

高 爐 廢 渣 用 作 耐 熱 混 凝 土 集 料 的 研 究

技術科學博士 К. Д. 涅克拉索夫 合 著
技術科學碩士 Э. Г. 阿 雅 瑪

夏 啓 明 譯

冶 金 工 業 出 版 社

苏 联

冶金和化学工業企業建造部技术司

中央工業建筑科学研究院

科学公报

第 19 卷

高 爐 廢 渣 用 作 耐热混凝土集料的研究

技术科学博士 К.Д. 涅克拉索夫

技术科学碩士 Э.Г. 阿 雅 瑪

合著

夏啓明 譯

冶 金 工 業 出 版 社

这本小册子叙述了以高爐廢渣作为受高溫長期作用的耐热混凝土集料的研究結果；引述了水泥石的耐热性能和以爐渣作集料的耐热混凝土的物理机械性能的研究結果；引述了以刻赤厂、瑪格尼托哥尔斯克厂和德涅泊罗捷尔任斯克厂的高爐廢渣調制的耐热混凝土的适宜組成和採用条件。

这本小册子供从事於設計、建筑和使用高溫設備和結構的建築工程師和科学工作者，以及冶金工作者和其他專家們使用。

Д-Р ТЕХН. НАУК К. Д. НЕКРАСОВ
КАНД. ТЕХН. НАУК Э. Г. ОЯМАА
ИССЛЕДОВАНИЕ ОТВАЛЬНЫХ ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ КАК ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ЖАРОУПОРНОГО БЕТОНА

高爐廢渣用作耐热混凝土集料的研究

夏啓明 譯

1957年三月第一版 1957年三月北京第一次印刷 3,042 册

787×1092·1/32·36,000字·印張 1 3/4 ·定价 (10) 0.26 元

冶金工業出版社印刷厂印

新华書店發行

書号 0591

冶金工業出版社出版 (地址: 北京市灯市口甲 45 号)

北京市發刊出版業營業許可証出字第 093 号

目 录

緒言·····	4
高溫对高爐渣性能的影响·····	7
掺有不同細磨掺合料的水泥石的耐热性能·····	11
以爐渣作集料的耐热混凝土的基本物理机械性能·····	25
結論·····	51

緒 言

耐热混凝土的性能已由祖國的學者們詳細研究過。同時已肯定：這種混凝土的質量大多決定於所用集料的種類。在目前，粘土熟料是耐热混凝土的一種主要的集料，它的高度耐火性能還並沒有經常被充分地利用；特別是在混凝土工作於溫度在 $700\sim 800^{\circ}$ 內的結構中時常發生這種情況。在上述溫度下工作的熱工設備是比較經常遇着的，因此，為了建設這種設備的結構需要大量的混凝土。可以舉出各種工業爐的基礎、廢氣通道、煙道、燒道窖等作為例子。

缺乏低廉且便於採用的耐热混凝土集料，在很大程度上是工業建設中廣泛採用這種混凝土的阻礙。

但是，在冶金工業企業分佈的區域內，高爐廢渣是宜於作耐热混凝土集料的廉價地方材料之一；在這些區域內還在大量建造各種熱工設備，那麼在這裡採用以高爐渣作集料的耐热混凝土就可以得到巨大的經濟效果。

在文獻中，幾乎沒有關於研究高爐渣耐热混凝土的報道。根據現有的資料來看，以高爐廢渣作的耐热混凝土於 1947 年曾被重工業企業建造部瑪克建築托拉斯（Трест Макстрой）運用於受 $500\sim 1200^{\circ}$ 溫度作用的結構中；在建築平爐時，曾用來建造：蓄熱室的承重梁和牆、沉渣室和蓄熱室的下部圍護框架、沉箱和聚水坑、煙道牆等等；稍晚，這種混凝土還被亞速鋼建築托拉斯

(Трест Азовстальстрой) 和瑪格尼托哥爾斯克建築托拉斯 (Трест Магнитострой) 採用過。

在 1949 年，中央工業建築科學研究院 (ЦНИПС) (由 К.Д. 涅克拉索夫) 進行過研究工作，証實利用渥可夫 (Войков) 冶金廠的高爐廢渣作耐熱混凝土的集料在原則上是可能的。

