

金属矿石形成特点、组合类型及其与选矿的关系讲座

第四讲：铁矿石

卧石

黑色金属，包括铁、锰、铬、钒、钛等金属元素，是发展钢铁工业的主要基础原料。我国钢铁资源十分丰富。建国以来，我国黑色金属矿物原料的找矿勘探做了大量工作，取得了很大成绩。但是，与社会主义革命和建设形势发展的需要，特别是与实现四个现代化的要求相比，还有不少差距。以铁矿石为例，资源分布不够平衡，从矿石储量和质量来看，尚不能满足需要；特别是对矿石性质的研究，还存在一些薄弱环节。例如，有些矿石的伴生有用组分未能充分利用；有些细粒、复杂贫铁矿石未能采取有效的加工处理方法，影响到资源的合理利用和有效回收。这样，一方面造成了矿石资源供不应求，另一方面又有相当一部分矿石不能迅速利用，成为呆矿。所有这些，必然直接或间接影响钢铁工业的迅速而稳步的发展。因而，除了大力加强、加速新的大而富的铁矿石资源的找矿勘探而外，加强对铁矿石工艺性质的研究，减少反复选矿试验的时间，提高矿石质量评价的效果，就成了摆在从事铁矿石资源评价勘探和选冶设计研究工作者面前的一个重要课题。

这一讲主要谈三个问题。

一 铁矿石质量评价的基本任务

铁矿石质量评价的基本任务在于做好两方面的工作：一是从工业利用角度出发，查明矿石本身的特点，例如矿石的矿物成分、化学成分及其含量，矿石中有益矿物粒度、分布和连生特点，矿石的物理性质等。二是针对矿石特点，选择有效的加工处理办法。

自然界中的含铁矿物很多。在不同的地质条件下，它们可以形成不同的矿物共生组合及结构构造，并伴有不同的杂质组分。因而其工艺性质也有很大差异。目前用于炼铁的主要是磁铁矿(Fe_3O_4 ，含铁72.4%)，赤铁矿(Fe_2O_3 ，含铁70.0%)，镜铁矿(Fe_2O_3 ，含铁70%)，菱铁矿(FeCO_3 ，含铁48.2%)，褐铁矿($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ，含铁48~62.9%)等少数几种含铁矿物。此外，在铁的一些硫化矿物中，如黄铁矿、白铁矿(FeS_2 ，含铁46.6%)，磁黄铁矿(Fe_5S_8 - $\text{Fe}_{18}\text{S}_{17}$ ，含铁60~61%)等含铁量也较高，但硫与铁结合力极强，难于分离，只能作为硫矿开采用于化学工业制造硫酸，而不能直接炼铁；少数缺铁国家在炼硫以后也用其残渣作为炼铁的代用品。至于

含铁矿物中数量最多的铁铝硅酸盐矿物，也由于铁在铝硅酸盐中结合力强，成分复杂，含量不定，在工业上不能利用。因此，评价铁矿石质量时，确定含铁矿物的种类及其含量，就是主要的关键之一。

其次，与含铁矿物共生的其他矿物，在目前的技术经济条件下，对一条列冶炼有关的有害杂质含量需要有一定限制，因为它们会影响生铁或钢的质量，妨碍高炉利用效率，增加焦消耗。如 SiO_2 含量过高，会增加炉渣数量和粘度，同时影响脱氧、脱硫过程，若要稀释炉渣，又会增加燃料和熔剂的消耗。硫（S）含量超过限度，会降低钢材强度，发生高温变脆，含磷（P）过高，除作铸铁、含磷生铁等外，在钢材中，发生冷脆。砷（As）在钢材中，并有高温变脆和冷却变脆的特点，而且使焊接性降低。锡（Sn）在炼铁时易使炉壁结瘤。铅锌易于挥发和熔化，它们可以侵蚀炉砖，或沿裂缝渗入炉身，破坏炉衬，降低炉的使用年限。铜的含量超过标准，也会使钢的质量变坏。这些基本知识，都是大家熟知的，无庸一一多述。评价铁矿石质量时，重要的不仅是通过分析，确定其有无和含量多少，而且要查明它们的赋存状态；如含量超过规定限度，能否在选矿中加以剔除。

