

艾莎熔炼技术 - 蒙特艾莎公司铜冶炼厂的近况

J.L. Bill¹, T.E. Briffa¹, A.S. Burrows¹, C.R. Fountain¹, D. Retallick¹,
J.M.I. Tuppurainen¹, J.S. Edwards², and P. Partington²

¹蒙特艾莎矿山有限公司, 蒙特艾莎, 昆士兰州, 澳大利亚

²蒙特艾莎矿冶集团公司工艺技术部, 布理斯本, 昆士兰州, 澳大利亚

摘要

蒙特艾莎矿山有限公司铜冶炼厂阳极铜的处理能力在一九九八年从十八万吨增加到二十六万五千吨。这一成就是以具有独创性的铜艾莎熔炼炉为基础取得的, 其原料处理量已达每小时一百八十四吨。艾莎炉的进料量从每小时一百零二吨到每小时一百八十四吨的大幅度提高只需增加喷枪空气中的富氧量, 无须对艾莎炉做任何变动。

扩建后耐火材料连续使用寿命已达两年。未来的耐火材料寿命在不使用冷却水的条件下预计可达四年。

目前艾莎铜熔炼炉已经在美国, 比利时和印度获得应用。中国和德国的铜艾莎熔炼炉正在建造中。除此之外, 在英国和马来西亚还投产了铅艾莎熔炼炉。

本文讨论了蒙特艾莎公司的铜艾莎熔炼炉及铜冶炼厂在扩建后的作业情况, 作业数据以及耐火材料的使用情况。

1.0 引言

哈佛大学商校的 Clayton Christensen 教授的名著“发明者的困境”是一九九七年最畅销的管理书之一(1)。书中讲到新技术有时会使某一工业中的大企业被能够更快采用新技术的后起之秀所取代。书中列举的例子包括计算机硬盘产家的不断更换, 缆绳操作的挖掘机被液压操作机器的取代, 联合作业的钢铁公司受到来自小型工厂的攻击。

Christensen 教授称这类新技术为“破坏性”技术, 因为他们具有打破某一工业现有次序的潜力。这类技术初期大都是从被主导厂家忽略了的边缘市场发展起来的。它们的存在虽然引起了大企业的注意, 但同其它更稳妥的投资方案相比, 发展这些技术的投资利润小。不过, 小型企业认为边缘市场有利可图, 而且它们有动力把新技术发展下去以推广到更广阔的市场上去。在这点上, 小型企业的导向作用是那些已经确立了它们市场地位的大企业所难取代的。小企业变成主导者, 而大企业慢慢从舞台上消失。

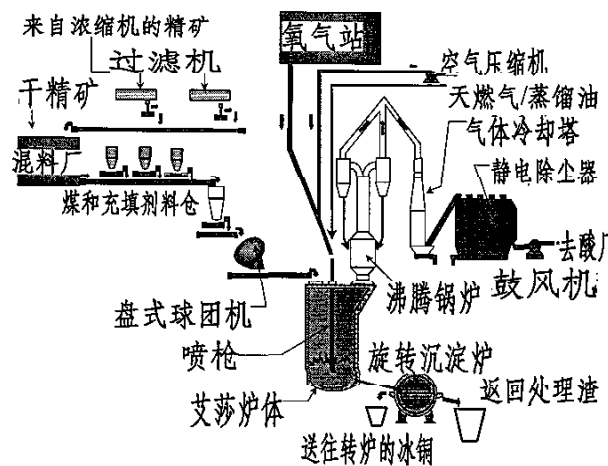
我们认为艾莎熔炼工艺与 Christensen 教授所说的“破坏性”技术相似。艾莎熔炼技术是由蒙特艾莎矿山公司(MIM)发展起来的。这项技术的前身是澳大利亚政府研究机构联邦科学与工业研究组织(CSIRO)发明的晒罗熔炼法(SIROSMELT)。艾莎熔炼工艺已经在澳大利亚, 美国, 英国, 比利时, 德国, 印度, 马来西亚和中国在取代传统熔炼技术的过程中得到了商业应用。对艾莎熔炼工艺的进一步改善使得三家采用艾莎法炼铜公司的成本降到世界最低。艾莎熔炼工艺处理铜精矿量已高达每年二百万吨。

