|  |
| --- |
| 1 绪 论 |
| 1.1特种冶炼的发展   特种冶炼是生产特殊钢、高温合金、精密合金和高合金钢等高级合金的特殊而有效的方法。以钢为代表的金属材料，在国民经济、国防建设和科学技术等领域中得到了广泛的应用。当代电子技术、航空航天技术，航海和能源技术等领域的日新月异的进展，对钢和合金的的质量和品种提出了愈来愈高的要求。例如：要求钢或合金能够在高温、高压、高速度、动载荷、高辐射、高腐蚀性介质等环境下可靠地进行工作。而常规熔炼方法如转炉、平炉和电弧炉等生产手段已难以满足实际的要求，无法提供如此高质量的产品，这就需要用特种熔炼方法来完成。常用的特种熔炼方法有感应炉熔炼（Induction Melting）、电渣冶金（Electro-slag Metallurgy）、等离子弧熔炼(Plasma Arc Melting）、真空电弧重熔（Vacuum Arc Remelting）和电子束熔炼法（Electron-beam Melting Process）等。  （1）    感应熔炼（Induction Melting）  感应炉熔炼是利用电磁感应原理加热和熔化金属的。按照频率可分为工频炉、中频炉和高频炉；按照气氛和结构分为真空感应炉以及等离子感应炉等不同用途的炉种。工频炉主要用于熔炼铸铁，高频炉主要用于实验室研究，而用于生产优质钢和合金主要是中频炉，具有熔化速度快、生产效率高、适应性强、使用灵活、电磁搅拌效果好和启动操作方便等优点。目前，感应炉冶炼已经发展成为特殊钢、精密合金、电热合金、高温合金以及耐蚀合金等特殊合金生产的重要方法。  （2）电渣冶金（Electro-slag Metallurgy）  电渣冶金是利用电流通过液态熔渣产生的渣阻热来加热和精炼金属的一种特种熔炼方法。其核心是电渣重熔（ESR），其目的是在初炼的基础上进一步提纯钢、合金和改善钢锭的结晶组织，从而获得高质量的金属产品。电渣重熔适合于中型及大型锻件的生产，重熔的产品磷、硫含量低，非金属夹杂物含量低，重熔锭子和铸件的组织致密，几乎没有缩孔，因而大大提高了产品的质量以及机械性能、加工性能、使用性能等各项指标。  （3）真空电弧熔炼（Vacuum Arc Melting）  真空电弧熔炼可以形成一种低氧势、高温的熔炼条件，所以早在上一个世纪就被用于熔炼铂、钽、钨等难熔的或易氧化的金属。随着机械工业的发展，真空自耗电弧重熔法成功地应用于钛及钛合金、精密合金、高温合金和难熔金属的生产，该熔炼方法在20世纪40～50年代得到了迅速发展，容量日趋大型化，至今在特种熔炼中，真空电弧熔炼仍然是重熔精炼的主要方法之一。  （4）电子束熔炼（Electron-beam Melting）  电子束重熔法是在高真空度条件下，利用电子枪发射出高速电子束作为热源，使金属熔化的一种熔炼方法，简称EBM。电子束重熔法从熔炼难熔金属(钽、铌、铪以及钨、钼等)开始，现已扩展到生产半导体材料和高性能的磁性合金以及部分特殊钢，如滚珠轴承钢、耐腐蚀不锈钢、以及超低碳纯铁等。此外，电子束重熔炉还能用来熔炼某些耐热合金，特别是以铌或钽为主的含钨、含钼的合金。  （5）等离子弧熔炼(Plasma Arc Melting）  等离子熔炼是利用等离子弧作为热源来熔化、精炼和重熔金属的一种新型熔炼方法。等离子弧作为冶金热源其潜在的优势在于：能量集中，温度高(5000～300000K)，离子流速度快(100～500m/s)，能够快速升温和快速反应等；气体处于离子状态，反应活性强，可根据需要对气体进行选择，如用还原性气体(氢气、一氧化碳、烷、烃等)对炉料进行直接还原或精炼，也可以脱氧使铸锭无残存脱氧产物。在高温等离子弧作用下，S、P、Pb、Bi、Sn、As等杂质容易挥发，它可熔炼金属材料，又可熔化非金属材料。 1.2特种冶炼所生产的主要品种 特种冶炼是生产特殊钢、高温合金、精密合金、高合金钢、难熔金属及合金、钛及钛合金、电热合金等高级合金的特殊而有效的方法。  （1）精密合金（precision alloy），具有特殊物理性能的一类金属和合金，主要用途不是作为结构件而是依据其物理性能而用于制造航空航天器的精密仪表、控制、遥测、电器、附件和电子装置以及武器系统中的传感器和换能器等重要材料。我国用字母“J” 前面冠有数字表示其合金类别；如“1J”表示软磁合金，“2J”表示永磁合金，“3J”表示弹性合金，“4J”表示热膨胀合金，“5J”表示热双金属，“6J”表示电阻合金。  （2）高温合金（high temperature-resisting alloy or Heat-resisting superalloy ) 是航空燃气涡轮、舰船燃气涡轮和火箭发动机的重要金属材料。较高的抗蠕变变形和抗蠕变断裂能力，抗腐蚀和抗热冲击的能力。 1.3 钢和合金的冶炼质量评价指标 **（1）成分控制**：成分控制中除了控制通常炼钢生产中必须控制的C、Mn、Si、P、S外，还包括Cr、Ni、Mo、W、Nb、V、Al、Ti等合金元素以及微量元素B、Ce、La、Zr、Mg、Ca、Hf、Y、Sm等的控制。成分能否获得最佳控制在很大程度上取决于冶炼工艺过程。  **（2）纯洁度**：钢和合金的纯洁度是指所含有害杂质的数量以及气体的含量，主要包括以下几方面。  **1）非金属杂质**      非金属杂质通常指S、P、Ce、Br、I等。不同钢种对S、P含量的要求是不同的，例如普通钢w(S)≤0.055％，w(P)≤0.045％；优质钢w(S)≤0.045％，w(P)≤0.040％；合金钢S和P均小于0.04％；高级优质钢w(S)≤0.030％，w(P)≤0.035％；而某些高温合金w(S)≤0.030％。对于Ce、Br、I等某些技术标准规定应低于0.0025％。  **2）气体**      通常情况下，钢和合金中氧、氢、氮的含量愈低，钢和合金的性能愈好。  **3）非金属夹杂物**      非金属夹杂物对钢和合金性能的影响不仅与其数量有关，而且与其类型、尺寸、形貌及分布有关。因此，非金属夹杂物含量及分布状态是评价钢和合金质量的重要指标之一，常规检验采用标准等级比较法。  **4）金属杂质**  金属杂质主要是指钢和合金中的Pb、Sn、As、Sb、Bi及其他微量元素杂质。金属杂质含量对钢和合金性能有显著影响。  **（3）铸态组织：**钢和合金锭子的铸态组织对锭子的热加工塑性及钢材的机械性能有重要影响。良好的冶金产品其铸态组织应具备以下条件：规格符合要求；表面质量良好；缩孔小；锭子密实；成分及组织结构均匀，偏析程度小；结晶组织良好。 1.4 工艺对钢和合金组织性能的影响途径 （1）成分控制影响钢和合金性能。不同冶炼方法对成分控制的程度不同，真空电弧炉对易氧化元素控制较好，电渣冶金对易挥发元素损失量小。  （2）纯洁度影响钢和合金性能。真空熔炼有害金属杂质及氧含量低，电渣重熔脱硫能力和去除氧化物夹杂较好；  （3）控制组织影响钢和合金性能。电渣冶金锭子柱状晶轴向发展、疏松偏析程度小。 |

|  |
| --- |
| 2感应炉熔炼 |
| 2.1感应炉工作原理及设备 **2.1.1感应炉工作原理**  各类感应炉，无论是有芯感应炉还是无芯感应炉，也不论工频、中频、还是高频，其基本电路都是由变额电源、电容器、感应线圈和坩埚中的金属炉料所组成(图2-1)。  hw071  **图2-1 感应炉的基本电路**  （1）感应加热原理  感应加热的原理是依据下述两则电学的基本定律：一是法拉第电磁感应定律              E=B·L·v·sin∠（v·B）                                  (2-1)  式中：L—在磁场中导线的长度；  （v·B）—磁感应强度的方向与速度方向之间的夹角。  另一条基本定律是焦耳—楞茨定律。该定律又称为电流热效应原理。焦耳——楞茨定律可写成式(2-3)的形式：  *Q* = *I* *2R t*                                    (2-2)  式中：*Q*—焦耳楞茨热，J；   *I*—电流强度，A；  *R*—导体的电阻，Ω；   *t*—导体通电的时同，s；      当一座无芯感应炉的感应线圈中通有频率为f的交变电流时，则在感应圈所包围的空间和四周产生一个交变磁场，该交变磁场的极性，磁感应强度和交变的频率，随着产生该交变磁场的交变电流而变化。若感应线圈内砌有坩埚并装满金属炉料，则交变磁场的一部分磁力线将穿过金属炉料，磁力线的交变就相当于金属炉料与磁力线之间产生的切割磁力线的相对运动。因此，在金属炉料中将产生感应电动势(E)，其大小可用下式确定：                E = 4.44 Ф·*f*· n                                  (2-3)  式中：Ф—感应线圈中交变磁场的磁通量，Wb；  *f*—交变电流的频率，Hz；        n— 炉料所形成回路的匝数，通常n=1；  由上式可知，若要使炉料中产生较大的感应电势，从理论上可以采用增加磁通量、频率以及匝数的方法，但是，由于感应线圈通电后所产生的磁力线被迫通过空气(指无芯感应炉)，而空气有很大的磁阻，所以就使磁通量较小，增加磁通量有困难, 而炉料的匝数一般来说总等于l，故为了提高感应电势, 多用增加频率的方法。     由于金属炉料本身形成一闭合回路t所以在金属炉料中产生的感应电流(I)为：               I = http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj2.files/image004.gif  A                                   (2-4)  式中：R一金属炉料的有效电阻，Ω；  炉料的加热速率，取决于感应电流、炉料的有效电阻以及通电时间。而感应电流又取决于感应电动势的大小，即穿过炉料的磁通量的大小和交变电流的频率。而感应电流的大小取决于金属炉料料块的大小、炉料的导电性质以及装料的密实程度，不同炉料要求频率不同。  （2）电磁搅拌作用  当炉料中流过感应电流时，必然会受到电磁力的作用。使金属炉料产生定向运动；即“电磁搅拌”作用，它的有益作用如下：1）均匀金属液的温度。2）使金属液均质。3）改善了物化反应的动力学条件。  **2.1.2感应炉工作设备**  感应炉可以分为有芯和无芯两种，有芯感应炉在炼钢中极少应用，这里不作介绍。 对于无芯感应炉，通常按照电源频率可以将感应炉分为三种类型:工频炉（频率50或60Hz），直接通过变压器与电网相连，主要用于熔炼铸铁；高频炉（频率10KHz～300KHz），所用电源为高频电子管振荡器，主要用于小型试验室研究；中频炉（频率150Hz～10000Hz），所用电源为中频发电机组、三倍频器或可控硅静止变频器。  中频感应炉的成套设备包括：电源及电器控制部分、炉体部分、传动装置及水冷系统  2.2感应炉熔炼的特点  **（1）电磁感应加热。**由于加热方式不同，感应炉没有电弧加热所必须的石墨电极，也没有电弧下的局部过热区，从而杜绝了电极增碳的可能。感应炉可以熔炼电弧炉很难熔炼的含碳量极低的钢和合金，为获得气体含量低的产品创造了有利条件。  **（2）熔池中存在着一定强度的电磁搅拌。**电磁感应所导致的金属搅拌促进成分与温度均匀，钢中夹杂合并、长大和上浮。感应炉熔炼过程中合金元素的烧损少，所以预测成分较为准确，有利于成分控制和缩短熔炼时间。  **（3）熔池的比表面积小。** 这对减少金属熔池中易氧化元素的损失和减少吸气是有利的，所以感应炉为熔炼高合金钢和合金，特别是含钛、铝或硼等元素的品种，创造了较为良好的条件。但是容易形成流动性差，反应力低，不利于渣钢界面冶金反应的进行“冷渣”。为此，感应炉熔炼对原材料的要求较为严格。  **（4）输入功率调节方便。**感应炉熔炼过程中，可方便地调节输入功率。 因此可以较精确地控制熔池温度，在炉内保温，还可以分几次出钢，为一炉熔炼几种不同成分的产品创造条件。  **（5）同一电源可向几个不同容量的炉座供电**(但是不能同时)，所以在冶炼的容量方面，感应炉的灵活性较电弧炉大。  **（6）热效率高**。 感应炉的加热方式以及比表面积小，散热少，故感应炉的热效率较电弧炉高。但是，感应炉的电效率较电弧炉低，所以两种电炉的总效率相差不多。  **（7）烟尘少，对环境的污染小。** 感应炉熔炼时，基本上无火焰，也无燃烧产物。  **（8）耐火材料消耗较电弧炉高，坩埚寿命短。**对坩埚耐火材料的要求高，所以每吨钢的耐火材料费用也较电弧炉高。  **2.3感应炉熔炼原理**  **2.3.1 元素的氧化与脱氧**  氧在钢液中以两种状态存在。一种是溶解态的氧，以[O]表示，氧的溶解度随温度升高而增大。另一种是氧在钢液中以夹杂物形态存在，当钢液中存在脱氧元素时，溶解在钢液中的氧就会与之结合而生成氧化物夹杂。钢液中氧的来源主要有3个方面，熔炼和浇注过程大气中氧的侵入、原材料带入、耐火材料中的氧进入。  （1）      元素的脱氧能力  各种元素被氧化的难易程度称为元素的氧化度，也叫脱氧能力。是指在一定温度、压力下，与一定浓度的脱氧元素呈平衡状态的溶解在钢中的残余氧含量。这部分氧含量越低，则这种元素的脱氧能力越强。元素的脱氧反应通式为：  x[M]+y[O]=MxOy                      （2-5）  如果把金属氧化物看成不防于钢液的纯物质，且金属元素和氧硅钢液中含量较低时，有：  K =http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj2.files/image006.gif                              （2-6）  式中  *aMxOy*—为脱氧元素脱氧得到得氧化物的活度；*a[M]*—为脱氧元素在钢中的活度；  *a[O]*—为氧在钢中的活度；  当脱氧产物为纯氧化物或呈饱和状态时，aMxOy =1，当fM=1，f0=1或fMx .f0y=常数时，则  K = http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj2.files/image008.gif；            （2-7）  令K*M*=1/K，则K*M*=[%M]x.[%O]y；    （2-8）  K*M*的大小可以用来判断元素的脱氧能力，KM越小，则元素的脱氧能力越强。