有用矿物或有害矿物的粒度、分布和连生情况，对选矿的磨碎程度和单体解离率具有决定影响。如某些细粒条带状磁铁—赤铁矿矿石，由于有用矿物粒度微细，必须磨至该矿物平均粒径（颗粒均匀）以下，而且矿物连生界面平直时，才能获得较高的解离率。这样不但要花费很高的磨矿费用，而且在设备和操作技术上也会带来困难，降低生产效率。矿物的物理性质，如硬度、磁性、松散度、孔隙度、含泥量、块度等等都直接间接对选矿方法和流程的确定有重大影响。如风化淋滤型或红土型铁矿石需经洗选、重选，沉积型铁矿石需经强磁选或浮选才能获得精矿。对一些弱磁性或无磁性的沉积型或

浅变质型的赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿矿石，一般要采取破碎、洗选，然后再进行磁化焙烧。经过磁化焙烧后的矿石，可以提高矿物磁性，如赤铁矿在温度为 750°C ，焙烧时间为 1 小时后，不仅可以转化为磁铁矿，而且使晶体粒度扩大 10 倍。菱铁矿在焙烧过程中，由于 CO_2 的分解挥发，可以还原为强磁性矿物，并且大大提高矿石中的铁含量。但由于浮选、焙烧的设备、费用较大和回收的效果不一，无论国外和国内，都还在进一步探索研究。

二 铁矿石工艺性研究的主要内容

铁矿石的工艺性随其形成条件和组合类型的不同而异。它们主要反映在矿石的化学成分、矿物成分以及有用、有害元素的存在状态上，反映在矿物的粒度和分布均匀程度上，反映在矿物的连生特征上，同时也反映在矿物的解离性与可选性特征上。这些就是铁矿石工艺性研究的主要内容。

以我国某钒钛磁铁矿为例，该矿床是含矿基性、超基性岩浆分异作用形成的。矿石的主要矿物成分经查定，金属矿物为氧化物及硫砷化物，前者系主要矿石矿物，而后者则为伴生有用组分的赋存矿物。脉石矿物主要是含微量 Ti, V, Cr, Ga, Co, Ni 的铁镁钙铝硅酸盐矿物。

钒钛磁铁矿是矿石中最主要的含铁矿物，但从镜下鉴定结果来看，它并不是一种单体矿物，而是由磁铁矿为主晶，与钛铁矿、钛铁尖晶石及镁铝尖晶石微晶呈连晶的复合体。微晶状客晶中以钛铁尖晶石最小，直径小于 1 微米，一般 0.5 微米。钛铁矿大小不等，一般直径 1~3 微米，有的达几十微米。镁铝尖晶石直径 1~2 微米。从化学成分上看，占原矿 40~50% 的钛，以细小的钛铁尖晶石和钛铁矿晶粒及固熔体的形式均匀

分布于磁铁矿主晶中。由于矿石普遍具这种密切的复合连生，容晶粒度过细，难用机械方法破碎解离，故用磁选回收的铁精矿品位较低，同时含有较高的钛、镁、硅、铝等元素。在伴生有用元素方面，经电子扫描分析，钒在钛磁铁矿中呈均匀分布，以类质同象参与磁铁矿的结晶格架。铬除极少呈铬铁矿存在外，大部分和钒一样，也是均匀分布于磁铁矿中，以类质同象方式存在，它们都不能用机械破碎方法分离和回收，而是随钛磁铁矿精矿一起富集。至于矿石中的主要有用元素铁，它不仅存在于钛磁铁矿、钛铁矿中，也含于一部分脉石矿物，如辉石、角闪石、橄榄石中，使铁的回收率也受到一定限制，并随不同矿体中连生体含量的变化以及钛磁铁矿粒度含量的变化而变化。如有少部分钛磁铁矿呈显微粒状、条状、格状，粒径为几微米，并为辉石等脉石所包裹。因量少，粒度过细，故还不能在现有磨矿技术条件下解离，自然也就不能进行回收利用。矿石中的硫化物主要有磁黄铁矿、黄铁矿，并有少量硫钴矿、镍黄铁矿、辉钴矿、针镍矿等。磁黄铁矿大部分呈他晶晶均匀分布于钛、铁氧化物及硫酸盐矿物颗粒间，少量呈星点状、乳滴状、细脉状包含于钛、铁氧化物和其它矿物中，钴、镍虽有独立矿物，但含量极少，而且又多为磁黄铁矿、黄铁矿等硫化物所包裹，所以也不能通过加工处理而单独解离，而是与磁黄铁矿等硫化物在选矿流程中一并回收。再则由于部分与钛磁铁矿晶粒连生的硫化物形态复杂，粒度又细，所以按钛磁铁矿粒度磨矿（至0.4~0.6毫米）使其解离时，硫化物无法充分解离，连分散在钛磁铁矿中以类质同象存在的镍钴在内，就不能单独利用，而必须在冶炼中加以考虑。由此可见，仅仅查明矿石组成的矿物成分、化学成分，而不考虑矿石的工艺性质是不能有效地拟定合理的加工流程和选择较为合适的处理方法的。

