 白班、夜班现场环境光线强度的变化有时会对红外测温仪的读数产生差异。红外测温仪安装应考虑避开直射光线, 必要时可用遮挡的办法制造人工阴影, 以减少不同光线强度对测温精度的影响。

作为一个电子仪器, 感应熔炼现场的使用环境无疑是比较恶劣的, 除了上述一些因素外, 环境温度、电磁干扰等对红外测温的测温精度也会产生不利的影响。鉴于这种环境条件, 还是选用双色测温仪比较好。

由于热电偶和红外测温仪测量液态炉料温度分别有各自突出的长处和短处, 因此在一个相当长的时间内还不存在谁取代谁的问题。但可以肯定的是, 随着铸造厂向智能化、自动化发展, 红外测温仪类非接触测温将是最佳选择^[24, 25]。

8 感应熔炼电炉的使用环境条件

所谓环境是指在任何地点、任何时间都存在的或遇到的自然条件及诱发条件, 或二者的总和。使用环境条件是指在一定时间内产品所经受的外界物理、化学和生物的条件。感应熔炼电炉的使用环境条件包括自然气候条件和工业环境两个方面(GB/T 11804—2005《电工电子产品环境条件 术语》)。与感应熔炼电炉设计、制造、储运、使用产生影响的环境因素并不多。属于自然气候环境条件的有海拔、环境温度和湿度; 属于工业环境的有尘埃、气体条件, 以及振动、颠簸等力学环境条件。

GB/T 10067.1—2019《电热和电磁处理装置基本技术条件 第1部分: 通用部分》作如下规定:

1) 对感应熔炼电炉产品要求按规定的使用环境条件设计。

2) 用户对使用环境条件提出与标准不同的要求时, 生产厂家应尽可能予以满足。

3) 其中一部分使用环境条件可列在企业产品标准, 其他部分使用环境条件在订货时由供需双方商定。

4) 热带和高原地区使用的感应熔炼电炉装置还应分别符合以下标准的要求: GB/T 20626—2017《特殊环境条件 高原电工电子产品 第1部分: 通用技术要求》; JB/T 4159—2013《热带电工产品 通用技术条件》。

8.1 海拔

海拔是指由平均海平面起算的地面点的高度。我国计算海拔高度都是以青岛的黄海海面作为零点起算。随着全球气候变暖, 近几十年来海平面以平均每年 2.6mm 的速率上升, 因此地面上每一个地方的海拔高度都在变动, 某地的海拔高度其实是平均海拔高度。地理上, 将海拔高度超过 1000m 的地区称之为高原地区, 我国主要的高原地区有青藏高原、云贵高原、蒙新高原、黄土高原等。我国海拔 1000m 以上的高原土地面积占全国陆地总面积的 60% 左右, 海拔 2000m 以上的高原土地面积约占 35% , 海拔 3000m 以上的高原土地面积占 15% ^[26, 27]。

虽然海拔 1000m 以上国土面积几乎占了 $2/3$, 但我国绝大多数工厂(设备生产厂和设备使用厂)都在海拔 1000m 以下, 将海拔不超过 1000m 定为设备使用环境条件是合乎国情的。国标将感应熔炼电炉的海拔定为不超过 1000m , 与炉子配套的整流变压器(GB/T 18494.1—2014)、变频电源(JB/T 8669—1997, 2010年复审, 现行有效)、电热电容器(GB/T 3984.1—2004/IEC 60110-1: 1998, IDT)以及其他与炉子相关的电工电子产品的标准都定为海拔不超过 1000m 。在海拔 1000m 以下为标准设备, 在海拔 1000m 以上的地区应降格使用。

我国位于海拔 $1000\sim 5000\text{m}$ 的工厂, 其中位于海拔 $1000\sim 2500\text{m}$ 的工厂占了绝大多数, “三线”建设的工厂基本都在这个海拔范围内, 位于我国西部的工厂也基本上处在海拔 $1000\sim 2500\text{m}$ 。按标准