图2-7和表2-8给出1600℃条件下铁液和镍液中元素的脱氧能力比较，一般1600℃条件下铁液中由强到弱的顺序为：Ba → Ca → Ce → La → Mg → Zr → Al → Ti → B → Si → Mn → W → Fe。  **（2）元素的脱氧效果及其影响因素**  1）元素对氧的亲和力。元素对氧的亲和力越强，脱氧能力就越大，对提高脱氧效果越有利。  2）脱氧元素的物理性能。脱氧元素的物理性能包括元素的熔点、比重、沸点（蒸气压）和元素在钢液中的溶解度等等  3）脱氧产物的物理特性。脱氧产物的熔点、比重和钢液的界面张力，与高熔点氧化物形成低熔点液态复合氧化物的能力，以及在钢液中的溶解度等物理特性，对脱氧的效果都有显著影响。  **（3）脱氧元素和复合脱氧剂的特点**  1）铝脱氧和铝、锰或铝、硅、锰同时脱氧，铝是与氧亲和力很强的脱氧剂其脱氧能力低于钙、镁、钡、稀土而高于硅、锰、钛等元素。  2）钙及钙合金脱氧的特点。钙是很强的脱氧剂，也是极强的脱硫元素。钙是很强的脱氧剂，也是极强的脱硫元素。但是，由于钙的沸点低（1484℃），在铁液中呈蒸气状态，使它的效果降低。另外，钙在铁液中的溶解度很低，影响了钙的脱氧脱硫效果，使钙的利用率也降低。  **2.3.2 扩散脱氧和沉淀脱氧**  （1） 扩散脱氧  1）扩散脱氧原理：能斯托分配定律，进行扩散脱氧时，能同时溶解于炉渣和钢液中氧，在温度一定时，存在以下平衡关系  (FeO)=Fe(l)+[O]      （2-9）  此时，氧在炉渣与钢液间的浓度比值应等于常数，即  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj2.files/image010.gif（2-10）  **2）影响扩散脱氧的因素**  a 温度对扩散脱氧效果的影响。铁液中的最大饱和含氧量对温度的影响具有双重性，关系式如下：Log [%O]饱和= -6320/T + 2.734    （2-11）  b 钢渣接触条件的影响。  c 炉渣成分的影响**。**  (2) 沉淀脱氧  1）沉淀脱氧的原理**。**沉淀脱氧是指向钢液中加入对氧亲合力大于铁的元素，以期与钢液中的溶解氧发生化合，形成不溶于钢液的氧化物，该氧化物借助于浮力自钢液中排出，从而使钢液的含氧量降低的方法。  2）沉淀脱氧剂的种类及使用范围**：**常用的沉淀脱氧剂，主要包括纯金属脱氧剂、镍基脱氧剂、铝基脱氧剂、硅锰基和硅钙基脱氧剂。从降低总氧量出发，使用含钙、钡、镁等强脱氧元素的复合脱氧剂，可以得到总氧量≤0.003%的钢液。不同脱氧剂的配合使用，才能得到纯净度很高的钢。  **2.3.3** **合金脱硫**  实质：使溶解在铁液中的硫结合成某种高熔点化合物（如CaS、MgS、CeS等）或硫氧化物，这些硫化物在铁液中的溶解度比硫化铁在铁液中的溶解度小得多，从而保证硫自钢中排除或弥散分布于金属中。脱硫的主要方法有精炼剂脱硫和钢渣反应脱硫。  （1）精炼剂脱硫  精炼剂脱硫的基本原理是利用与硫亲和力大的物质与硫结合成硫化物。该硫化物不溶于铁液或在铁液中溶解度很小，密度小于合金液。各种元素与硫亲和力的大小可用各元素与1mol硫反应的标准自由能变化的大小来衡量。在同样温度下，若标准自由能数值越小，该元素与硫亲和力越大。各种元素与硫亲和力的大小按La、Ca、Ba、Mg、Mn、Fe的次序而递减。  (2) 钢渣反应脱硫  只有在碱性感应炉中才能进行钢渣之间的脱硫反应。脱硫过程可分为如下3个步骤：      1) 金属液中的硫离子扩散到钢渣界面，渣中的氧离子扩散到渣钢界面；      2) 在钢渣界面发生下列反应：[S]+(O2-)=(S2-)+[O]  (2-12)  3) 生成的硫原子向渣中扩散，生成的氧原子向钢中扩散。由实践可知，决定脱硫反应速度的是硫离子在渣中的扩散。式2-12所示的平衡常数K是随温度变化的常数。通常用分配系数Ls表示炉渣的脱硫能力，即  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj2.files/image012.gif                                （2-13）  NO2-代表了熔渣的碱度，碱度越高越有利于脱硫。但当碱度过高时，熔渣熔点、黏度都增高的情况下，脱硫速度受到限制，反而不利于脱硫。当金属熔池中氧含量较低时，渣中氧化铁含量也较低，这时有利于脱硫。实验发现在1600℃纯铁液中硫与氧平衡含量之间有以下关系：[S]/[O]= 4。增加温度有利于脱硫，提高温度不但使Ls增大，再且可以改善钢渣流动性。  **2.3.4 非金属夹杂物的去除**  钢中存在大量的非金属夹杂物能够破坏钢基体的连续性，使原子间的作用力减弱，起应力集中，促使裂纹形成。它们严重降低钢的力学性能，尤其是降低钢的塑性和冲击韧性及疲劳性能，使合金的冷、热加工乃至某些物理性能变坏。这种影响不仅与它们的含量多少有关，还与形状和大小有关。  合金中残留的氢和氮，除了形成氢化物、氮化物以外，还容易引起白点、氢脆、时效等现象。以气体形式析出的[H]、[N]，在钢坯中形成气孔，带材轧制时容易引起皮下气泡等缺陷。常压感应炉有渣熔炼，一般采用浮升法去除夹杂物。非金属夹杂物的密度小于金属液时，在浮力作用下，夹杂物浮至金属熔体与熔渣界面而被熔渣吸收。夹杂物的上浮速度，可用斯托克斯公式计算：  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj2.files/image014.gif                          (2-14)  2.4 感应炉冶炼用原材料  对原料的要求：入炉料的化学成分应当准确；金属料清洁、干燥、无油污和铁锈；  料块尺寸合适；炉料都必须存放在干燥的环境中；  原料的种类：钢铁料：生铁、工业纯铁、废钢、返回料合金料：W、Mo、Nb及其铁合金；Ni Cr、Co及其合金；Si、Mn及其合金；V、B及其合金；Al、Ti及其合金；稀土金属及其合金；特种添加剂造渣料：石灰、萤石、粘土砖碎块。   配料计算：  根据炉料成分和熔炼产品的控制成分，计算 出入炉每种原料的重量；   感应炉由于主要是熔化和升温过程，所以 配料计算要求比较精确计算方法；   合金元素的回收率是精确计算的关键；  2.5 感应炉冶炼用坩埚**（第4次课）**  **2.5.1 感应炉坩埚的分类及质量要求**  (1) 坩埚的分类；  按材质分感应炉坩埚有3种，碱性坩埚、酸性坩埚和中性坩埚。应用最广泛的粘结剂是硼酸。  硼酸在酸性(石英砂)或碱性(镁砂)坩埚的制作中的作用有：  a 降低烧结温度。  b 促进尖晶石的形成。  c 降低了坩埚的体积变化率。  按制作方法分类坩埚的制作方法有3种：炉外预制成形坩埚、炉内成形坩埚和砌筑式坩埚。  (2)坩埚的质量要求  对坩埚耐火材料的主要要求有：  1) 耐火度和高温结构强度高。  2) 耐急冷急热性好。  3) 良好的抗渣性。  4) 导热性尽可能低。  5) 绝缘性能。  6) 无污染、无害、挥发性低、抗水化性强、成本低廉。  **2.5.2 坩埚的制备**  （1）粒度的配比  合理的粒度配比，可以得到最佳的体积密度保证坩埚具有最小的气孔率，坩埚的气孔率通常在20%左右；砂料颗粒的粗、中、细范围取决于炉子的容量。  **同容量的镁砂坩埚的粒度配比情况**   |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | 坩埚容量/Kg |  |  | 粒度配比/% | | | | 4-6mm | 2-4mm | 1-2mm | 0.5-1mm | <0.5mm | | 1300 | 15 | 30 | 25 | 20 | 10 | | 430 |  | 50 | 10 |  | 40 | | 200 |  | 25 | 30 | 10 | 35 | | 10 |  | 15 | 15 | 55 | 15 |   （2）成型的方法  感应炉用坩埚的成型方法可分为炉外成型和炉内成型两大类，根据粘结剂的不同炉内成型法又可分为湿法成和干法成型两种  （3）坩埚的制作  对于炉外成型法坩埚的制作是指坩埚如何安装在感应圈内和修筑炉口，这里介绍的是炉内成型法坩埚的制作过程。制作前的准备工作有砂料的配置与混匀、感应圈的清理和检查、制作坩埚用模具的准备、成型工具和装备的准备。  每次在打结坩埚前，感应圈检查的内容有：漏水、渗水、绝缘的破裂以及感应圈和匝间的紧固件是否可靠牢固可靠。  模具主要指的是坩埚型芯，型芯主要是控制坩埚内形和容积的胎具感应炉坩埚型芯用钢板焊成或用石墨制成。  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj2.files/image016.jpg hw147tu3  **石墨型芯**                           **震动成型机**  （4）坩埚的烧结  目的：提高坩埚的致密性、强度、和体积稳定性  过程：在高温下使砂料的接触面上出现液相结合，形成连续的烧结网络，通过网络使整个砂料连成一个整体  烧结方法：高温烧结和低温烧结；  A镁砂坩埚的高温烧结（分为四个阶段）  第一阶段：烧结温度在850℃，主要发生砂料的脱水反应和碳酸盐的分解。  第二阶段：烧结温度在850-1500℃低熔点化合物开始熔化，烧结网络开始形成，坩埚体积收缩明显，该阶段课适当增大升温速度      第三阶段：烧结温度在1500-1700℃，镁橄榄石、镁铝尖晶石开始熔化，新生化合物开始形成，烧结网络形成，坩埚体积急剧的收缩，密度强度显著增加，该阶段应降低升温速度。      第四阶段：烧结温度在1700-1850℃，目的是促进方镁石体继续长大，得到比较理想的烧结层厚度和坩埚断面的烧结结构。  B 镁砂坩埚的低温烧结（分为三个阶段）  第一阶段：温度在850℃，主要发生脱水反应和碳酸盐的分反应，升温速度缓慢。  第二阶段：温度在850℃-1400℃，含B2O3的低熔点化合物的烧 结网络迅速形成，坩埚强度增加  第三阶段：温度在850℃-1400℃，使经过初步烧结后的坩埚继续扩大烧结层的厚度，并烧结得到理想的烧结结构  2.6 中频感应炉熔炼工艺  **2.6.1  熔炼工艺过程**  熔炼所用的废钢中通常会含有一定量的水分和油污。这种炉料直接加入炉内，特别是已形成熔池的炉内，是不安全的，常常会导致喷溅。同时，它还是产品中氧的主要来源之一。所以有些厂设置了废钢的预热或干燥系统，用加热的办法去除废钢上附有的水分和油污，以保证使用的安全和阻止氢的一项来源。此外，加入已预热的废钢还可以缩短熔炼的熔化时间和降低电能的消耗。碱性冶炼法中的熔化法的生产工艺流程如下图所示  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj2.files/image020.jpg  **非真空感应炉冶炼工艺流程图**  **(1) 装料**  原料要求：  a 入炉料的化学成分要准确； b 金属料清洁干燥、无油、少锈； c 合适的料块尺寸； d 干燥存放；     装料要求：  炉料下层紧密，上层较松，防止熔化过程上层炉料搭桥；  在装大料前先在炉底铺垫一层细小的轻料；  先在炉底装一些熔点不是最高的合金或钢料；  高熔点又不易氧化的炉料应装在层料的上部，即高温区；  坩埚上部的低温区，主要装钢料；  料应装松一些防止搭桥。  **（2）熔化**  炉料的熔化直接关系到金属液中气体含量的变化和合金元素的回收，同时影响熔炼时间 坩埚寿命、电能的消耗等技术指标；熔化期是感应炉冶炼的重要阶段，它的主要任务：  使炉料迅速熔化、脱硫、 减少合金元素的损失、即时加入炉渣，防止金属熔池吸气。  **（3）精炼**  精炼期是感应炉冶炼的重要环节，通过精炼完成脱氧、合金化和调整钢液成分、温度等任务。  1） 调整炉渣成分，降低渣中合金元素含量**。**  2） 钢液脱氧与合金化**。**  **（4）出钢和浇注**  当熔炼的钢或合金满足出钢要求时，即可出钢。对于小容量炉座，可以直接浇注。对于较大容量的炉座，可以先倒入浇注包中，再浇注。根据产品的要求，可浇注成锭、铸件或自耗电极。出钢过程还需要依据产品的质量和工艺流程来选择浇注方式，如采用真空浇注还是非真空浇注，是采用上注还是下注。一般电热合金和高温合金需要进一步精炼，所以一般浇注成自耗电极，而精密合金一般采用真空浇注。真空浇注由于浇注过程进行真空处理可以避免钢液的二次氧化和再吸气，并且可有效去除氢气及部分氮气，因此可获得杂质极少，纯净度更高的钢。  2.7感应炉冶炼的成分控制**（第5次课）**  化学成分对钢的质量和性能均有很大的影响。一些钢种的化学成分除了应满足技术条件的规格外，还要控制在某一个更加严格的范围内，才能满足该钢种对质量和性能的更高要求。化学成分的控制贯穿于每炉钢冶炼过程的始终，它与合金元素的烧损情况、物化性质、熔渣物化状态、钢液温度、冶炼方法等密切相关。  **(1) 影响合金元素收得率的主要因素**  1) 合金元素本身的物化性质。  2) 冶炼时间。熔化期越长，C、Si的烧损越大，活泼元素加入后，距离出钢时间越长，合金元素的烧损越高。  3) 冶炼温度。温度增加，钢中合金元素的自由能降低，有利于合金元素的溶解。但温度过高，则会加剧合金元素的烧损。  4) 炉渣制度。炉渣物化状态对合金元素的收得率的影响较大。尤其是炉渣的黏度和碱度的影响更大。炉渣中FeO、SiO2越高，元素的烧损越大。  5) 元素的挥发损失。对于W、Mo、Mn均应注意其通过氧化物造成的挥发损失。  6) 钢液中的[O]、[N]、[S]含量。钢中[O]、[N]、[S]含量越高，元素的烧损就越大。加入合金元素前钢液应当充分脱氧、脱硫和脱氮。  7) 合金元素的加入时机、块度及加入方法。较活泼的元素加入时间越早，则烧损越大；加入块状的合金元素比加入粉末状的收得率高；加入到炉中和加入到钢包中，收得率也略有不同。  **(2) 提高合金元素收得率的方法**  1) 低烧损元素的控制方法：正常冶炼条件下烧损率低于5%的合金元素称为低烧损元素，包括Ni、Co、Mo、W、Cu等。低烧损元素一般可以随炉料一起加入，电解铜由于其熔点较低，应在熔化末期加入。低烧损元素中Mo 、W冶炼过程中的烧损主要是其氧化物的挥发损失，另外，新坩埚冶炼时不能冶炼含钨的合金，会由于新坩埚“吸钨”而导致钨损失及化学成分不合格。含钨炉料还容易造成“结底现象”，即大量的含钨炉料沉积于坩埚底部长期不能熔化。为减少W、Mo的损失，冶炼中要充分熔化、加强搅拌。  2) 中等烧损元素的控制方法：中等烧损元素是指烧损率在5%～20%之间的元素，包括Cr、V、Si、Mn、Nb等等，加入时视炉中情况而定。一般Nb在精炼末期加入，并加强搅拌；冶炼含Cr的钢时，应防止铬氧化进入炉渣，如果铬含量不高，最好脱氧完全以后再加入；加入Mn来消除FeS的热脆效应时，应控制Mn/S>8。  3) 高烧损元素的控制方法：Ti、Al、Re、Zr等合金元素，正常冶炼条件下，烧损率大于20%，为高烧损元素。冶炼时一般应尽量在终脱氧后加入。作脱氧剂时，加入方法视脱氧制度而定。另外，还要综合考虑加入的方式、方法来控制合金元素的回收率。例如，冶炼高温合金时需要加入Ti，如果Ti以海绵钛的形式加入，即使是在终脱氧以后加入，回收率也只有70%左右，但是，如果把钛制成Ni-Ti中间合金加入，则收得率就可以达到95%以上。 |