中央工業建築科學研究院於 1948~1949 年 (由 Г.Д. 薩爾曼諾夫) 進行的關於研究加熱達 650° 時各種集料對混凝土和泥漿的強度影響的工作結論如后。在十次加熱以諾沃土拉 (Ново-Тульский) 冶金廠高爐廢渣作的混凝土試樣時，獲得了比以碎磚作的混凝土試塊較小的強度，但比以輝綠岩，玄武岩，石灰岩，砂岩和礫石作的試樣的強度大些。

如此，上面列舉的工作証實了採用某些冶金廠的高爐廢渣作耐熱混凝土集料是可能的；也還知道了在工業建設中採用高爐廢渣耐熱混凝土的某些情況。但是，在這個領域中系統的研究還未進行過。

在最近幾年中，本科學公報的作者們在中央工業建築科學研究院進行了以爐渣作集料的耐熱混凝土的基本物理機械性能和選擇最合適的組成的研究。

從彼此成分和性能不同的大量高爐廢渣中，曾以三個冶金廠 (以渥可夫命名的刻赤 [Керченский] 廠、以捷爾任斯基命名的德涅泊羅捷爾任斯克 [Днепродзержинский] 廠和以斯大林命名的瑪格尼托哥爾斯克 [Магнитогорский] 廠) 的爐渣作了研究，它們的廢渣堆是儲量很大的原料基地。同時，還研究了耐熱混凝土和它的各個成分 (即上述的廢爐渣^① 集料和隨加熱溫度不

① 在以後的敘述中，[爐渣]一詞應理解為高爐廢渣；而[耐熱混凝土]一詞，如果未特別提到爐渣或膠結材的種類，則指以矽酸鹽水泥作膠結材的混凝土。

同而加有各种細磨掺合料的水泥石)的基本性能。

把混凝土的性能和它諸成分的性能相对照,就可能詳細地研究在它受热时耐热混凝土內所發生的复杂的現象,並能找出个别成分对混凝土性能的影响。

此外,还研究了瑪格尼托哥尔斯克厂的水流作耐热混凝土細集料的适合程度。

高溫对高爐渣性能的影响

按照 Г.Н. 西維尔則夫 (Г.Н. Сиверцев) 建議的 分类法, 刻赤厂的爐渣屬於微錳含硫一类, 德涅泊罗捷尔任斯克厂的——多錳含硫的一类, 而瑪格尼托哥尔斯克厂的——含矾土微硫爐渣一类。这些爐渣是稳定的, 不散裂。

爐渣的热膨胀以膨脹計測定, 膨脹計內以針尖 (Мессюра, 微細指示器的触头) 測量試样的变形, 針尖的刻度值 0.001 公厘, 而測距 1.2 公厘。測定爐渣热膨胀用的試样, 是以个別的爐渣塊在金剛砂砂輪上研磨而成, 把它磨成断面約 14×14 公厘和長度从 20 至 55 公厘的稜柱形。热膨胀在 900° 的溫度下測定。加热和冷却制度採取每小时 150 到 200° 的速度均匀进行。

用来測定热膨胀系数的諸爐渣試样按外部標誌 (气孔率、气孔尺寸和顏色) 区分。

获得的結果可以証实: 爐渣的热膨胀系数不決定於它的气孔率或其他外部標誌, 而對於各个試样, 这个系数在比較不大的範圍內变化。

在 200 到 300° 範圍內, 热膨胀系数平均可採用: 對於刻赤厂廢爐渣等於 $\alpha = 10.5 \times 10^{-4}$, 對於德涅泊罗捷尔任斯克厂的—— $\alpha = 9.0 \times 10^{-4}$, 對於瑪格尼托哥尔斯克厂的—— $\alpha = 9.5 \times 10^{-4}$ 。

考虑到高爐廢渣有着約等於粘土熟料 2 倍大的热膨胀系数 (對於粘土熟料 $\alpha = 5 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$), 應該料到: 以爐渣作集料的耐热混凝土与以粘土熟料作集料的耐热混凝土比起来, 在提高加热溫度时将会有較大的强度降低和較急剧的彈性性能降低。

爐渣的耐火度按標準試驗法測定。對於高爐廢渣，耐火度為 $1170\sim 1250^{\circ}$ 。

高爐廢渣的特點是熱穩定性很小。放在馬弗爐（муфельная печь）內的各個爐渣塊，加熱至 800° 溫度時，以劇烈的噼啪聲碎裂成小塊。如果再把这些爐渣小塊放在冷爐子內，然後再加熱爐子，則爐渣小塊的碎裂約在溫度為 $200\sim 300^{\circ}$ 時開始，並延續至 800° ，雖然在溫度高於 500° 時碎裂大為減弱。

