

沸騰層焙燒

Г. Я. 列依塞洛維奇 編

周 惕 安 譯

冶金工業出版社

本小冊子說明沸騰層形成过程和在其中焙燒礦物原料的一般原理；引述有色冶金方面和其他工業部門所採用的沸騰層焙燒爐的構造；報導已採用的焙燒系統和焙燒成績。

本小冊子供冶金工業工程技術人員和熟練工人使用。

Г. Я. Лейзерович
ОБЖИГ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ
Металлургиздат (Москва 1955)

*

沸 騰 層 焙 燒

周惕安 譯

*

冶金工業出版社出版（北京市灯市口甲45号）
北京市書刊出版業營業許可証出字第〇九三号
冶金工業出版社印刷厂印 新華書店發行

*

書号：（內）0084 • 开本 $850 \times 1168 \cdot \frac{1}{32}$ • 1 $\frac{14}{32}$ 印張 • 40,000字

1956年 8 月第 一 版

1956年 8 月北京第一次印刷

印数：1 - 2,033 定价（10）0.30 元

（新華書店內部發行）

目 錄

緒言	(4)
沸騰層焙燒	(6)
沸騰層的性质	(6)
顆粒和气体的运动	(10)
沸騰層焙燒工藝过程的主要参数	(10)
沸騰層焙燒爐構造的一般情况	(12)
鋅精礦的焙燒	(13)
銅精礦的焙燒	(18)
鎳冰銅的焙燒	(20)
硫酸化焙燒	(21)
含硫化鉄 (黃鉄礦尾礦和精礦、黃鉄礦等) 的物料的焙燒	(24)
鉬精礦的焙燒	(27)
含金物料的焙燒	(28)
成粒的鋅精礦和磁鉄鉄礦在豎爐內焙燒	(33)
从礦石揮發銻	(35)
从氧化礦揮發鉛	(35)
从貧礦和精礦揮發硫化錫	(36)
沸騰層焙燒用於处理生產輕金屬的原料	(37)
石膏的分解, 在沸騰層內燒結霞石的可能性	(37)
石灰石和白云石的沸騰層焙燒	(38)
焙燒与选礦联合法	(42)
結束語	(43)

81.17
191

沸騰層焙燒

Г. Я. 列依塞洛維奇 編

周 惕 安 譯

(新華書店內部發行)

冶金工業出版社

本小冊子說明沸騰層形成過程和在其中焙燒礦物原料的一般原理；引述有色冶金方面和其他工業部門所採用的沸騰層焙燒爐的構造；報導已採用的焙燒系統和焙燒成績。

本小冊子供冶金工業工程技術人員和熟練工人使用。

Г. Я. Лейзерович
ОБЖИГ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ
Металлургиздат (Москва 1955)

*

沸 騰 層 焙 燒

周惕安 譯

*

冶金工業出版社出版（北京市灯市口甲45号）
北京市書刊出版業營業許可証出字第〇九三号
冶金工業出版社印刷厂印 新華書店發行

*

書号：（內）0084 • 开本 $850 \times 1168 \cdot \frac{1}{32}$ • 1 $\frac{14}{32}$ 印張 • 40,000字

1956年 8 月第 一 版

1956年 8 月北京第一次印刷

印数：1 - 2,033 定价（10）0.30 元

（新華書店內部發行）

目 錄

緒言	(4)
沸騰層焙燒	(6)
沸騰層的性质	(6)
顆粒和气体的运动	(10)
沸騰層焙燒工藝过程的主要参数	(10)
沸騰層焙燒爐構造的一般情况	(12)
鋅精礦的焙燒	(13)
銅精礦的焙燒	(18)
鎳冰銅的焙燒	(20)
硫酸化焙燒	(21)
含硫化鉄 (黃鉄礦尾礦和精礦、黃鉄礦等) 的物料的焙燒	(24)
鉬精礦的焙燒	(27)
含金物料的焙燒	(28)
成粒的鋅精礦和磁鉄鉄礦在豎爐內焙燒	(33)
从礦石揮發銻	(35)
从氧化礦揮發鉛	(35)
从貧礦和精礦揮發硫化錫	(36)
沸騰層焙燒用於处理生產輕金屬的原料	(37)
石膏的分解, 在沸騰層內燒結霞石的可能性	(37)
石灰石和白云石的沸騰層焙燒	(38)
焙燒与选礦联合法	(42)
結束語	(43)

