

艾萨熔炼技术（ISASMELT）不断发展的二十五年

菲立普·阿瑟，高明炜
澳大利亚超达技术公司（Xstrata Technology）
电子邮箱：isasmelt@xstrata.com.au

摘要

艾萨熔炼技术（ISASMELT）在二十世纪九十年代已经在全球得到了广泛的应用，每年大约处理四百万吨的精矿和二次原料。该技术是一种浸没式喷枪熔炼技术，在澳大利亚、美国、比利时、印度、德国、马来西亚和中国的冶炼厂中生产铜金属和铅金属。在秘鲁和赞比亚的艾萨铜熔炼厂正在建设中。

艾萨熔炼技术的基础是澳大利亚联邦科学与工业研究组织 CSIRO（赛洛）在二十世纪七十年代开发浸没式喷枪顶部吹炼的赛洛熔炼法（Sirosmelt）。澳大利亚芒苔艾萨公司认识到了这种新的熔炼理念的巨大经济潜力，于二十世纪七十年代末期开始了一项持续二十五年的开发计划，建立了中试厂、示范厂和商业规模艾萨熔炼厂处理各种各样的原料。

芒苔艾萨矿业公司还把此项技术转让给了世界上的多家公司。这些公司的艾萨熔炼厂在技术和商业上的成功使得艾萨熔炼工艺被普遍认为是当前最经济最具有吸引力的铜熔炼工艺。本文追述了艾萨熔炼技术的发展历史并探讨了它在冶炼工艺方面始终保持领先地位的原因。

1.0 引言

赛洛喷枪的发明为有色金属火法冶炼提供了一种的新机遇。在此之前，熔融炉渣或冰铜是用风嘴注入燃烧气体来实现的，存在着设计上的复杂性和耐火材料寿命问题。二十世纪七十年代，芒苔艾萨矿业公司在自己的冶炼厂引入了浸没式喷枪技术，并看到了它在铅和铜冶炼中提高工作效率的潜力。采用喷枪便可以使用设计简单的固定式炉体，而且可以极大地提高反应速率。芒苔艾萨矿业公司经过和澳大利亚联邦科学与工业研究组织 CSIRO（赛洛）在初始阶段合作之后，开发出了艾萨熔炼技术，并在澳大利亚芒苔艾萨和世界上多家冶炼厂取得了商业成功。

2.0 艾萨熔炼工艺的初始

艾萨熔炼工艺的发展开始于 1977 年，当时试用一个零点八米直径的中试厂，内装赛洛喷枪，对芒苔艾萨公司的铜转炉和阳极炉炉渣进行浸没燃烧处理⁽¹⁾。试验结果表明，炉中形成的熔池在加煤的条件下可使还原过程迅速发生，添加的溶剂可以快速分散溶解。试验过程中还发现温度控制是延长耐火材料寿命的关键。用赛洛喷枪处理转炉渣避免了炉渣返回反射炉后形成磁铁矿块所产生的操作问题。

在二十世纪七十年代的末期，芒苔艾萨公司在寻找一种更好的技术来扩大其铅冶炼厂的生产。公司对当时的铅冶炼新技术，包括 Kivcet, QSL 和 Kaldo 工艺⁽²⁾也进行了研究，觉得赛洛喷枪技术更经济和高效。一九七八年，芒苔艾萨矿业公司和赛洛联合进行了浸没喷枪技术在铅冶炼中应用的研究，对工艺的热动力学进行了计算机模拟，并做了坩埚试验⁽³⁾。坩埚试验确认了计算机模拟工作的结论，亦即：熔池中铅的烟化过程较慢，铅渣的还原速度较快。这项工作为下一步中试厂上马打下了基础。

芒苔艾萨矿业公司在一九八〇年九月投产了一座每小时一百二十公斤能力的中试厂，其主要目标是证实铅精矿冶炼和炉渣还原的两阶段工艺的可行性和烟化比率、并取得耐火材料磨损和燃料比率的合理估算值。表一概括了中试厂工作的主要结果。

表一 中试厂的主要研究结果

铅烟化	炉渣成份和温度大范围内变化时依然可以控制
增加喷枪的富氧含量	燃料消耗降低 了烟尘量降低 喷枪磨损无明显变化
耐火材料磨损	小于预期值 还原期间高于氧化期间
炉渣还原	在批量生产时展现 添加块煤时进行较快
锌烟化	对温度非常敏感

芒苔艾萨公司和赛洛后来共同申请了“高强度铅冶炼工艺”⁽⁴⁾的专利。这项工艺被命名为“艾萨熔炼工艺”，代表顶吹浸没式喷枪熔炼技术在芒苔艾萨的生产操作中所获得的整体知识，包括炉体和改进后的喷枪设计。

3.0 艾萨铅熔炼炉的发展

中试厂的试验成功促使芒苔艾萨公司的管理层投资建设一座示范厂来评估艾萨工艺的商业潜力。示范厂的能力定为每小时五吨，为当时芒苔艾萨公司铅冶炼厂产量的十分之一。示范厂投产的目的是更可靠地获得有关耐火材料，喷枪磨损，燃料消耗，烟气产生和卫生保健方面的信息，并培养这种新技术的操作人员。

示范厂建设分成两个阶段。第一阶段是一九八三年九月建成的氧化熔炼炉，其生产能力为每小时五到九吨的给料量，炉子钢外壳直径为二点七米，炉子的排气烟道由耐火砖砌成，部分衬有耐火铸块。芒苔艾萨公司当时生产的铅精矿的百分之十五是由这个炉子来冶炼⁽⁵⁾，生产出颗粒状的高铅渣，再掺进烧结炉的进料中去。烧结炉的能力当时受着燃硫能力的局限。在烧结进料中添加低硫的艾萨炉高铅渣，将烧结的产出量提高了百分之十。

示范厂操作得到的新信息是同中试相比铅烟化率减少一半以上，同时耐火材料的磨损还不到中试时的十分之一。示范厂还改进了喷枪设计。赛洛喷枪的工作压力在二百五十千帕左右。经过不断改进，艾萨喷枪的工作压力降到一百千帕左右，不但节省了压缩空气的费用，还延长了喷枪的寿命。对各种燃料的研究结果表明，块煤、焦粉和精矿石的混合物可以用做燃料的主体，再配合用喷枪注入的少量燃油可以精确地控制温度。这项研结果还表明没有必要使用喷枪喷入固体燃料，避免了投资和操作成本的增加。

由于艾萨熔炼示范厂提高了芒苔艾萨公司总的铅产量，管理层明显地看到对示范厂的投资上在经济是合算的。这种在提高企业现有生产能力的同时来开发新工艺的策略贯穿在整个艾萨工艺技术的发展史中。另外，艾萨炉操作人员与设计人员配合默契，在项目发展过程中一直起着十分重要的作用。这些人员将工艺设计和设备操作尽量简化。人们相信这也是此项工艺取得全面成功的重要因素之一。