|  |
| --- |
| 3真空感应炉熔炼 |
| **3.1 概述**  真空感应熔炼（vacuum induction melting,简称VIM），是在真空条件下，利用电磁感应在金属导体内产生涡流加热炉料来进行熔炼的方法。新型真空感应脱气浇注VIDP，具有熔炼体积小，抽真空时间和熔炼周期短，便于温度压力控制、易于回收易挥发元素和成分控制准确等特点；自1988年出现以来，被发达国家列为大型真空感应炉的重点选择对象  **3.1.1 真空感应炉设备**  真空感应炉是生产超级合金的设备。按照作业方式可以分为间歇式炉子和半连续作业式炉子。真空感应炉可用于精炼超级合金，也可用于特种合金铸造。真空感应炉配套设备可以分为电源及电气控制、炉体、真空系统、水冷系统4大部分，见图3-1和3-2。  hw122tu  **图3-1 真空感应炉熔炼设备**  **3.1.2 真空感应炉的电源**  对真空感应炉的电源有如下要求：  (1) 感应器的端电位低。真空感应炉使用的工作电压比中频感应炉低，通常在750V以下，以防止电压过高引起真空下气体放电而破坏绝缘，造成事故。  (2) 防止高次谐波进入负载电路。使用晶闸管变频电路时，经常出现高次谐波进入负载电路，使感应器对炉壳电压增高，从而引起放电。因此，必须在电源输出端增添中频隔离变压器，来截断高次谐波的进入。  (3) 振荡回路的电流大；    http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj3.files/image004.jpg  **图3-2 典型的实验室真空熔炼装置**  图中1－真空感应炉熔炼室；2－粗抽阀；3－后级阀；4－机械；5－扩散泵；6－阀门  **3.1.3 真空感应炉的炉体结构**  常规真空感应炉基本结构按照炉体的启闭形式，可以分为单室立式炉和两室卧式炉。真空感应炉的炉体部分主要有炉壳、感应器、坩埚、倾炉机构、浇铸系统、水冷系统和送电装置等组成。炉体的结构形式有坩埚转动浇铸式和炉体倾动浇铸式两种。真空感应炉的炉体上安装有装料、捣料、测温、取样等附属装置。真空感应炉的最大特点是冶炼及浇铸过程在炉壳内进行。炉壳分为固定炉壳与可动炉壳两部分。炉壳必须承受因内部真空而形成的强大压力，要有足够的结构强度。小型真空感应炉炉壳采用双层结构，内层用无磁不锈钢板，外层用普通钢板焊接，中间通冷却水。大型真空感应炉局部使用双层结构，单层钢板外面用水管冷却。炉壳的活动部分与固定部分的接触面，都必须用真空橡胶件密封。真空系统原理见图3-3。  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj3.files/image006.jpg  **图3-3 真空系统原理图**  **3.1.4真空感应炉熔炼的特点**  （1）产品的气体含量低、纯洁度高；  （2）能精确控制产品成分的含量；  （3）对原材料的适应性强；  （4）可在真空条件下浇注成锭，也可浇注成复杂形状的铸件；  但是，真空感应炉熔炼也存在一些问题，如熔炼过程中，所熔炼炼金属长时间地与坩埚耐火材料接触，必然存在耐火材料玷污金属的问题。其次，所熔炼的金属液的凝固条件和一般浇注方法没有区别，所以仍然存在疏松、偏析等缺陷。  **表3-1不同熔炼方法生产的SAE4340钢中气体含量**   |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | | 冶炼方法 | [O]/% | [H]/% | [N]/% | | 炉料 | 0.0251 | 0.00018 | 0.0029 | | 电弧炉 | 0.0031 | 0.00017 | 0.0039 | | 非真空感应炉 | 0.0030 | 0.00010 | 0.0053 | | 真空感应炉 | 0.0003 | 0.00001 | 0.0005 |   **表3-2 不同熔炼方法生产的SAE4340钢中气体含量**   |  |  |  | | --- | --- | --- | | 钢与合金 | 氧化物夹杂，% | | | 非真空感应炉 | 真空感应炉 | | Cr20 | 0.034～0.044 | 0.006～0.010 | | Cr16Ni25W5AlTi2 | 0.025  0.013～0.044 | 0.006  0.003～0.010 | | Cr10Ni65Co10W5Mo5VAl4 | 0.012  0.006～0.010 | 0.0046  0.005～0.010 |   **3.2 真空熔炼的理论基础**  （1）真空下的碳脱氧  真空下碳的脱氧能力随着真空度的提高而大幅度增加。1600℃条件下 ，当真空度为10-3atm时，碳的脱氧能力已经超过铝；当系统 真空度为10-5atm 时，碳的脱氧能力是大气条件下的105倍；真空下主要利用碳脱氧  （2）气体在钢中的溶解及其影响因素  双原子气体分子在熔融金属中的溶解度与气氛中气体的分压力的平方根成正比；因而真空度越高，气体在金属中溶解度越低；  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj3.files/image008.gif                        19  **在1600℃、PH2=100Kpa条件下, 合金        在1600℃、PN2=100Kpa条件下,合金元素对氮在熔元素对氢在熔融铁中的溶解度的影响          铁中溶解度的影响**  **3.3真空感应炉冶炼工艺过程**  真空感应炉熔炼的整个周期可分为以下几个主要阶段，即装料、熔化、精炼、合金化和脱氧、浇注等。  **3.3.1装料**  （1）原料要求  真空感应炉所用的炉料，一般都是经过表面除锈和去油污后的清洁原料，而大部分合金元素以纯金属形式加入。加料时严禁使用潮湿的炉料，以免影响成品的质量和在熔炼时发生喷溅。装料时应做到上松下紧，以防止熔化过程中上部炉料因卡住或焊接而出现“架桥”；在装大料前先在炉底铺垫一层细小的轻料；高熔点又不易氧化的炉料应装在坩埚的中、下部高温区；少数活泼元素如Al、Ti、Mn、B和稀土等装入分格加料器中。  （2）装料要求  I 炉料下层紧密，上层较松，防止熔化过程上层炉料搭桥；在装大料前先在炉底铺垫一层细小的轻料；  II 高熔点又不易氧化的炉料应装在坩埚的中下部高温区；  III 易氧化的炉料应在金属脱氧良好的条件下加入；  IV 为减少易挥发元素的损失，可以合金的形式加入金属熔池中，或熔炼室中充以惰性气体，以保持一定的炉膛压力。  **3.3.2  熔化期**  对于间歇式生产的真空炉，当装料完毕后，闭合真空室，开始抽真空。等到真空室压力达到0.67Pa (5×10-3mmHg) 时，便可送电加热炉料。对于真空条件下装料的连续式生产炉座，装完料后，即可送电进入熔化期。考虑到炉料在熔化过程中的放气作用,熔化初期不要求输入最大功率。而是根据炉料的放气情况，逐渐增大功率，避免大量放气造成喷溅。当出现剧烈沸腾或喷溅时，可采取减少输入功率或适当提高熔炼室压力的办法加以控制。熔池熔清的标志是：熔池表面平静，无气泡逸出。可转入精炼期。  **3.3.3  精炼期**  精炼期的主要任务是提高液态金属的纯洁度及进行合金化。与此同时，还要调整熔池的温度和进行合金化。精炼期要实现的目标是降低气体含量，去除有害杂质，使钢液成分合格。精炼期的温度：控制在所冶炼金属的熔点以上100 ℃。 真空度：大型真空感应炉通常在15-150Pa；小型炉为0.1-1Pa。精炼时间：200kg的炉座为15-25分钟；1吨左右为60-100min  **3.3.4 合金化**  合金化即成分的调整，是在脱氧和脱气良好的情况下进行的，通过添加合金元素来实现。由对合金性能的要求决定添加元素的种类及数量，根据合金元素与氧的亲合力大小和容易挥发程度决定加入的先后顺序及加入条件。每加一种元素后，都应当加大功率进行一定时间的搅拌，以加速熔化并使之分布均匀。  **3.3.5 出钢和浇注**  合金化结束后，坩埚中的金属液达到目标成分和温度，真空室内的直空度也符合技术要求的规定，则可以出钢。浇注到保温帽时，即破真空，立即打开真空室加发热剂和保温剂，以免缩孔进入锭身。对于成分复杂的高温合金，浇注后在真空下停留15～20分钟，再破真空。对于大型连续式真空感应炉，铸锭可让它在真空下冷却。  **3.4元素的挥发与成分控制**  所有金属(包括部分非金属)都存在一平衡的蒸气压Poi，它取决于该金属的物性、气态的存在形式(单原子、双原子还是多原子组成气态分子)以及温度。i物质的蒸气压Po，与温度的关系式为：(P0为标准压力，不用改动)                   lg（Poi/133.3）=AT-1+BlgT +TC×10-3+D                  (3-1 )  式中Poi的单位是Pa，与钢铁冶金有关的一些元素的A、B、C、D以及有关物性参数列于表3-5。元素的蒸气压越高，在真空熔炼时挥发的趋势就越大。按表3-5所列数据可计算1873K时，各元素的Poi递减顺序是：Zn、Mg、Ca、Sb、Bi、Pb、Mn、Al、Sn、Cu、Cr、Fe、Co、Ni、Y、Ce、Sl、La、Ti、V、B、Zr、Mo、Nb、W、Ta。  合金或粗金属中的组元i的蒸气压Pi和纯物质i的蒸气压Poi是不相等的，因为合金中i的浓度必然低于纯物质，此外合金中i与其他组元分子之间的作用力也不等于i分子之间的作用力。Pi可由下式表示：                        Pi= *ai* .Poi，= r i.Ni .Poi                          (3-2)  式中：*ai*——合金中组元i的活度；            r i——i的活度系数；            Ni——i的摩尔分数浓度；  在铁基合金中，可将合金元素分成不挥发、易挥发和可以借助于挥发去除的杂质元素等三类。属于不挥发的元素有Ti、V、B、Zr、Mc、Nb、Ta、W。属于易挥发的元素有Mn、Al、Cr、Fe、Co、Ni、Cu以及Ca和Mg。在真空熔炼的条件下，这类元素会有或多或少的挥发。钢和合金中有一些微量的金属元素，它们对钢和合金的性能有较大的危害，一般的化学方法又难以去除，若这类元素有较高的蒸气压，则可以在真空熔炼中借助挥发而去除。这类金属元素有Sn、Pb、Bi、Sb、Zn等  微量元素指用于微合金化的镁、锆、硼等，微量杂质指Pb、Bi、As、Sb、Sn等，对于钢和合金来说，前者是有益的，后者是有害的； 纯镁在熔炼温度条件下具有很高的蒸汽压，密度小，对氧有较强的亲和力，这些因素给镁合金化带来一定困难。   在真空熔炼时，镁是以二元或三元合金在熔炼后期加入的，为了提高镁的回收率，加入镁时应注意以下几点：  （1）加镁前钢液温度低于出钢温度20℃左右。  （2）加镁后应该控制保温时间，一般出钢前1-5min内加入；  （3）加镁前炉内应充入氩气，以保证镁的高回收率。  而微量杂质低熔点元素是废钢反复使用积累和某些铁矿含有这些元素所造成的。钢与合金中的微量有害元素一般都具有较高的蒸气压，所以真空精炼是去除这类有害杂质元素的最有效方法。由于蒸气压不同，其他组元的影响不同，所以这些元素的挥发速率差别很大。  **3.5真空下金属熔池与耐火材料的相互作用**  随着感应炉技术的不断发展，无芯感应炉的容量也随之不断增大，已经投产的真空和传统的感应炉已分别达到60t和40t，20世纪60年代，美国先后制造了15t、30t甚至60t的VIM (Vacuum Induction Melting Furnace) 炉。而电炉容量的增大对耐火材料的要求也相应提高，特别是具有特殊物理特性的高纯耐火材料。  真空熔炼用耐火材料的操作条件一般比常规熔炼时的苛刻，因为在真空条件下很多耐火材料按照组分分解并与熔融的金属反应，一方面污染了熔融金属，同时也加大了耐火材料的损蚀。这在含有大量二氧化硅和氧化铁的耐火材料中表现尤为突出。  真空熔炼用耐火材料发生的收缩裂纹较常规熔炼的严重，特别是大容量(>2.5t)捣打炉衬的感应炉。因此大型感应炉的耐火材料应具有以下特征：  (1) 不可逆的膨胀，不会发生收缩裂纹；  (2) 高纯度；  (3) 在真空环境中具有良好的稳定性；  (4) 能够很好的耐熔融金属和熔渣的侵蚀。  具备上述特征的耐火材料有高纯氧化镁－氧化铝－尖晶石和氧化铝。近年来这些耐火材料的捣打配料、型砖以及相应的补炉材料和粘结剂都已有了很大的发展。  氧化镁和氧化铝经过反应会形成密度较低的高纯氧化镁－氧化铝－尖晶石，而氧化镁－氧化铝－尖晶石的炉衬在1647℃的温度条件下使用，当冷却至室温时或进行冷装料操作后，再加热到1647℃使用，如此循环几十次亦不会发生裂纹。据有关资料报道，对公称容量为6t的感应炉其炉衬采用95%氧化铝捣打成型，在生产300系和400系的不锈钢时，可以连续生产150炉而未对炉衬进行任何的处理。  **3.6新技术在感应炉冶炼中的应用**  从感应炉出现至今近80年间，感应炉在设备和工艺方面都有着长足的进步，因而使得感应炉熔炼无论在产量和生产率方面，还是在产品质量、品种范围方面出现并已采用一些措施，主要包括：合金的镁处理、低氧势脱磷、吹氩、喷粉，喷吹氢氧混合气体脱碳、钢液的氢气精炼。  **3.6.1合金的镁处理**  镍基或铁基的高温合金、精密合金，含有较高的合金元素，有些还是较活泼的元素，例如铝、钛等。这类合金即使在真空中熔炼，还不能保证得到令人满意的热塑性、焊接性能、高温强度和抗蠕变强度等性能。为此，在精炼终了加入一定数量的镁。残留在金属中的镁，能显著地改进上述性能。  镁特定的物化性质决定着，在镁的加入操作中，镁的加入方式回收率的控制都是难以完善解决的工艺问题，使用镁合金如：Ni-Mg、Ni-Mg-Me以降低镁的蒸汽压，提高熔点和沸点。镁处理的操作过程为：  （1）精炼期结束后，若要求添加B、Ce,在B、Ce加入后，调节熔池温度，使温度低于出钢温度20℃;  （2）真空室内充高纯氩气至13-27kPa;  （3）镁以块状的含镁中间合金加入金属熔池;  （4）镁加入后立即大功率搅拌，时间不宜过长，为减少镁的损失，加镁后，通常1-5min内出钢;  **3.6.2 低氧势脱磷**  熔炼合金钢时，特别是用合金钢返回料作炉料时，为了减少合金元素的损失，在熔化和精炼过程中，必须控制炉气和炉渣的氧势，因此熔炼过程中就不能用氧化的办法脱磷。当要求熔炼低磷钢种时，只能用含磷量低于规格要求的原材料，这样就提高了生产的成本。为解决高合金钢返回料熔炼的脱磷问题，近年来提出低氧势脱磷的理论和实践，在感应炉熔炼中也得到了应用。钙和钢中的磷，在钢液充分地脱氧和脱硫的条件下，能进行如下反应：      3Ca+2[P] = Ca3P2；               （3-3）  生成物为磷化钙。参与反应的钙可以是金属钙，也可以是钙的合金(如硅钙合金)，或钙的化合物(如CaC2)。由于金属钙的熔点低(839℃)、蒸气压高(1600℃时，P 1.775×105Pa)、在钢液中的溶解度小，所以当金属钙加入钢液后很快挥发成蒸气，以气泡形式上浮排出。在上浮过程中，钙蒸汽能与钢中的磷反应生成Ca3P2，但钙的利用率很低。常用的是钙的合金或化合物。反应生成的Ca3P2是不溶于钢液中的化合物，其熔点为1320℃，密度3.3 g／㎝3，在炼钢温度下会以液态上浮而进入渣中。但是磷化钙在炼钢条件下并不稳定，是一强的还原剂。当炉内气氛氧势偏高和渣中存在易还原的氧化物时，会进行以下反应：  (Ca3P2) + 4O2= 3 (CaO)+ (P2O5) ；                    （3-4）   y (Ca3P2) + 8 (MexOy) = 3y (CaO) + y (P2O5) + 8x [Me]       （3-5）  当炉气中含有水汽时：                  (Ca3P2)十3H2O= 3 (CaO) + 2PH3↑;                   （3-6）  PH3是气体，将随炉气排出而带走磷，但是这种气体有毒，操作时应避免这种反应发生。在处理含Ca3P2的炉渣时，应采用专门措施以保证安全。当渣中碱度较高时，而生成稳定性较高的CaO.P2 O5。  3        (CaO) + (P2 O5)= (3 CaO.P2 O5)                      （3-7）  但是用于低氧势脱磷的硅钙或CaC2都是具有极强的还原性，所以当渣中有过剩的硅钙或CaC2存在时，磷酸钙会分解，P2O5会被还原而使磷又回到钢中，降低了低氧势脱磷的效率。在实际操作中。保持钢液的低氧势和及时去除含磷炉渣是提高钙的脱磷效率的关键。当加入钙时，要防止钙的急剧气化而导致喷溅；用CaC2做脱磷剂时，为避免渣中的CaC2氧化，操作时要求在坩埚上加盖，内充还原或惰性气体；在Cr12MoV模具钢熔炼中，粉剂用量为10～15kg/t，脱磷量 约为0.005%，喷粉结束后，立即清除炉渣，另造新渣。  **3.6.3 吹氩**  钢包吹氩在普钢和低合金钢的熔炼中已是一项成熟技术，依靠上浮的氩气泡，搅拌钢液，促进碳氧反应，气泡表面粘附夹杂和促进夹杂间的碰撞、长大、上浮，在一定条件下还能脱气。当氩气纯度较高且十分干燥时，吹氩可以去除部分气体，特别是氢。当吹氩时间为20分钟左右时，脱氢率可达50％左右。在炼钢温度下蒸气压较高的有害微量元素，如铅、砷等，通过吹氩，也能得到不同程度的去除。有资料介绍，吹氩20分钟时，可以将钢中的铅去除70～80％，砷的去除量却只有10％。  **3.6.4 喷粉**  喷射冶金是近期发展起来的一项精炼钢液的新技术。钢包喷粉已在常规炼钢炉的炼钢生产中得到较为广泛的应用，根据所喷粉剂的不同，可以利用喷粉完成脱磷、脱硫、脱氧、控制夹杂的形态、合金化或增碳等冶金任务。喷粉技术本质上是一种将固体料加入钢液熔体的技术。  由于粉剂是靠载流气体输送，与粉剂同时进入的载流气体，将会导致熔体的搅拌，从而改善冶金反应的动力学条件，所以喷粉比传统的固体料添加技术效果要好一些。当然，这种添加技术也完全可以用于感应炉熔炼。  感应炉熔炼中可以利用喷吹脱磷剂 (钙的合金或钙的化合物) 脱磷，也可以喷吹脱硫剂脱硫。常用的脱硫剂有以石灰为主的粉剂(w(CaO) 60～80%，w(CaF2)20～40％)，这种脱硫剂取材方便，价格便宜，并对钢液的成分控制没有影响，脱硫率约为30~50％。使用较多的另一种脱硫剂是Ca-Si-CaF2(其中w(CaF2)20～30％)，这种脱硫剂中的硅大部分会被钢液吸收而增硅，脱硫率可达40~80％。对于不担心增碳的钢种，在以石灰为基的脱硫剂中配加一定比例的CaC2，也能取得较好的脱硫效果。  喷粉常用瓶装氩气作为载流气体。对于含氮量没有要求的钢种也可以使用氮气，可以降低成本。工作压力一般为0.2～0.3MPa，在保证粉剂均匀输送的前提下，应尽可能减小工作压力。用外敷耐火材料的钢管作为喷枪，插入深度为熔池深度减去喷透深度。  **3.6.5** **喷吹氩氧混合气体脱碳**  美国联合碳化物公司用感应炉研究了Fe-Cr-C-O四元系的平衡关系，发现溶解在铁中的碳和铬的含量与温度和气相中一氧化碳的分压力PCO之间存在着对应的关系。在一定的铬含量下，平衡的碳含量随温度的提高或PCO的降低而下降，从而得出只要设法降低与钢液相接触的气相中PCO，就可以在不太高的温度下，将钢液中的碳降到较低的水平，而铬不会遭到太多的氧化损失。  在此基础上，提出了用氩气稀释PCO分压的AOD法，即喷吹氩氧混合气体脱碳。这种方法克服了电弧炉中返回吹氧法熔炼铬不锈钢时的温度高、铬损失大、石墨电极增碳、炉衬寿命低、微碳铬铁或金属铬用量大等缺点，得到迅速发展和广泛应用。  既然AOD法是在感应炉上研究出来的，则氩氧脱碳法应该可以用于感应炉熔炼。当用感应炉熔炼铬或镍铬不锈钢时，可以喷吹氩氧混合气体，以脱除钢中的碳。 |

|  |
| --- |
| 4. 电渣熔炼 |
| **4.1电渣重熔设备和基本原理**  电渣重熔法(Electro-slag Remelting，以下简称ESR法)是在水冷结晶器中，利用熔渣的电阻热来重熔 自耗电极，生产高质量的钢和合金的一种方法，系当今世界上采用最广泛二次精炼法（见图4-1）。它与真空自耗电弧炉相比较，不需真空抽气系统，多采用交流电源，故其设备简单，容易操作，钢锭内部组织致密，表面质量良好。主要用于特殊钢和合金的生产。  **4.1.1电渣重熔设备**  与真空自耗电弧炉相比，电渣炉的设备较为简单，它由以下几部分组成：电源变压器和短网，自耗电极升降系统，结晶器与底水箱，测量及控制系统，供水与除尘系统等等。这里只介绍电源变压器、结晶器、底水箱和电渣炉的各种结构类型。  **（1）电源变压器**  电渣重熔电制度的特点是使用的大电流、低电压的交流或直流电源。为此需要选择与电渣炉容量相适宜的变压器将外部输入的高压电转变为低压电（40～100V）。  **（2）结晶器**  结晶器是电渣炉最重要的设备部件。电渣重熔过程中，不仅自耗电极在结晶器内熔化，而且液态金属还在结晶器内强制冷却、结晶，并形成金属锭或铸件。它是炉子的熔炼室，同时又是金属凝固的锭模。结晶器的形状更加复杂，其结构多种多样(图4-4)，主要有锭模式结晶器、滑动式结晶器和组合式结晶器三类。  **(3) 底水箱**  底水箱安装在结晶器的下面，电渣熔炼初期它承受着大量的热负荷，并且还有部分(或全部)熔炼电流通过底水箱，它起冷却和承重的作用，还起导电作用。要求底水箱具有良好的导电性能和冷却能力，并且要有足够的刚度。底水箱的上盖板应采用光滑的紫铜板做成，箱体内通水冷却。冷却水在底水箱中可设计成不同的流向，底水箱也可制成不同的形式。  **（4）电渣炉的类型**  电渣炉的类型很多，结构也多种多样。本节中仅从电渣炉的电源种类，供电方式、机架结构类型等作如下介绍：按电源可分为直流电渣炉和交流电渣炉两种，在工业生产中大量采用的是交流电源供电。按供电方式可分为单相电渣炉、三相三电极电渣炉、由三个单相(或多个单相)单电极组成的电渣炉以及双极串联电渣炉。如图4-6～4-8为电渣炉的几种布置形式，图4-3为电渣炉的电源布置示意图。  hw183tu1  **图4-1电渣炉**   **hw188tu11 图4-2不同类型的结晶器**  1-自耗电极； 2渣池；3-金属熔池；4-金属锭；           1-3 锭模式结晶器；   4-5 滑动式结晶器； 5-结晶器；6-底水箱   6-7 可拆卸式；  8 移动式   |  |  |  | | --- | --- | --- | | http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image006.jpg  图4-3 单相固定式电渣炉 | http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image008.jpg图4-4 单相双极串联电渣炉 | http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image010.jpg图4-5 三相电渣炉 |   **4.1.2电渣重熔的基本原理**  （1）重熔的基本原理  电渣重熔过程中，电流经过自耗电极、熔渣、金属熔池、冷凝的金属锭以及底水箱，最后流经短网、变压器等，形成一个回路（见图4-6）。对于双极串联的电渣炉而言，电流是从其中的一根自耗电极经过熔渣(小部分电流还流经金属熔池，然后再流回熔渣)，再经另一根自耗电极，最后回到变压器而构成回路。  电渣重熔过程，包括渣池的形成、自耗电极的熔化、重熔金属的凝固以及重熔锭的补缩等都是在一个连续的工作程序中进行的。  当电流通过熔渣时，由于熔渣具有较大的电阻，在渣池中产生强大的电阻热。单位时间内渣池中析出的热量Q用下式表示：        Q =  I2R                  (4-1)  式中：Q—单位时间内产生的电阻热，J/S ；   I—通电熔渣的电流强度，A；          R—渣池在熔炼温度下的电阻，Ω  自耗电极插在渣层中，由于熔渣的高温，使自耗电极的插入部分被加热，并超过自身的熔点，于是电极端头的表层开始熔化，形成薄层金属液，并附在端头上部。同时，在重力g、电磁力R、渣池运动的冲刷力F的作用下，沿电极端部表面向下流动，在电极的中央部位集中，并汇集成熔滴。重力使熔滴向下滴落，而熔渣与熔滴的界面张力δ力图阻止此熔滴下落(图4-7)  可以将重熔过程中自耗电极的熔化和金属熔滴的过渡看成以下三个阶段：  1) 自耗电极末端形成液态的金属膜；  2) 聚集成熔滴而通过渣层向金属熔池过渡；  3) 进入金属熔池表面。  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image012.jpg **图4-6 电渣重熔基本原理图 hw191tu**  **图4-7  金属熔滴受力示意图** 1－渣池；2－熔化液层；3－金属熔池；4－渣皮； 5－电渣锭；6－结晶器； 7－底水箱；8－变压器； 9－短网；10－夹持器；11－自耗电极  **4.2电渣重熔的优越性**  电渣重熔与一般的冶炼方法相比，不同之处在于：重熔过程，包括渣池的形成、自耗电极的熔化、重熔金属的凝固以及重熔锭的补缩等都是在一个连续的工作程序中进行的。正因如此，具有一系列优越性。  （1）重熔金属能被熔渣有效精炼。  （2）改善金属锭的结晶条件，提高金属的成材率。  （3）设备简单，生产费用低，操作易掌握。  （4）产品品种多，应用范围广。  （5）电渣重熔法还有一个很大的优点，能炼制不同截面的金属锭，如圆形、正方形、矩形，以及宽窄面长度比很大的金属锭。还可以生产中空管和熔铸不同形状的铸件，如空心管坯、轧辊毛坯、高压容器、大型高压阀门，以及曲轴等  电渣重熔法有一些不足之处，如生产率较低，电能消耗高，去气效果差，重熔含Ti、Al元素高的钢种时，化学成分不容易准确控制，生产费用仍比一般熔炼方法要高。  **4.3电渣重熔的原材料、渣制度及工艺参数的选择**  **4.3.1 电渣重熔的原材料**  **（**1**）**自耗电极  电渣重熔所用的自耗电极一般为电弧炉或感应炉冶炼的金属锭，经过轧制或锻造后制成金属棒。它的断面可以是圆形的、方形的或矩形的，其品种应该与重熔后的成品种类相同。为了避免重熔过程中易氧化元素大量烧损，要求自耗电极的表面没有铁锈和氧化铁皮，尤其是对含有Al、Ti、B等元素的钢和合金重熔时，更应如此。重熔过程中，除易氧化的元素(Ti、Al等)可能被烧损外，其他元素基本上变化不大。对于这些易氧化的元素，应根据重熔过程中的烧损量，在制备自耗电极时将它们控制在一定的范围内重熔过程中为了避免自耗电极偏心，要求它应尽可能平直，一般要求每米不超过6mm的弯曲度。  （2）      护锭板  重熔开始时，为了防止底水箱被烧穿，可在结晶器的下部、底水箱的上面，安放一块金属板，此板名为护锭板。护锭板采用与自耗电极相同的材料制成。护锭板的表面不应带有氧化铁皮和铁锈，要求十分平整，这样能保证与底水箱的表面紧密接触，取得良好的导电效果。护锭板的厚度一般选用12～18mm。  （3）引燃渣料  众所周知，电渣重熔时，熔融状态的炉渣有一定的导电能力，当渣料为固态时，其导电能力很差，不能直接用来导电发热而建立渣池。如果采用固体渣料作为引燃渣料时，必须寻找一种能在固态时有足够导电能力的炉渣。在实践中人们发现，当固体渣中含有一定数量的TiO2时，能满足这个要求。因此在相当一段时间内，将含有TiO2的固体渣料作为电渣重熔的引燃渣料。  （4）重熔渣料  电渣重熔过程中，炉渣起着十分重要的作用。常用的渣系多由萤石 (CaF2)、铝氧 (A12O3)、石灰(CaO) 以及镁砂(MgO) 等组成，(见表4-1)。  **4.3.2 电渣重熔工艺参数的选择**  **（1）电渣锭的尺寸**  锭重和锭子尺寸间关系满足式4-2。  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image016.gif                      （4-2）  G锭—锭重，t；  D锭—锭子平均直径，㎝；  h 锭— 锭高，cm；γ 锭—重熔金属的比重，g/cm3；    **表4-1  常用的渣系及液态的比重、熔点**   |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | 渣系组成，% | | | 渣子比重，g/㎝3 | | 熔点/ ℃ | | CaF2 | CaO | A12O3 | 1450℃ | 1650℃ | | 100 | - | - | 2.52 | 2.42 |  | | 90 | 10 | - | 2.57 |  | 1390～1410 | | 80 | 20 | - | 2.63 | 2.50 | 1200～1220 | | 70 | 30 | - | 2.66 |  |  | | 60 | 40 | - | 2.69 |  |  | | 70 | - | 30 | 2.88 | 2.80 | 1320～1340 | | 80 | 10 | 10 | 2.69 |  |  | | 60 | 20 | 20 | 2.90 |  | 1240～1260 |   **（2）结晶器和自耗电极尺寸**  结晶器的直径D结以下式确定：  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image018.gif                              （4-3）  式中：D结一结晶器的平均直径，mm； D产—产品直径，mm；        M一毛坯加工余量(对于钢锭，M=0；对于铸件，M=10～15mm)；        δ％一锭坯的减缩率(一般为3±0.5％)。  结晶器的高度(H结)以下式确定：         H结=（3～6）D结；                           （4-4）  若D结＞300mm时，式中H结取下限。  自耗电极的直径如取决于结晶器的直径D结，可按下列经验公式确定：  d极=  K·D结                                 ( 4-5 )  式中：K——充填比，一般选用0.4～0.6；d极—自耗电极直径，mm；        D结—结晶器直径，mm。  目前，世界各国根据自己的实际情况，选择的充填比K不同。在保证重熔金属质量和安全操作的前提下，K值选用大一些为好，它对降低电能消耗、提高生产率以及改善锭表质量都是有益的。自耗电极的直径不能过大，否则将影响操作安全。自耗电极的长度L级，可以按下式计算：  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image020.gif；                  （4-6）  式中 G极—金属锭质量，t；n—生产一根金属锭所需要的自耗电极数目，根；      γ金—重熔金属的密度，普通钢取7.9g／cm3；      Z—电极致密度，对铸造电极取0.95，对锻轧电极取大约等于1；      △L—电极余尾，应视电极的夹持方式而定，一般取（2～3）d极。  **（3）冶炼电压**  冶炼电压是指重熔时工作电压和线路电压降之和。工作电压接近于渣层电压，比较确切地代表了实际电压。它决定了自耗电极的埋入深度，决定了能否形成满意的锭子轴向结晶和表面质量，并关系到元素的氧化程度。适当提高炉口电压，能细化熔滴，升高渣温，有利于锭子轴向结晶。通常导电性好、电阻小的渣系，工作电压宜选择偏低些，冶炼含Al、Ti等易氧化元素的合金以及宜产生偏析的钢或合金时，工作电压宜选择偏低些。工作电压可以按以 下经验公式选取。  U = 0.5 D结+ B                               （4-7）  U —工作电压，V； D结—结晶器直径，cm； B— 常数，取27～37 V；  **（4）冶炼电流**  冶炼电流是重要的参数，对产品质量和经济技术指标有重要影响。提高冶炼电流，自耗电极埋入深度增大，不利于锭子的轴向结晶。冶炼电流主要由自耗电极截面积和电流密度确定。  I = A·*J*                                      （4-8）  A—自耗电极截面积，mm2；*J*—电流密度，A/mm2；  电流密度*J*可以有经验公式选择。  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image022.gif                                  （4-9）  其中d电为自耗电极直径，mm。  **（5）输入功率**  输入功率是为了检验电压电流值是否合适，或为设备选择变压器提供依据。确定输入功率是根据单位渣池体积输入功率来确定的。如D结=400～800mm时，有效输入功率为0.15～0.30KW/ cm2, D结=200～400mm时，有效输入功率为0.30～0.60KW/ cm2 当D结＜200mm时，有效输入功率＞0.60KW/cm2。  **（6）渣量及渣池深度**  渣量的确定按下式进行，常用的渣系及比重见表4-3。  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image024.gif                           （4-10）  G渣—渣重，㎏；       D结—结晶器直径，㎝；  h 渣— 渣池深度，cm；  γ渣—重熔金属的比重，㎏／cm3；  渣池深度可以根据如下经验公式确定：  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image026.gif                               （4-11）  当D结≤250mm时，取上限，当D结＞350mm时，取下限。据文献介绍，国内单相电渣炉的渣量30～40㎏/t,三相电渣炉的渣量60～70㎏/t,国外渣量为锭重的3～5%。  **（7）冷却水温度**  为了有利于钢锭的结晶和防止事故发生，要求结晶器和底水箱的冷却强度大一些，通常要求冷却水压力1.5～2.0㎏/mm2，保证结晶器出口水温控制在40～60℃。  4.4电渣重熔的冶金特点**(第11次课)**  电渣重熔过程，包括渣池的形成、自耗电极的熔化、重熔金属的凝固以及重熔锭的补缩等。这些过程是在一个连续的工作程序中进行的。  **4.4 .1电渣重熔渣池的形成**  (1) 熔渣的作用   1）重熔过程的热源。  2）有效地进行精炼。  3）炉渣的保护作用。  4）此外，在重熔金属的凝固过程中，锭表面还形成一层薄薄而均匀的渣壳，保护结晶器不受高温熔渣的直接作用，并使锭的表面光滑，易于脱模。  (2) 熔渣的性能  1）一定的比电导。  2）较低的黏度与熔点。  3）低的蒸气压。  4）熔渣的界面张力适宜。  5）熔渣的密度适中。  6）熔渣的透气性适宜。  (3) 渣系的选择  应根据以上熔渣物理性能的分析选择熔渣。常用的渣系见表4-1。  渣系的熔点应低于重熔金属熔点100～200℃，熔渣的黏度也应小，则重熔过程中渣的流动性好，有利于脱硫和去除非金属夹杂物。同时还可使锭子表面形成一层薄而均匀的渣壳，有利于锭子凝固和获得光滑的表面。  CaF2-CaO渣系，具有显著的脱硫能力，并且脱硫能力随熔渣碱度的提高而增大。当重熔含硫的易切削钢时，为了保证钢中硫的含量，则需采用酸性渣操作，其碱度R＜l。  电渣重熔时，熔渣中不稳定的氧化物 (FeO、MnO) 等以及变价金属的氧化物( MexOy)含量应越少越好，以防止金属中[O]含量增高和元素的烧损。在熔炼含AI、Ti、B等元素的钢与合金时，渣中不应含有(SiO2)。  由于Na2O、K2O等碱金属氧化物的熔点低，且容易挥发，因此渣中不应含有此类氧化物。  (4)渣池的建立  在重熔开始时，要迅速建立起重熔渣池，使电渣过程能够顺利进行。建立渣池的方法有明弧法和无弧法，目前的生产中主要采用后者。无弧法中，又以固体导电渣引燃法和液渣法为主。  **4.4.2自耗电极的熔化**  金属熔滴在滴落的过程中，其过渡特征主要表现为熔滴滴落的频率和熔滴直径的大小，这些对金属的精炼有着相当的影响。  首先，熔渣成分对熔滴尺寸有明显的影响。当采用直径d极=200mm的ЭП65钢作自耗电极，结晶器的直径D结=425mm，熔渣为含CaF2-Al2O3渣系，并添加不同数量的Al2O3，进行重熔时，其熔滴质量变化列于表4-2。  **表4-2  熔滴变化情况**   |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | | CaF2-Al2O3渣中Al2O3含量，/% | 电压，/V | 电流，/A | 滴落频率，滴/秒 | 熔滴平均质量，/g | | 1 | 61 | 7500 | 5.07 | 6.90 | | 5 | 61 | 7500 | 6.53 | 7.50 | | 15 | 61 | 7500 | 7.01 | 7.95 | | 30 | 61 | 7500 | 7.06 | 11.70 |   其次，渣池深度与熔滴滴落频率和熔滴尺寸有着一定的关系。当采用小断面的自耗电极时，随渣池深度的增加导致熔滴滴落频率的降低，而熔滴直径增大 ( 见表4-3 )。  **表4-3 渣池深度与熔滴滴落频率、熔滴直径的关系**   |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | | 渣 池 深 度，/㎜ | 30 | 50 | 70 | | 滴 落 频 率，滴/秒 | 21.5 | 14.8 | 11.5 | | 熔滴平均质量，/g | 0.11 | 0.16 | 0.21 | | 熔滴平均直径，/㎜ | 3.12 | 3.54 | 3.86 |   注：电极升降速度为1.55m/h；电压为45V  电渣生产中重熔过程的稳定与否，与自耗电极的下降速度有密切的关系。当电极下降很慢时，电渣过程会过渡到电弧过程。此时，电极的端头是平的，熔滴通常分布在电极端面的边缘(见图4-18a)。当熔滴下落的瞬间，可以观察到电弧放电的现象，此时电渣过程不稳定。当提高电极下降速度时，此时电极端头出现圆锥形凸起(见图4-18b)，熔滴在电极端头的中心部位 (凸起的尖端) 形成。进一步提高电极下降速度，插入渣中的电极圆锥部分的尺寸增加，圆锥的侧表面凹度变小。  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image028.jpg http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image030.jpg  **图4-8 电极熔化特征**  a-电极下降速度低；b-电极下降速度适中；c-电极下降速度过快  再进一步提高电极的下降速度，则电极端部圆锥体的侧表面变成凸形，同时将有一部分电极圆柱体也埋入渣池中。此时，随电极下降速度的增加，还能观察到电流的缓慢增加(图4-19)。  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image032.jpg  **图4-9 电极下降速度与电流的关系**  1-电极直径180mm，U=80V；2-电极直径180mm，U=51V；  3-电极直径100mm，U=51V；4-电极直径80mm，U=51V；  当电极下降速度过快时，将会导致电极端部与金属熔池表面之间由于熔滴断落而发生周期性的电弧放电，因而出现渣池下部沸腾。有时甚至还会出现电极与金属熔池之间短路，使重熔过程不稳定。  总之，在采用大断面电极的电渣重熔时，电极末端应当是正规锥体的形状，这时重熔过程最为稳定。  **4.4.3 重熔金属的凝固**  电渣锭的凝固过程与一般铸锭方法凝固的差别如下：  （1）电渣重熔锭的偏析比其他方法都小；  （2）电渣重熔过程中，在金属凝固的同时，由于自耗电极的继续熔化，可以不断地向结晶器，内补充新的金属液，普通模铸时则不需要；  （3）电渣锭的表面有一层薄渣壳，使其轴向冷却速度远大于径向冷却速度，结晶组织趋于轴向；  （4）电渣锭的结晶组织，不仅与锭表渣壳有关，还与金属熔池的形状有关。  实践证明，自耗电极的下降速度、工作电流、工作电压、渣池深度以及重熔金属的导热性等主要因素影响金属熔池形状的形成。  **4.4.4补缩、脱模及冷却**  补缩：在重熔结束前10~15分钟时进行补缩以保证获得平整没有缩孔的电渣锭，提高金属锭的成材率；  脱模及冷却：熔炼结束后，应待金属锭完全凝固后10分钟，再脱 模操作。通常根据不同钢种以及锭的大小来规定模冷时间。脱模后，合金钢一般均应缓冷，缓冷的方法 有空冷、砂冷、罩冷和坑冷等。     **4.5电渣重熔的冶金质量**  **4.5.1  电渣过程的脱磷、脱硫**  电渣重熔法的脱硫效果较显著，脱硫率一般能达到50～80％，这是电渣重熔法的优点之一。普通炼钢方法，为了使金属能有效地脱硫，必须具备以下条件：  （1）熔渣应具有高的碱度；（2）为使熔渣具有很好的流动性，要求熔渣的温度高；（3）金属与熔渣的接触界面尽可能大。  电渣重熔的脱硫过程，有以下三种形式：  **（1）是炉渣脱硫，即硫从金属中向渣中转移**  其反应式为：    [S]+(O2- )→(S2- )+[O]               （4-12）  反应的平衡常数为： http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image034.gif                  （4-13）  则由4-13可得：      http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image036.gif               （4-14）  如果渣中氧离子的含量越高，金属中氧的活度越低，则硫从金属中转入到渣中的数量就越多。