緒 言

沸騰層焙燒是新的進步的處理原料的工藝方法，可以順利解決許多不僅與有色冶金發展有關的，而且與其他工業部門發展有關的問題。現在推行和應用的所有冶金方法首先應該反映有色冶金原料——浮選精礦的物理狀態。

浮選精礦是細磨的礦物，有時顆粒大小直徑小於 0.07 公厘。

這樣的物料有很大的單位表面積，化學的和物理的過程應能以極快的速度在這種表面上進行。例如，1 公斤鋅精礦有 200 平方公尺甚至更大的表面積。

物理的和物理化學的過程（加熱、熔化、蒸發、化學反應）的速度與固體物表面積的數值成比例增加。

現有焙燒和熔煉方法的主要缺點是很少利用被處理物料的很大的活性表面積。

目前我國工業上採用帶耙的多膛爐和管式迴轉爐焙燒粉細的物料。在這些爐內氣體與焙燒物料粒層表面接觸，粒層表面借助於攪動物料的機械而不斷變化。

在多膛爐內一多半物料是依靠顆粒在由一層落到另一層時的浮懸狀態下焙燒而得以焙燒的。

如果在焙燒爐內只有一部分物料被氣體從料層表面掠過，那末在熔煉反射爐內氣體只與傳熱條件更為困難的料層表面接觸，因為不動的料層表面是全部顆粒表面積的微不足道的部分。

近 50~60 年來，焙燒和熔煉發展的歷史表明在過程強化方面，爐子能力增加和構造改進方面有很大的技術成就。

然而，顯著增加這些爐子的生產能力、提高焙燒氣體的質量，利用硫化物料的热量並沒有能做到。

其主要原因在於焙燒或熔煉時氣體與固體顆粒全部表面缺乏密切接觸，這對於像浮選精礦這樣的粉末狀物料是特別重要的。因此，爐子現有的構造妨礙過程的發展，而應當加以改變。

由於这些过程都是以固体物和气体物的相互作用为基础的，在固体物表面如此擴展时过程進行的强度和完全程度首先取決於气体的流入和从每一顆粒表面脫除气体的条件或者顆粒与气体相互运动的条件。

这些条件在沸騰層內和在固体顆粒浮懸状态下進行的过程中得到很好的保証。

沸騰層焙燒

“沸騰層”这个名称常用其他的術語代替：如假液化層、浮懸層、渦旋層、流体化層、流体技術。这些術語大多数是以反映沸騰層与液体相似的性質为基础的。無条件地，这在技術上是最有兴趣和最有价值的性質。

沸騰層的原理早已廣泛应用於有价資源的空气选礦、粉狀物料流槽輸送和細磨物料的混合等。

約 30 年以前在高溫条件下技術上运用这一原理最初在維恩克勒（Винклер）式煤气發生爐內气化碎煤方面已經实现。

后来这一方法以更大規模用於石油的催化热裂和炭氫化合物的合成。

这一方法在最近八九年來才开始应用於焙燒礦物和干燥各种不同的粒狀物料並迅速發展，即是，比在浮懸状态下焙燒和干燥要晚得多。

工業上採用沸騰層焙燒以分解石灰石，氧化硫化物、含砷金精礦、黃鉄礦等的初步成績已經証明这一方法比从前在技術上已知的焙燒方法有很大的优点。

沸騰層的性質

当由下通过放在網上的粒狀物料的不動料層的气体速度逐漸增加时，松散料層的物理性質發生質的变化。

当气体速度小时（特別是像在鼓風爐內一样）松散料層保持不动，而其容積也不变。在这种情况下松散料層僅只像過濾層一样工作。气体速度提高时料層阻力按冪次定律增加。此时冪次指数視雷諾系数而定，从 1 到 2 变动。