艾萨熔炼示范厂经过一年多的运行，明确了熔炼操作步骤之后，便立即开始第二阶段的建设。第二个艾萨示范厂于一九八五年八月建成投产，位于第一座示范炉的附近，便于第一个炉子的炉渣在熔融状态可流向另外一座炉子。

在第二个艾萨示范厂上最初进行了一百五十多次的批量还原试验，取得了废弃渣中含铅百分之

四的结果。熔炼和还原过程都取得了百分之七到百分之八的铅烟化率。在一九八七年的生产中，两个艾萨示范炉同时连续运行，完成下面的工序，

- 在熔炼炉中熔炼铅精矿
- 将熔炼炉炉渣在熔融状态下排放到还原炉
- 在还原炉中用块煤在一千一百七十到一千二百度下将炉渣还原
- 用单一的排放口将粗铅和废弃炉渣一起排放

在氧化炉和还原炉同时而且连续的作业中，铅精矿的加料量稳定在每小时五十吨。在原矿含铅为百分之五十时，弃渣含铅为百分之二到百分之五，喷枪寿命最长达到了二百小时⁵。

到一九八九年四月，两座示范工厂已经处理了十二万五千吨的铅精矿石。

4.0 艾萨铅熔炼炉的工业化

在艾萨炉示范厂取得铅冶炼成功后，芒苔艾萨公司又批准建设了两个商业性的艾萨铅炉于一九九二年二月投产。一个是熔炼炉内径二点五米，一个是还原炉内径三点五米，两炉之间第一次用溢流堰连接允许连续放铅。在还原炉上安装了废热锅炉，并且在还原炉中通过喷枪注入煤粉，而不是直接加入块煤。煤的主要用途是提高炉渣还原速率。二十世纪八十年代未在赛洛(CSIRO)进行过坩埚规模的铅炉渣还原研究，了解铅还原过程中的速率控制机制⁽¹⁰⁾。研究表明，在铅炉渣含铅低至大约至百分之六的情况下，艾萨熔炼工艺的还原动力学相对说来是快的。但如果含铅量再下降时还原速率便有较大降低。商业性艾萨还原炉计划处理的高铅渣含铅在百分之三到五，所以用还原炉喷枪加入煤粉以提高铅的还原速率。

商业熔炼炉很快就达到了每小时处理二十吨精矿的产量，生产出了高品位的铅炉渣，冶炼操作稳定，并取得了理想的喷枪和耐火材料寿命。铅炉渣在熔融状态含有铁酸锌结晶，在喷枪上和耐火材料壁上形成了铁酸锌保护层，保护了它们不受炉渣的侵蚀。喷枪的平均寿命为一个月以上，炉壁磨损很小。熔炼炉内的氧化条件和高强搅动熔池实现了对硫化铅烟化的抑制。

不过，商业还原炉出现了较多的问题，其喷枪寿命短，气动式输煤系统堵塞和磨损造成炉渣中的铅含量不稳定。在对输煤系统重新设计和修改了喷枪端部设计后，这些问题得到了很好的解决。最佳运行状况出现在一九九三年，当时有条件使用更多的氧气，在富氧量为百分之三十三到三十五时，还原炉的处理原料量比设计值超过了百分之四十四，高达每小时三十六吨，相应的还原炉炉渣的含铅量降低到百分之二到五。

余热锅炉的问题出现在废气进入布袋过滤器时，温度过高，不得不临时补加了一个空气冷却系统来进一步降温。问题的原因是对流管簇上形成了灰尘粘结层，明显地降低了热传导率。还原炉耐火材料取得了较好的使用寿命，持续了两年才开始更换耐火砖。

一九九四年底，芒苔艾萨公司的铅精矿供应不足，年产铅六万吨的艾萨铅炉与年产铅十六万吨的焙烧炉和鼓风炉争原料。为了降低成本，次年初公司关闭了艾萨铅炉，以保证焙烧炉和鼓风炉的原料供应。自那以后，艾萨铅炉一直处于停产状态，但公司对它进行了多次评估，以便根据铅的市场和精矿供应情况决定是否将其启动。

表二列出了芒苔艾萨公司建成的各种铅艾萨炉的细节。

表二 芒苔艾萨公司建成的铅艾萨炉

日期	装置的类型	生产能力
1980	小型中试厂	每小时二百五十公斤铅精矿 ⁶
1983	铅冶炼示范厂	每小时五到十吨铅精矿 ⁷
1985	铅渣还原示范厂	每小时五吨铅渣

1991	商业性铅熔炼和还原炉	年产六万吨铅
------	------------	--------

5.0 艾萨铜熔炼技术的发展

5.1 艾萨铜熔炼示范厂

铅艾萨熔炼工艺的开发从坩埚阶段到示范厂规模经历了大约十年的时间。在这十年期间芒苔艾萨公司对艾萨熔炼技术的基本概念有了更多的了解，并在铅示范厂运作的同时，中试厂也在做进一步的开发工作，包括镍冶炼，电池膏处理，来自铅冶炼和铜冶炼过程中铜浮渣的处理。铜的试验结果表明艾萨熔炼对解决芒苔艾萨铜冶炼作业问题有着特别的潜力。

在八十年代，芒苔艾萨矿山自产的铜精矿在流态化焙烧炉中焙烧，再将焙砂在两个反射炉中冶炼。焙烧炉和反射炉的效率低，对环境污染严重。在考虑取代这两个装置的方案时，芒苔艾萨公司比较了闪速熔炼，诺兰达炉和三菱连续熔炼和吹炼。这些工艺不是因为自身的缺陷难以满足改造的要求，就是成本过高而难以上马。考察重点最后转到了艾萨熔炼技术。在芒苔艾萨的中试厂和赛洛(CSIRO)进行了大量试验的基础上，芒苔艾萨公司在一九八七年四月建成了示范性铜艾萨炉，其内经为2.3米⁽⁶⁾。

铜示范厂原设计的喷枪供气为七百千帕的压缩空气。但是，在采用了新的喷枪设计后，喷枪供气压力降到了一百五十千帕，并发现在压缩空气中充氧可以提高示范厂的产量。示范厂原设计每小时十五吨的精矿处理量，在喷枪空气中含氧百分之三十五时，可提高到每小时五十吨，并保持正常运行。最初曾担心在压力较低和氧浓度提高的情况下会缩短喷枪的寿命，但对炉体和喷枪在设计上的改进避免了这些问题的出现。铜艾萨熔炼示范厂的产量最终达到了公司铜总产量的百分之二十。它可以处理各种入料，包括不适合在反射炉中处理的含磁铁矿较高的转炉渣，并可以生产出含铜在百分之三十六到六十五（按重量）的各种品位的冰铜。