艾莎熔炼技术的全套服务是由蒙特艾莎矿冶集团公司工艺技术部提供的。全套服务内容包括艾莎炉设计和组建, 发放使用艾莎熔炼工艺的执照, 提供关键设备, 在蒙特艾莎公司的冶炼厂中进行现场培训, 新炉调试以及对客户提供持续性的技术支持。

本文重点讨论艾莎炼铜法在蒙特艾莎公司的最近发展以及最新的生产指标。

2.0 艾莎熔炼工艺简介

艾莎熔炼炉是内衬耐火材料的竖炉，其内装有特殊设计的插入熔融物体池中的浸没式燃烧喷枪。空气或者富氧气通过喷枪射入融池中造成剧烈搅拌，产生快速反应。同早期的晒罗熔炼工艺比较艾莎熔炼工艺的诱人特点在于其独特的低压旋涡器的设计。艾莎炉喷枪典型的作业压力为八十千帕左右，采用单段鼓风机即可提供燃烧气体，避免了昂贵压缩机的使用。艾莎炉已被用于熔炼铜精矿，镍铜精矿，铅精矿，铅和铜的二次材料。图一是蒙特艾莎铜冶炼厂艾莎熔炼工艺流程。



图一 蒙特艾莎铜艾莎熔炼工艺流程

3.0 一九九七年至今艾莎熔炼工艺在世界范围的发展

艾莎熔炼工艺的发展史早期已有文章介绍(2-6)。本文重点讨论一九九七年以来的进展。表一列举了一九九七年以来新建的艾莎炉和正在建设中的项目。

表一 一九九七年以来新建的艾莎炉

日期	公司	厂址	厂型	处理量
1997	UNION MINIRE	HOBOKEN, 比利时	二次铜熔炼	每年二十万吨原料
2000	METAL RECLAMATION INDUSTRIES SDN. BHD.	PULAU, 印度	二次铅熔炼	每年四万吨铅金属
2002	云南铜业	昆明, 中国	铜熔炼	年产冰铜中含十二万五千吨铜
2002	HOTTENWEREKE	LONEN, 德国	二次铜熔炼	每年十五万吨二次铜料

4.0 一九九七年以来蒙特艾莎公司冶炼厂的发展

4.1 关键决定

一九九七年是铜艾莎炉发展的分水岭。蒙特艾莎公司决定关闭其焙烧炉和反射炉，使用铜艾莎炉熔炼全部铜精矿。蒙特艾莎公司同时开始扩建铜冶炼厂将其处理量提高到每年二十六万五千吨。澳大利亚西部矿山公司所属的化肥子公司也决定开发其在昆士兰省磷山附近的磷矿并建造一座酸厂将铜熔炼厂排放的二氧化硫转变为硫酸用于化肥生产。

下面列举的现场改造都促进了铜熔炼炉产量的提高

- 铜精矿品位从25%提高到27%
 - 新艾莎炉进料系统的安装，包括混料设施
- 第二台日产氧气525吨氧气站的安装
- 艾莎炉废气处理系统中鼓风机处理量的提高
 - 艾莎熔炼厂中转动沉淀炉长度加长
- KRESS型渣车取代了转动沉淀炉水淬渣系统
- 艾莎炉冰铜品位提高到62%
 - 第四座 Peirce-Smith 转炉的安装
- 转炉车间安装了一台新的鼓风机
- 转炉车间两台吊车的更换，提高了机械可靠性
 - 关闭焙烧炉和反射炉
- 阳极铜炉处理量增加
- 阳极铜浇机更新

艾莎炉本身没做任何改动。以上冶炼厂各项改造的调试另有文章介绍(7)，本文不加讨论。艾莎炉最近的详细作业指标请见表二。

4.2 艾莎炉耐火材料寿命

一九八七年到一九九一年，蒙特艾莎矿山公司投产运行了每小时处理原料十五吨的中间型艾莎炉试验厂，其耐火材料寿命为八十周。一九九二年工业规模铜艾莎炉建成时，耐火材料寿命是根据中间试验厂的八十九周耐火材料寿命估算的，预计寿命为两年。不过最初的结果令人失望。艾莎炉投产后最好的耐火材料寿命为六十五周。为了解决这一问题，蒙特艾莎公司对不同的耐火材料和砌炉技术做了大量的试验。同其它火法冶金工业上的耐火材料难题一样，确定最佳材料和操作方法化了多年时间。

