

关于白云鄂博矿床资源综合利用的探讨

沈茂森

(包钢集团矿山研究院(有限责任公司), 内蒙古 包头 014010)

摘要: 文章阐述了白云鄂博矿床资源综合利用的固有困难和优势,提出了做好综合利用值得关注的几个问题,指出了下一步最有可能利用的矿种,强调了不要忽略矿床中非金属矿产的综合利用。复合矿床给人们提供了丰富的矿藏,同时也给回收利用造成了诸多困难。要做好资源的综合利用工作,不仅要调查清楚矿石的固有特性,而且要有相应的考核激励机制,这样才能让综合利用真正落地,尽可能地利用矿藏。

关键词: 白云鄂博;矿床;资源;综合利用

中图分类号:TD98

文献标识码:B

文章编号:1009-5438(2024)04-0001-06

Discussions on Comprehensive Utilizations of Resources in Bayan Obo Ore Deposit

Shen Mao - sen

(Baotou Steel Group Mine Institute (Co., Ltd.), Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: In the paper, it is elaborated the inherent difficulties and advantages for comprehensive utilizations of resources in Bayan Obo ore deposit, proposed several problems noteworthy of better comprehensive utilizations, pointed out the most likely minerals to be utilized next as well as emphasized that comprehensive utilizations of nonmetallic minerals in the deposit should not be ignored. The complex deposits provide abundant mineral resources for people and cause many difficulties of recycle. In order to do comprehensive utilization of resources well, it is necessary to investigate thoroughly inherent characteristics of the ore as well as have corresponding assessment and motivation mechanism so that the comprehensive utilizations could be put into practice indeed and mineral resources could be used as far as possible.

Key words: Bayan Obo; ore deposit; resources; comprehensive utilizations

矿产是不可再生的宝贵资源,人们从学会利用的那一天起,就懂得尽量将其物尽其用。特别是一些复杂多金属矿床,如举世闻名的白云鄂博铁镍稀土矿、攀枝花钒钛铁矿、金川镍铜铂族元素共生矿等,都具有得天独厚的资源禀赋^[1],但在综合利用方面却并不尽如人意。据调查统计,综合利用有用

组分在70%以上的矿山仅占2%,综合利用有用组分在50%以上的矿山不到15%,综合利用有用组分低于25%的矿山占75%。同时也有资料报道,目前西方矿业发达国家从有色金属的选冶过程中回收利用的有价值元素已达70多种,副产品价值占总产品价值的30%以上,其选冶综合回收利用率已达

80%^[2]。可见,复杂多金属矿的综合利用确实不是一件容易的事情,但是也确实有人做得很好。对于白云鄂博矿来说亦如此,欲综合回收多种矿产品必然会困难重重,但是,只要深刻认识矿藏的固有特性,不断提高综合利用的思想意识,建立有利于综合利用的考核激励机制,白云鄂博矿资源的综合回收利用一定会突破难关,不断进步。

1 难以综合利用是多种矿产复合矿床的固有特征

对于多种金属、非金属的复合矿床,在发现之初,尤其在宣传报道时,人们往往习惯强调其可利用的丰富的资源禀赋,而忽略了其给回收利用带来的固有困难。最近的一次统计,加上新发现的新矿物,在白云鄂博矿床中发现的矿物已经突破 210 种^[3]。就目前的选矿工艺来说,除了所要利用的目标元素外,其他丰富的元素都是选别作业需要去除的,毫无疑问,矿物种类越多,选别时的困难就越大。白云鄂博矿资源综合利用时,以下困难是与生俱来的。

1.1 矿种的丰富必然造成选别困难

对于目前常用的选矿工艺来说,除了要回收的目标矿物外,其他矿物均称为脉石矿物,通常都会给目标矿物的回收带来不利的影响。从理论上讲,白云鄂博矿床中存在的 200 多种矿物都有残留在精矿中的可能。从生产实践来看,从选矿流程中取回的原矿和尾矿样品,在几毫克的样品中,总能同时见到以下矿物:磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿、独居石、氟碳铈矿、氟碳钙铈矿、萤石、以白云石为主的碳酸盐矿物、霓石、钠闪石、重晶石、磷灰石、云母、碱性长石。可见,无论是回收铁、稀土、萤石,还是将来进一步回收其他元素,常见的脉石矿物都不下十几种。