在示范厂运作期间也对微量元素的分布进行了研究⁽⁷⁾。结果表明，艾萨熔炼炉产生的冰铜中除掉了百分之九十以上的砷，百分之八十到九十的铋和百分之六十到八十的锑。

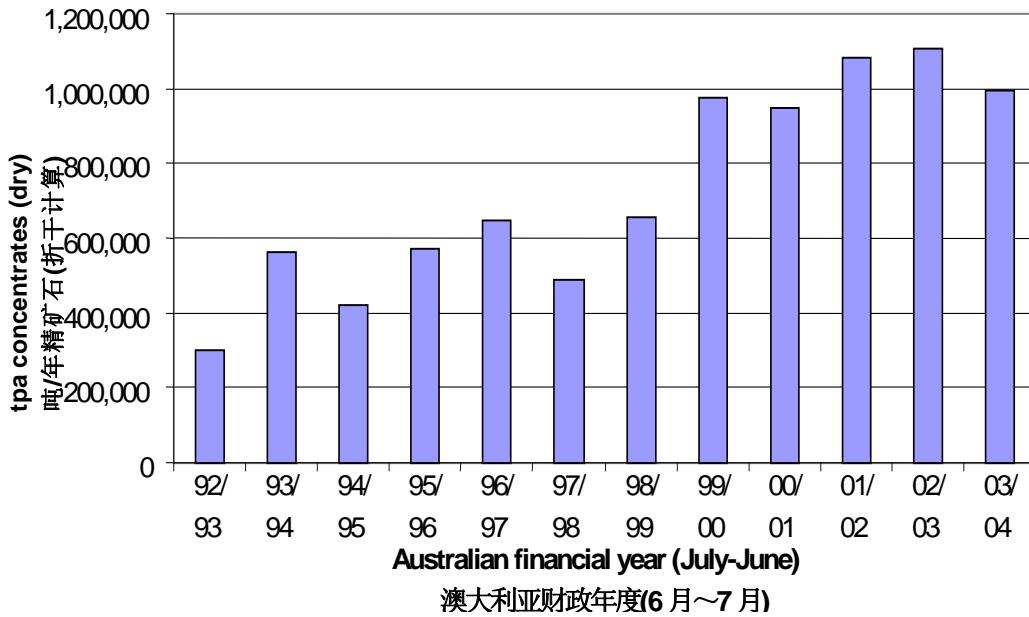
在示范厂运作期间，还对延长耐火材料寿命进行了攻关，在耐火材料衬里和钢壳体之间插入了水冷系统来降低耐火材料的磨损率，对各种耐火材料类型和安置技术进行比较试验。炉龄由最初的几个月，最终延长到了二十二个月。这项研究表明，只有经过多年的现场实践，在稳定的工艺条件下才可能开发出可靠的耐火材料方案，取得稳定的长期的耐火材料寿命。

5.2 芒苔艾萨公司的商业性铜熔炼炉

在示范性艾萨铜厂取得成功之后，芒苔艾萨公司于一九九二年八月投产了一个年产十八万吨铜的商业性艾萨铜冶炼厂，艾萨炉的内经为3.75米⁽¹²⁾，喷枪空气中富氧量为百分之四十五，冰铜含铜百分之六十，混入给料中的块煤为熔炼的主要燃料。熔池温度的调节和在停炉后熔池的加热由喷枪注入煤油实现。

如图一所示，商业性艾萨铜冶炼厂的产量逐年增长，尤其是在一九九八年新氧站建成后，喷枪空气中富氧量从百分之四十五提高到了百分之六十一，使处理的铜精矿量增加到每年一百万吨，生产粗铜二十五万吨，是设计值的一点四倍⁽¹³⁾。

图一，芒苔艾萨公司铜艾萨炉每年处理精矿量



表三所示为该艾萨炉的典型作业参数。

表三 芒苔艾萨公司铜艾萨炉典型的操作参数

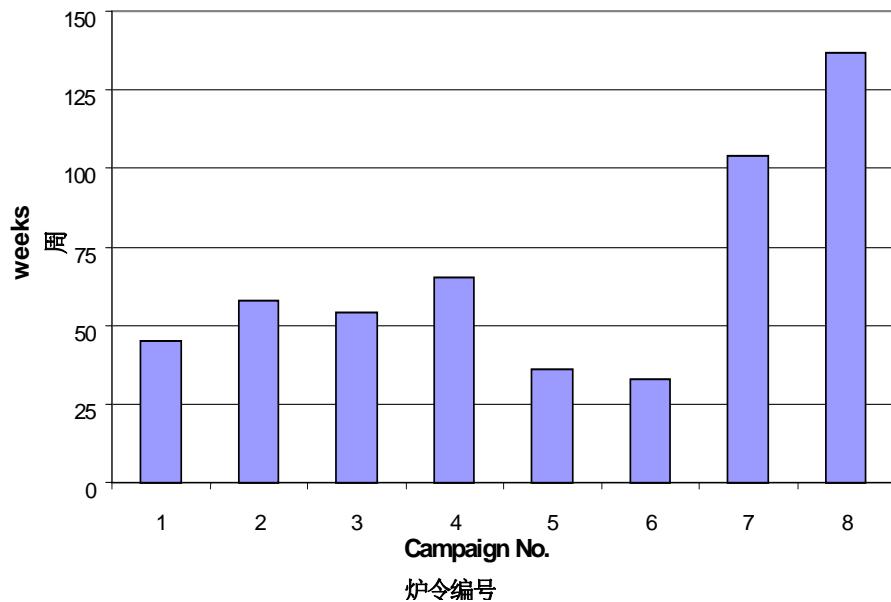
参数	数值	单位
每小时铜精矿处理量	160	小时吨
干矿化验铜品位	23.8	%
二氧化硅熔剂	3.4	小时吨
返回料	1.6	小时吨
焦粉	0.7	小时吨
天然气	706	Nm ³ /h
喷枪空气	20,210	Nm ³ /h
喷枪氧气 (95%)	23,580	Nm ³ /h
喷枪氧富集值	60.8	%
熔池温度	1172	degC
冰铜铜品位	57.0	%

在十二年的运行过程中，炉子耐火材料的寿命是逐年延伸的。芒苔艾萨公司的商业性艾萨炉没有使用水冷却装置，尽管示范厂安装的冷却装置取得积极的经验。这样决策的原因是担心商业炉采用水冷却装置会在熔池区产生问题。同时也感到如果精心选择耐火材料，改进砌炉技术和温度控制方法不用水冷也可取得两年的耐火材料寿命。

在炉子运行初期，对各种耐火材料和不同的砌炉方法做了大量试验。起初的炉龄为十二到十五个月。到了一九九八年，根据所取得的经验以及在过程控制方面的进展，耐火材料的性能有了较大地改善。耐火材料的磨损情况现在是在线监控的，可将炉内的操作状态及时地反馈给操作者，以便调整。自一九九八年以来，每期炉龄都为二年以上。图二所示为至目前为止为艾萨铜