表二 蒙特艾莎公司铜艾莎炉作业参数

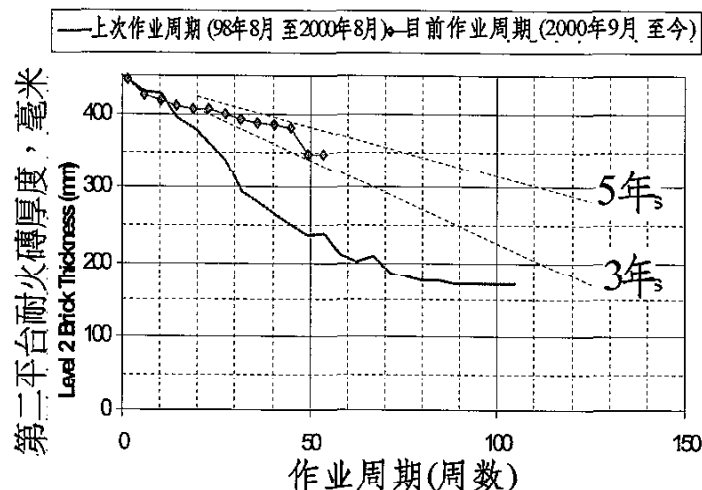
参数	数值
设计每年处理铜精矿量	一百万吨
耐火砖内部炉体设计	
直径	3.75米
池深	1-2米
排料口数目	一个
排料口设计	水冷铜块

喷枪设计	
枪外部直径	0.5米
材料	不锈钢
枪头位置	入渣层 0.3米
旋涡器两端压差	80 千帕左右
吹风流量	每分钟 750 标米
富氧量	平均 60%
碳氢燃料	每小时 860 标米天然气
给料参数	
给料制备	潮湿球团料
处理精矿量(干量)	每天 2850 吨
精矿含铜量	25-27%
精矿水份	9%
加煤量	每天十吨
二氧化硅添加剂	每天 78 吨
石灰添加量	无
铜渣回炉	每天 100 吨
其它	每天 50 吨
产品	
冰铜-渣混合物	
下段作业	转动沉降炉
温度	1220 °C
废气	
SO ₂ 体积含量	锅炉入口处浓度 27%
温度	1220 °C
灰尘量	每天 25 吨
沉降后的熔融产品	
冰铜	每天 1300 吨
冰铜品位	62% 铜
下段作业	Peirce-Smith转炉
出渣量	每天1270吨
硅铁比	0.78
渣处理	返回熔炼炉

对理解艾莎熔炼工艺耐火材料磨损机理的突破是在一九九八年取得的。在对作业方式做了相应改进后，效果明显，耐火材料磨损率大幅度下降。最近的一批耐火材料是在使用两年后由于锅炉的定期检查不得不报废的。在拆炉过程中发现，耐火砖的剩余厚度还可再坚持六到十二个月。

最近的运转周期中对耐火材料磨损控制作了进一步改善，损耗又有下降。图二给出了现在和上一个运转周期中耐火材料磨损的月指标。

艾莎炉炉砖厚度



图二 现在和上一个运转周期中耐火材料磨损的月指标。

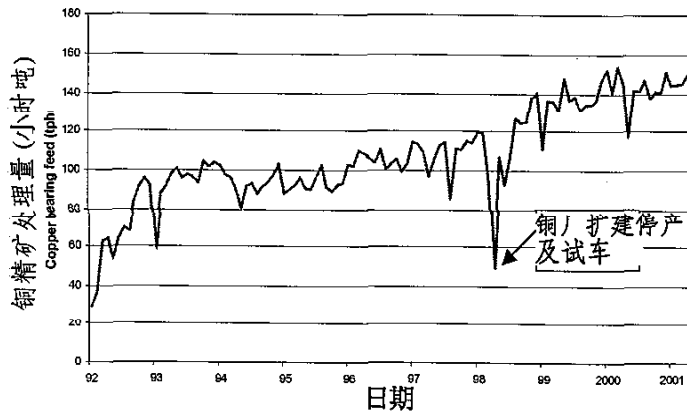
炉子运转四十五周后，磨损最严重处的砖厚度损失为七十毫米，而上次运转周期相应作业时间的砖厚度损失为二百毫米。图二中的另外两条线为三年和五年耐火材料寿命的预报线。