為了測定熱穩定性，還進行過下列試驗：把為量約50公斤的製赤廠的爐渣分批放入加熱至 800° 的爐內，在那里放到它們獲得 800° 溫度時，然後取出，放入水中冷卻。由於急劇冷卻的結果，爐渣轉化成細小碎塊和砂粒狀；在使它通過25公厘篩孔的篩子時僅剩餘17%；約有50%通過了15公厘篩孔的篩子。此外還發現，大部分剩下的較大的碎塊有用眼睛不易看出的裂紋，並在輕微打擊時散成細小塊粒。

由剩下的較大碎塊中選出了10塊爐渣，這10塊爐渣從外表看來是最堅固的，且在輕擊時不碎裂，用它們來繼續作熱穩定性的試驗。將這些碎塊也放入加熱至 800° 溫度的爐子中，保持到溫度均勻，然後取出並冷卻，再如此繼續下去。

在試驗前和每次熱交換後都稱取爐渣塊重量。如果爐渣塊破壞了，就以最大的小塊繼續試驗。

由所進行試驗的結果可以作出結論：全部被研究的爐渣塊有着大約同樣的、並且都是非常小的熱穩定性，不管氣孔率、氣孔大小和顏色有所不同。

爐渣這樣小的熱穩定性，在起初甚至引起對它是否適宜作耐熱溫凝土集料的懷疑。但是以後的試驗證明：在溫凝土中，爐渣良好得多地承受溫度的急劇改變，關於這個在以後與溫凝土熱

穩定性研究一起還要更詳細地敘述。

由所進行的試驗還証實：以刻赤廠、德涅泊羅捷爾任斯克廠和瑪格尼托哥爾斯克廠的爐渣作的耐熱混凝土的耐壓強度極限時常達到 400 公斤/平方公分。這樣，可以肯定，按照強度，以所研究的爐渣可以獲得實際中運用的任何標號的混凝土。

高爐渣彈性係數，平均在 $E=600\ 000\sim 900\ 000$ 公斤/平方公分的範圍內，即比花崗岩的稍高些，並大約等於玄武岩和輝綠岩的彈性係數。

為了確定以高爐渣作集料的耐熱混凝土的最高使用溫度，除了其他指標外，還必須知道在何種溫度下爐渣具有可塑變形的能力。

因此，指出瑪格尼托哥爾斯克廠水渣的有意思的性能是適宜的。這種玻璃狀爐渣的可塑變形能力早在加熱至 600° 溫度時即已開始出現，隨著溫度提高到 700° 以上，水渣的韌性急劇降低，在 $750\sim 800^{\circ}$ 範圍內達到最低，而在溫度高於 800° 時又開始增加；在 900° 溫度下水渣已經不現出可塑性能，直至約在 1200° 溫度時軟化。這個性能是不可逆的，因為 $900\sim 1000^{\circ}$ 下加熱後，水渣就失掉了可塑變形的性能。

圖 1 上列有加熱瑪格尼托哥爾斯克廠水渣時，用院士 H.C.庫爾納可夫 (H.C. Курнаков) 的高溫計和用膨脹計求得的加熱和變形曲線。從圖表(圖 1, б)可得出結論：在第一次加熱水渣時，可塑變形出現在溫度 $600\sim 700^{\circ}$ 時，在 $730\sim 830^{\circ}$ 階段內強烈地發展，並約在 860° 溫度時停止。在冷卻和第二次加熱時，以及在加熱廢爐渣時，均未發現可塑性變形。

水渣的加熱曲線(圖 1, а)顯出：從 $200\sim 300^{\circ}$ 溫度起就已開始出現穩定上升的放熱(發出熱)效應，在溫度為 $720\sim 850^{\circ}$ 時，