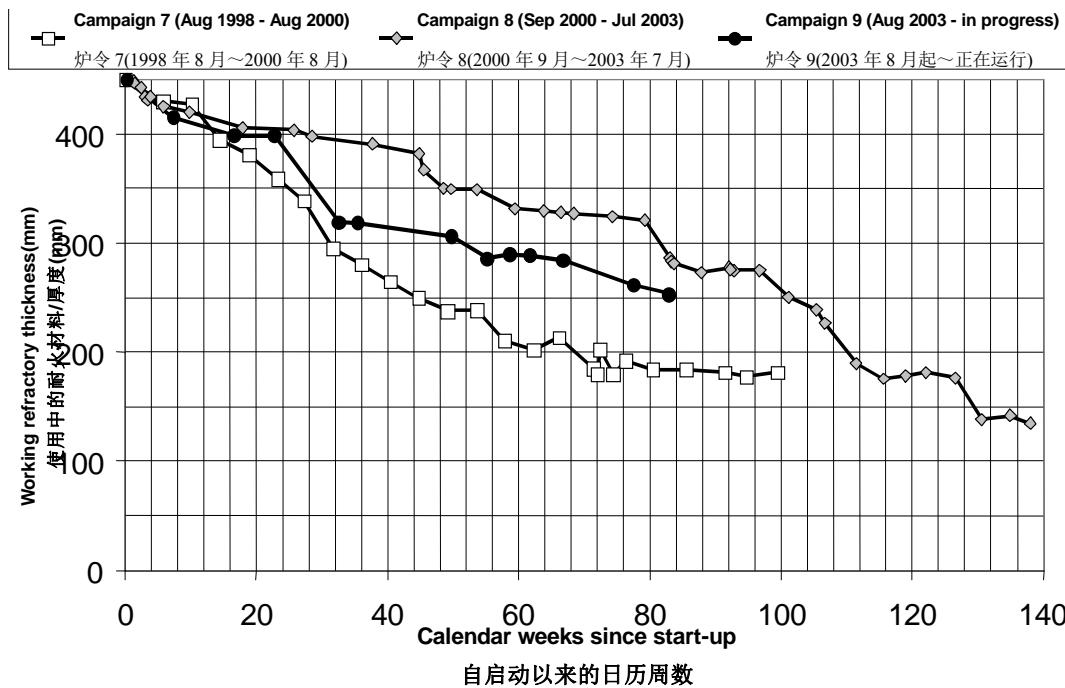
炉耐火材料炉龄的寿命情况。炉令 7 为一九九八年八月到二〇〇〇年八月，炉令 8 为二〇〇〇年 9 月到二〇〇三年七月。

图二，艾萨铜炉每次砌炉后耐火砖的使用周数



图三为自一九九八年以来每次砌砖后耐火材料的磨损速率。炉令 9 从二〇〇三年八月开始，其缓慢的磨损速率可望取得比炉令 8 的两年十个月更好的炉寿。每减少一次砌炉，芒特艾萨公司节省近两千万澳元的费用。

图三，艾萨铜炉耐火材料磨损速率



6.0 艾萨熔炼许可证工厂

6.1 美国道奇公司迈阿密冶炼厂铜艾萨炉

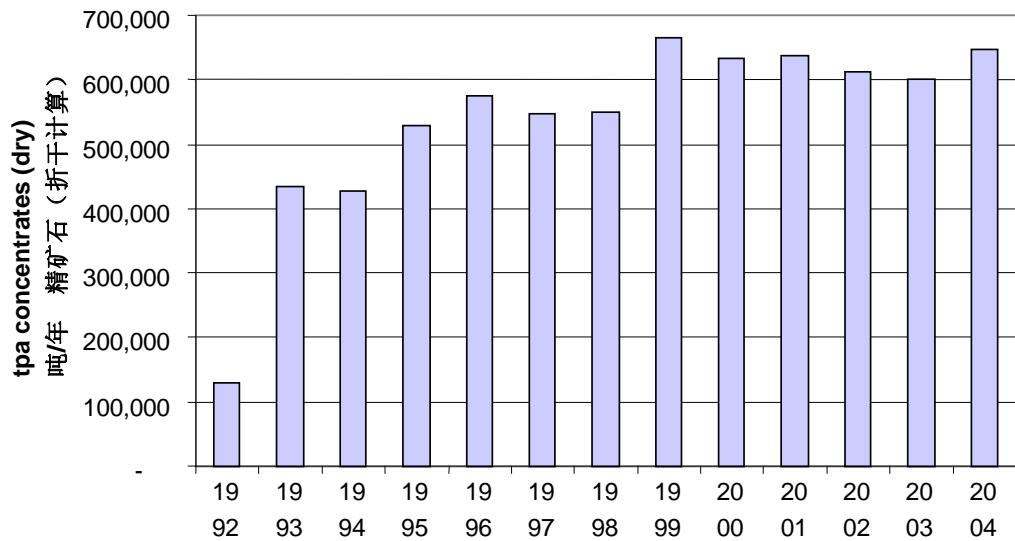
美国道奇公司在一九九〇年决定选择艾萨熔炼技术改造其铜冶炼厂。他们的决定是在比较了三菱法、诺兰达、闪烁法以及特尼安特等技术之后，并了解了艾萨示范工厂的运行结果而作出的。道奇公司在美国亚利桑那州的迈阿密艾萨铜熔炼厂是与芒苔艾萨公司在澳大利亚的年产十八万吨铜的艾萨铜熔炼厂同时动工的，并比芒苔艾萨厂早投产两个月。

美国道奇公司认识到采用没有经过商业性生产检验的艾萨熔炼技术的风险，并制定了一项风险控制计划，包括派三十五名人员到芒苔艾萨的艾萨铜示范工厂和艾萨铅冶炼厂学习。并在设计上做了三点变动。首先是使用电炉做沉降炉，而不是用保温沉降炉；其次是在余热锅炉的辐射和对流段之前安装了倾斜的水冷排气罩，而不是垂直的；第三点是使用喷枪注入天然气为炉子的主要燃料，而不是用块煤。喷枪空气的富氧量达到百分之五十。

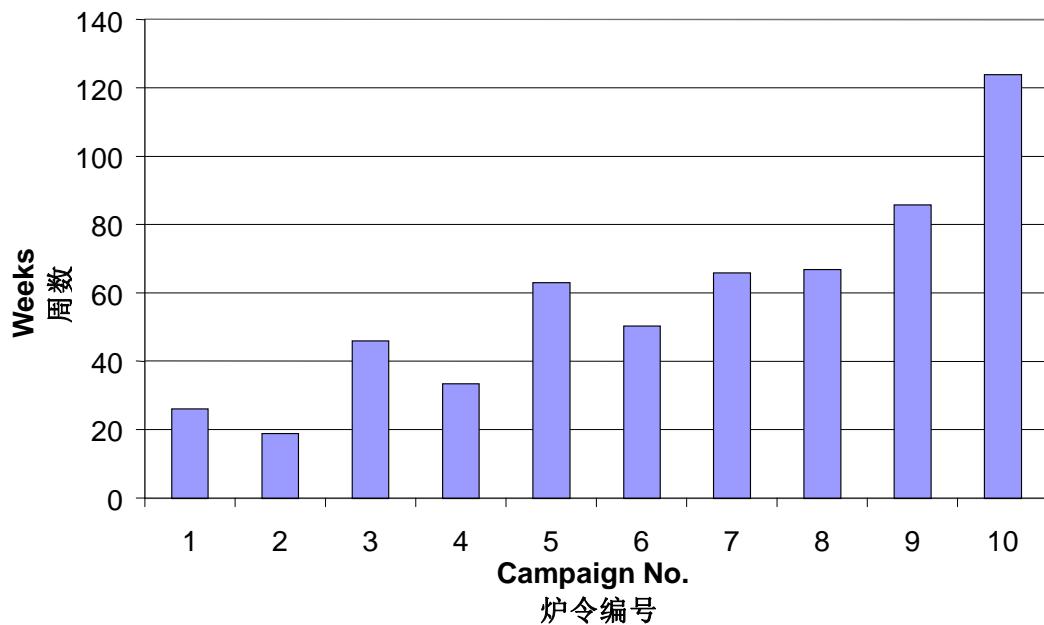
在所做的三点变动中，倾斜的水冷排气罩在最初几年成为停产的主要原因，排气管腐蚀和结块现象严重。后来倾斜的排气罩被一段垂直的辐射通道取代。沉降电炉的主要问题是渣含铜过高，直到一九九〇年使用天然气喷注技术才得到了圆满解决¹⁵。