圖 1 把上升气流对固体物粒松散層的影响与溫度对物質在自身蒸汽压力下的物理状态的影响作了对比。这一圖上不動層相当於物質在

低温时的固体状态。

当气体达到临界速度时空气压力变得等於单位面积上松散物料层的重量，这一料层开始发生膨胀。气体速度的临界值相当於类似图形上的熔点。

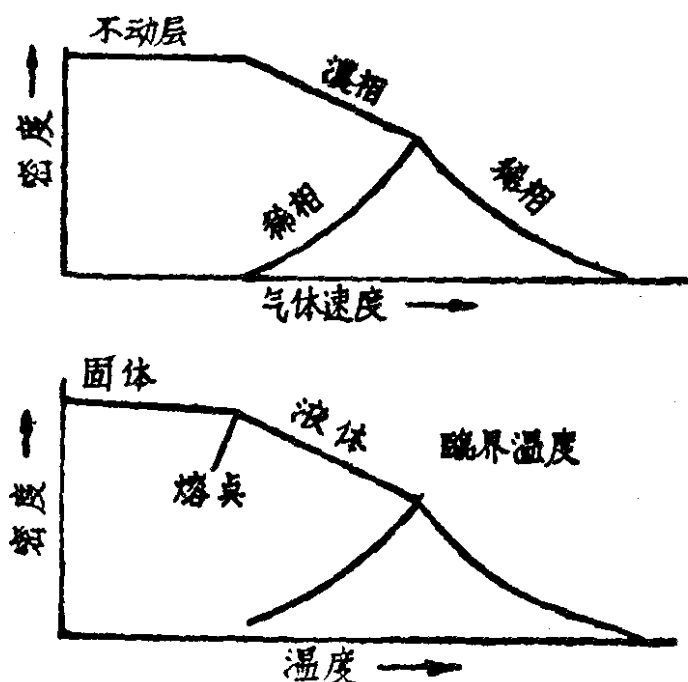


圖 1 物料物理性質变化与物質三态的質的比較

当气体速度進一步增加时料層厚度稍微增加，但料層阻力与相当於料層重量的一定数值很少出入。

当料層容積达到視顆粒形狀和大小而定的一定数值的时候，顆粒开始运动起来。在这种情况下松散顆粒层的物理性質發生質的变化——它变得类似靜止的粘性的液体，即是，轉变成「液体」或假液化的状态。

在这种状态下料層容易由高向低移动，而当其移动时固体物几乎遇不到阻力。

气体速度高於一定范围，料層即呈顆粒激烈运动的相，好像“沸腾”的液体並且相間有明顯的分界綫。

再進一步增加气体速度时开始沸腾並拋出塵粒，形成类似蒸汽相的稀相。稀相密度不断增加，而濃相不断减少，並且兩者可能同时存在，正像沸腾的液体与蒸汽同时存在一样。

气体速度最后增加到假液化最大速度的臨界值时全部料層轉变成稀相或成浮懸状态，类似液体在臨界溫度沸騰时液体与蒸汽間的界面消失。

提高气流强度超过假液化的最小臨界速度引起裂縫和通道，稠密的大气“核”或气“泡”的形成。这种現象導致料層內充气混合物形成不均匀，这种不均匀性取決於顆粒的大小、形狀和料層的高度。当其他条件相同时形成通道和气泡的趋向随顆粒尺寸增加而提高。只是当物料顆粒很細（小於0.04~0.05 公厘）时料層不均匀性又按顆粒尺寸減小的程度而增長，这是由於微粒在靜电作用下粘附的傾向，因此它們表現得像粗粒物料一样。