根据目前测定的磨损率，现在在炉中的这批耐火砖预计寿命可达四年之久。耐火材料寿命的延长没有采用水冷措施。水冷费用昂贵，作业复杂，在冶金炉上使用还有爆裂的危险。

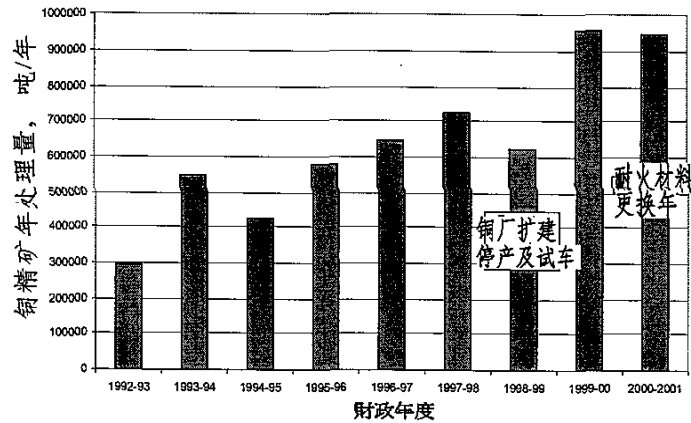
4.3 艾莎炉原料处理量

一九九七年以前，艾莎铜炉给料量的提高受到后续作业的限制。原因是Peirce-Smith转炉要同时处理艾莎炉和反射炉的冰铜而使其成为冶炼厂的颈口。一九九七年底反射炉关闭和一九九八年第二座氧气站投产后，艾莎炉的给料量有了明显的增加。最高小时处理能力达一百八十四吨。不过平均处理量仍然受到旋转沉降炉无备用处理能力的限制。当转炉，阳极炉或者阳极铜浇铸机出故障时，艾莎炉不得不降低处理量或停产。图三中给出的是艾莎炉的月平均处理量。

图四给出的是从一九九二年艾莎炉投产后每年铜精矿处理量。由图可知，处理量是每年增加的，最大产量是在一九九〇到二〇〇〇财政年度(七月一日到六月三十日)取得的，年产量为九十五万七千七百七十三吨。二〇〇〇到二〇〇一财政年度的总产量由于换耐火材料停产的影响而有所下降。不过在目前的财政年度中，铜精矿处理量可期望超过一百万吨。处理量的增加在很大程度上是提高喷枪空气中富氧率取得的。富氧率目前通常高达67%。