生产的设备,如果海拔1000m以上地区在定制感应熔炼电炉时,应在合同和技术协议中标明使用地区的海拔高度。电炉生产厂家提供的炉子应按非标的技术条件设计、制作。

在海拔1000~5000m的高原地区,对感应熔炼电炉装置产生影响的环境因素主要有气压降低、空气密度降低、日温差大,以及太阳辐射、雷击、静电等。诸多环境因素中气压和空气密度低这两个因素对炉子运行带来的负面影响最大。

气压与海拔关系密切,海拔越高,气压越低,在同一高度上的气压又随纬度增加而降低。在海拔0~5000m区间,海拔每升高1000m,气压值平均递减7.7~10.5kPa。空气密度也随着海拔升高而降低,海拔每升高100m,空气密度降低0.48%~1.04%。这给感应熔炼电炉的使用带来以下几个问题。

(1) 对变频电源装置开关器件的影响 空气密度低,空气分子间距加大,离子的自由行程加大,造成变频电源装置开关器件的电晕电压降低。一般情况下,海拔每增高1000m,电晕电压降低8%~13%;空气密度低,散热对流作用减弱,有热脱扣元件的断路器和热继电器的脱扣动作时间会缩短;以自由空气为灭弧介质的空气开关灭弧时间延长,飞弧距离增加,触头烧损严重,接通和分断能力下降;因为工作温度升高和灭弧影响延长,所以开关的电寿命也受到影响。

(2) 对电气间隙击穿电压的影响 低气压会造成电气间隙击穿电压降低。当年修青藏铁路时,有关科研部门曾进行过不同气压条件下的对比试验,当空气间隙同样为1mm时,北京地区气压在101kPa,击穿电压为4.6kV;拉萨地区气压在65kPa,击穿电压为2.8kV;甘巴拉地区气压在55kPa,击穿电压就只有2.5kV^[28, 29]。变频电压的大电流矩形母线、中频回路矩形母线最小间距净值(见第三讲表3)计算感应器线圈匝间距时的填充系数等都是按海拔1000m条件设置的。高海拔电气间隙值,可按JB/T 7573—1994《高原环境条件下电工产品的通用技术条件》提供的系数加以修正。

(3) 对绝缘介质强度的影响 海拔增高后,外绝缘放电电压降低,会造成绝缘介质强度降低。海拔每升高1000m,外绝缘强度降低8%~13%。海拔升

高、空气密度降低对于高海拔地区使用的感应熔炼电炉炉衬的绝缘层及感应器线圈铜管涂覆的绝缘漆,应选用更高绝缘强度、耐受高击穿电压的材料。

(4) 温升的影响 低气压、低空气密度条件下空气分子数减少,使以自然对流、强迫通风或空气散热器为主要散热方式的器件使用时温升增加。一般海拔每升高1000m,温升增加3%~10%。变频电源内的继电器、接触器、自动空气开关、主令控制器、熔断器等根据人工模拟海拔高度的试验结果,温升随海拔升高的增加率为0.15~0.46K/hm。

整流变压器的温升随海拔的增加与其冷却方式有关。其增加率每100m为:油浸自冷为额定温升的0.4%;干式自冷为额定温升的0.5%。因此,在订购与炉子配套的整流变压器时,必须向生产厂家提供使用所在地纬度及海拔高度。

由于海拔增高、气温下降,海拔每升高100m,气温下降约0.6℃,这样却反而可以部分补偿海拔升高对上述器件温升的影响。

(5) 对电容器类密封电工产品的影响 气压降低使密封容器内外压差增大,易引起气体或液体泄漏。变频电源控制系统中的电解电容器以及谐振回路的电热电容器都存在此类危险。

8.2 环境温度

按照气候环境条件的分类,温度高于40℃时称为高温,温度低于0℃时称为低温。我国境内测得的极端高低温分别为49.6℃(吐鲁番民航机场,1975年7月13日)、-52.3℃(漠河,1969年2月13日)。我国高温地区分布比较广,除了青藏高原外,全国都出现过35℃以上高温。曾出现过-25℃以下低温地区占国土面积的50%。

