

시멘트 粉碎用 High-pressure Roll mill

韓 邦 淵 (譯)

〈韓一시멘트工業(株) 技術部 部長〉

1. 序 論

Lägerdorf 시멘트工場은 生産能力 增大方案에 따라 기존 시멘트 밀을 능가하는 粉碎能力 100 t/h의 새로운 시멘트 밀을 설치할 계획이었다. 이러한 新粉碎技術로 에너지 및 建設비용 절감을 기하고자 초기 설계 과정에서는 破碎機 (Hammer mill)와 分級機 (Classifier)를 갖춘 Closed circuit의 High-pressure roll mill (Roller press)만으로 시멘트를 粉碎하고자 하였다. 그러나 사전 조사 단계¹⁾에서 이러한 High-pressure roll mill 粉碎로는 시멘트의 특성에 큰 변화가 올 수 있다는 것이 알려졌으며 특성 변화의 이유가 무엇인지 또는 이러한 방법으로 品質 向上을 꾀할 수 있는지에 대한 사항이 불분명하였다. 이러한 문제점들을 해결하고자 종합적인 분석시험과 조사가 수행되었으며 本文은 그 결과에 대한 事項을 기록한 것이다.

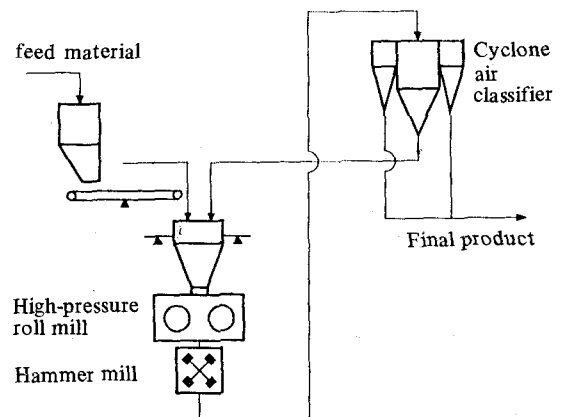
2. High-pressure roll mill의 運轉 試驗

1) 粉碎 設備의 配置와 運轉 特性

Lägerdorf 工場에서는 1987년 중반부터 사용하여오던 lime 粉碎에 High-pressure roll mill을 갖추어 시멘트 粉碎試驗을 하였다. lime

粉碎에 있어서는 電力消費가 50% 이상 節減되었으며 品質 또한 向上되었다는 Paulsen의 報告書²⁾가 이미 발표된 바 있다.

시멘트 粉碎試驗은 〈그림-1〉에서와 같이 분급기를 갖춘 closed circuit의 High-pressure roll mill로 시행되었다. 크링카는 weigh-belt feeder를 통하여 mill feed bin으로부터 분급기에서 선별된 수분과 함께 load-cell을 갖춘 mill feed hopper로 供給된다. 原料 投入量은 hopper 內의 原料量이 一定하게 유지될 수 있도록 hopper의 重量에 의해 調整된다. Roller



〈그림-1〉 High-pressure roll mill을 갖춘 closed-circuit 시멘트 粉碎 設備

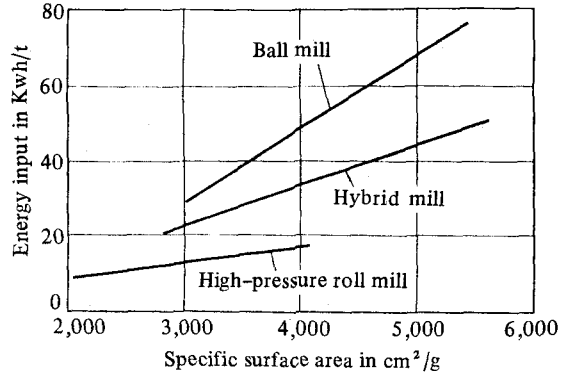
mill 下部로 排出된 덩어리진 原料는 파쇄기에서 破碎된 후 bucket elevator 에 의해 Cyclone air classifier 로 운반된다.

粉碎試驗은 황산 칼슘(Calcium sulphate, 석고)과 함께 또는 크링카 자체만을 분쇄하여 1,900 ~ 4,000 cm²/g의 比表面積을 측정함으로써 행하여졌으며, 시험 결과 매우 높은 분말도와 함께 굵은 粒子(1.0 mm mesh sieve 잔사 최대 15%) 들도 다량 발견되어 결과적으로 분쇄 공정에서는 상대적으로 높은 4~6%의 재순환율이 확인되었다. 다량의 굵은 粒子가 原料에 함유되어 있으므로 roll 간격에 있어서의 venting 문제가 없는 반면 High-pressure roll mill 을 Ball mill과 함께 사용하여 분급기로부터 Roll mill 에 재순환되는 원료의 분말도가 높아지면 venting 문제가 제기될 수도 있다.