再如泥盆纪沉积型宁乡式铁矿，属于浅海—近岸沉积成因，主要分布于湘赣边境，鄂西、川、湘、黔、桂等省（区）。矿石主要由赤铁矿、菱铁矿、鲕绿泥石组成。具典型的鲕状构造。以某地矿石为例，矿石中的矿物含量，赤铁矿与褐铁矿占40~60%，碳酸盐24%，鲕绿泥石10%，石英5%，其他1%。赤铁矿鲕粒中心往往为石英及绿泥石，有时鲕粒全部为赤铁矿。这种浅海相胶体生物化学沉积铁矿石的工艺性质，常随沉积分异作用的完整与否，而有很大差别。如分异作用良好，金属与非金属组分完全分离沉淀，形成块状赤铁矿、肾状赤铁矿或无核心鲕状赤铁矿，则矿石的选矿效果最好，有的富赤铁矿，几乎不需加工处理，即可入炉冶炼。如果分异作用较差，金属与非金属组分同时沉积，形成含铁量较低的胶状构造矿石，常具不同成分的鲕状圈层或鲕粒核心，则矿石的选矿过程复杂，有的甚至很难用机械选矿方法使有用矿物全部或大部达到解离的目的。在有核心的鲕粒中，核心的大小和成分也不完全一样，有的以细小石英粒为核心，有的以黑云母或绿泥石为核心。在鲕粒之间有时为赤铁矿胶结，有时为碳酸盐胶结，而且有的赤铁矿呈细小鲕粒分布于石英颗粒间。鲕粒长径一般为0.15~0.7毫米，短径为0.1~0.4毫米。矿石中有3~5%的褐铁矿，为赤铁矿风化后的次生产物，经多次焙烧磁选，仍未获满意效果。对精矿、尾矿鉴定表明，焙烧后变为磁铁矿的颗粒呈细小角砾状，而在焙烧前呈细脉与脉状的赤铁矿。焙烧后虽已变为磁铁矿，但经磨碎，仍不易完全解离。在精矿中，未完全解离的连生体达30~40%，而在尾矿中，磁铁矿仍占10~20%，虽然大部分已经解离，由于过细，对磁选和重选反应不大，还是不能回收。目前对这类复杂难选矿石，国内外都在进一步作浮选试验，主要是测定磨矿细度，药剂的经济效果、用量以及流程的选择。