白云鄂博矿床中种类繁多的矿物给资源综合利用带来了无可回避的困难。

1.2 矿种的丰富通常会造目标元素分散

白云鄂博矿中,不仅矿物种类繁多,而且一种元素赋存在不同种矿物的现象也非常普遍。其中常见含铁矿物就有十多种,见表 1。这些矿物中有氧化物,有碳酸盐,有硅酸盐,还有硫化物。这些矿物性质迥异,直接决定了不可能用一种方法有效回收,这还没有考虑更加众多的脉石矿物的捣乱。

磁铁矿、赤铁矿虽然铁含量都很高,但不能用一种方法有效回收。由于要去除白云石为主的碳酸盐矿物,含铁较高的菱铁矿、铁白云石也随之进入尾

矿;霓石、闪石等硅酸盐矿物虽然含铁,但因含有对炼铁工艺有害的钾钠元素而不能利用;硫铁矿铁含量较高,但对炼铁有害的硫含量也很高,因而不能利用;而磁黄铁矿具有较强的磁性,磁选工艺选铁时,必然和磁铁矿一起进入铁精矿而造成精矿硫超标。

表 1 白云鄂博矿常见含铁矿物(质量分数) %

| 名称 | Fe | 名称 | Fe |
|------|-------|-------|-------|
| 磁铁矿 | 72.36 | 钕铁金红石 | 11.72 |
| 赤铁矿 | 69.94 | 霓石 | 24.18 |
| 针铁矿 | 62.85 | 钠闪石 | 29.84 |
| 菱铁矿 | 48.20 | 黑云母 | 6.44 |
| 铁白云石 | 16.24 | 黄铁矿 | 46.55 |
| 钛铁矿 | 36.81 | 磁黄铁矿 | 62.33 |
| 钕铁矿 | 16.54 | 黄铜矿 | 30.43 |

一种元素赋存在不同种矿物中的现象不仅仅是铁,稀土、氟、钕、钛、硫、磷、钾、钠等都存在类似的现象。这种现象带来的最大问题就是总有一些矿物中的元素是不能回收的,会降低目标元素的回收率。如硅酸盐矿物中的铁、稀土矿物中的氟,会显著拉低铁和萤石的回收率。这也是多种矿产复合矿床固有的特征,是无法回避的。因此,在生产实践中必须根据实际情况制定切实可行的回收指标,不宜追求高品质精矿,更不能单一矿种的生产指标来要求综合利用。在研究白云鄂博矿萤石的回收利用时,笔者发现萤石不仅赋存在复杂的矿石中,而且本身还富含包裹体。研究表明用白云鄂博矿的萤石矿难以选出高品质的萤石精矿,所以,课题组向选矿企业提出以“低质高产”组织生产为宜的建议^[4]。目前白云鄂博矿的萤石选厂基本是按“低质高产”组织生产。表 2 为白云鄂博矿常见含氟矿物及氟含量。

表 2 白云鄂博矿常见含氟矿物(质量分数) %

| 名称 | F | 名称 | F |
|-------|-------|------|------|
| 萤石 | 48.67 | 中华铈矿 | 3.09 |
| 氟碳铈矿 | 8.67 | 氟磷灰石 | 3.77 |
| 氟碳钙铈矿 | 7.07 | 烧绿石 | 1.34 |
| 氟碳钽铈矿 | 5.98 | 金云母 | 4.53 |
| 黄河矿 | 4.56 | 黑云母 | 1.1 |
| 氟碳铈钽矿 | 3.69 | 氟铁云母 | 3.91 |

1.3 复杂的矿石组合也给化检验工作带来很大的困难

如前所述,一种元素赋存在不同种矿物的现象在白云鄂博矿中非常普遍,而且总有一些矿物中的元素是不能回收利用的。为了有效地组织生产,企业必须要清楚哪些矿物中的元素可以回收利用,哪些矿物中的元素无法利用。对于铁矿石来说,化验一个铁品位是远远不够的,还需要化验不同物相中的铁品位,这无疑会增加生产成本。

增加成本还不是化检验工作面临的最大问题,化检验工作面临的最大问题是无法准确测定矿物的含量。目前化检验工作比较成熟的技术是对元素含量的测定,对于一些简单的单一矿种的检测基本可以胜任,但对于复杂的白云鄂博矿石就力不从心,甚至是无能为力。比如化验萤石,白云鄂博矿中含氟的矿物那么多,含钙的矿物也那么多,无论是化验氟还是化验钙,都不可能确定萤石的准确含量。目前的解决方法是人为地考虑主要因素忽略其他次要因素,这样的化验结果其误差之大可想而知。