图三 艾莎炉一九九二年投产以来月平均原料处理量



图四 一九九二年以来每财政年度处理的铜精矿总量

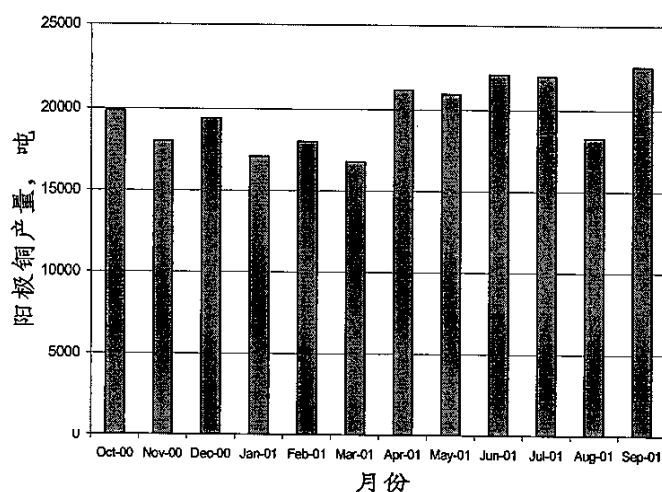
4.4 铜冶炼厂生产指标

图五给出了在最近的耐火材料使用周期间，阳极铜月生产指标。铜冶炼厂生产指标在持续改善，连续四个月生产阳极铜二十万吨。

4.5 杂质分布

表三列举了艾莎炉的杂质分布。PLAYER曾在文献(8)中介绍过这方面的数据。杂质分布是对每个月生产混合样化验分析后，取二到十二个月的数据计算得来的。

从表三中的数据可知，与铜精矿相比，冰铜中只含大约 91%的砷，85%的镉，76%的铋，68%的锌，60%的锑和铊，44%的铅和29%的碲。



图五 二〇〇二年到二〇〇一年蒙特艾莎冶炼厂月生产阳极铜指标

表三 蒙特艾莎公司铜艾莎熔炼厂杂质分布

元素	冰铜(%)	渣(%)	生产用气(%)*
Ag	98.5	1.0	0.5
Au	98.5	1.0	0.5
Pb	56.4	13.7	29.8
Zn	32.0	60.0	8.0
As	9.3	17.9	72.8
Co	63.0	36.5	0.5
Ni	97.3	2.2	0.5
Sb	39.9	51.9	8.1
Bi	24.0	1.0	75.0
Cd	14.9	5.0	80.1
Tl	39.9	43.7	16.3
Te	70.8	18.4	10.8

*在计算了冰铜和渣的元素之后平衡的结果

5.0 铜吹炼

艾莎熔炼工艺正在被试验用于铜的连续吹炼, 有希望取代铜的间断吹炼作业, 比如 Peirce-Smith 吹炼法。它的诱人之处在于艾莎工艺可以用米灵活地处理固体物料, 有效的扑收二氧化硫, 并减少车间中的尘烟漏放。

澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (CSIRO) 与蒙特艾莎公司合作对用艾莎炉连续吹炼铜精矿或冰铜生成粗铜的工艺进行了模拟和试验研究。蒙特艾莎公司还单独进行了大量的半工业试验, 吹炼由艾莎炉生产的冰铜, 证明该技术方向可行。两段熔炼和吹炼的艾莎炉工艺

已被考虑将来在蒙特艾莎矿山实际应用。该工艺便于操作，而且在助燃气体的富氧量达30%时便可形成自燃。吹炼固体物料加上高富氧吹风生成的二氧化硫废气浓度高，体积小。

此工艺已生产出含硫量低达0.07%的粗铜，与Peirce-Smith 转炉生产的粗铜含硫量相同。艾莎工艺用于连续铜吹炼的优点有，

- 1) 投资比Peirce-Smith 转炉低10-20%。投资节省的原因是吹炼炉的体积和数目减少，小厂的卫生通风简单，无需昂贵的转炉车间吊车系统，艾莎炉可提供连续吹炼废气从而减小了所需酸厂的规模。
- 2) 在艾莎炉多年积累起来的操作经验基础上，吹炼炉耐火材料的寿命可望延长。
- 3) 如果在熔炼和吹炼之间设置冰铜料堆，可省去冰铜沉降炉，使两段作业分别操作，互不干扰。这种工艺设置解除了生产上的一个瓶颈，可明显增加工厂的利用率。
- 4) 同现有的其它吹炼技术相比，艾莎工艺产生的灰尘率低，废气量小，二氧化硫浓度高，这些特点带来巨大的环保优势。