最后,再举一个前寒武纪条带状磁铁赤铁矿矿床。矿床属浅变质型。矿石的主要矿物为磁铁矿及赤铁矿,局部因次生氧化而形成一定数量的褐铁矿,脉石矿物主要有石英,并含有一定数量的绿泥石、黑云母、绢云母以及少量的绿帘石、透闪石、石榴石、方解石、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿、磷灰石等。各地段所含矿物数量与种类并不一致。矿石以具条带状构造为其主要特征:由以磁铁—赤铁矿为主的黑色条带(或深色)与以石英为主的白色(或浅色)条带相间平行组成。条带宽窄不一,宽者3~8毫米,细者仅1~3毫米。磁铁矿多呈八面体及立方体自形晶,少部分呈半自形及他形,粒度在50~600微米之间。微粒与次微粒常交替出现。赤铁矿主要呈他形粒状,部分也有以假象或半假象赤铁矿形式产出,粒度范围1~30微米。矿石中全铁含量在20~34%之间,可溶铁含量与全铁含量极为近似,二者相差仅1%以下。氧化亚铁的含量变化很大,一般在2~18%之间,二氧化硅的含量较高,一般在40~50%之间,硫0.01~0.8%,磷0.15~0.40%,钙、镁、铝的含量较低, $(CaO + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3)$ 在0.02~0.08范围之内。对于这类矿石工艺性的评价,关键在于查定矿石中有益、有害组分的存在状态及其解离性与可选性。根据前述矿物特点,本类型矿石中,铁主要呈磁铁矿、赤铁矿及褐铁矿三种氧化物产出,少部分则含于绿泥石、绿帘石、黑云母、阳起石、透闪石等含铁硅酸盐及黄铁矿、黄铜矿等含铁硫化物中。另外还有极少量作为杂质含于其他脉石之内。由于在含铁硅酸盐矿物中的铁占有一定数量,而且多以 Fe^{++} 方式结合在晶格内,它们在化学分析时,虽也可以溶解,但在加工处理过程中,对绿泥石、黑云母、透闪石、石榴石之类硅酸盐矿物内的铁,却无法利用。过去习惯用全铁—可溶铁=硅酸铁,因此,错误认为这种矿石中的硅

酸铁含量极少,应当加以纠正。反之,在认为是难溶硅酸铁那一部分的含铁量,大部分则是在石英颗粒中呈赤铁矿包果体,由于受石英保护未被解离和溶解,而实际上它并不是硅酸铁。因此,全铁—可溶铁=硅酸铁,至多只能是个别特有的情况,而绝非是普遍的情况。在评价条带状磁—赤铁矿时,不能以此作为标志。根据磁铁矿晶形完好,且与绿泥石、云母类矿物的物理性质差异大的特点,其解离性较好,通过弱磁选,一般可回收磁铁矿含量97%以上。至于赤铁矿和褐铁矿的解离性与分选性则较磁铁矿复杂得多。晶粒完好并与石英、绿泥石、黑云母等矿物连生的赤铁矿破碎后,较易解离。但沿解理面易裂成薄片细碎,增加分选困难,通过强磁选,离心分选亦可回收95%以上。至于呈细粒他形云絮状分布于脉石基质中的赤铁矿,由于粒度极小,且包果于石英晶粒之中,解离性差,用浮选、重选、强磁选都难获得较好效果。对硅酸盐脉石矿物,如绿泥石、黑云母等,虽与石英、赤铁矿等连生,但由于物理性质不同,磨碎时易于泥化,故可通过选择絮凝脱泥等方法将其大部分除去。

三 铁矿石类型划分原则 及不同矿石类型工艺 性质分析举例

我们认为除按矿石中含铁品位和脉石中 $(CaO + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3)$ 的比值进行分类外,着重考虑主要含铁矿物及其共生组合特点,同时也要考虑有用、有害组分的粒度分布与连生特征。下面将我国若干主要铁矿矿石工艺特征列一简表,作为本讲的结束。