2) 電力原單位

High-pressure roll mill에서의 電力原單位는 모든 시험 결과 어느 종류의 mill 보다 월등히 적게 소요된다는 것이 밝혀졌다. <그림-2>는 세가지 다른 종류의 mill 에 있어서 제품의 비표면적에 대한 電力原單位를 나타낸다. 이 비교 그래프의 목적상 분급기와 bucket elevator에서의 소요 전력량은 이에 대한 현재의 설비가 용량으로 보아 과잉 설계되어 있어 High-pressure roll mill의 시멘트 분쇄 결과가 잘못 판단될 수 있기 때문에 고려되지 않았다.

<그림-2>의 맨 위 직선은 현재 Lägerdorf 工場에서 시멘트 粉碎用으로稼動中인 Ball mill의 平均 電力原單位를 나타낸 것이며 중간 직선은 他 시멘트 공장의 Hybrid 粉碎設備의 實績에 기초한 것이고 마지막 직선은 현재 시험 중인 Hammer mill 을 갖추고 closed-circuit 으로 운전 중인 High-pressure roll mill의 전력 소요량을 나타낸 것이다. 이 그림으로서 High-pressure roll mill은 Ball mill에서 요구되는 전력량의 절반도 채 소요되지 않으며 ball mill과 High-pressure roll mill 을 같이 사용한 Hybrid mill의 전력 소요량이 그 중간 정도인 것을 알 수 있다. 또한 이 결과 Ball mill 대신 High-pressure roll mill 을 채택함으로써



<그림-2> Mill의 比表面積에 대한 電力原單位

High-pressure roll mill로 生産된 시멘트와 portland cement PZ 45 F의 特性 比較

<表-1>

cement properties	Ball mill PZ 45 F	High-pressure roll mill
specific surface area in cm ² /g	4,020	3,450
position parameter X' in microns	17.7	16.8
slope n	0.91	1.06
water requirement in	27.0	32.5
initial set in minutes	91	125
final set in minutes	161	195
strength in N/mm ² at 1 day	15	15
2 days	27	30
7 days	49	50
28 days	59	60

제품의 분말도 증가보다 에너지 절감 효과가 더 클 것으로 기대된다.

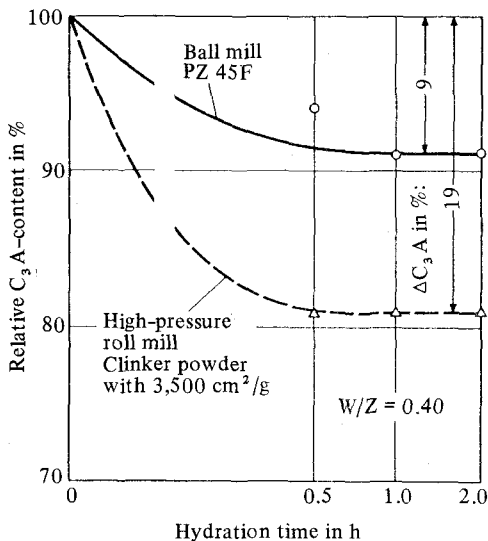
3) 시멘트의 品質 特性

<表-1>은 Roll mill에서 生産된 시멘트의 主要 特性들을 Lägerdorf 工場에서 生産된 Portland cement인 PZ 45 F의 特性들과 비교하여 놓은 것이다. 두 시멘트 모두 크링카 石膏를 혼합 분쇄하였으며 비교 목적상 Roll mill 시멘트는 RRSB Granulometric diagram⁹⁾에서 PZ 45 F와 입도 분포상의 같은 X position parameter를 갖는 것을 선택하였다. 그 결과 이 두

시멘트의 時間에 따른 強度 發現은 同一한 것으로 나타났으나 High-pressure roll mill에서 生産된 시멘트의 粒度 分布의 기울기 $n=1.06$ 으로 PZ 45 F 보다 약간 좁아 대략 같은 position parameter 에서 Roll mill cement 의 비표면적이 Ball mill cement 보다 상당히 낮은 것을 알 수 있다. 반면 이들 두 시멘트는 流動性에 있어서 큰 차이가 있음을 알 수 있는데 <表-1>에서 Roll mill 시멘트가 標準 流動值에 도달하기 위한 물 소요량은 Ball mill 시멘트보다 5.5% 높은 32.5%이며 이는 다른 시험에서도 항상 같은 결과를 보인 바 심지어 35%나 높은 경우도 있었다.