图四和五给出了迈阿密厂在过去十二年期间处理量提高和耐火材料寿命改进的数据。

图四，美国道奇公司迈阿密艾萨炉的给料速率



图五，美国道奇公司迈阿密艾萨炉耐火砖寿命



6.2 印度斯特来特（Sterlite）公司的铜艾萨炉

印度斯特来特艾萨铜冶炼厂于一九九六年投产，原料全部为进口铜精矿。艾萨铜炉的原设计能力为每年六万吨，通过提高富氧量，现已增加到每年十八万吨铜产量。斯特来特在不到十年时间，从无到有，现在已经成为世界上重要的铜生产厂家之一了。斯特来特的新艾萨铜炉已于二〇〇五年五月投产，设计铜产量为每年三十万吨。

6.3 比利时尤米考（Umicore）公司的铜艾萨炉

比利时的尤米考贵金属冶炼厂使用艾萨熔炼技术处理各种一次性和二次性原料。该公司在九十年代末经历过的现代化改造，以求实现在严格的环保条件下有竞争力。改造的主要标志就是建造了艾萨熔炼炉，取代了多个作业，明显地减低了操作成本和二氧化硫的排放。自一九九七年以来，艾萨炉运作正常，对公司的再生原料利用业务起着重要的作用。

6.4 德国凯萨（Huettenwerke Kayser）公司的铜艾萨炉

凯萨铜冶炼厂是德国诺叨奇公司的子公司，与2002年投产了一座艾萨熔炼炉，取代了两座鼓风炉和三座皮氏转炉来进行二次铜回收。艾萨炉的投产大大地降低了该公司的操作成本并改善了冶炼厂的环保指标。

6.5 云南铜业公司的铜艾萨炉

作为铜冶炼厂改造项目的一部分，云南铜业于二〇〇五年五月开始运营自己的铜艾萨熔炼炉⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾，每年处理铜精矿六十万吨以上。该艾萨炉取代了一座老式烧结炉和两台电炉，喷枪空气中的富氧量为百分之五十，产出的冰铜品位为百分之五十五。艾萨炉的投产大大地改善了冶炼厂的环保指标和操作成本，硫的捕获率从百分之七十九提高到百分之九十六，能源消耗降低了百分之三十二。云南铜业的艾萨熔炼项目采用了芒苔艾萨公司最新的技术成果，云南铜业的技术人员在澳大利亚芒苔艾萨公司进行了七十多月的培训，其结果是该厂在投产后的两个月内便达到了设计能力。云南铜业艾萨炉的第一期炉龄从二〇〇二年五月到二〇〇四年九月继续了两年零四个月，取得了与芒苔铜冶炼厂最好的耐火砖寿命相类似的指标。

6.6 南秘鲁铜业公司的铜艾萨炉

南秘鲁铜业公司在选用艾萨熔炼之前，对各种技术做过调查，包括闪速熔炼、特尼安特转炉、诺兰达和三菱技术。选择艾萨技术的原因有许多，但最重要的是艾萨技术为该项目节省了巨额投资，而且公司项目组考察在美国，澳大利亚，印度和中国运作的艾萨炉过程中对其简单的操作和灵活性留下了深刻的印象。南秘鲁铜业公司的艾萨炉设计年处理量为一百二十万吨铜精矿，将取代两座反射炉和一座特尼安特转炉。两座旋转式沉降炉用来分离艾萨炉产出的冰铜和炉渣混合物。余热锅炉将烟气冷却并净化，再送到一座新建的硫酸厂造硫酸。吹炼工艺采用皮氏卧式转炉。超达技术公司将在芒苔艾萨冶炼厂对南秘鲁铜业公司技术人员进行培训，提供多年来积累的实际操作经验。该厂计划二〇〇六年投产。

6.7 赞比亚马帕尼铜业公司的铜艾萨炉

马帕尼铜公司在赞比亚新建的铜艾萨炉已经破土动工。该公司对艾萨熔炼，闪速熔炼，三菱工艺和特尼安特转炉技术比较后，认为艾萨熔炼具有如下优点：

- 结构紧凑，占地面积小，尤其适于老厂改造
- 投资成本较低。
- 运行成本低
- 高浓度的烟气适合硫酸生产。
- 操作简单

- 处理能力灵活，同一座炉子可在二〇〇六年开工时处理六十五万吨铜精矿，也可以在以后提高到每年八十五万吨的水平。

该艾萨炉将取代一座现有的电炉。冶炼厂包括新的给料制备系统，余热锅炉，电沉降炉，氧气站和酸厂，同时对转炉和阳极炉也做了改进。新冶炼厂将于 2006 年投产。

6.8 英国布瑞塔尼亚公司的铅艾萨炉

英国布瑞塔尼亚精炼厂于一九九一年投产了一座艾萨铅炉，从废电池的熔炼过程中回收铅^(8,9)。该厂的设计数据是在每小时一百二十公斤的示范铅炉上取得的，炉子内径二点五米。该厂在成功地运作了十二年后，于二〇〇三年关闭。当时超达锌公司接管了该厂，决定停止二次铅冶炼的业务。

6.9 马来西亚金属回收公司（MRI）的铅艾萨炉

马来西亚金属回收公司于二〇〇〇年在普劳·因达投产了一座二次铅艾萨炉，每年通过处理废电池来回收四万吨的电铅。该厂是依据在英国的布瑞塔尼亚（Britannia）精炼公司的艾萨铅炉设计的。

6.10 云南冶金集团的铅艾萨炉

云南冶金集团在中国曲靖新建的铅艾萨炉设计产量每年十六万吨铅精矿，生产直接铅和高铅渣。后者在固化后送到云冶自行设计的鼓风炉进行还原。艾萨炉将取代传统的烧结厂，达到节能，降低污染的目的。