可见,准确测定矿物含量是一个必须尽快攻克的难题,毫无疑问,随着白云鄂博矿综合利用元素的增加,类似的问题还会出现。

以上重点阐述了多种矿产复合矿石综合利用所固有的难题,这些难题都无可回避,只有弄清楚了这些客观存在的问题,才能更好地做好综合利用工作。虽然多种矿产复合矿石综合利用有许多固有的难题,但也具有更多的得天独厚的优势,值得人们把综合利用的事情进行到底。

2 多种矿产复合矿床综合利用的显著优势

多种矿产复合矿床综合利用最显著的优势是提供了丰富的物质基础和分摊了采选成本。

2.1 提供了丰富的物质基础

白云鄂博矿提供的矿物资源确实实是得天独厚的,在地球上没有第二家,一般认为具有回收潜力的元素将近30种。其中列入我国战略性矿产目录的有铁、稀土、萤石、磷。目录中还有钾盐,白云鄂博矿虽然没有丰富的钾盐,但有丰富的富钾板岩,关键的时候完全可以替代钾盐。重晶石虽然没有列入我国战略性矿产目录,但上了欧盟关键矿产清单和美国关键矿产目录,白云鄂博矿也蕴藏了丰富的重晶石。此外,已对铌、钛、钽、钪进行过深入研究,相信

在不久的将来,它们也会被综合利用。

多种矿产复合的矿石尽管由于复杂的矿物组成及嵌布结构会给资源的利用带来不少干扰,但依然掩盖不了其提供的丰富的物质基础这一绝对优势。手里有粮,心里不慌,利用只是技术问题,技术问题迟早会被突破。

2.2 降低了采选成本

一般来说,复合矿床的开发利用往往始于一种容易利用的矿种,已经利用的矿种为进一步利用的矿种创造了很好的条件,基本无需再在采掘、磨矿方面投入巨资。这些都为综合利用产生经济效益创造了非常有利的条件。目前,从白云鄂博矿中回收稀土和萤石都是在选铁尾矿中进一步回收,没有采矿投入,磨矿投入也很少,只增加一些选别环节就能实现。今后,其他元素的利用仍然来至尾矿,已有的采矿和磨矿工艺大大降低了综合利用的成本,创造经济效益的前景极为广阔。

3 综合利用值得关注的几个问题

认清资源综合利用的固有困难是做好资源综合利用的基础,抓住关键是解决资源综合利用问题的有效途径。做好白云鄂博矿资源综合利用最关键的问题,首先是把矿床中最主要的矿物处理好,其次是各环节的从业人员要积极主动提高资源综合利用的思想意识,另外,也不要忽略矿床中非金属矿产的综合利用。

3.1 把矿床中最主要的矿物处理好

白云鄂博矿床中的矿物虽然复杂繁多,但是含量较大的矿物也是有限的几种。笔者发现白云鄂博矿床中最主要的矿物是白云石(实指以白云石为主的碳酸岩矿物)、萤石和铁矿物,它们是矿床中的贯通矿物,存在于各种类型的矿石中,可谓白云鄂博矿床中的“铁三角矿物”,对白云鄂博矿资源综合利用具有重大的影响。如果把这几种矿物处理好了,资源综合利用多半的问题就解决了。通过对已经利用的铁精矿、稀土精矿和萤石精矿的研究发现,铁精矿中的主要脉石矿物必然有白云石和萤石;稀土精矿中的主要脉石矿物必然有铁矿物、白云石和萤石,见表3、表4、图1;萤石精矿中的主要脉石矿物必然有铁矿物和白云石,见表5、图2。图1中黑色颗粒为铁矿物,紫色颗粒为萤石,其他主要是稀土矿物。图2(a)、(b)为同一视域,(a)图中黑色颗粒为铁矿物,其他主要是萤石;(b)图中明亮颗粒主要是白云石。

表 3 稀土精矿化学成分(质量分数)

| 名称 | REO | TFe | F | S | P | CaO | MgO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | ThO ₂ | Nb ₂ O ₅ |
|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------------------|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|
| 稀土 1 | 57.34 | 3.00 | 5.97 | 1.044 | 5.60 | 7.47 | 0.071 | 0.86 | 0.24 | 0.064 | 0.12 | 0.03 |
| 稀土 2 | 71.15 | 0.84 | 5.80 | 1.202 | 4.91 | 0.23 | <0.01 | 0.18 | <0.01 | 0.047 | 0.21 | 0.007 |