即剛到發現韌性急劇下降的溫度時，在放熱效應後是吸熱（吸收熱）效應。當溫度高於 850° 時，很明显，開始強烈的結晶，因之獲得放熱效應。

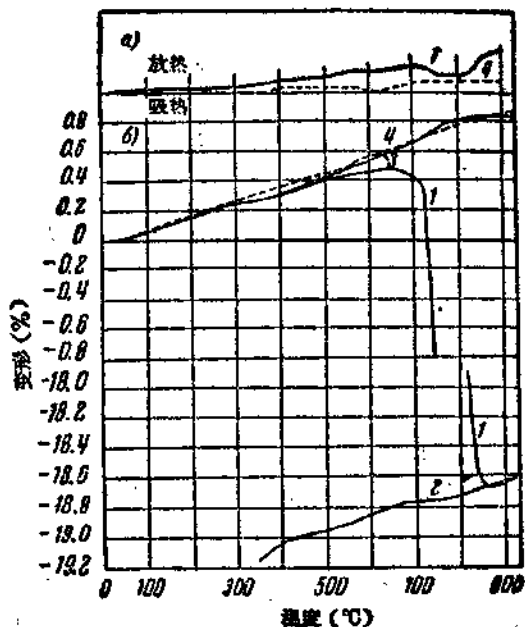


圖 1 在加熱瑪格尼托哥爾斯克廠水渣和廢爐渣時的加熱和變形的曲綫

- а—用陀士庫爾納可夫的高溫計；б—用膨脹計；
1—第一次加熱水渣；2—第一次冷卻水渣；
3—第二次加熱水渣；4—加熱廢爐渣

總之，勃赤廠、德涅泊羅捷爾任斯克廠和瑪格尼托哥爾斯克廠高爐廢渣的性能研究，証實了用它們作耐熱混凝土集料而不加

特別精選是可能的^①。但是這個並不排斥必須清除爐渣中的各種外來雜質（如泥土雜物、垃圾、金屬小塊等）。對於後者應加以特別注意，因為1951年在一個冶金廠內發生過這樣的事，在調制耐熱混凝土時，用了被大量外來雜質（石灰、砂磚、金屬塊等）弄髒的廢爐渣，結果混凝土的爐道在它受熱達800。~900°溫度時發生了破壞。

摻有不同細磨摻合料的水泥石的耐熱性能

往以矽酸鹽水泥調制的耐熱混凝土內加礦物質細磨摻合料，它們與水泥石的氯化鈣作用時，促進水泥石在加熱時和在冷卻後保持必要強度和結構。此外，細磨摻合料的存在還顯著地增大了於100至200°溫度階段內加熱混凝土時水泥石的強度。

目前已証實：作為以矽酸鹽水泥調制的耐熱混凝土的細磨摻合料，可以採用一系列的材料，例如，粘土熟料，（шамот*），石英砂，高爐水渣，粘土製品碎塊（цемянка**），粉煤灰等。中央工業建築科學研究院（Г.Д. 薩爾曼諾夫）所進行的最近的幾次研究証明：往矽酸鹽水泥內加入重量約與之相等的細磨摻合料（石英、粘土熟料）能減少水泥石在第一次受熱時的收縮；耐熱混凝土內細磨摻合料與水泥的這種比例能減少集料與水泥石的溫度變形差數，因此與往其中加入水泥重量30%的細磨摻合料的混凝土的強度相比，混凝土受熱時強度顯得高些。

① 其他冶金廠的高爐廢渣僅在進行了相當的試驗後才允許採用。

* 粘土熟料一般使用粘土磚碎塊或粘土磚粉（譯者）。

** 粘土製品碎塊即紅磚（或青磚），瓦，陶質製品等的碎塊和陶瓷工業廢料碎塊（譯者）。

本書作者們進行研究時，提出了一項任務，要確定在以爐渣作集料的耐熱混凝土中採用什麼樣的細磨摻合料較適宜和這些摻合料的數量。

很顯然，並不是所有的細磨摻合料，在運用耐熱混凝土的各種條件下，都是有相等價值的；細磨摻合料和水泥的最合適的比例，對於各種摻合料也可以是不同的。

為了研究摻有各種細磨摻合料的水泥石的性能，曾進行過兩組試驗。在第一組試驗中研究了細磨粘土熟料、瑪格尼托哥爾斯克的水渣、柳別爾崔的石英砂和刻赤的高爐廢渣。摻有刻赤廢渣摻合料的水泥石在受熱後的強度最小。此外，這種摻合料也顯出最小的結合游離氧化鈣的能力，因此未曾進行刻赤廢渣摻合料的進一步的研究。在第二組試驗內以其他摻合料繼續作了研究，其中還包括瑪格尼托哥爾斯克的廢爐渣。