艾萨炉与烧结工艺不同，可将铅精矿中近百分之四十的铅直接炼成金属铅，从而降低了鼓风炉对炉渣还原的负荷。鼓风炉比烧结厂体积小得多而且结构简单，可以方便的加以屏蔽，消除排放污染。来自艾萨炉的烟气中二氧化硫浓度较高，适合用传统的制酸工艺转化为硫酸。另外，艾萨炉生产的高铅渣含硫低，利用鼓风炉还原时所排放的二氧化硫量要比处理传统的烧结块低得多，进一步降低了环境污染。

6.11 埃吉普铜镍艾萨炉

在艾萨炉示范厂进行的铜镍冶炼试验的成功导致了澳大利亚埃吉普公司（Agip Australia）在西澳大利亚的无线电山建造了新的艾萨炉生产高冰镍和冰铜⁽¹¹⁾，于一九九一年十一月投产，在三个月内即达到了每小时处理七点五吨精矿的设计能力。入料含镍百分之七，铜三点五，产品中镍铜品位为百分之四十五。不幸的是镍的价格由一九八九年的每磅六美元以上下跌到一九九一年的每磅三美元左右。尽管这个项目在技术上是成功的，埃吉普（Agip）公司还是在运行不到六个月的时间把采矿、选矿厂和冶炼炉关掉了。后来的矿主只侧重采矿和选矿，而艾萨炉始终废弃在那里。

7.0 艾萨熔炼法的技术特点

中国云南铜业公司的艾萨炉于二〇〇二年五月成功投产，刚好是芒苔艾萨公司开发艾萨熔炼技术的二十五周年。由于众多的管理和专业人员多年的不懈努力，艾萨熔炼技术已经发展成为成本低、效率高，污染小，投产期短，作业寿命长，成熟的熔炼新技术。云铜艾萨炉的成功还表明经过二十五年的持续发展，艾萨熔炼技术不但先进成熟，而且在世界上任何国家都可以立项，建厂，迅速投产，并将技术投资风险降到最低。超达技术公司在过去二十五年里还积累了丰富的市场经验和在全球范围内成功建厂的业绩。艾萨熔炼技术的主要特点分述如下。

7.1 耐火材料

耐火材料的寿命对于任何火法冶炼工艺都是关键的。耐火材料的类型，安装方法、冷却系统和监控设备的发展研究需要较长的周期。芒苔艾萨公司从一开始就把提高耐火材料的寿命作为艾萨技术发展的重点之一，与赛洛(CSIRO)，昆士兰州立大学，澳大利亚矿业研究协会、耐火材料供应商以及其它的行业伙伴一起完成了一系列的项目，研究耐火材料磨损的机理，并把成果应用到商业性艾萨炉的运作上。

为了寻找最佳的艾萨炉炉壁冷却系统，芒苔艾萨公司做了大量的实际研究工作，特别是沿炉子的渣线附近，比如有的艾萨炉在耐火材料衬里和钢壳体之间安装了冷却铜块，有的艾萨炉装备了外部喷射冷却系统。在芒苔艾萨铜冶炼厂的艾萨炉没有采用任何水冷却措施，经过大量的优化研究，取得了炉龄为二年半的业绩。实践证明通过使用高品质的耐火材料，细心而认真的安装步骤，对熔池温度进行严格控制，在线监控以及利用十多年积累的操作经验是可以取得理想的耐火砖寿命的。最近，芒苔艾萨铜冶炼厂提出了炉龄为五年的目标并正在开展研究以达到这一目标。

7.2 控制系统

艾萨炉关键参数的控制完全是自动化的，所以艾萨炉的控制极为简单。由于艾萨炉的进料是连续的，但阶段排料，芒苔艾萨公司多年来一直在完善准确控制喷枪在炉中移动位置的办法，目标是保证喷枪端部总是位于熔融体内，尽量减少喷枪端部磨损完成所要求的物料混合和反应速率。在中试和示范艾萨炉上开发出的控制系统在商业规模的艾萨炉运作中又取得了改进。目前对喷枪端部位置的控制可保证相当准确程度，在正常的操作期间，喷枪位置完全是自动控制的，无需人工干预。

艾萨炉基本上是一个典型的搅拌罐式反应器，整个容器的熔池成分和温度都是非常均匀的。可靠的测量和反馈系统可以对温度进行精确的控制。在九十年代芒苔艾萨公司一直都在开发这样的系统，现在可以把熔池温度控制在正负十摄氏度的范围内。

7.3 废气处理系统

废气处理系统是艾萨炉不可分割的部分。冶金粉尘冷却后的沾结性极强，使得余热锅炉的设计非常困难。令人满意的设计方案是在花费了好多年的时间和巨额资金，在多座艾萨炉上反复验证之后才完成的。

中试和示范规模的艾萨炉使用的是蒸发冷却器和衬有耐火材料的烟气通道。但对商业规模的艾萨炉来讲，最好的选择是余热锅炉以便提高工艺的热效率。多年来对不同炉型的应用取得了不同程度的成功。芒苔艾萨的铜艾萨炉装有循环流态化床锅炉，优点是可使气体快速冷淬，缺点是有较大的压力降。道奇公司的铜艾萨炉原有水冷却排气道总是存在结块和酸凝聚腐蚀问题⁽²⁰⁾。芒苔艾萨公司的铅氧化炉和还原炉上设装有传统的辐射和对流锅炉，但是由于锅炉设计时没有考虑到烟尘沾结后热传导率下降的问题，烟气量一直达不到设计能力。以上这些问题在超达技术公司和锅炉公司的多年努力下已经完全得到了解决。超达公司现在可以保证为新的艾

萨炉项目提供成熟可靠废气系统的设计，云南铜业公司的锅炉自投产以来一直运转正常就是最好的证明。

7.4 艾萨炉体设计

最初的赛洛熔炼专利的主要内容是气冷喷枪的概念。当时设计的小型顶吹炉子似乎工作正常。不过，随后的多年经验表明，小型顶吹炉子的设计在用于商业规模炉子上时出现了许多问题。从喷枪中喷出的气体使熔池中熔融体产生一个复杂的波动，把周期性的很强的水平和垂直力传送给炉壁和炉底⁽²¹⁾。为了保证炉子在受力下能正常工作，对炉子地基和支撑系统的设计给予了极大的重视。炉子和支承系统之间的连接方法也做了不断地改进，做到既能允许耐火材料和钢壳体的膨胀又能保证冶炉的稳定性。

最初的炉顶设计是斜坡式的，主要是为了提高气流的动力学效果。但在实践中发现水平式炉顶更易于建造和维护，与倾斜式相比也没有太大的缺点。第一次设计时平炉顶使用的是耐火材料衬里的和水冷的钢构件，后来改用了维护方便的水冷铜块。最近我们发现对于铜熔炼来说，锅炉管道构成的平炉顶的方案是较好的，但要求工作温度大大高于废气的露点。