气流压力差 圖 2 表示液体介質或气体介質經過粒狀物料層时压力差 ΔP 与流速 v 的关系曲綫。曲綫傾斜部分 AB 相当於不动的，过穗的，还没有膨脹的料層。

近 B 点部分曲綫的压力差增長率降低与料層的膨脹有关，並且在 C 点压力差达到最高值。

料層高度在这一时刻增加 5~10 %。

流速進一步增加时压力差稍微下降，並从 D 点开始，曲綫大約呈直綫性質。在相当於假液化状态

的这一部分內，料層按流速增加程度進一步發生膨脹。

料層不动部分和假液化部分在相当於最低臨界流速 v_{MHH} 的 B 点分开。假液化从这一点开始。

在假液化部分时常發現压力差值和料層膨脹程度的波动。这些波动在气体假液化时，由於有气泡存在而特別顯著。

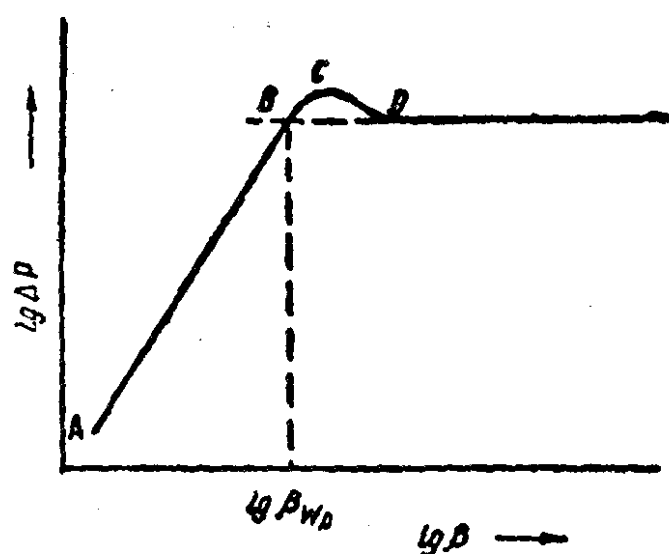


圖 2 压力差与流速的关系

为了确定开始假液化点，压力差曲线根据由空气动力学的实验模型得到的数据作出，实验模型由直立的玻璃圆管和管内下部气体分佈装置（格子、網或多孔物料）組成。

測定压力，可以判断在模型內、爐內或設備內進行的沸騰过程的状态和特性。压力的測定是控制这种过程的最重要的因素之一。

沸騰層內压力差按下式計算：

$$\Delta P = L (\gamma_{\text{TB}} - \gamma_{\text{cp}}) (1 - \epsilon), \quad (1)$$

式中 ΔP ——沸騰層压力差，公斤/平方公尺；

L ——料層高度，公尺；

γ_{TB} ——固体物料的密度，公斤/立方公尺；

γ_{cp} ——通过的介質的密度，公斤/立方公尺；

ϵ ——气体容積对料層总容積的比值。

这一方程式表明已知的水力靜力学的定律：**液体（或在本情况下是假液体）柱的压力与液体比重及柱的高度成比例。**

沸騰層的总压力事实上与顆粒大小無關。

介質的最小臨界流速在假液化点 在这点时沸騰層已經存在，这是在假液化点的流速 v_{MH} 。由圖 2 的線圖可以看到，这一速度在兩根直線的相交点。水平直線相当於沸騰層內的压力差，基本上与流速無關。傾斜直綫相当於压力差值与在假液化点前，即是在松散層內，流速（流量）的关系。

由此可知， v_{MH} 是松散層的阻力开始等於沸騰層的阻力时的流速。

對於計算假液化最小速度建議过許多公式，从这些公式可知，这一速度与顆粒直徑平方成比例並取決於固体物料和气体的性質。但是只有当顆粒形狀系数已知的时候，才能利用这些公式。