為了發現最有效的細磨摻合料和最合適的細磨摻合料配料量，曾研究了水泥石的耐壓強度、收縮與重量損失、以及其中游離氧化鈣的含量等對於加熱溫度的關係。

為了制作試樣，把水泥粉仔細地與細磨摻合料混合，並用水調成漿。用漿模制成尺寸為 $3 \times 3 \times 3$ 公分的方塊和8字形試樣，試樣用震動方法搗實。試樣在潤濕鋸屑中養護到26日期齡和在空氣干燥條件下養護兩晝夜。然後在 110° 溫度下將試樣干燥至恒重，並於 400 、 600 、 800 、 1000 和 1200° 溫度下加熱。加熱時溫度的上昇等於每小時 150° ，在規定的溫度下保持3小時，冷卻是与爐子一起進行的。

在加熱以後，仔細地觀察試樣，並把它們的一部分在空氣干燥的條件下保持10晝夜以上，而另一部分試樣在加熱和冷卻以後立即進行了壓縮和斷裂試驗。在壓碎後，從小塊中選集試樣以備

用葡萄糖二酸鹽法來測定水泥石中游离氧化鈣的含量。

熱膨脹和收縮用膨脹計測定；此時加熱和冷卻速度是每小時 $150\sim 200^{\circ}$ 。但是用現有的膨脹計不可能試驗溫度在 900° 以上的試樣。

為了測定烘乾時和在更高溫度下（ 900° 以上）的收縮，曾試驗了尺寸為 $3\times 3\times 3$ 公分的試塊（耐壓）強度。用測微計在兩個互相垂直的方向上測量試塊。為了多次測量都測在試塊的同一地方，把測微計固定在專門的台座上，在台座上設置有試塊的擋板。在試塊脫模後和在潤濕養護與隨後在 110° 下烘乾時定期地測量試塊，然後在加熱到規定溫度的前後測量試塊。

在潤濕養護試塊的時候未發現它收縮；相反地，在大多數場合下觀察到尺寸有微小的增加。採取 26 日期齡的試樣尺寸作原始的尺寸（由此尺寸計算收縮）。以在 110° 下烘乾到恒重的試樣尺寸的百分數計算收縮。

用試塊和用膨脹計測定摻有粘土熟料和水渣摻合料的水泥石的收縮。此時獲得十分相近的結果；但是在加熱至 400° 溫度時由膨脹計得出稍小一些的收縮。很顯然，在這種加熱速度下（每小時 $150\sim 200^{\circ}$ ），水來不及足夠快地排出而收縮也就可能被延緩。

由於所進行的測定游离氧化鈣含量的試驗（圖 2~4）的結果和與我們以前的研究相比較証實了：在水泥石中游离氧化鈣的絕對含量方面和在氧化鈣結合隨著加熱溫度的提高而改變的特性方面，細磨粘土熟料和石英的摻合料得出十分相近的結果。當溫度達 300° 時游离氧化鈣結合的程度不大；摻有粘土熟料摻合料的水泥石加熱到 800° 時，其中存留的游离氧化鈣為在 110° 下烘乾試樣所含氧化鈣的 $60\sim 90\%$ 。當溫度高於 800° 時，游离氧化鈣的結合急劇增加。加熱到 1000° 的水泥石含有的游离氧化鈣大約為

原始含量的 20~50%，到 1200° 时——约为原始含量的 10%。但是在水泥对掺合料的比为 80：20 时，加热到 1200° 的水泥石中的游离氧化钙数量与加热到 1000° 时的相比並不减少，也就是說看来在这个情况下掺合料的数量不足以进一步結合游离氧化钙。

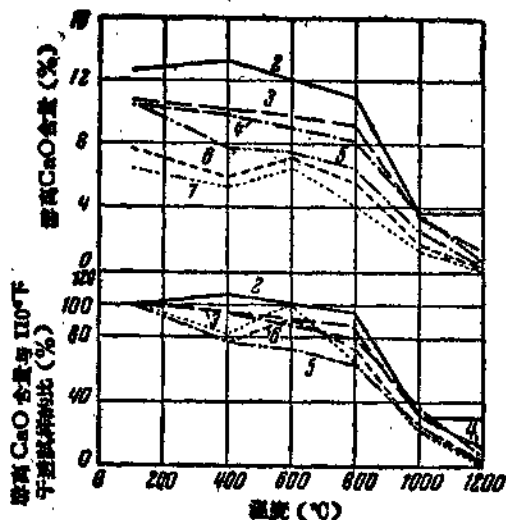


圖 2 水泥石中游离氧化钙含量和細磨粘土熟料掺合料及加热温度的关系曲线，各曲线的砂酸盐水泥和粘土熟料的比 (%) 为：2—80：20；3—70：30；4—60：40；5—50：50；6—40：60；7—30：70