我国主要铁矿石工艺特征一览表

矿石工业类型	矿物共生组合特点	矿石结构构造、粒度分布及连生特点	含铁量	矿石类型进一步划分依据	选矿方法及回收率
岩浆型钒钛磁铁矿岩石	主要金属矿物为钛磁铁矿、钛铁矿，其次有少量硫砷化物及铬铁矿，脉石矿物有斜长石、辉石、角闪石、橄榄石。伴生有V, Ti, Co, Cr和铂族金属	一般为致密块状、条带状及浸染状构造，主要含铁矿物呈自形、半自形及海绵陨铁结构。连生特点从简单到复杂均有	含铁量高，一般达50~60%，含V ₂ O ₅ 达1.5~2.5%含TiO ₂ 20%±	根据矿物组分可分为：钛磁铁矿矿石、磁铁-钛铁矿矿石、含铜钛磁铁矿矿石等；根据结构构造可分为：致密块状矿石、浸染状矿石等，并可根据粒度再细分	磁选-磁浮选联合流程，精矿含铁量70%±，回收率90%±
接触交代型(夕卡岩型)磁铁赤铁矿矿石	主要金属矿物为赤铁矿、磁铁矿、镜铁矿、褐铁矿及少量黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿。脉石矿物主要为石英、方解石、石榴石、透辉石、透闪石、绿泥石、绿帘石、绢云母等。伴生有Co, Be, TR, Ga等	赤铁矿多呈不规则粒状、星点状、片状，有时呈致密块状。磁铁矿较集中，但有时呈星点状、团块状、粒状。与脉石矿物呈复杂接触连生	含铁一般较高，达40~50%，富矿可达60%以上。含Cu, S可达n~0.n%	根据氧化程度及含量可分为：原生矿石、氧化矿石及混合矿石；再据矿物成分分为：磁铁矿矿石、磁铁赤铁矿矿石、赤铁矿矿石；根据造渣组分可分为：酸性矿石、基性矿石，自溶性矿石等	重选-强磁选联合流程，精矿含铁量60%，回收率90%±
玢岩型磁铁-赤铁矿矿石	金属矿物主要由磁铁矿、赤铁矿组成，含少量钛铁矿、磷灰石；主要脉石矿物为斜长石、角闪石、黑云母、绿泥石，有时有石榴石、阳起石、透辉石与透闪石等	矿石主要呈致密块状、浸染状构造，含铁矿物主要呈自形、半自形、均匀粒状结构，少数呈他形似陨铁结构。连生特点比较简单；个别地段偶见角砾状、网脉状构造	含铁一般较高，大于50%，贫者15~20%	根据主要金属矿物可分为：赤铁矿矿石、磁铁矿矿石、磁铁赤铁矿矿石、含磷灰石磁铁矿矿石；根据结构可分为：块状矿石、浸染状矿石；还可根据粒度细分	磁选或重磁选联合流程，精矿含铁量>60%，回收率90%以上
沉积型鲕状赤铁矿、菱铁矿矿石	金属矿物主要为鲕状赤铁矿、菱铁矿及少量褐铁矿；脉石矿物主要为含铁绿泥石、含铁泥质，其次为石英、磁酸盐，并有少量胶磷矿、石髓、黑云母等杂质	鲕状赤铁矿一般呈细小隐晶集合体，并与含铁泥质、绿泥石组成同心鲕粒环带，有时呈胶结物，胶结鲕粒，鲕粒大小不一，长径一般0.15~0.7毫米，短径0.1~0.4毫米；鲕粒一般占70%左右，胶结物一般占30%左右	含铁一般低于40%	根据主要金属矿物可分为：赤铁矿水针铁矿矿石、菱铁矿-绿泥石水针铁矿矿石、菱铁矿矿石；根据造渣组分为：基性矿石、酸性矿石、自溶性矿石	焙烧磁选、浮选，精矿含铁量50%左右，回收率70~90%
浅变质型条带状磁铁赤铁矿矿石	金属矿物主要为磁铁矿、赤铁矿，其次为假象赤铁矿、褐铁矿，少量磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿；脉石矿物主要为石英，其次有绿泥石、黑云母、角闪石、辉石和少量磷灰石、石榴石、透闪石、黝帘石等	磁铁矿常呈八面体、立方体，自形或半自形等粒结构，粒径一般0.01~0.4毫米；在脉石中分布较均匀，其颗粒边缘及小裂隙中常有赤铁矿充填交代；赤铁矿常呈半自形或他形不规则粒状，少数被石英包裹；细粒黄铁矿有时为包体	25~30%±，富矿可达40~60%	根据矿物可分为磁铁矿矿石、赤铁矿矿石、赤铁矿矿石；根据构造可分为：粗条带矿石(<12毫米)、细条带矿石(12~2毫米)、微条带矿石(<2毫米)；还可按氧化程度再分	湿式弱磁选，精矿含铁量65%，回收率90%±