4) 물 所要量과 그 영향

High-pressure roll mill 시멘트의 많은 물 소요량은 아마도 좁은 粒度分布와 Roll mill에서 분쇄된 크링카 분말의 높은 반응성, 불충분한 탈수 또는 분쇄 공정에 있어서의 微粉碎 및 石膏의 分布 때문이라고 생각할 수 있으나 좁은 粒度分布의 영향은 일반적으로 <表-1>에서의 기울기를 0.15 만큼 증가시키거나 또는 같



<그림-3> 포틀랜드 시멘트 PZ 45F와 High-pressure roll mill에서 生産된 크링카 powder의 水和 時間에 따른 C₃A 변화

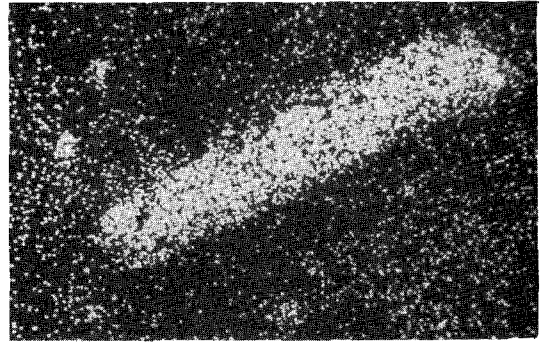
은 조건에서도 물 소요량을 단지 1~2% 정도 밖에 증가시키지 못하므로 상대적으로 미미하다고 할 수 있다.

物理·化學的 調査에 의하면 C₃A의 變換으로 특징지어지는 크링카의 반응성은 High-pressure roll mill에서 분쇄된 크링카가 Ball mill보다 상당히 높은 것을 알 수 있는데 이는 시멘트 반죽에서의 流動性을 결정하는 중요한 要因이 된다. 이 반응의 측정은 시멘트가 물과 혼합된 후 첫 반응 단계에서 변화되는 C₃A의 비율로서 알 수 있다. C₃A의 變換(ΔC₃A)는 독일에서 제조되는 시멘트의 경우 상대적으로 4%~16%이므로 C₃A의 낮은 반응을 갖는 시멘트는 물과 혼합 후 전체 C₃A 중 단지 4%만이 즉시 변화하는 반면 높은 반응을 갖는 시멘트는 첫 水和 반응에서 최대 16%의 C₃A가 변화한다고 할 수 있다. 시멘트의 C₃A 變換율이 높을수록 주어진 절대 C₃A의 함량에서 수화 초기 단계에서의 시멘트 입자의 표면에서 형성되는 수화층의 비율 또한 높아지므로 결과적으로 동일한 시멘트 입도 분포에서 C₃A의 變換이 빠를수록 물 소요량은 많아진다. 이는 黃成分의 溶解 特性이 C₃A 最適의 變換율을 증가시키는데 둔감하게 작용할수록 더욱 그러하다. 2時間까지 水和作用이 進行된 두 시멘트의 C₃A 變換이 <그림-3>에 나타나 있다. 이 두 sample은 重量으로 보아 대략 같은 약 11%의 C₃A 성분을 가지고 있다. 위 곡선은 Lägerdorf 工場의 볼 밀에서 4,000 cm²/g까지 분쇄된 포틀랜드 시멘트인 PZ 45 F를 나타내며 아래 곡선은 High-pressure roll mill에서 3,500 cm²/g으로 분쇄된 크링카 분말의 C₃A 變換을 나타낸다 <그림-3>에서 알 수 있듯이 볼 밀에서 분쇄된 PZ 45 F는 水和 초기 단계에서 독일에서 제조된 포틀랜드 시멘트의 平均値와 일치하는 全 C₃A中 9% 變換을 보였으며 적당한 黃成分의 投入으로 標準値에 필요한 물 소요량은 27%이었으므로 보통 사용하는 量이라고 할 수 있다.