表 4 稀土精矿矿物组成(体积分数)

| 名称 | 铁矿物 | 萤石 | 霓石 | 闪石 | 磷灰石 | 稀土矿物 | 其他 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| 稀土 1 | 7.2 | 5.6 | 0.8 | 2.2 | 3.7 | 78.7 | 1.9 |
| 稀土 2 | 6.9 | 1.1 | - | - | 3.9 | 86.5 | 1.6 |

注：“铁矿物”实指不透明矿物，主要是磁铁矿、赤铁矿及少量磁黄铁矿、黄铁矿等；稀土矿物中包括一定量的白云石（稀土矿物和白云石微粒在显微镜下难以分辨）；“-”表示在所观测的样品中未看到，并不表示不存在；“其他”表示难确定的微粒矿物及偶见的极少量矿物；10 μm 以下（不含）的颗粒未统计。

表 5 萤石精矿化学成分(质量分数)

| 名称 | CaF ₂ | TFe | REO | MgO | BaO | P | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | Nb ₂ O ₅ | Sc ₂ O ₃ |
|------|------------------|------|------|------|-------|------|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 萤石 1 | 81.48 | 1.40 | 0.90 | 0.33 | 0.140 | 1.30 | 0.41 | 0.29 | <0.01 | 0.063 | 0.013 | 12.24 |
| 萤石 2 | 80.49 | 1.00 | 1.48 | 0.63 | 0.140 | 1.12 | 0.72 | 0.20 | <0.10 | 0.066 | 0.016 | 15.28 |
| 萤石 3 | 80.95 | 0.80 | 1.42 | 1.61 | 0.093 | 2.16 | 0.49 | 1.61 | <0.01 | 0.053 | 0.011 | 9.85 |

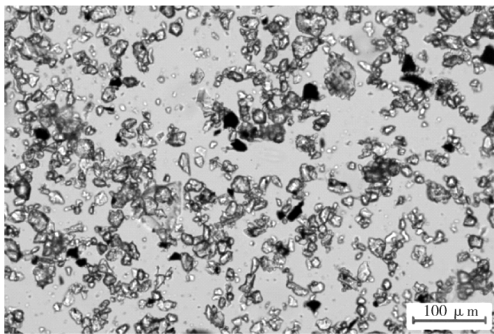


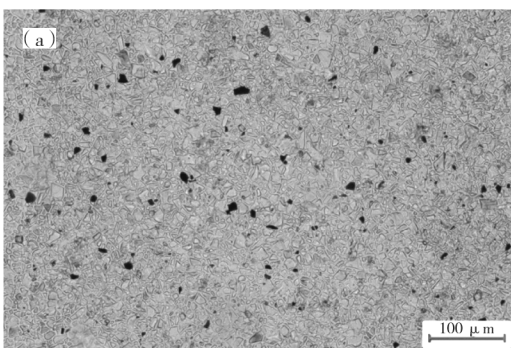
图 1 稀土 1 的显微形貌(透射光)

如果能把上述精矿中作为脉石的铁矿物、白云

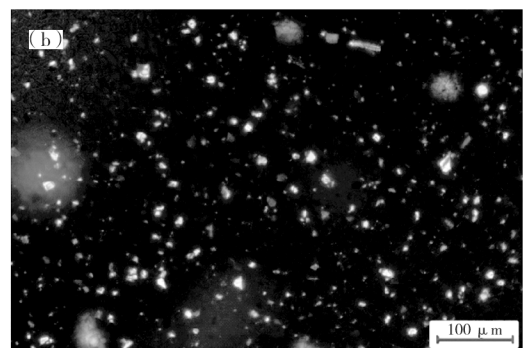
石和萤石进一步选出去，则上述精矿的品位有可能再提高大约 1 个百分点。因此，还有进一步研究高效除去铁矿物、白云石和萤石这些常见矿物的必要。

3.2 提高思想意识，建立激励综合利用的考核管理制度

对于多金属矿床，人们很早就提出了综合利用的理念。对于白云鄂博矿来说，早在开采初期就提出了“以铁为主，综合利用”的方针。但在较长一段时间内，仅能利用铁资源，其他资源的综合利用一直处于探索研究阶段。如今，除了提取铁之外，综合回收稀土、萤石已经成为事实，回收铈、钽等资源的研究也在紧锣密鼓地进行中。