8.0 艾萨熔炼技术成功原因

在技术发明史上，许多好的设想都没能过渡到工业上的成功，所以回顾一下艾萨技术得以成功和国际化的原因是必要的。

艾萨熔炼技术成功的原因有多种，赛洛(CSIRO)喷枪的发明是它的开始，但是关键的原因是工程技术人员在冶炼厂的工业环境下将艾萨炉发展成具有商业价值的先进工艺。芒苔艾萨公司员工包括一些艾萨熔炼技术的“开拓者”的冒险精神和澳大利亚政府工业研发促进会(AIRDIB)的支持在项目的早期也起到了重要的作用。同样重要的是艾萨熔炼技术是经过严格的开发步骤实现的，包括实验室研究、中间工厂试验、长期的示范厂运作以及在商业性艾萨炉上进行的耐火材料试验。

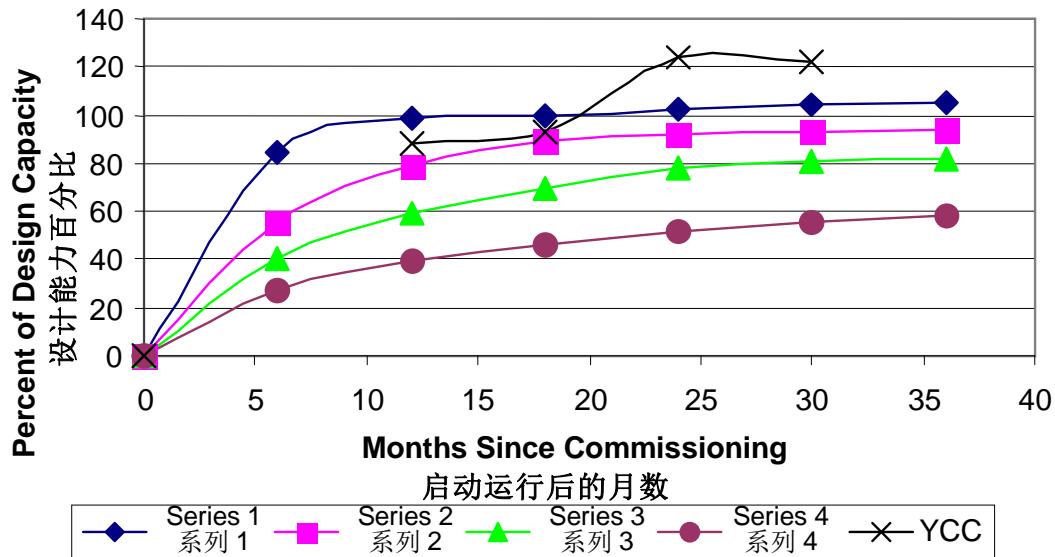
最后还应提到操作人员在艾萨炉发展过程中的密切参与起了极大的作用。芒苔艾萨公司在开发过程的早期就把操作人员作为项目必要的组成部分。操作人员意识到了艾萨炉的成功对冶炼厂前途和自身经济利益的重要性，都努力的工作，为项目出谋划策，在每次关键性的开发阶段他们都提出了非常宝贵和切合实际的建议。

艾萨熔炼技术的成熟和先进性在云南铜业的快速投产达标上充分地显示出来，尤其是与第一座艾萨炉和其它冶炼技术相比。一些学者对过去几十年所有冶炼厂试车指标和达产时间进行了统计，为新建的冶炼厂提供了一个评比标准。CRA公司的数据表明⁽²²⁾一半以上的冶炼厂在投产初期的一到三年只达到设计能力的百分之七十，并指出低产的关键是在设计商业性工厂过程中，依据实验室和中试厂数据而确定的放大比例有误。这一点由于芒苔艾萨公司在开发艾萨熔炼技术的过程中给予了高度的重视而得到了圆满的解决。关于新冶炼厂迟迟不能达标，令人失

望的耐火砖性能和难以操作的废气处理系统是主要原因。在艾萨炉的发展史上道奇公司的迈阿密艾萨炉和芒苔艾萨的商业艾萨炉在投产的最初五到六年间锅炉一直不正常，在锅炉设计上作了重大改进后才得以解决，并为以后多座新艾萨炉的顺利投产提供了宝贵的经验。

Terry McNulty的一篇文章⁽²³⁾分析了四十一座冶炼厂的开炉情况，包括六个铜和镍冶炼厂，按启动后六，十二，二十四和四十八个月达到设计能力占冶炼厂总数百分比的情况进行了分组，如图八所示。

图八， 新冶炼厂达到冶炼厂年设计能力的比例 (YCC 代表云南铜业)



系列1的冶炼厂是最成功的，在启动后12个月内达到设计能力的百分之百。系列4是不成功的，在三十六个月后仍然不足设计能力的百分之四十。芒苔艾萨和道奇公司的艾萨炉属于系列2中，该系列冶炼厂至少具有下述特点之一：

- 如果冶炼厂的工艺是转让技术，那它就是第一次转让中的一个（道奇公司就是这种情况）。
- 从炉子的大小和处理的金属种类来讲，新建的冶炼厂都是初试（芒苔艾萨和道奇公司的艾萨炉都是当时最大的）。
- 中试规模的试验工作不完善（芒苔艾萨和道奇公司的艾萨炉不属此列）
- 关键性设备的工艺条件非常严苛，例如高温（适于艾萨炉工艺）
- 冶炼厂采用新技术的部分已工作得很好，但配套设施还没有跟上（在芒苔艾萨和道奇公司的艾萨炉调试中，废气处理系统是主要问题，但有人会说这也是艾萨熔炼技术的一部分）。

按照McNulty的统计数据以及考虑到云南铜业艾萨炉开炉后其处理能力主要是受精矿供应不足的局限，云铜的艾萨炉可以分类到系列1的冶炼厂中。这类冶炼厂的特点是：

- 依靠一种成熟的技术（云铜属此类）

- 冶炼技术在能力和应用上已经有成功的先例(云铜属此类)
- 如果新技术是转让性质的，在此以前已有过许多许可用户了(云铜属此类)

9.0 结论

新的发明一般分为革命性的或渐进性的。三十年以前由弗罗伊德博士发明的赛洛喷枪熔炼技术是革命性的。把这种革命性的技术概念发展成可持续发展的冶炼工艺是结合了许多渐进性发明的。两者的结合导致了艾萨熔炼技术在全世界铜工业的广泛应用。艾萨炼铅工艺也正在逐步推广之中。在欧洲和亚洲的冶炼厂中还使用艾萨熔炼处理废杂铜和废电池(铅回收)。艾萨熔炼技术处理其它物料的应用也在开发中。表四所列为许可证客户正在运行和正在建设中的艾萨炉。

艾萨熔炼技术的商业成功有许多因素，包括许多个人的贡献在内，不仅有赛洛(CSIRO)和芒苔艾萨公司的人员，还有在世界各国艾萨技术许可公司人员的贡献。毫无疑问，操作人员对于艾萨技术的自信心和责任感也是成功的重要原因。

在过去十年中，艾萨熔炼技术在世界有色金属工业中的普及率高于任何一个熔炼技术，成功投产了六座铜艾萨炉和两座铅艾萨炉。这些项目在技术经济上的成功对艾萨熔炼技术在世界上的进一步推广打下了坚实的基础。