그러나 만일 같은 크링카가 High-pressure roll mill에서 분쇄된다면 초기 水和 단계에서의 상대적 C₃A 變換은 19%이며 이는 분명히



〈그림-4〉 100미크론의 石膏 粒子和 High-pressure roll mill 시멘트의 전자 현미경 사진



〈그림-5〉 롤 밀 시멘트의 전자 현미경 사진 (〈그림-4〉)에 있어서 黃(밝은 부분) 分布

C_3A 의 반응성의 분쇄 공정에 의해 다소 증가되었음을 의미한다. 이와 유사하게 높은 C_3A 변화가 黃 성분과 함께 High-pressure roll mill에서 같은 비표면적으로 분쇄된 같은 크링카에서도 나타난다.

이미 언급한 바와 같이 시멘트에 있어서의 물소요량은 粒度 分布와 C_3A 의 반응 뿐만 아니라 시멘트에 내재해 있는⁷⁾ 黃 성분의 분말도 분포⁶⁾ 및 특성에 의해 좌우된다.

시멘트내 黃 성분의 均一한 分布는 또한 미세하게 분쇄되었을 때만 얻어질 수 있다. 볼 밀 시멘트에 있어서의 黃 성분은 시멘트에 균일하게 분포되어 있는 미세입자내에 존재하는 반면 High-pressure roll mill 분쇄에서는 黃 성분이 충분히 미세하게 분쇄되지 않아 그 분말도가 시멘트의 균일 분포에 적합하지 않다는 것이 조사 결과 밝혀졌으며 이는 黃 성분의 분쇄에 필요한 에너지가 상대적으로 낮음에도 불구하고 사실이다. 이는 石膏의 높은 塑性 變形으로 설명될 수도 있으며 한편 High-pressure roll mill에서 분쇄되어야 하는 물질의 機械的·熱的條件에서도 찾아볼 수 있다.

〈그림-4,5〉에서 볼 수 있듯이 High-pressure roll mill에서의 黃 성분 微粉碎는 제대로 이루어지지 않은 것처럼 보인다. 롤 밀 시멘트는 전자 현미경으로 관찰한 〈그림-4〉에서 100미크론 이상의 粒子가 나타나며 〈그림-5〉는 이와 같은 방법 및 배율로서 黃 성분의 分布를

보여준다. 이 두 사진을 비교함으로써 길이 100미크론을 초과하는 巨形 粒子는 황산 칼슘 특히 이 경우에는 石膏로 구성되어 있음을 알 수 있다.

이로써 黃 성분의 粉碎에 있어서 적절한 粉末度가 얻어지지 않았음이 분명하다. 또한 調査結果 High-pressure roll mill에서의 크링카와 黃 성분의 혼합 분쇄 과정에서 黃 성분의 石膏분이 低 에너지 소비로 밀의 溫度가 상대적으로 낮으며 粉碎工程에서의 체류 시간이 상대적으로 짧기 때문에 필요한만큼 완전 건조되지 않았음이 밝혀졌다. 또한 이러한 이유로 High-pressure roll mill의 運轉 試驗中 低溫의 크링카로 사용하였는데도 밀 溫度는 $60^{\circ}C$ 에 지나지 않았다. 이러한 이유 및 工程內에서의 짧은 체류 시간으로 石膏의 완전 건조가 이루어지지 않았으며 이러한 분쇄 조건하에서 시멘트의 黃에 대한 최적 조건을 만족시킬 수 없었다.

初期 研究 結果를 요약하면 微粉碎와 均一한 分布 및 黃 혼합물의 완전 건조는 롤 밀 분쇄 후 볼 밀에서 또다시 분쇄와 균일화가 이루어져야 얻어질 수 있으며 또한 C_3A 의 주어진 반응성을 調整할 수 있다고 할 수 있다.

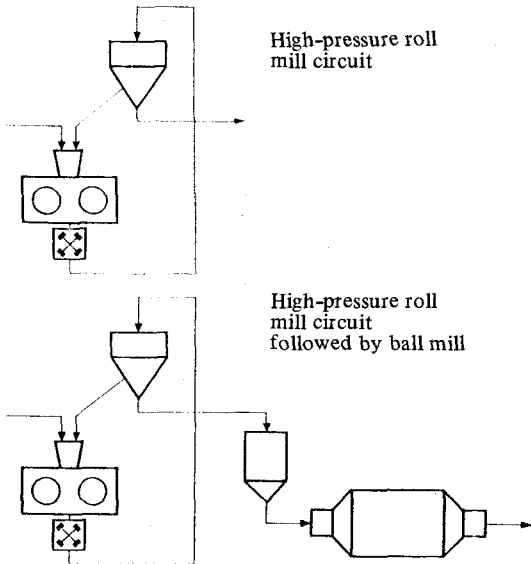
3. Ball mill에서의 2次 粉碎

1) 實驗的 考察

High-pressure roll mill 시멘트의 物性を改善하기 위하여 産業用 볼 밀과 實驗用 밀에서 2次 粉碎 實驗이 行하여졌으며 이에 대한 실제 운전 경로는 <그림-6>과 같다.