目前文献中缺乏必要的試驗数据，所以为了确定每一种新物料의假液化臨界条件都需要在上述的仪器里進行適當的試驗。

不动層在气体（最小）臨界速度时轉变成运动層或沸騰層，最小臨界速度比沸騰層轉变成浮懸状态时的顆粒飛揚臨界速度小 50~80 倍。

顆粒和气体的运动

沸騰層內發生强烈运动，运动时有些顆粒迅速从裝入口走出排料口，而另一些在層內循环。

运动因数与气体流速和顆粒直径成正比增加。

通过沸騰層的气体的运动比在不动的、過濾層內要强烈得多（达1000倍）。

沸騰層內的热傳遞的指标非常高。試驗查明，当以管截面積計算的气体速度均匀一致时，总热傳遞因数为：

- a) 在沒有顆粒的气流中，14；
- б) 在通过不动層的气流中，44；
- в) 在沸騰層內，180。

因此，沸騰層內热傳遞高於在不动層內的4倍多，高於在自由气流中的13倍。

磨蝕 沸騰層顆粒对表面的作用与噴砂器的作用相似。在沸騰層区域内所有的表面不断受到磨損和研磨。磨蝕强度取決於平面相遇角（угол встречи плоскости）和气体速度。这一点在選擇材料和設計構造时必须考慮。

沸騰層焙燒工藝过程的主要参数

1. 用於沸騰層焙燒的**固体物料顆粒大小**从百分之几公厘到50公厘甚至更高的範圍內变动。

当顆粒大小不同时为了达到均匀的“沸騰”或假液化，大小範圍从0.01到0.3公厘是適宜的。大多数有色金屬精礦都合乎这种要求。礦石可以碎成較大的顆粒（3~5公厘）。對於很細的顆粒要採用团粒法或制粒法。

2. 入爐物料的水分也可能在很寬的範圍內波动。進入沸騰層的水分几乎在瞬間即蒸發。这就可以，視技術的和經濟的合理性定而，

將濕團和甚至含水達 30% 的礦漿裝入爐內。

3. **熱過程和溫度調節** 已經查明在焙燒硫化物料的条件下熱傳遞因數很高——200~300 千卡/平方公尺·小時°C。這就可以有效利用從硫化物氧化反應放出的熱量。例如，在焙燒 1 噸鋅精礦時可得 0.85 噸蒸汽，此時從沸騰層放出熱量的 30~50% 被利用了。

在需要從外部加熱焙燒的情況下，燃料可在沸騰層內部燃燒，保證最高的熱利用率。

用將熱交換面積（水套，管子或鍋爐）伸入沸騰層的方法實現熱的利用和溫度調節，由於如上所述的熱傳遞因數存在的差，熱交換面積可以小於用煙氣加熱的鍋爐面積 10~12 倍。

沸騰層的加熱和冷卻同樣可以借送入層內吸熱或加熱的液體或氣體的辦法實現。

4. **沸騰層焙燒氣體條件（газовой режим）容易調節。**氣體對於反應的高度利用率和溫度容易調節的可能性為在焙燒時採用氧氣开辟了巨大前景而沒有燒結的危險。送風中含氧 30% 時，可以從黃鐵礦得到含 SO_2 20% 的氣體。提高氧氣濃度，爐子生產能力相應提高。

由於可能在接近理論的空氣消耗量下進行焙燒硫化礦，氣體濃度增加，而容積相應減少。例如，氣體中 SO_2 含量為：焙燒鋅精礦時 8~10%，而焙燒黃鐵礦物料（黃鐵礦，黃鐵礦尾礦，銅精礦等）時 13~15%。

料層高度 700 公厘時空氣壓力為 600~700 公厘水柱，而送風電力消耗為每噸黃鐵礦 12~14 瓩時。空氣消耗量不取決於沸騰層高度。

5. 在沸騰層內焙燒精礦時煙塵率為裝料量的 30 到 70%。這些煙塵約 90~95% 在旋風收塵器內收集作為成品或再返回爐內；旋風收塵器後帶走的煙塵為裝料量的 3~6%。

6. **沸騰層焙燒爐的生產能力**為燃燒過程的速度和顆粒的大小所限制，因為送風速度與顆粒直徑的平方成正比增加。例如，沸騰層焙燒碎至小於 6 公厘的黃鐵礦時，在德國巴登蘇打苯胺廠生產能力達到每平方公尺床面積每晝夜 20 噸黃鐵礦或 9.6 噸硫，而每立方公尺容