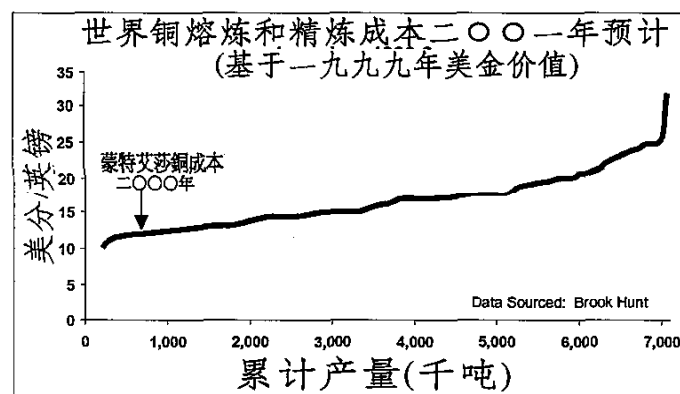
6.0 艾莎熔炼工艺的优点

下面介绍艾莎熔炼工艺的部份优点。

1) 基建和作业成本低

艾莎炉构造简单体积小，废气排放量低，废气处理系统规模小。这些特点降低了基建费用和作业成本。蒙特艾莎公司铜艾莎炉于一九九二年建成，造价一亿两千万澳元，包括精矿过滤器，干料仓，废热锅炉，静电沉淀池，渣团粒系统，氧站，喷枪空气吹风机以及用于分离冰铜和渣的旋转沉降炉。

维修成本低，耐火材料寿命长，能源效率高和人工要求少导致了艾莎炉总作业成本大幅度下降。三座使用艾莎炉处理铜精矿的铜熔炼厂是世界上成本最低的。如图六所示，蒙特艾莎的艾莎炉与蒙特艾莎公司Townsville 铜精炼厂的艾莎工艺炼铜法(另一项蒙特艾莎公司专利技术)相结合使得蒙特艾莎公司的铜熔炼和精炼总成本位于世界产铜成本曲线的最低部位。最近，由于艾莎炉的处理量和利用率增加，作业成本又有人幅度下降。在二〇〇〇到二〇〇一的财政年度里，熔炼和精练的综合成本为每磅铜12.16美分。在二〇〇一到二〇〇二财政年度的头三个月中，熔炼和精练的综合成本为每磅铜8.64美分。



图六 铜熔炼厂和精炼厂成本曲线

艾莎炉充分利用了精矿本身含有的化学能，从而降低了冶炼能耗。表四列出了在铜艾莎炉建成前焙烧炉和反射炉处理一吨铜精矿的耗能。表中还给出了在铜艾莎炉的产量不断增加的过程中，每吨精矿所需能耗降低的数据。能耗的计算包括排料槽加热喷嘴和旋转沉降炉用油，但不包括熔炼厂用电。电耗对焙烧炉，反射炉和艾莎炉都很难估算。不过，根据二〇〇〇年三月数据估计的喷枪和氧站净耗电约为每吨精矿0.25兆焦。

表四中的数据表明艾莎炉熔炼铜精矿可节能百分之八)。实际的节能还要高些，因为艾莎炉的原料中包括含自燃能量低的铜渣，渣的再选铜精矿和其它再生料。焙烧炉和反射炉是处理不了这类物质的。

表四 熔炼 吨铜精矿所需能源比较

	焙烧-反射 炉 (1991.7 到 1992.6)	铜艾莎炉 (1993.7到 1994.6)	铜艾莎炉 (2000.3)	铜艾莎炉 (2001.4)
精矿处理量(吨)	650,254	548,987	89,781	97,344
耗煤(吨)	84,658	14,991	1,437	636
耗天然气(标米)	0	0	0	602,790
用油(千升)	2,407	2,730	227.2	100.9
吨能耗(兆焦/吨)	4.12	1.02	0.58	0.47

2) 原料和燃料的灵活性

艾莎熔炼工艺可用来处理范围很广的物料，包括铜和铜镍精矿，二次铜材料，铅精矿和二次铅材料。艾莎炉可使用的燃料包括各种等级的煤，焦粉，各种类型的油，天然气，或这些燃料的混合。设计燃料可采用价格最低的。如果燃料价格有变化，可再更换。蒙特艾莎公司艾莎炉的设计燃料为煤和油，现在已改用煤和天然气。美国Phelps Dodge Miami的艾莎炉一直在使用天然气。印度 Sterlite Industries 的艾莎炉用煤和油，取决于其它燃料的价格。

艾莎炉最明显的操作优点之一是当辅助设备出现问题需要修理时可方便的将其停炉和启动。一般来讲，停炉需要二十秒钟，启动需要五分钟。由于停炉时间过长炉子需要冷态启动时，程序也不复杂。一小时之内熔炼生产便可继续进行。