<그림-6>에서 위쪽 그림은 앞 장에서 설명한 바와 같이 롤 밀만의 분쇄 공정이며 아래 그림은 classifier의 정분을 위한 bin과 2次 粉碎用の 볼 밀의 배치를 보여준다. 실제에 있어서의 볼 밀로는 單室 밀이 사용되었으며 실제로 미분쇄될 量이 적으므로 매우 작은 분쇄 매체 즉 鋼球가 충전되었다. Batch로 투입되는 實驗用 밀에서의 2次 분쇄 결과는 다음에 기록되어 있으며 이 시험의 목적은 좋은 품질의 시멘트를 얻기 위하여 최소한 어느 정도의 量이 분쇄되어야 하는가를 알아내는데 있다.

實驗用 볼 밀(0.65 m × 0.65 m)은 cylpebs 분쇄 매체로 충전되어(충전율 約 30%) 상대 회전 속도 0.75로 運轉되었다. 石膏의 건조를 위한 실제 조건을 맞추기 위하여 분쇄가 진행되는 동안 밀을 전기 가열시켜 밀 내부 온도를 100℃로 유지하였으며 High-pressure roll mi-



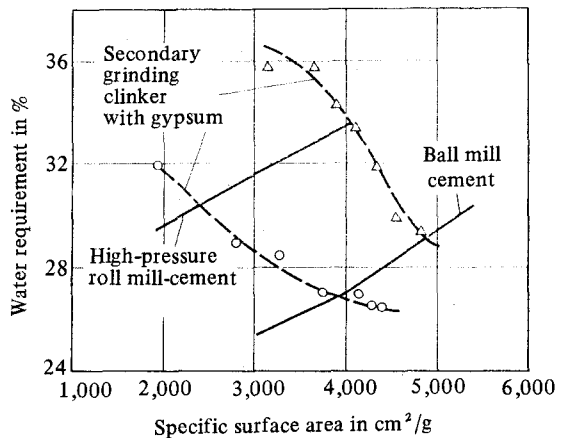
<그림-6> Process engineering layout of grinding plants

ll에서 비표면적 1,900 cm²/g와 3,100 cm²/g으로 분쇄된 크링카들을 投入하였다. 2次 粉碎前 50%의 人造 石膏(2,000 cm²/g)와 人造 無水石膏(2,500 cm²/g)의 黃 혼합물을 각 경우의 크링카에 첨가하였다.

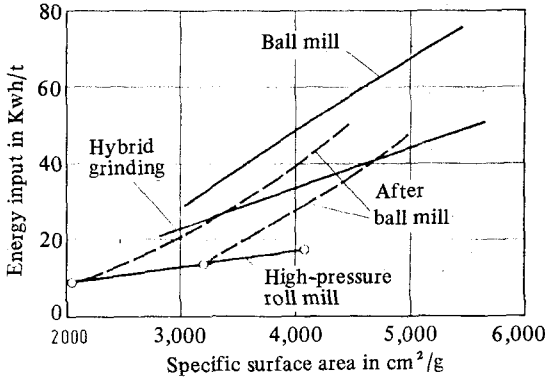
2) 시멘트의 品質 變化

볼 밀에서의 2次 분쇄 공정중 시멘트의 비표면적은 분쇄 시간이 증가함에 따라 커졌다. 분쇄는 최대 50分 동안 지속되었으며 밀 내부 온도 100℃下에서 黃 成分의 石膏는 半水 石膏에서 차츰 無水石膏로 變했다. 또한 粒子 分布는 분쇄 시간이 길어짐에 따라 넓어져 RRSB Granulometric diagram에서의 기울기 n이 1.0 ~ 1.1에서 0.95로 감소되었으며 position parameter x'도 같이 줄어드는 것이 밝혀졌다.