(a) 单偏光



(b) 正交偏光

图 2 萤石 1 的显微形貌

白云鄂博矿产资源的综合利用已经进入大工业实施阶段,但现在的生产管理制度一直是“以铁定制”,几乎没有融入综合利用的理念。单一选铁时制定的管理制度,已经不适用今天的综合利用现状,甚至会阻碍综合利用的实现。针对白云鄂博矿资源综合利用的现状和前景,建立有利于资源综合利用的激励考核管理制度已势在必行。

譬如,现在考核矿石是否合格,最主要的是铁品位,铁品位不合格就不行。但现在已经不是单一回收铁的时代了,在稀土、萤石含量较高的采区,如果能灵活地适当降低对铁品位的要求,为下游的选稀土、选萤石工艺提供较高品位的原料,可能更为有利。铁矿损失的效益,在稀土、萤石方面可能会得到更大的补偿。综合利用必须要由集团公司总体统筹,不局限于局部利益的得失,只要集团公司算总账有效益,就应制定相应的制度,坚决贯彻执行,将资源综合利用的理念落实到实际生产过程中。

3.3 不要忽略矿床中非金属矿产的综合利用

白云鄂博矿床不仅是多种金属共生矿床,也是多种非金属共生矿床。以钢铁立业的包钢,往往会无意中忽略了矿床中的非金属矿藏。过去把白云鄂博矿藏叫做白云鄂博铁矿,随着对该矿床认识的深入,又称为白云鄂博铁铈稀土矿。直到现在,我们看到对白云鄂博矿藏最全面的称谓是铁铈稀土多金属共生的超大型矿床。殊不知,这依然没有反映出白云鄂博矿藏的实际情况,因为它忽略了矿床中蕴含的大量的重要的非金属矿藏,尤其是萤石已经被利用的当下,还这么称谓就很不恰当了。

事实上,白云鄂博矿床是铁、铈、稀土等多种金属和萤石、磷灰石、重晶石等多种非金属共生的大型复合矿床,简单地说,白云鄂博矿床是多种金属和非金属共生的大型复合矿床。目前,萤石已经实现工业化回收利用,磷灰石、重晶石也有较高的含量,利用前景广阔。因此,要高度重视白云鄂博矿床中非金属矿产的综合利用,应该尽快将重晶石和磷灰石综合利用提上日程,开展研究工作。

4 下一步最有可能利用的矿种

白云鄂博矿铈资源仅次于巴西,居世界第二位,居国内第一位。2005年以后,我国成为世界第一大铈消费国,但是几乎全部依赖进口。这与我国的铈资源大国的地位极不相称,毫无疑问,攻克白云鄂博矿铈资源的综合利用是亟待解决的问题。客观地

说,对白云鄂博矿铈资源综合利用研究的起步并不算晚,投入也不可谓不大。1953年以来,中国科学院和原冶金部的有关单位已开始了白云鄂博矿的研究工作。从1963年的“415”会议开始到1985年,原国家科委、国家计委、国家经委、冶金部和中国科学院、内蒙古自治区人民政府先后联合主持召开了十三次包头资源综合利用会议。包钢铈冶炼工艺及产品开发与应用,获1991年度国家科技进步奖,并被列入国家“八五”重点科技攻关计划^[5-6]。直到今天仍有多个科研团队在孜孜不倦地进行着白云鄂博矿铈资源综合利用的科技攻关。然而,由于白云鄂博矿铈品位较低,粒度细微,且分布在多种不同种类的矿物中,利用难度极大,至今没有找到适合工业生产的经济合理的利用方法。

笔者认为,白云鄂博矿铈资源的综合利用不可能一步到位,应该遵从先易后难的利用原则,先从最容易利用的方向入手,从一个突破口逐步扩展,尽快让人看到希望。我们注意到白云鄂博矿的霓石岩是相对富铈的一种岩石,其中常常富集肉眼可见的易解石,见图3。建议将白云鄂博矿的霓石岩作为铈矿石,进行分采、分堆、分选,很可能是铈资源综合利用的突破口。白云鄂博矿霓石岩中不仅可以形成铁矿石、稀土矿石,而且与铈、钽、钷元素也关系密切,即使构不成铁矿和稀土矿的霓石岩,仍然是极具潜力的铈矿床、钽矿床和钷矿床,应该是下一步白云鄂博矿资源综合利用的首选目标,在回收铈、钷的同时,还能综合回收铁、钽和稀土^[7],尾矿霓石是生产微晶玻璃和铸石的好原料。