3) 粉尘低

艾莎炉原料被带入废气系统的量比其它熔炼方法低得多，一般不超过原料重量的1%。

4) 无需燃烧喷嘴

艾莎炉使用喷枪而不是燃烧喷嘴，从而免除了喷嘴堵塞和喷嘴管道上的耐火材料损耗。喷枪更换是十分简单的，有些艾莎炉已做到了完全机械化。蒙特艾莎公司的铜艾莎炉在过去九年中对喷枪设计和控制方法做了改进，大大提高了枪的寿命。二〇〇一年四月和五月铜艾莎炉喷枪的平均寿命为十四天，每次换枪的大致时间为三十到四十分钟。至今为止取得的最长喷枪寿命为二十四天。枪的维修很简单，而且费用低，只需更换枪头部份即可。

7.0 结论

由蒙特艾莎公司发展的艾莎熔炼工艺可以说是当今最先进的铜熔炼技术。它的投资和作业成本都比其它铜熔炼技术低，而且有着多年的被工业实践证明了的性能指标。

艾莎炉目前在世界上许多国家都有应用，正在迈入主流技术行列，尤其是处理铜精矿目前已经有三家用户，第四家正在建造中。三家采用艾莎熔炼工艺公司的产铜成本是世界上最低的。除了熔炼作业外，环境保护法的日益加强使得艾莎熔炼工艺成为代替Peirce-Smith转炉进行铜吹炼的有力竞争对手。艾莎工艺吹炼所产生的粉尘少，作业简单，废气量低。

一九九九到二〇〇〇财政年度中，蒙特艾莎公司的铜艾莎炉熔炼了大约九十五万八千吨铜精矿。二〇〇一到二〇〇二政年度的处理量预计为一百万吨。

蒙特艾莎公司和世界上其它的艾莎炉作业成本和生产指标表明艾莎熔炼工艺已经远远跨越了其发展阶段，目前已经成为熔炼的主要竞争技术之一。

参考文献

- (1) C.M. Christensen, *The Innovator's Dilemma*, Harvard Business School Press, Boston, Massachusetts, 1997.
- (2) Errington, W.J., Fewings, J.H., Keran, V.P., and Denholm, W.T. (1987). "The ISASMELT lead smelting process." *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C*, 96, 1-6.
- (3) M.D. Coulter and C.R. Fountain, "The ISASMELI process for copper smelting," *Non-ferrous Smelting Symposium, Port Pirie, South Australia, 17-21 September 1989, Aus.I.M.M., Melbourne, 1989, 237-240.*
- (4) C.R. Fountain, M.D. Coulter, and J.S. Edwards, "Minor element distribution in the Copper ISASMELT process," *Copper '91, Volume IV, C. Diaz, C. Landolt, A Luraschi, C.J. Newman, Eds., Pergamon Press, New York, NY, 1991, 359-373.*
- (5) R. Player, C.R. Fountain, T.V. Nguyen, and F.R. Jorgensen, "Top-entry submerged injection and the ISASMELT technology," *Proceedings of the Savard/Lee International Symposium on Bath Smelting, ed. J.K. Brimacombe, P.J. Mackey, G.J.W. Kor, C. Bickert and M.G. Ranade, TMS, Warrendale, PA, 1992, 215-229.*
- (6) J.L. Cribb, J.S. Edwards, C.R. Fountain, and S.P. Matthew, "ISASMELT technology for the smelting of copper," *15th CMMI Congress, Johannesburg, SAIMM, Vol. 2., 1994, 99-103.*
- (7) J.S. Edwards, C.R. Fountain, and R.L. Morland, "ISASMELT-extending the envelope," W. Poole (Ed.), *Proceedings of the Brimacombe Memorial Symposium, October 1 to 4, 2000: Poster Session Proceedings, CIM, Montreal, QC, October 2000.*
- (8) R. Player, "Copper ISASMELT-Process Investigations", Madhu Nilmani and Theo Lehner (Eds), *The Howard Worner International Symposium on Injection in Pyrometallurgy, Melbourne, July 1996, TMS, Warrendale, PA, 1996, 439-446.*

(高瑞敏 翻译, 高明炜 校对, 二〇〇二年十二月于布理斯本, 澳大利亚)