<그림-7>은 시멘트의 비표면적에 대한 물 소요량을 나타냈으며 아래쪽 직선은 産業用 볼 밀에서의 물 소요량을 의미한다. 이렇게 상대적으로 낮은 값은 實驗用 볼 밀에서 2次 분쇄된 High-pressure roll mill 시멘트에서 얻을 수 있다. 위쪽 직선은 볼 밀에서 같은 크링카와 黃 成分으로 혼합 분쇄된 시멘트를 나타내는데 이를 볼 밀 시멘트와 비교하여 보면 같은 비표면적에서 약 6% 많은 물이 소요됨을 알 수 있



<그림-7> 各 분쇄 설비에서의 比表面積에 대한 물 소요量



〈그림-8〉 各 mill에서의 比表面積에 대한 電力原單位

다. 다음 두 개의 점선은 앞서 설명한 바와 같이 High-pressure roll mill에서 분쇄된 크링카를 實驗用 볼 밀에서 2次 분쇄하여 크링카에서 얻어진 결과이다.

〈그림-7〉로부터 볼 밀에서의 2次 분쇄의 결과로서 비표면적이 2,000 cm²/g만큼 증가해도 오히려 시멘트의 물 소비량은 6%까지 감소될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 실험 조건하에서 물 소비량을 줄이기 위해서는 2次 분쇄를 통하여 비표면적을 1,500 cm²/g만큼 증가시키면 충분하다고 할 수 있으며 이러한 물 소요량의 급격한 감소는 黃 성분의 微粉碎와 고분分布 및 無水와 半水石膏로 인한 黃 성분과 C₃A의 반응 조정에 의한 것이라 할 수 있다. 이러한 시험 결과로서 다른 분쇄 공정에서도 또한 黃 성분의 적당한 분쇄 및 최적 배합만으로도 상대적으로 많은 물 소비는 피할 수 있으리라 짐작할 수 있다.

3) 2次 粉碎에 있어서의 電力原單位

〈그림-8〉은 각종 분쇄 공정의 비표면적에 대한 電力原單位를 나타내며 이미 언급한 사항을 비교하기 위하여 볼 밀, Hybrid grinding 및 High-pressure roll mill의 관계를 보여준다. 두 점선은 實驗用 볼 밀로 投入되기 전 각각 2,000 cm²/g과 3,100 cm²/g의 분말도를 가졌던 시멘트의 2次 분쇄에 대한 것으로 High-pressure roll

mill에서 2,000 cm²/g까지 분쇄하는데 소요되는 電力은 단지 9kwh/t이나 實驗용 볼 밀에서 2次 분쇄하는데는 약 18 kwh/t가 필요하여 전체적으로는 약 27 kwh/t가 소요되어 Hybrid grinding에서와 거의 같은 電力이 필요하게 된다. 또한 〈그림-8〉은 高性能의 롤 밀과 低性能의 볼 밀을 함께 사용하고자 할 때 더욱 유리함을 보여준다. 그러므로 High-pressure roll mill과 볼 밀의 분리 운전이 복합 운전보다 품질이나 에너지 절감 측면에서는 더 적합하다고 할 수 있으나 이러한 기술적 이점이 또한 경제적으로도 유리한지는 더 연구되어야 할 과제이다.

〈參 考 文 獻〉

- 1) Wüstner, H., Dreizler, I., und Oberheuser, G.: Einsatz der Rollenpresse zum Mahlen von Kohle. Zementrohmaterial und Zement. Zement-Kalk-Gips 40 (1987) H. 7, S. 345-353.
- 2) Paulsen, H.: Erste Betriebsergebnisse beim Einsatz einer Rollenpresse zur Kalkmahlung. Zement-Kalk-Gips 40 (1987) H. 12. S. 598-601.
- 3) DIN 66 145. Darstellung von Korngrößenverteilungen, RRSB-Netz. April 1976. Beuth-Verlag, Berlin und Köln.
- 4) Kuhlmann, K., Ellerbrock, H. G., und Sprung, S.: Korngrößenverteilung und Eigenschaften von Zement. Teil I: Festigkeit von Portlandzement. Zement-Kalk-Gips 38 (1985) H. 4. S. 169-178.
- 5) Sprung, S., Kuhlmann, K., und Ellerbrock, H. G.: Korngrößenverteilung und Eigenschaften von Zement. Teil II: Wasseranspruch von Portlandzement. Zement-Kalk-Gips 38 (1985) H. 9, S. 528-534.
- 6) Tang, F. J., und Gartner, E. M.: Influence of sulphate source on Portland cement hydration. Advances in Cement Research 1 (1988) 2 (April), 67-74.
- 7) Locher, F. W., Richartz, W., und Sprung, S.: Erstarren von Zement. Teil II: Einfluß des Calciumsulfatzusatzes. Zement-Kalk-Gips 33 (1980) H. 6, S. 271-277. ♣

〈資料 : ZKG No. 4 1989〉