積2.3噸硫。這些數字超過用於細粒黃鐵礦的焙燒爐生產能力約100倍，而對浮懸焙燒爐燃燒室斷面積比較則超過10倍。

沸騰層焙燒爐構造的一般情況

以下引述的沸騰層焙燒爐和反應器的構造在工業上和試驗條件下採用這種方法焙燒各種不同物料時各有不同。

由於已有構造多式多樣，在描述之前先作些一般說明是合理的。

不論構造如何不同，每種沸騰層焙燒爐均由以下主要部分組成：

垂直爐壁，爐頂，爐床，裝料和卸料的裝置，排氣煙道。裝料和卸料地方安置在上部、下部或爐側，但它們總是彼此相對的。

爐子最重要的部分是爐床，爐床是氣體分佈裝置，氣體經過爐床從下送入放在爐床上的物料顆粒層。

爐床應該保證氣體沿料層下部水平面均勻分佈並不讓粒狀物料經爐床的孔下落到氣體室中去。

這樣的裝置或者是粗粒物料不動層，或者是不漏料的格柵構造；前者目前已很少採用了。圖3表示罩式噴嘴的構造，不漏料的耐熱爐床由這些噴嘴組成；這種爐床在許多焙燒黃鐵礦、鋅精礦和含硫砷的金精礦的爐子長期操作中受到考驗。這種噴嘴以彼此間從150到300公厘的距離排列在爐床面積上。

有時，例如在維恩克勒式煤氣發生爐內，氣體經位於豎爐下部錐形部分的風口送入。

爐子工作空間的水平斷面可以為任何幾何形狀：正方形、長方形、圓形、橢圓形或其他。

爐子可以是一室的和多室的，並且多室爐內的爐室可以相鄰排列成垂直位置，一層高於另一層；或者是單獨的爐室借助於風動輸送相互連接。

由於爐子的大小不影響工藝過程的進程，爐子可以如此設計，使其生產能力在用最少爐數時保證生產上要求的機動性。

為了減少煙塵率，某些爐子構造規定爐室上部直徑擴大或在爐內

部裝置旋渦型的收塵器。在必要的情况下，为了使从沸騰層区域（从濃相）被气体帶走的顆粒在浮懸状态（在稀相）中完成反应，在沸騰層水平面以上添加工作空間的高度。

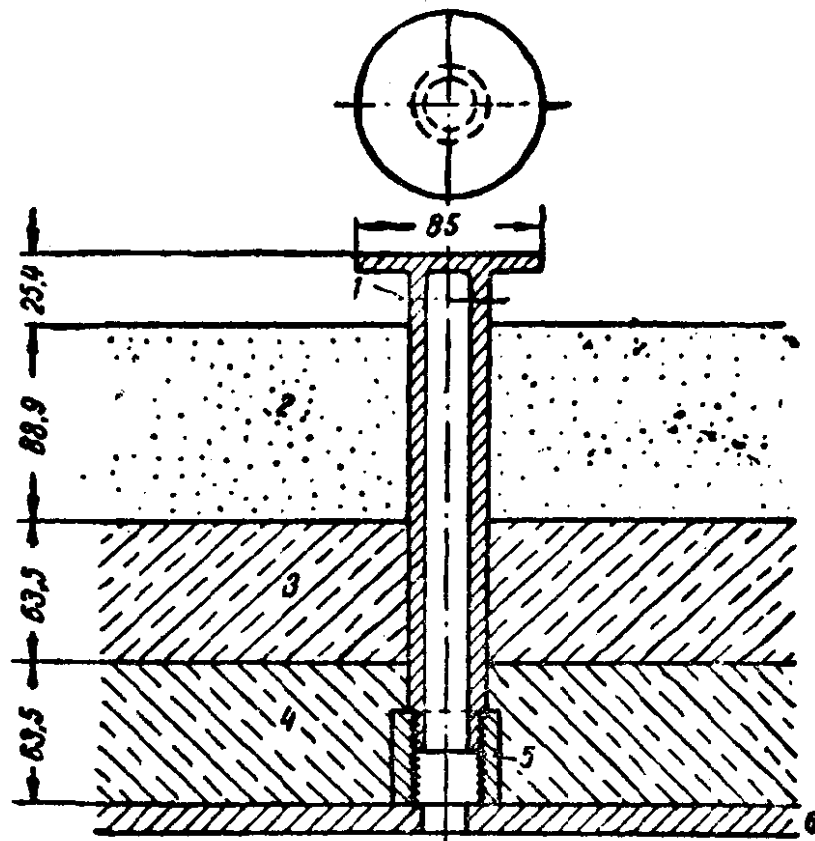
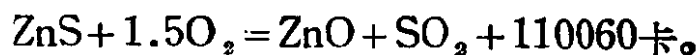