为了使渣中有较多的氧离子含量，可以通过采用高碱度的熔渣来实现。从炉渣脱硫的化学反应式来看，随着硫的脱除，金属中的氧含量应随之增加。  **（2）重熔过程中还进行气化脱硫的反应，即硫从熔渣中向大气转移**  (S2- ) +3/2｛O2｝= (O2-) +｛SO2｝                  （4-15）  此反应的平衡常数为：  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image038.gif               （4-16）  由式4-16可得：     http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj4.files/image040.gif             （4-17）  从 (4-17) 式看出，大气中氧的分压越高，而渣中氧离子的活度越低，则对重熔过程中的气化脱硫有利。以上两个反应过程存在着一定的矛盾。但是，这两个过程是在同一系统内发生的，因此脱硫的最终效果，应是这两个反应相互作用的综合结果。  **（3）金属中[S]从金属中向渣中过渡**  电流和电压极性不同，对金属中硫的去除也会产生一定的效果。如果采用直流反接（即自耗电极接正极），可以使金属中[S]从金属中向渣中过渡，取得较好的脱硫效果。采用直流正接基本上看不出脱硫效果。电渣重熔时，在以上三种脱硫方式中，气化脱硫占有相当的比例。总的来看，采用交流电源和高碱度熔渣在大气下重熔所取得的脱硫效果最好。当采用交流电源时，在氟化物渣系中，以CaF2--CaO渣系的脱硫效果最佳。  关于金属中的脱磷，传统的方法是在冶炼过程中尽力创造 “三高一低”(高碱度，高(FeO)含量，大渣量和较低温度)的条件。但是，在电渣重熔过程中，由于熔渣为非氧化性的，熔池温度又高，因而很难获得良好的脱磷效果。  **4.5.2  电渣重熔过程中非金属夹杂物的去除**  电渣重熔对去除金属中非金属夹杂物十分有效，下表给出滚珠轴承钢经电渣重熔后，非金属夹杂物含量的变化。  **表4-4电渣重熔滚珠轴承钢氧化物夹杂的变化**   |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | | 取样部位 | 试样数 | 视场数 | 视场中氧化物夹杂的平均面积，μm2 | | 自耗电极 | 3 | 36 | 254 | | 电极端部熔滴 | 3 | 38 | 59 | | 滴落的熔滴 | 5 | 51 | 33 | | 金属熔池 | 5 | 63 | 47 | | 重熔钢材 | 5 | 60 | 37 |   **表4-10不同条件下电渣重熔时 [Ti] 的烧损情况**   |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | 锭型 | 气氛 | 炉数 | －△[Ti]，% | | | | 最大 | 平均 | 锭身波动 | | 1.0吨 | 大气 | 6 | 0.47 | 0.22 | 0.46 | | 氩气 | 2 | 0.15 | 0.11 | 0.08 |   **4.6电渣重熔的应用**  **(1) 电渣新应用**  电渣重熔 ESR；电渣熔铸 ESC；电渣浇铸 ESP；电渣转铸 ESMPC；电渣离心浇铸 CESC；  电渣热封顶 ESHT；快速电渣 ESRR；电渣焊 ESW；电渣复合 E.S.Cladding；  电渣喷射成形 E.S.Osprey；电渣直接合金化 Direct ESM；  **(2) 未来电渣产品展望**  I   重熔在中型及大型锻件生产中,将处于垄断地位。  II 在优质工具钢、模具钢、双相不锈耐热钢、含Ｎ超高强钢、管坯、冷轧辊生产领域中占绝对优势,真空电弧重熔在这一领域必为电渣重熔所取代。  III 在超级合金领域(高温合金、耐蚀合金、精密合金、电热合金),电渣重熔与真空电弧重熔处于竞争局面,在80年代末,电渣重熔在产量上已超过真空电弧重熔。许多沿袭真空电弧重熔的均系较老材料,受过去技术鉴定所限制,而新材料电渣占绝对优势。  IV 有色金属生产方面,电渣重熔处于方兴未艾的阶段。 |

|  |
| --- |
| 5 真空电弧重熔 |
| **5.1概述**  真空电弧重熔是在无渣和低压环境下，利用金属电极与被熔化的金属熔池之间产生的直流电弧的高温作用将自耗电极逐层熔化并在电极的端部形成金属液滴，该液滴通过高温弧区进入金属熔池的过程中，被高温电弧迅速加热，使其得到净化和精炼，并在水冷结晶器中凝固。  真空电弧炉可以创造一种低氧势、高温的熔炼条件。所以早在上一个世纪就被用于熔炼铂、钽、钨等难熔的或易氧化的金属。随着机械工业的发展，真空自耗电弧重熔法成功地应用于钛及钛合金、精密合金、高温合金和难熔金属的生产，所以在20世纪40～50年代得到了迅速发展，容量日趋大型化。在特种熔炼中，真空电弧熔炼是重熔精炼的主要方法之一。真空电弧熔炼示意图如图5-1所示。  hw052tu  图5-1真空电弧炉  1-铜结晶器;2-操作台;3-光学观察系统;4-电极升降装置;5-电极杆;  6-炉体;7-电极;8-真空系统;9-电弧;10-锭子;11-电控线圈;  真空电孤炉分自耗和非自耗两大类。后者是指这种真空电弧炉所用的电极是一种耐高温的导体，常用的有钨或石墨等，被熔炼的金属放在结晶器中，依靠电弧的热量将这些金属熔化并得到精炼。在熔炼过程中，电极本身不消耗或消耗很少，所以称为非自耗。自耗电弧炉是将被熔炼的金属做成电极，在燃弧过程中，电极以一定速率熔化并得到精炼，所以这种类型的电弧炉称为自耗电弧炉。由于生产钢和合金的真空电孤炉绝大多数是自耗电弧炉，所以在以后的各节中，若无注明，均指自耗电弧炉。  **5.2真空白耗电弧炉的结构简介及分类**  **5.2.1结构简介**  真空自耗电弧炉的型式有多种多样，但它们的基本结构是相同的。图5-1为真空自耗电弧炉。真空自耗电弧炉成套设备包括电炉本体、电源设备、真空系统，电控系统、观测系统、水冷系统等几个部分。真空电弧重熔原理图和自耗电极真空电弧炉结构示意图见图5-2和图5-3。   |  |  | | --- | --- | | http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj5.files/image004.jpg  图5-2  真空电弧重熔原理图  1－金属自耗电极；2－气相区；3－弧柱区；  4－金属熔池；5－金属锭 | http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj5.files/image006.jpg  图5-3  自耗电极真空电弧炉结构示意图  1－负极；2－电极供给机构；3－连杆；4－真空滑动密封套；5－炉体；6－夹头；7－短棒；8－自耗电极；9－铜坩埚；10－铸锭；11－水套；12－正极；a－冷却进水；b－冷却出水；c－去真空泵 |   **5.2.2 真空电弧自耗电弧炉的分类**  炉的种类很多，可以按照电弧炉的不同特征进行分类。按炉体结构形式可分为固定式和旋转式两种。按铸锭的形式可分固定铸锭式和抽锭式两种按作业形式，可分为间歇式和连续式两类。  **5.3钢和合金的重熔工艺**  **5.3.1重熔工艺过程**  弧重熔过程可分为焊接电极、引弧、正常熔炼和封顶四个时期。  **焊接**是在真空或保护性气氛下进行。在自耗电极被焊接的一端铺上一层引弧剂(一般用同品种的车屑)，然后下降电极杆，使过渡电极与自耗电极之间燃弧，当燃弧的两个端面被加热，并电弧稳定，有较多的液相形成时，迅速下降电极杆，使燃弧的两个端面紧密接触而焊合在一起。  **引弧**的作用就是让自耗电极与结晶器底部的引弧剂之间形成电弧，提高弧区温度和在结晶器底部形成一定大小的金属熔池，保持自耗电极与金属熔池之间形成稳定的电弧，使自耗电极的重熔转入正常的熔炼期。  **正常熔炼**期是重熔过程的主要时期，在这期间钢或合金被精炼和凝固成锭，即脱除金属中的气体及低熔点的金属杂质，去除非金属夹杂，降低偏析程度以及获得理想的结晶组织。  **封顶**的目的在于减小重熔锭头部缩孔，减轻头部“V”形收缩区的疏松程度，以及促进夹杂物的最后上浮和排除，减少切头量，提高成材率。  **5.3.2工艺参数**  **(1)自耗电极的直径**  自耗电极的直径直接影响着重熔锭的质量。当直径较大时，电弧热能均匀地分布在整个熔池表面，所以熔池呈扁平状。这样，容易获得成分偏析小，铸态组织致密，柱状晶取向有利于改善热加工性能(柱状品的结品方向与锭的轴线问夹角小)的重熔锭。通常用下式来选择电极的直径：             d/D=0.65～0.85                        (5-1)  式中：d—自耗电极的直径，mm；             D—结晶器的直径，mm；  对于钢或合金，目前d/D一般在0.7～0.8范围内选择。锭型较大时取上限，反之取下限。      另外，也可以根据下式凭经验来确定电极的直径：d=D-2δ   (5-2)  式中：δ—电极与结晶器之间的距离，mm。  当电极为多面柱体时，则值表示电极的棱与结晶器内壁之间的距离。确定δ值时，必须保证大于正常熔炼时电弧的长度，以消除产生边弧的危险。在重熔有色或难熔的金属和合金时，特别是第一次真空重熔(放气量大)时，为了充分排除气体和安全操作， δ值应该比重熔钢时选择得更大一些。一般情况下，δ值在25～50mm范围内选取，大型锭取上限。  **表5-1确定熔炼电流的经验公式**   |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | | 公  式 | 单位 | | 适用范围 | 备注 | | i或I | d或D | | http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj5.files/image008.gif http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj5.files/image010.gif | i  A/cm2 | d  mm | 钢、合金钢铁基或镍基合金 | i-电流密度  I-熔炼电流  d-自耗电极直径  D-结晶器直径 | | http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj5.files/image012.gif | I  A | D  mm | 钢、合金钢  D=145～150  d/D=0.7～0.8 | | http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj5.files/image014.gif | I  A | d  mm | 钢\铁基或镍基合金  d=10～300  d/D=0.65～0.85 |   **(2) 真空度**真空度对重熔过程中的脱氧、去除气体、元素挥发、夹杂物的分解和去除，以及电弧的行为和安全操作均有着直接的影响，因此，真空度是一个十分重要的工艺参数。为提高精炼效果，要求提高熔炼室的真空度，但是为了稳定电弧，真空度就不宜太高，特别是应该避开会引起辉光放电的压力范围。熔炼室的压力宜保持在1.3Pa左右。  **(3) 电流**熔炼电流决定着自耗电极的熔化速率和熔池温度。电流大，电弧温度就高，电极的熔化速率就大，重熔锭的表面质量好。但是，熔池温度也高，熔池的深度增加，重熔锭凝固时的结晶方向趋于水平，从而使重熔锭的疏松发展，成分偏折增加，各向异性加剧，热加工性能变差。熔炼电流小时，虽熔化速率低，但金属熔池形状浅平，结晶方向趋于轴向，从而保证了重熔锭致密、偏析小、树枝晶之间的夹杂有条件上浮排出，所以锭中夹杂细小弥散分布。选择熔炼电流还应考虑到电极直径、锭型的大小、所炼产品的物性(熔点、成分、黏度、导热性等)。表5-1给出选择熔炼电流的经验公式。  **(4) 电压**在电流一定的条件下，电弧电压决定了电弧长度。电弧长度控制过短(例如小于15mm)，易产生周期性的短路，使熔池温度忽高忽低，从而影响了重熔锭结晶组织的均匀性和锭的表面质量。电弧过长，使热量不集中，熔池热分布不均匀，也会影响重熔锭结晶组织的均匀性，并且使出现边弧的危险性增大。在真空电弧炉熔炼中，电弧长度的控制基本一致。目前，大都将电弧长度控制在22～26mm范围内，相应的电压为24～26V，这时的δ值应大于25mm。  **(5)熔化速率**单位时间内自耗电极被熔化且进入结晶器的金属液的千克数，常用单位是kg/min。熔化速率(*V*)可以用与自耗电极升降相联动的标尺在单位时间内下降的距离(*S*，mm/min)来确定。计算公式为：  *V*=*K·S*   (5-3)  式中的*K*称为熔化速率系数，kg/mm，即白耗电极每下降lmm所熔化的自耗电极千克数。K值可由电极的下降和液面的上升之间的质量平衡而导出。  **(6)漏气率** 真空系统的漏气率E是指单位时间内炉体外的空气渗入真空室内的数量，单位是μmHg.L/s。漏气率对重熔金属的质量有较大的影响，特别是对难熔或含有活泼元素的合金影响更大。漏入真空系统内的气体，使真空室内氧、氮、水汽的分压提高，使重熔金属中氧化物和氮化物夹杂数量增加，从而使合金的持久强度和塑性下降。因此，真空电弧重熔要求设备漏气率控制在≤6.67Pa.L/s，在熔炼难熔金属及其合金时，要求E=0.400～0.667Pa.L/s。  **(7) 冷却强度** 结晶器的冷却强度影响重熔锭的凝固过程和铸态组织。在实际生产中冷却强度受到冷却水的流量、压力、进出水的温度，以及锭型、锭重、钢种、结晶器的结构、熔炼温度等因素的影响。由于影响因素较为复杂，在操作中常根据经验调  节冷却水的流量，使进、出水温度在要求的范围内，同时保持凝固速率与熔化速率相一致，金属熔池的形状保持稳定。  对结晶器出水温度的要求为：底结晶器进、出水温差小于3℃；上结晶器进、出水温差不小于20℃，出口水温在45℃～50℃范围内。  **5.4 真空电弧重熔常见的冶金质量问题**  **5.4.1 钢和合金的宏观缺陷**  常见的宏观缺陷主要是重熔锭的表面质量不良和裂纹。  **(1)重熔锭表面质量不良**真空电弧重熔的特点是在低压环境中无渣操作，重熔后的金属液在水冷结晶器中较快地凝固，因此会造成重熔锭表面结疤、夹渣、重痕和翻皮等表面缺陷。  **(2)裂纹** 重熔锭在热加工过程中或者在成材以后，在坯或材上有时会存在裂纹。根据其成因，可将裂纹分为：表面裂纹、余缩孔导致的裂纹、晶间裂纹。  **5.4.1 钢和合金的微观缺陷**  **(1) 疏松**凝固时，由于体积收缩，树枝状晶之间得不到金属液的补充，而导致晶间的显微孔隙称为疏松。克服这种缺陷的办法是选择合理的起弧工艺制度，在此阶段短时间提高输入功率(熔炼电流要比正常时提高10～20％，以提高熔池温度，和使金属熔化速率大于凝固速率。  **(2)偏析** 选分结晶是造成偏析的根本原因。影响选分结晶的诸因素，如成分、锭型、锭的大小、熔化速率、熔池形状、凝固速率、磁场的大小等，均影响偏析的发展与否  **5.5真空电弧重熔的特点**  (1) 低压环境中进行熔炼，不仅杜绝了外界空气对合金的污染，还可以降低钢和合金中的气体含量和低熔点易挥发的有害杂质的含量，从而提高合金的纯洁度。  (2) 重熔过程中铝、钛等活泼元素烧损少，合金的化学成分控制较为稳定。  (3) 熔炼是在无渣、无耐火材料的环境下进行的，这样就避免了这两方面来源的外来夹杂对合金的玷污。  (4) 改善夹杂物类型和分布状态。  (5) 这种熔炼方法的凝固条件，可以保证得到偏析程度低，致密度高的优质重熔锭。  (6)电弧的高温允许重熔一些高熔点的金属和合金。  (7)合理的封顶工艺制度可使重熔锭头部的缩孔趋于最小，且最后的收缩区的结晶组织可以较接近于锭身，从而提高了成材率。  (8)真空电弧重熔过程中的气氛可以控制。  (9)与电渣重熔相比较，重熔锭表面质量较差，致密度较差，缩孔还不能完全消除。由于表面质量差，通常重熔锭要扒皮，这样使金属的收得率降低。  (10)去除硫和夹杂物不及电渣重熔有利。  (11)对于高温合金而言，真空电弧重熔锭的热加工性能较差。  (12)真空电弧重熔含有锰等易挥发元素的合金时，其成分控制较为困难。如重熔GCrl5时，钢中锰的挥发损失可达15～18％，且挥发的锰均凝结在结晶器的内壁，使重熔锭表面含锰量过高，热加工前必须经扒皮处理。  (13)设备复杂，维护费用高，致使合金的生产成本提高。  **5.6 真空电弧炉生产的品种**  （1）难熔活性金属及其合金如：W、Mo、Ta、Nb、Zr、Hf、Ti和U等。  （2）特殊合金：高温合金和精密合金。  （3）特殊不锈钢和耐热钢。  （4）重要的结构钢，特别是大型铸造用锭。  （5）高级滚珠轴承钢。  （6）大断面高速钢、工具钢。  （7）高纯度有色金属及其合金。 |

|  |
| --- |
| 6 等离子熔炼 |
| **6.1 等离子熔炼的特点**  等离子体是一种强有力的高温热源，它不仅广泛地用于焊接、切割、喷涂、化工以及宇航事业的某些试验，而且还用于冶金工业，即等离子体熔炼。  等离子体熔炼，就是利用等离子弧作为热源，既可熔炼金属材料，又可熔化非金属材料。在60年代初应用到冶金领域，主要用于金属材料的精炼以及熔炼高纯度和特殊性能的钢与合金，尤其是高温合金和精密合金的生产。  **6.1.1等离子体的产生及等离子弧的特点**  等离子弧具有以下特点：  1) 等离子弧的温度高。  2) 等离子弧的导电能力强  3) 等离子弧的流速高。  4) 等离子弧燃烧稳定。  **6.1.2 等离子熔炼的优越性**  等离子熔炼炉不仅能生产合金钢与合金，而且还能熔炼一些难熔的金属和活泼金属，如W、Mo、Nb、Ta、Zr、Ti等。这种设备之所以在技术上得到不断改进与提高，发展十分迅速，而且在经济上有很强的生命力，是因为它具有如下优点：  (1) 熔化速度快，热效率高。   (2) 去除气体和非金属夹杂物较充分。  (3) 合金元素烧损小。  (4) 工作电流、电压稳定。  (5) 可以在不同的气氛、压力下工作。等离子熔炼时，根据不同工艺要求，炉内可选用不同压力以及不同的气氛(如还原性、惰性等)。  (6) 可造渣精炼。等离子炉不仅可采用精料熔炼，而且还可以利用粗料，甚至硫含量较高的炉料。  (7) 避免增碳的可能性。  (8)元素蒸发量较小。等离子熔炼与其他几种熔炼方法(如真空电弧熔炼、真空感应熔炼以及电子束熔炼等)不同之处是在：熔池上方有气氛压力，因而金属中元素的蒸发量较小。  (9)可使金属渗氮。  (10)设备较简单，易于调节温度。与真空炉相比，等离子炉设备简单，其弧温比较易于调节。  (11)重熔炉料的范围较广。与真空电弧炉相比，等离子重熔炉不仅能重熔棒料，还可以重熔块料。  **6.2 等离子熔炼**  按照加热方式，等离子熔炼主要包括等离子电弧熔炼、等离子感应炉熔炼、等离子电弧重熔、等离 文本框:   图6-1 等离子感应炉 1-等离子枪；2-窥视孔；3-出钢口；4-感应线圈； 5-坩埚；6-炉底电极；7-炉壳；8-等离子弧；9-等离子喷嘴10-合金加料漏斗 子电子束熔炼等。  （1）等离子电弧熔炼（Plasma Arc Melting，简称PAM）利用等离子弧的超高温及惰性气氛，在耐火材料坩埚中熔炼难熔金属及活泼元素。合金的回收率高，可有效脱碳，合金的纯洁度高。  （2）等离子感应熔炼（(Plasma Induction Melting，简称PIM）是利用等离子弧的超高温及惰性气氛以及感应加热及电磁搅拌作用而组合的炉子，可以有效地脱硫、去碳、去气。对易挥发元素的控制也有优势。  （3）等离子电弧重熔（Plasma Arc Remelting，简称PAR）是在惰性气氛下利用等离子弧的超高温熔融金属和炉渣，在水冷结晶器中凝固，可以获得良好的冶金效果。  （4）等离子电子束重熔（Plasma Electron-beamRemelting，简称PER）在低真空下，利用氩气等离子弧加热钽阴极，使其发射热电子，热电子在电场作用下，撞击阳极金属炉料，并在水冷结晶器中凝固，能够熔炼海绵钛及难熔金属.  文本框:   图6-2 等离子电弧炉 1-等离子枪；2-炉盖；3-辅助阳极；4-出钢口；5-搅拌线圈；6-炉衬；7-水冷阳极；8-钨阴极；9-等离子弧； 10-炉门；11-金属液；12-渣液； **6.2.1 等离子感应炉熔炼（PIM）**  等离子感应炉是由普通感应炉和等离子弧加热装置组合而成，由于在感应炉中增加了一个等离子热源，同时还可采取有渣熔炼，并使渣池温度高达1850℃左右，形成高温、活泼的熔渣，为降低金属中的硫含量创造了条件，因此避免了普通感应炉的冷渣和无保护气氛的缺点，显著地提高了感应炉的精炼能力。  等离子感应炉通常在常压条件下工作，若因工艺的需要，也可以在负压下工作。  为了得到含[N]较高的金属，等离子感应炉可利用不活泼气体N2或N2+Ar为工作气体，通过氮气流形成等离子弧的同时进行合金化，使金属中氮的含量增高。有时为了使钢液脱碳，有的厂还在等离子感应炉中采用空气为工作气体。  这种熔炼设备还有一个重要特点，就是它可以进行有渣或无渣操作。当熔炼工艺需要采用有渣操作时，可完成脱硫、脱氧、脱碳等任务；而在采用无渣操作时，金属液面被高温等离子弧直接加热。  等离子感应炉如图6-1所示，由如下4部分组成：等离子感应炉炉体；感应炉电源；等离子枪；等离子弧发生电源。  等离子感应熔炼在脱硫，去除非金属夹杂物和减少钢与合金中的气体含量等方面，接近或超过真空感应炉熔炼的水平，是一种非常有竞争力的特种熔炼方法。  **6.2.2 等离子电弧熔炼 (PAM)**  等离子电弧炉利用等离子弧的超高温及惰性气氛，在耐火材料坩埚中熔炼难熔金属及活泼元素。合金的回收率高，可有效脱碳，合金的纯洁度高。  图6-2为等离子电弧炉，它的外形与普通电弧炉相似，设有炉盖2、炉门l0、出钢槽4等，还配有电磁搅拌设备5、等离子喷枪1和炉底阳极7等。为防止炉气的污染，等离子电弧炉也可以做成密封式。  喷枪均由水冷铜喷嘴以及水冷铈钨极(或钍钨极)组成。喷嘴与铈钨阴极之间绝缘，并允许氩气流过。氩气是从喷枪上部经喷枪套管流向炉内，并电离成等离子体。炉体是由耐火材料砌成，而在炉底的中心部位，埋有一根石墨棒(或钢—铜质水冷棒)作为炉底阳极。通电时，炉底阳极与直流电源的正极相连接。  由于等离子孤的弧温高，热量集中，而且这种电弧所引起的熔池搅拌也较微弱，将会引起熔池内金属局帮过热，而在炉底，有时还会出现未熔他的块料。为了使熔炼过程中金属能得到充分地搅拌，使焙池温度和化学成分均匀，在炉底的耐火材料外层装有两个水冷铜管线圈，工作电流通过是产生磁场，搅拌金属液。  文本框:   图6-3 等离子电弧重熔 1-等离子枪；2-密封圈；3-料棒；4-金属熔池；5-金属锭；6-抽锭系统；7-真空系统；8-炉膛；9-电源；10-结晶器； 对于非密封式的等离子电弧炉，要造一定数量的熔渣覆盖金属液面，以防止氧化、吸气等。若有脱硫任务时，可造碱性炉渣，还可采用换渣操作，以使硫达到合格范围。      等离子电弧炉所显示的精炼效果十分明显，用它来熔炼的钢与合金的品种也不少，如高速工具钢、耐热钢、滚珠轴承钢、超低碳不锈钢、精密合金和高温合金等。  等离子电弧炉除熔炼合金钢之外，还能用来冶炼铁合金   在炼钢过程中，当废钢熔化后，由于金属熔池对炉壁的辐射增强，加速了炉衬耐火材料的损坏。为了延长炉衬寿命，有的将电弧炉仅作为熔化设备，而将钢液的精炼任务放到钢包内进行。为了在钢包内加热钢液，参照等离子电弧炉的工作原理，发展了等离子钢包加热设备。如当今美国建造的容量为220t等离子钢包二次加热装置；德国克鲁伯钢厂的150t等离子钢包加热炉，并在此钢包炉上装有l2kA的交流等离子枪。  **6.2.3等离子弧重熔(PAR)**  等离子弧重熔法是在惰性气氛或者可控气氛中，利用等离子弧来熔炼金属的特种熔炼方法，也可以说是一种金属的重熔工艺。重熔过程中，被熔化的金属熔滴穿过熔渣层，在结晶器内凝固。它与真空自耗电弧重熔和电渣重熔一样，边熔炼、边结晶，即金属的熔炼与浇注同时进行。被重熔的金属料可以是棒料，也可以是块料。当采用棒料时，等离子弧直接射向棒料而使它熔化。  根据金属锭的质量大小，等离子重熔法可采用单枪操作或多枪操作。若采用单枪操作时，等离子枪则垂直地安装在炉膛中心，而料棒则从炉体侧面的装料孔伸入到炉膛内(图6-3)。若采用多枪操作时，料棒从炉子的正上方伸入炉内，而等离子枪(4～6支)从炉子的侧壁伸入，并倾斜地布置在料棒的四周。  在重熔块料时，为了使炉料能迅速而完全熔化，炉料应经过漏斗槽加入到熔池的中央部位。等离子弧重熔炉的炉壳，通常采用不锈钢的双层结构，中间通水冷却。结晶器安置在炉膛底部中央，电源的一端与等离子枪中的电极相连，另一端是通过凝固的金属锭与熔池相接。  重熔前，先将炉内抽成真空，采用Ar气为等离子喷枪的工作气体。工作时，一面进气到炉膛内，一面将炉内的气体抽出，并保持炉内一定压力。  等离子弧重熔与等离子电弧炉、等离子感应炉相比，不同之处是前者采用水冷结晶器，使熔炼与结晶同时进行。并且由于等离子弧的高温，可以在金属熔池上形成渣池，锭表面上形成一薄层渣壳，因而使所得的金属锭具有良好的铸态组织。重熔过程中，有Ar气保护，因此金属的化学成分波动很小，并且气体和非金属夹杂物的含量均很低,等离子重熔钢的夹杂总量和氧含量仅次于电子束重熔法。  目前，这种熔炼方法可以用来熔炼滚珠轴承钢、合金结构钢、耐腐蚀钢、含氮合金钢、难熔金属及其合金、高温台金、精密合金和活泼金属等。 |

|  |
| --- |
| 7 电子束炉重熔 |
| **7.1概述**  电子束熔炼（Electron-beam Melting）技术是利用高能量密度的电子束在轰击金属时产生高温使金属熔化的冶金方法。目前，电子束熔炼技术在多个领域都得到了应用，主要用于稀有金属、贵金属以及难熔金属材料的熔炼、提纯以及回收重熔，还可以用于制取半导体材料和难熔金属及其合金的单晶等。电子束重熔法（Electron-beamRemelting）是在高真空度的条件下，利用电子枪发射出高速的电子束作为热源轰击被精炼的金属料，将电子束所具有的动能转化为热能，从而使金属熔炼、提纯的一种熔炼方法。金属被熔化成金属液滴并在水冷结晶器中凝固成型。电子束熔炼是在高真空状态下进行，熔炼时过热温度高，维持液态时间长，使金属的精炼提纯作用得到充分有效进行，可以脱气、脱氧、挥发去除金属杂质。在下引铸锭过程中，不熔杂质上浮富集在锭头顶部，高熔点金属富集在外表面，去掉铸锭顶部及精整去掉外表皮可得到高纯的金属铸锭。电子束熔炼炉设备示意图见图7-1。   |  | | --- | |  | | hw058tu |   **图7-1 电子束熔炼炉**  1-油扩散泵；2-机械泵；3-罗茨泵；4-车间地面；5-操作平台；6-装料阀门；7-料棒推送机构；  8-料棒；9-电子束偏转系统；10-电子枪；11-电子枪真空接口；12-电子束；13-熔炼室；  14-结晶器；15-水冷锭模座；16-锭车；17-拖锭机构；18-拖锭机构架；  电子束重熔法从熔炼难熔金属(钽、铌、铪以及钨、钼等)开始，现已扩展到生产半导体材料和高性能的磁性合金以及部分特殊钢，如滚珠轴承钢、耐腐蚀不锈钢、以及超低碳纯铁等。此外，电子束重熔炉还能用来熔炼某些耐热合金，特别是以铌或钽为主的含钨、含钼的合金。据报导，前苏联还曾用电子束熔炼炉来熔炼铜和镍。电子束熔炼法除用于钢和合金等金属材料的熔炼外，还可用它来熔炼不同性质的陶瓷和玻璃。  电子束熔炼技术特点可以归纳如下：  (1) 由于电子束熔炼是在真空中进行的，材料的熔融状态可以随时控制，因此可以获得高纯难熔材料。  (2) 电子束能量密度较高，其能量密度调节方便，可通过对电子束的聚散来控制调节熔池表面能量分布，因此，可用于熔炼难熔金属。  (3) 容易实现自动化控制、安全、可靠.特别是现代计算机技术、电子技术、自动化技术的应用，更容易实现对难熔材料的提炼及获取高纯材料。  (4) 容易精确控制熔料的化学成分，能得到一定性能要求的稀有难熔和高纯金属材料。  这种重熔法的不足之处在于生产率低，设备结构比较复杂，需应用高压直流电源，设备投资费用高。所以这种熔炼方法难以成为特种熔炼的主要方法。如从生产费用方面分析，电子束重熔法是最高的，若以普通熔炼方法熔炼特殊钢的费用为l，则其他熔炼法熔炼同容量、同钢种的费用分别为：电渣重熔法1.75，等离子电弧重熔2.03，真空电弧重熔2.4，电子束重熔2.72。  **7.2 电子束重熔的基本原理**  电子束重熔法的工作原理与真空二极管相似，即阴、阳两极置于一个真空室内，分别连接在直流电源的负极和正极上。