掺有細磨水渣掺合料的水泥石中，游离氧化钙的绝对含量在加热达 100° 温度时与掺有其他掺合料的水泥石试样比較起来要小些，因为氧化钙的相当大部分在凝固时即已結合；在 600° 温度时發現游离氧化钙含量的急剧增加。这个现象的原因未弄明白。可

能，游离氧化钙在水渣颗粒表面上结合为水化物。当温度提高并排除水份时，这个结合就被破坏而氧化钙变成非结合的。加热到 800° 的温度急剧地降低水泥石中游离氧化钙的含量。可能这是由于在 $750\sim 800^{\circ}$ 温度阶段内水渣在可塑粘滞状态下活性提高而引起；在温度高于 800° 时，游离氧化钙的结合进行得没有在此相似温度下掺有粘土熟料掺合料时的那样激烈。

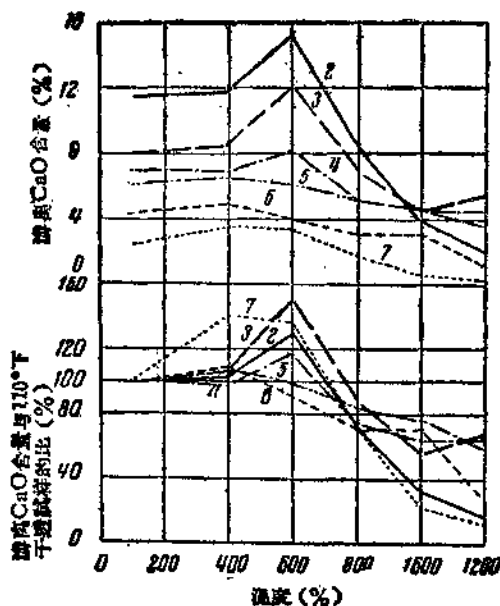


圖 3 水泥石中游离氧化钙含量和細磨水渣掺合料及加热温度的关系曲线，各曲线的砂酸盐水泥和水渣比(%)为：2—85 : 15; 3—70 : 30; 4—55 : 45; 5—40 : 60; 6—25 : 75; 7—10 : 90

在加热达 800° 温度以前，高爐廢渣的掺合料不与游离氧化鈣結合；在更高温度时，游离氧化鈣的含量减少，但仍然比用水泥掺合料的多。

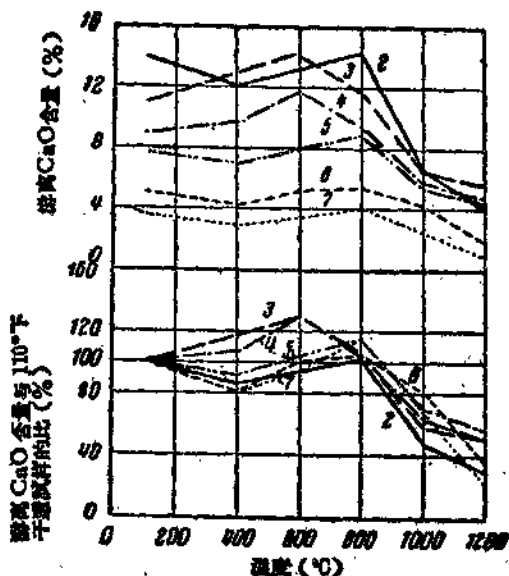


圖 4 水泥石中游离氧化鈣含量和細磨高爐廢渣掺合料及加热温度的关系曲线，各曲线的砂、水泥和廢渣的比(%)为：2—83 : 17；3—70 : 30；4—55 : 45；5—40 : 60；6—25 : 75；7—15 : 85

按水泥石中游离氧化鈣含量所得的结果，与加热到 800° 温度后於空气干燥条件下养护的試塊上出現裂縫的資料十分符合。

在加廢爐渣(含 CaO 5~14%)掺合料的情况下，观察到出現