圖 3 不漏料的無閥噴嘴

1—孔；2—輕質澆注層（澆耐火混凝土）；3—尺寸为 228.6×114.3×63.5 公厘的标准絕热耐火磚；4—同 3；5—1"管接头；6—底板

鋅精礦的焙燒

焙燒的基本目的在於氧化金屬硫化物，主要是按下列反应式氧化硫化鋅（ZnS）：



氧化一公斤鋅精礦时約放热 1000 千卡。

目前在我國工厂中鋅精礦的氧化焙燒在多膛爐內進行。

由於有色金屬科學研究院在 1946 年开始的並在爐床面積 0.05 平方公尺的綜合實驗爐內進行的沸騰層焙燒鋅精礦的實驗研究結果，新的焙燒方法的优越性已經獲得証明。

1951年在我國一工厂里的生產条件下於爐床面積3平方公尺的長方形試驗爐里已獲得沸騰層焙燒愈來愈高的指标。1953年試驗爐已由工厂擴大，因此它的床面積增至7.4平方公尺。

這一爐子在工業操作中已有三年；它的生產能力為每晝夜30~40噸鋅精礦。在這個爐子內焙燒了各種鋅精礦，並且即使在沸騰層內焙燒在多膛爐內最難焙燒的精礦也沒遇到困難。

這座爐子的生產能力與工厂現有焙燒車間的七層爐幾乎相同。

對於全部其他指标而言，沸騰層焙燒爐都大大優於多膛爐。

1. 從這個爐子得到質量更好的焙燒礦：酸性浸出時可多回收2~3%的鋅；焙燒礦中沒有焙燒不足的團粒，這種團粒在多膛爐內得到，為裝料量的20~25%並需要篩分、磨碎和重復焙燒。綜言之，這使得鋅的回收率提高和焙燒過程簡化。

2. 焙燒氣體中二氧化硫 SO_2 的含量從7到10%波動，這比原有爐子所得的氣體濃度提高到1½~2倍。同時焙燒氣體總容積減少，這使淨氣除塵的費用降低，原有除塵設備處理能力提高，並提高制造硫酸的生產能力。

3. 質量指標的提高與沸騰層焙燒過程強度大大增加有密切關係。

爐子生產率每24小時每平方公尺床面積達到4.5噸精礦或每立方公尺爐子工作容積1.5噸精礦。

達到的生產率與多膛爐焙燒比較起來每立方公尺高6½倍，而與浮懸焙燒比較起來高1~1½倍。這使得在同樣車間面積里可多焙燒2~3倍精礦或者相應地減少新建築的容積。

4. 消除了焙燒燃料消耗，為借冷卻水套和冷卻管利用熱量創造了條件。

5. 由於爐內沒有運動的機械，爐子構造比起多膛爐來特別簡單。爐子可由冶煉廠自己的力量來制造，操作時照管簡便，基建費減少2~3倍，維護費也降低。

6. 在研究爐子設計和工藝過程的同時，還研究過可使未來的工業爐完全自動化操作的自動化控制和調整過程的條件。