对于感应熔炼电炉环境温度在5~40℃,变频电源的环境温度不超过40℃,并且在24h内的平均温度不超过35℃,最低环境温度不得低于5℃。

GB/T 10067.31—2013规定了感应熔炼电炉各受热构件表面温升极限值,见表10。

对于感应熔炼电炉的配套装置,如电热电容器柜、液压站的外壳,以及正常使用中连续握持的操作手柄等,表面温升不得超过30℃。当环境温度超过40℃时,这个表面温升极限值还要降低。

变频电源在额定输出功率下运行至温升稳定后,各部分温升极限值规定见表11。

表10 受热构件表面温升极限值

部位	表面温升极限值/℃
炉架、炉壳、磁轭	75
炉底钢板、炉盖外表面	200
液压系统油箱、大电流母线等	35

表11 变频电源各受热部件温升极限值

变频电源内的部件	母线材料及被覆层	温升极限值/℃
电器元件及电力半导体器件	—	符合元件各自标准
连接于一般低压电器的母线 连接处的母线	铜：无被覆层	60
	铜：镀锡	65
	铜：镀银	70
连接于半导体器件的母线连 接处的母线	铜：无被覆层	45
	铜：镀锡	55
	铜：镀银	70

表10、表11中的极限温升值是在现场环境温度上限40℃条件下提出的。如果炉子现场环境温度超过40℃，设计炉子和变频电源受热构件时，应在设计和制作时采取必要的措施，将各受热部件限制在要求的极限温度内。

过低的环境温度对变频电源、炉子控制系统的电气元件会有影响，使倾炉机构液压站的液压油黏度增大，影响倾炉以及冷却水的冷凝和结冰，也会使电子设备材料产生硬化或脆化。

8.3 相对湿度

GB/T 10067.1—2019规定，感应熔炼电炉使用地区最湿月每日最大相对湿度的月平均值 $\leq 90\%$ ，同时该月每日最低温度的月平均值 $\leq 25^\circ\text{C}$ 。变频电源则要求相对湿度在最高温度为40℃时 $\leq 50\%$ 。在较低温度时，允许有较高的相对湿度（如20℃以下时为90%），应注意消除由于温度变化而可能偶尔发生的凝露，相对湿度对设备受潮程度会有直接影响，而高温又加剧了设备潮湿的程度。在我国南方地区，高温、高湿往往同时出现，在这样的环境下，潮湿空气会改变材料的介电特性。在高温作用下，绝缘材料吸湿加快，导致绝缘性能下降；加速金属腐蚀，对导体，尤其是没有经过电镀等表面处理的大电流母线，会使接触电阻加大，引起局部发热；另外，还会影响微电子电路的电接触，对印刷电路板的腐蚀加剧。

对于在湿热环境下工作的感应熔炼电炉装置，其结构与设计、材料与电工元器件选用、工艺防护

等应参照JB/T 4159—2013《热带电工产品通用技术要求》的规定，并特别注意加强变频电源及控制系统外壳结构的密封及表面防护，选用耐气候影响的低压电器，尽量采用无触点开关元器件，绝缘材料的选用也应保证其耐气候性^[30]。

8.4 工业环境

GB/T 10067.1—2019规定了感应熔炼电炉装置周围不能有导电尘埃、爆炸性气体以及能严重损坏金属和绝缘的腐蚀性气体。尘埃中含有导电的分子如铁分子、不纯净的水分子等就会导电。导电尘埃会引起汇流母线及感应器线圈匝间等处放电。电炉工作中熔液的高温，在变频电源装置开关时可能产生拉弧或电火花，因此在炉子周围不能有爆炸性气体、腐蚀性气体，否则会损害设备的金属和绝缘，尤其在高温、高湿气候条件下会加剧这种损害。

为应对恶劣的工业环境，主要采取两种措施：合理选用优质材料；采用相应的外壳防护。IEC推荐的电气设备外壳防护分级：防固体物分为6级；防液体分为8级。英国BS标准，将电气设备防护类型分为20种，如开启型、全封闭型、气候防护型等。美国NEMA标准基本上是按开启型和封闭型两大类来划分外壳防护等级，对两种类型具体规定了结构形式。