当阴极用其他电源通电加热后，温度提高，在阴极材料中有自由电子因受热而被激发逸出。若此时的阴极和阳极被接通一定电压的直流电源，则激发出的电子就处于一定强度的电场作用下，被加速并射向阳极。在电子束重熔炉中，借此高速的电子流轰击阳极金属料，将电子的动能在阳极上转换成热能，从而加热和熔化阳极。其熔炼的工艺原理如图7-2所示。  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj7.files/image004.jpg  **7.3 电子束重熔炉的主要设备**  电子束重熔炉由炉体、真空系统和电气系统等三部分组成，熔炼设备的原理图见图7-3。  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj7.files/image005.gif  图7-3 电子束熔炼设备原理图  1-电子束发生系统；2-真空阀；3-真空系统；4-聚焦、偏扫系统；5-工作室；6-工件；7-高压电源；8-磁透镜电源；9-偏转线圈电源；10-控制系统  文本框:   图7-4 轴向枪内部结构 1-绝缘瓷瓶;2-真空抽气口;3-灯丝；4-块状阴极；5-加速阳极；6-冷却水；7，9-聚焦线圈；8-电子束；10-导管；11-偏转线圈 本节只就炉体的主要部分介绍如下，炉体的核心部位是电子枪。除此之外，还有真空室外壳、结晶器、进料和抽锭机构。  7.3.1电子枪      电子枪是电子束重熔炉产生电子束的关键设备。它的结构形式很多，有轴向枪、横向枪、环形枪等。目前应用轴向枪较多。  轴向枪的它的外形像一个直筒，内部结构见图7-4，电子枪原理图见图7-5，电子枪的三维模拟结构模型见图7-6。电子束由块状阴极发射出，经过阳极的加速，以及聚焦线圈的聚焦，并且在偏转线圈的控制下，使电子束按所需要的方向，以极高的速度射到被加热的金属料上，使金属料熔化。  它是由电子束发射元件、聚束阴极、加速阳极、离子捕集器、电子束聚焦系统和电子束偏转系统等部分组成。电子束发射元件是由加热阴极3和发射阴极4两部分组成。加热阴极是钨丝绕成的双螺旋形，当用40～50A(电压5V)的交流电通过钨丝时，钨丝可加热列2800℃，在加热阴极和发射阴极之间加上1500V的直流电压。在此条件下，从钨丝发射出热电子，在外加电压的电场作用下，撞击发射阴极。  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj7.files/image009.jpg  图7-5 电子束的产生和形成原理  1-灯丝加热电源；2-灯丝；3-偏转线圈电源； 4-加速电压电源；5-聚焦线圈电源；6-电子束；7-聚焦线圈；8-阳极(接地)；9-阴极  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj7.files/image010.gif  图7-6  电子束轰击炉电子枪的三维结构模型图  1-引线座；2-电子束发生系统；3-三通连接管；4、5-第一、第二磁透镜；6-真空阀；7-磁偏扫系统  **7.3.2结晶器**  电子束炉的结晶器与真空电弧炉的结晶器相似，用紫铜制成，并通水冷却。结晶器的底部有固定式和活动式(用于抽锭)两种。并且根据金属成品的不同要求，结晶器的内腔截面可制成圆形、环形或矩形。  **7.3.3进料装置**  电子束炉是一种边熔化边凝固的设备。当金属料棒不断熔化时，应随即将未熔化的料棒推向电子束轰击区。料棒的推进机构多为机械传动。进料装置有纵向和横向两种型式，横向还有两侧双向交替进料的型式。  **7.3.4抽锭机构**  对于底部活动式的结晶器，需安装抽锭机构。这是因为当结晶器内金属不断凝固时，为了使熔池液面始终保持一定的高度，已凝固的金属锭需要不断地向下抽引。电子束炉的抽锭机构可采用机械传动和液压传动两种。  **7.4 电子束重熔工艺及其冶金特点**  **7.4.1电子束重熔工艺**      （1）开炉前，应对炉子各部位认真检查，以免由于设备中的隐患而使熔炼过程中造成事故或热停工抢修。另一方面应准备好被重熔的炉料。  （2）熔炼前，将结晶器和棒料安装好，随后密封炉体，抽真空。当炉内真空度达到(1～3)×10mmHg(0.00133～0.00399Pa)时，再开始送电加热阴极，并同时通水冷却。  （3）开始送电时的功率不宜太大，当结晶器内已有一定数量的金属液，并且金属熔池有一定深度以后，再逐渐加大功率，达到正常的熔炼速率。  （4）重熔过程中，应特别注意防止电子束打在结晶器壁上而损坏结晶器，以致造成事故。重熔时，应根据金属熔池的液面高度来判断抽锭开始的时机，并且还应始终注意抽锭速度与金属熔化速率之间的配合。  **7.4.2电子束重熔的冶金特点**  电子束重熔法是在高真空和高温的条件下使钢或合金获得净化精炼的一种熔炼方法。它与钢和合金的其他特种熔炼方法相比，有以下特点：  (1) 电子束重熔是在很高的真空度(可达～0.00133Pa)下进行。它比真空感应炉、真空电弧炉的真空度要高得多。因此对于金属中的气体、非金属夹杂以及某些有害元素的去除要完全和彻底得多，净化精炼反应的速率也较其他真空炉来得高。  (2) 在重熔过程中能对熔化炉料的功率和加热熔池的功率分别进行调节，因而当熔化速率改变时，仍可使熔池保持所需要的温度  (3) 由于射到阳极上的电子束释放出很高的能量，使金属熔池能达到很高的温度(熔池表面温度可达1850℃)，这不仅有利于重熔过程中精炼反应的进行，并且可用于熔炼钽、铌、钨、钼等高熔点金属。  (4) 电子束的可控性好，所以可通过控制电子束来控制熔池的加热部位，从而保证熔池温度分布均匀。这将有村于得到表面质量和结晶组织优良的金属锭。  (5) 电子束炉不仅能熔化料棒，还可设计成能熔化块状、屑状或粉末状的金属料。  **7.5 电子束重熔的效果**  电了束重熔材料具有很高的品质，可以把低熔点易挥发元素含量减少到非常低。主要可以用于以下金属的熔炼和提纯：生产具有光滑表面和足够塑性的冷加工用钛、镍铸锭；生产最高纯度的钨、钼铸锭；与真空电弧熔炼的铅相比，重熔的铅具有更高的纯度，可要用于核潜艇反应堆的控制元件；精炼的钒锭可要用于制造核潜艇反应堆零件。  电子束熔炼，钢的主要优点是金属和非金属杂质以及杂质元素极大减少，采用连续流熔炼或冷床精炼特殊钢和超耐热合金，可以大大减少生产成本。  **7.5.1金属中气体和夹杂的去除**  电子束熔炼的最大特点是可以较长时间保持高真空、高温和液态金属，因此对气体、杂质元素以及其低价氧化物的去除十分有利。通过对不同材料的试验，也证明了经电子束重熔后所得材料的纯度最高，从而可使金属的性能大大改善和提高。电子束重熔法不仅对和合金有很好的除气能力，对纯金属也是如此。对于某些特殊用途的金属，甚至可通过多次重熔的办法，使金属达到更高的纯度。  重熔后金属中的气体含量除与重熔次数有关外，还与每次重熔的时间有关。延长重熔时间可显著地降低金属中氧和氮的含量。但是重熔时间延长，即表示熔化速率降低，这将降低生产率和增加生产成本，因此应当综合考虑。  电子束重熔法对去除金属中的非金属夹杂也有较为理想的效果。  **7.5.2金属性能的改善**  由于电子束重熔法能大幅度降低金属中的气体和夹杂物含量，加之凝固条件改善，使重熔金属的性能明显改善。据报导，耐热合金经电子束重熔后，其金属中的氮、氢、氧的含量分别降低60～70％、40～50％、70～80％，合金性能显著改善。当电子束重熔合金结构钢时，若与普通熔炼方法相比较，其材料的延伸率提高了35％，断面收缩率提高65％，各向同性系数从0.6提高到0.9。 |

|  |
| --- |
| 8 冶炼工艺路线的对比与选择 |
| **8.1 典型膨胀合金熔炼工艺**  膨胀合金是指与玻璃或者陶瓷材料进行封接的一类合金，该类合金国内有29个牌号、多种规格。与玻璃封接的主要有4J29、4J49、4J52、4J54、4J6等，与陶瓷相封接的主要有4J33、4J34等，其中4J29属于定膨胀合金，是在－60℃～＋400℃范围内具有一定线膨胀系数的合金，用来和硬玻璃进行匹配封接，是电真空工业中广泛使用的封接结构材料，其用量比较大，单国内需求量每年在数百吨之多，产品的主要供货方式为带材。  4J36为低膨胀合金，是在0℃～＋100℃和－60℃～＋100℃范围内具有很低膨胀系数的合金，用来制造在气温变化范围内尺寸近似恒定的元件，广泛应用于无线电工业、精密仪器、仪表及其他工业。  **8.1.1膨胀合金相关标准**  部分牌号的膨胀合金成分要求以及相关指标如表8-1、8-2、8-3和8-4所示。  **表8-1  膨胀合金成分要求**  目录  **键入章标题(第 1 级)1**  键入章标题(第 2 级)2  键入章标题(第 3 级)3  **键入章标题(第 1 级)4**  键入章标题(第 2 级)5  键入章标题(第 3 级)6  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj8.files/02.jpg  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj8.files/03.jpg      **8.1.2膨胀合金4J36相关标准冶炼**  膨胀合金的产品形式主要有丝、带、管、棒等，应用比较广泛的为带材，生产所用的主要设备有电炉、锻锤(3~5t)、带坯机、退火炉、矫直机、水磨机、氩弧焊、四辊(多辊)冷轧机以及连续退火炉、表面处理设备等。  **8.2 典型软磁合金熔炼工艺**  铁镍系合金从19世纪最初的发现到随后20世纪的系列试验研究，以及真空冶炼的采用，使合金的特性得到了较大的提高。随着研究的深入和实际应用的需要，在二元系中加入了钼、铜、铬等其他元素，并因此创造了著名的超坡莫合金、具有较高的初磁导率铜坡莫合金，以及具有较高电阻率的铬镍铁合金等一系列材料。其中两个基本的参数是：磁晶各向异性常数K和磁致伸缩常数λ，他们决定着合金的技术磁化过程，决定着合金的磁性。  铁镍系软磁合金。这类合金的特点主要有：在弱(或中)磁场下又很高的导磁率和极小的矫顽力；又很好的加工性能，可以制作成形状复杂的器件；有较好的防锈性能；有些材料经过特定的加工后，具有特殊的磁性能如磁矩形磁滞迥线，很低的剩磁，或在相当宽的磁场范围内保持恒导磁率等。  **8.2.1相关合金的化学成分**  部分典型软磁合金的化学成分要求表8-5。  表8-5  软磁合金的化学成分(%)http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj8.files/04.jpg  **8.2.2 软磁合金1J86合金的性能特点**  1J86合金主要含镍81％和钼6％，该合金比1J77和1J85具有更高的μi和更低的Hc,μm值接近。合金中由于含有6％的钼，电阻率较高，这就改善了较高频率下的磁性能。为了获得更高的静态磁性，合金中不加硅、锰，他们对磁性能的影响不如镍、钼明显。而合金中加入1％的锰和少量的硅，是为了改善合金温度稳定性和热加工性。软磁合金的生产工艺典型的生产工艺如图8-2：  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj8.files/image009.jpg  图8-2 软磁合金的生产工艺典型的生产工艺  **8.3高温合金熔炼工艺**  **8.3.1相关合金的化学成分**  部分典型高温合金的化学成分要求表8-6。  **表8-6 典型高温合金成分http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj8.files/05.jpg**  **8.3.2高温合金熔炼工艺**  为了使高温合金具有所需要的耐高温、抗腐蚀的性能，合金必须具有一定的化学成分、纯净度以及合适的组织结构，而合金的成分及纯洁度取决于熔炼技术。因此熔炼工艺是高温合金生产过程的关键环节。  高温合金由于合金化程度很高，含有大量的钨、钼、铌、铬等密度大的元素和易氧化元素铝、钛、硼等。这些特点决定了高温合金对冶炼的工艺要求较严，一般采用真空冶炼。目前多数合金在真空感应炉或常压感应炉熔炼后，再经过真空自耗炉电渣炉重熔，以改善纯洁度而获得良好的组织和性能。  国内外冶炼高温合金的设备有电弧炉、感应炉、真空感应炉、真空电弧炉和电渣炉，此外还有电子束炉和等离子炉等。  我国在多年的生产实践中，不断探索和发展，从最初的电弧炉熔炼到多种熔炼方式组合的熔炼工艺，具体见表8-7。  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj8.files/06.jpg  **8.3.3 冶金工艺路线的选择**  对特种熔炼，常见的可选工艺流程方案很多，可以选用单一冶炼方法直接熔炼，也可以采用双联工艺或者三联工艺，根据冶炼的品种质量不同，选择适宜的工艺方案。对不同冶炼方法的优缺点，需要从能源消耗、设备投资、技术经济指标以及冶炼质量等方面来综合考虑。  表8-8 常见特种冶炼工艺流程   |  |  | | --- | --- | | **冶炼工艺流程** | **常处理的品种** | | AIM | 膨胀合金、热双金属、特殊钢、高合金钢、耐蚀合金等 | | VIM | 软磁合金、硬磁合金、弹性合金、膨胀合金、高温合金、超低碳特殊钢、耐蚀合金等 | | PAM | 特殊钢、合金钢、难熔金属、耐蚀合金等 | | AIM+ESR | 电热合金、高温合金、耐热耐酸钢等 | | VIM+ESR | 超低碳特殊钢、轴承钢、高温合金等 | | VIM+VAR | 电阻合金、热电偶材料、软磁合金、钛及钛合金、高温合金、难熔金属及其合金 | | VIM+EBR | 难熔金属及其合金、钒合金、钛合金 | | AIM+VAR | 变形合金、铸造合金等 | | VIM+EBR+VAR | 优质高温合金 | | VIM +VAR+EBR | 优质高温合金 | | EAF+(AOD)+LF+ ESR | 特殊钢 |   我国某特种冶炼厂工艺流程图如图8-3。  http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2012/tzyl/content/jxkj/jxkj8.files/image010.jpg  **图8-3  某特种冶炼厂工艺流程图** |