在白云鄂博矿选铁尾矿中含量较多的除了已利用的铁矿物、稀土矿物和萤石外,含量最多的当推以白云石为主的碳酸盐矿物,此外,含量较多的有重晶石和磷灰石。由于白云石、石灰石并不是稀缺矿种,再加上白云鄂博矿的碳酸岩也很复杂,不仅含有白云石、石灰石,而且含有菱铁矿、菱镁矿、铁白云石、锰白云石等,也不好利用,暂时没被列入综合利用的对象。不过笔者发现,稀有元素铈在碳酸岩中有富集现象,让我们看到从碳酸盐矿物中回收铈的希望。

白云鄂博矿选铁尾矿中的重晶石和磷灰石不仅含量相对较高、稳定,而且回收利用应该比眼下正在攻克的铈更容易,而且,重晶石和磷灰石是列入欧盟关键矿产清单和美国关键矿产目录或我国战略性矿产目录的重要矿产。因此,应该将白云鄂博矿床中重晶石和磷灰石的综合利用提上日程,尽快开展

研究工作。

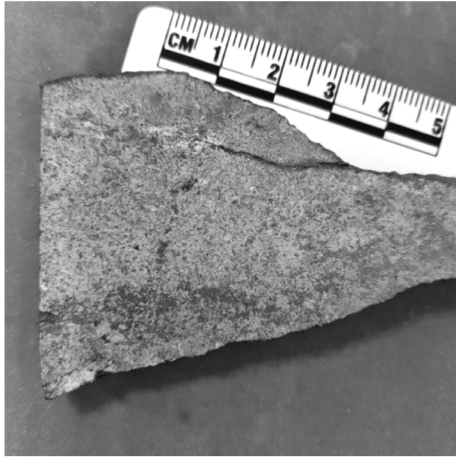


图 3 富含易解石的萤石岩切片

5 结束语

复合矿床给人们提供了丰富的矿藏,同时也给回收利用造成了诸多困难。要做好资源的综合利用工作,不仅要调查清楚矿石的固有特性,而且要有相应的考核激励机制,这样才能让综合利用真正落地,尽可能地利用矿藏。

参 考 文 献

- [1] 刘亚川,丁其光,汪镜亮,等. 中国西部重要共生矿产综合利用[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.
- [2] 王春秋. 关于矿产资源综合利用的思考[J]. 矿产与地质,2005,19(3):242-245.
- [3] 沈茂森,赵永岗. 白云鄂博矿床中究竟发现了多少种矿物[J]. 包钢科技,2023,49(1):6-9,35.
- [4] 沈茂森,郝美珍,郭爱芳,等. 白云鄂博铁矿石中的萤石及其中包裹体的特征[J]. 现代矿业,2024,40(4):155-158.
- [5] 于俊. 包钢铌资源的综合利用[J]. 包钢科技,1993,29(2):93-94.
- [6] 李小钢,徐广尧. 开发内蒙古铌资源的战略意义[C]//中国稀土学会地采选专业委员会. 2012年中国稀土资源综合利用与环境保护研讨会论文集. 2012:11.
- [7] 沈茂森. 白云鄂博萤石岩:既是铌矿床又是钽矿床[C]//内蒙古自治区人民政府,中国工程院,中国稀土学会,中国稀土行业协会. 中国稀土学会 2022 学术年会、第十四届中国包头·稀土产业论坛摘要集. 2022:1.

信息

内蒙古自治区稀土钢产品研发重点实验室重组成功

2024年7月10日,内蒙古自治区科技厅发布《关于印发材料、化学、制造、环境、信息领域通过优化重组自治区重点实验室名单的通知》,内蒙古自治区稀土钢产品研发重点实验室顺利通过本次重组评审,自治区材料领域共有11家重点实验室重组成功。

内蒙古自治区稀土钢产品研发重点实验室成立于2016年12月19日。稀土钢产品研发重点实验室面向国家和自治区重大战略需求,聚焦稀土钢新材料,重点解决稀土在钢铁材料应用的重大科学问题和技术难题,推动高性能稀土钢新材料的开发和应用,建设全球最优稀土钢新材料生产基地,为“两个稀土基地”建设提供技术支撑。

内蒙古自治区稀土钢产品研发重点实验室现有三个研究方向:稀土在钢中的赋存状态及作用机理、高水平(稀土)炼钢连铸生产技术、高端特殊性能钢系列产品研发。