对感应熔炼电炉装置的变频电源、控制系统的柜壳进行整体全密封（包括进线、出线、水路及二次管线等）是完全必要的。这种壳体的整体全密封设计，避免了导电尘埃、爆炸性气体、腐蚀性气体对柜内器件及导电母线的损害。在第四讲中，介绍了两组铜排最小间距净值参考数值，两组数值设定条件分别为干燥无尘和干燥多尘，但干燥多尘特别注明是非导电尘，在导电尘埃环境下，铜排最小间距净值的数值比干燥多尘数据还要放大^[31]。

8.5 力学环境

GB/T 10067.1—2019规定，感应熔炼电炉装置的力学环境应“没有明显的振动和颠簸。炉子成套设备在运输中，应注意出厂前给感应器线圈涂覆的耐火胶泥不能在运输过程中因振动、颠簸而脱落，排除水冷系统的积水，拆除电热电容器瓷头外连接的硬母线。炉子和变频电源都属于大型件，设计应满足GB/T 5959.1—2019/IEC 60519-1；2015 IDT关于吊装和装配的要求：能安全吊运和装配；不能用

手移动的任何部分应配置安全、可靠的起吊附件；所有电炉装置应能容易地使用适当的设备或升降机构进行组装。

参考文献：

- [17]西安电炉研究所情报组.感应电炉用耐火材料的性能及其应用[J].电炉, 1972 (2) : 62-69.
- [18]B.A.布伦.耐火胶泥与粉料.[M].汪培初, 刘景林, 译.北京: 冶金工业出版社, 1958.
- [19]冯胜山, 许顺红, 刘庆丰, 等.无芯感应电炉炉衬使用寿命的影响因素及其控制措施[J].耐火材料, 2008 (4) : 302-306.
- [20]殷经星.铸铁感应电炉硅质炉衬的使用寿命分析(上)[J].机械工人(热加工), 2003 (8) : 55-58.
- [21]殷经星.铸铁感应电炉硅质炉衬的使用寿命分析(下)[J].机械工人(热加工), 2003 (9) : 61-63.
- [22]P.A.Kinzie.热电偶测温[M], 陈道龙, 译.北京: 原子能出版社, 1980.
- [23]陈尧生.光学创新型测温仪的研制[J].机械工人(热加工), 2005 (8) : 60-61.
- [24]刘福杰,王浩静, 范立东.红外测温仪原理及其在应用中注意的问题[J].现代仪器, 2007 (4) : 50-51.
- [25]林君,丁宇涛.热电偶测温 and 红外测温的比较研究[J].工业加热, 2010 (1) : 57-60.
- [26]广州电器科学研究所科研办.环境条件与环境试验技术发展情况[J].特殊电工, 1980 (1) : 38-51.
- [27]广州电器科学研究所技术情报室.特殊环境条件用电工产品国内外概况[J].特殊电工, 1974 (4) : 75-85.
- [28]W.Pfeiffer, K.Richter.自然环境条件下小漏电距离的电气强度[J].绝缘材料通讯, 1986 (3) : 40-44.
- [29]王鑫.环境条件对电工电子产品安全性能的影响[J].环境条件, 2008 (4) : 12-14.
- [30]邱松根.电炉设计中应注意的几个使用环境条件问题[J].电炉, 1981 (2) : 15-18.
- [31]联合国环境规划署.工业环境影响评价、厂址环境条件指导准则 (内部发行) [Z].北京钢铁设计研究总院, 译.1983. (全文完)

MW 20200326

作者简介：李韵豪，长期从事铸造、锻造、整体热处理领域感应加热装置的研发与设计工作。
联系方式：13709196753 @163.com。

致读者：您在阅读每期讲座后，如有问题可直接联系作者进行交流、探讨，或即时反馈到编辑部（联系人：田文华13671067737, rb1950@126.com），我们将在后期以专家答疑的形式刊出，实现作者与读者的互动。

《金属加工（热加工）》2020年第5期广告目次

单位名称	查询编号	位置	单位名称	查询编号	位置
德国克鲁斯公司	0124	封面A			
易孚迪感应设备（上海）有限公司	1492	封面B			
北京金威焊材有限公司	1161	封三			
北京中孚悦达真空科技有限公司	5378	封底			