表四 许可证客户正在运行和正在建设中的艾萨炉

投产日期	许可证客户	客户地点	处理能力
1992	美国道奇公司 迈阿密冶炼厂	美国亚利桑那州	650,000 吨/年铜精矿
1996	印度斯特赖特实业 公司	印度图梯考林 (Tuticorin)	450,000 吨/年铜精矿
1997	优米考尔贵金属公 司	比利时郝伯肯 (Hoboken)	200,000 吨/年混合进料
2000	金属回收实业公司	马来西亚普老·因达 (Pulau Indah)	40,000 吨/年金属铅
2002	德国开赛 (Kayser) 冶炼厂	德国吕南 (Lünen)	150,000 吨/年废铜
2002	云南铜业公司	云南昆明	600,000 吨/年铜精矿石
2005	斯特赖特实业有限 公司 (印度)	印度图梯考林 (Tuticorin)	1,200,000 吨/年铜精矿石
2005	云南冶金集团	云南曲靖	160,000 吨/年铅精矿石
2006 (正在建设中)	南秘鲁铜业公司	秘鲁爱罗 (Ilo)	1,200,000 吨/年铜精矿石
2006 (正在建设中)	莫帕尼 (Mopani) 铜矿公司	赞比亚穆弗利拉 (Mufulira)	650,000 吨/年铜精矿石

鸣谢

作者感谢那些从一开始就认识到艾萨熔炼活力的人们以及他们在这些年中为它的发展做出的贡献;也感谢芒苔艾萨矿业公司,道奇迈阿密公司以及云南铜业公司允许发表他们的生产数据。

参考文献

1. J.M. Floyd, G.J. Leahy, R.L. Player, D.J. Wright, "Submerged Combustion Technology Applied to Copper Slag Treatment", AusIMM Conference, North Queensland, 1978.
2. K.R. Barrett, "Lead Smelting into the 90's", ILZIC Silver Jubilee Conference, New Delhi, 1988.
3. W.J. Errington, J.H. Fewings, V.P. Keran, W.T. Denholm, "The ISASMELT lead smelting process", Trans. Instn. Min. Metall., Section C, vol 96, 1987
4. W. T. Denholm, J. M. Floyd, W. J. Errington and A. N. Parry, assigned to Mount Isa Mines Ltd, "High Intensity Lead Smelting Process" U.S. Patent 4514222, November 1983.
5. S.P. Matthew, G.R. McKean, R.L. Player and K.E. Ramus, "The continuous ISASMELT lead process", Lead-Zinc '90, T.S. Mackey and R.D. Prengaman, Eds., TMS, Warrendale, 1990.
6. R.L. Player, C.R. Fountain, and J.M.I. Tuppurainen, "ISASMELT developments", Mervyn Willis Symposium, University of Melbourne, Melbourne, 1992.

7. C.R. Fountain, M.D. Coulter and J.S. Edwards, "Minor element distribution in the copper ISASMELT process", Copper '91, Volume IV, C. Landolt, A. Luraschi and C.J. Newman, Eds., Pergamon Press, New York, 1991.
8. W.J. Errington, J.S. Edwards and P. Hawkins, "ISASMELT technology – current status and future development", South African Institute of Mining and Metallurgy Colloquium, 1997.
9. R.B.M. Brew, C.R. Fountain and J. Pritchard, "ISASMELT for secondary lead smelting", Lead 90: 10th International Lead Conference, Nice, The Lead Development Association, 1991.
10. S. Jahanshahi and R.L. Player, "Process chemistry studies of the ISASMELT lead reduction process", Non-ferrous Smelting Symposium, Port Pirie, 1989.
11. P. Bartsch, B. Anselmi and C.R. Fountain, "The Radio Hill Project", Pryosem WA, E.J. Grimsey and N.D. Stockton, Eds., Murdoch University Press, Perth, 1990.
12. C.R. Fountain, J.M.I. Tuppurainen, N.R. Whitworth and J.K. Wright, "New developments for the copper ISASMELT process", Extractive Metallurgy of Copper, Nickel and Cobalt, Volume II, C.A. Landolt, Ed., TMS, Warrendale, 1993.
13. J.S. Edwards, "ISASMELT – a 250,000 tpa copper smelting furnace", AusIMM '98 – The Mining Cycle, AusIMM, Melbourne, 1998.
14. R.R. Bhappu, K.H. Larson, R.D. Tunis, "Cyprus Miami Mining Corporation smelter modernization Project Summary and Status", EPD Congress 1994, G. Warren, Ed., TMS, Warrendale, 1993
15. J.E. Salle and V. Ushakov, "Electric settling furnace operations at the Cyprus Miami Mining Corporation copper smelter", Copper 99-Cobre 99 International Conference, Volume V – Smelting Operations and Advances, D.B. George, W.J. Chen, P.J. Mackey and A.J. Weddick, Eds., TMS Warrendale, 1999.
16. Y. Li, P. Arthur, "Yunnan Copper Corporation's new smelter – China's first ISASMELT", Yazawa International Symposium on Metallurgical and Materials Processing, Volume II – High Temperature Metal Production, F. Kongoli, K. Itagaki, C. Yamauchi, H.Y. Sohn, Eds., TMS, Warrendale, 2003
17. P. Arthur, P. Partington, W. Fan, Y. Li, "ISASMELT – Not just a flash in the pan", Copper 2003-Cobre 2003, Volume IV – Pyrometallurgy of Copper (Book 1), C. Diaz, J. Kapusta, C. Newman, Eds., CIMM, 2003.
18. J. Ross and D. de Vries, "Mufulira smelter upgrade project - 'Industry' Smelting on the Zambian Copperbelt", Pyrometallurgy 05, Capetown, Minerals Engineering International, 2005.
19. P.Arthur, B.Butler, J.Edwards, C.Fountain, S.Hunt and J.Tuppurainen, "The ISASMELT process – an example of successful industrial R&D", Yazawa International Symposium on Metallurgical and Materials Processing, Volume II – High Temperature Metal Production, F. Kongoli, K. Itagaki, C. Yamauchi, H.Y. Sohn, Eds., TMS, Warrendale, 2003
20. A. H. Binegar, "Cyprus ISASMELT startup and operating experience", Copper 95 – Cobre 95, Volume IV – Pyrometallurgy of Copper, W.J. Chen, C. Diaz, A. Luraschi and P.J. Mackey, Eds., TMS, Warrendale, 1995.

21. R. Player, "Copper ISASMELT – process investigations", The Howard Worner International Symposium on Injection in Pyrometallurgy, M. Nilmani and T. Lehner, Eds., TMS, Warrendale, 1996.
22. J. Agarwal and F. Katrak, "Economic impact of startup experiences of smelters", Charles River and Associates, A paper based on "Startup of New Mine, Mill/Concentrator, and Processing Plants for Copper, Lead, Zinc and Nickel: Survey and Analysis", World Bank, 1979
23. T. McNulty, "Developing innovative technology", Mining Engineering Magazine, October 1998.