

多单色激发的DM2500用于水泥元素分析的优越性

摘要

DM2500 MMEDXRF 轻中元素光谱仪，是一种具创新性的 XRF 光谱仪。它采用多单色激发能量色散 X 射线荧光 (MMEDXRF) (Multiple Monochromatic Excitation Energy Dispersive X-Ray Fluorescence) 分析技术。对数螺线旋转双曲面晶体 (LSDCC) 用于轻元素 (Cl 以下) 测量，锗二次靶用于中元素 (K-Zn) 测量，极大地提高了峰背比。通过与各种不同类型的 XRF 光谱仪 (包括本公司的) 的比较，其与 GB/T176-2017《水泥化学分析方法》的符合性，不仅远优于传统的 EDXRF 光谱仪，而且接近、甚至于部分优于大型的 WDXRF 光谱仪。其价格与传统的 EDXRF 光谱仪相当，仅为国产 WDXRF 光谱仪的一半，进口 WDXRF 光谱仪的四分之一，具有极高的性价比。故其用于水泥元素分析具有无可比拟的优越性。



关键词：

GB/T176-2017
《水泥化学分析方法》

多单色激发能量色散X射线荧光(MMEDXRF)

二次靶

双曲面晶体(LSDCC)

Bragg定律

X射线荧光分析方法

常量分析

能量分辨率

背景强度

峰背比

重复性R

再现性R

介绍

用于水泥元素分析的方法有很多，仅国家推荐标准 GB/T176-2017《水泥化学分析方法》中提到的分析方法就有：化学分析方法，X 射线荧光 (XRF) 分析方法，电感耦合等离子体 (ICP) 发射光谱法。

化学分析方法是水泥行业传统的分析方法，其方法数量繁多，复杂，需化学试剂，需人工进行操作，人为误差不可避免，分析时间长。所以，除非其他方法不能分析，一般情况尽可能不用化学分析方法。

电感耦合等离子体 (ICP) 发射光谱法具有多元素同时分析，检出限低等优点。但也有不少缺点，如：进样方式必须液体进样，样品前处理的过程比较复杂且时间较长，水泥元素分析一般是常量分析，所以不能体现出其检出限低的优点，且仪器价格昂贵。所以水泥行业很少用该方法。

X 射线荧光 (XRF) 分析方法是目前水泥行业使用最广泛的方法。其本质是物理分析方法，具有分析速度快、准确度高、不破坏样品、只需简单制样等优点。

X 射线荧光 (XRF) 分析方法所用仪器为 XRF 光谱仪。其分为两大类，分别是波长色散 (WD) XRF 光谱仪和能量色散 (ED) XRF 光谱仪。

WDXRF 光谱仪由于其分辨率高，对轻元素能达到 30eV 左右，性能优异，能完全满足标准 GB/T176-2017 的要求，故目前绝大部分

水泥企业所用的都是 WDXRF 光谱仪。但其结构复杂，价格较高，难以维护。

EDXRF 光谱仪是较后发展出来的，其结构简单，价格较低，易于维护，并且所有元素能同时分析。但由于其探测器的分辨率较低，轻元素的峰有一定的重叠，故一直以来都不能完全满足水泥行业的要求。长期以来世界各国的科研人员都在竭力提高 X 射线探测器的分辨率，目前最好的 SDD 探测器其分辨率已达到 130eV 左右，基本能使相邻轻元素如 Na, Mg, Al, Si 的峰之间没有重叠，基本能满足水泥分析的要求。但由于轻元素特别是 Na, Mg 的荧光产额较低，使其峰背比较低，从而还是不能得到准确分析。

EDXRF 光谱仪所用之探测器在不断的改进中，但其分辨率不可能在近期达到 WDXRF 光谱仪的水平。为提高 EDXRF 光谱仪的准确度，科研人员另辟蹊径，从激发源入手，采用单色激发，极大地降低了背景，从而提高了峰背比，使 EDXRF 光谱仪也能准确分析轻元素，完全满足标准 GB/T176-2017 的要求。这种具创新性的 EDXRF 光谱仪就是多单色激发能量色散 X 射线荧光 (MMEDXRF) (Multiple Monochromatic Excitation Energy Dispersive X-Ray Fluorescence) 光谱仪。



EDXRF光谱仪原理及其峰背比

由于元素的原子序数越小荧光产额（荧光发射的概率）也就越小，所以 XRF 光谱仪对原子序数越小的元素测量的灵敏度越低，也就是说越难测量。在 GB/T176-2017 中所要求分析的元素中，对 XRF 光谱仪来说，最难测量的就是 Na 元素了。像 S、Ca、Fe 这些元素，本公司的 DM1240 等只要 3 万左右用的正比计数管作探测器的 XRF 光谱仪就能准确测量。所以本文通过比较各种不同 XRF 光谱仪对 Na 元素测量的好坏来说明哪种 XRF 光谱仪更好。

能量色散 X 射线荧光 (EDXRF) 光谱仪的原理图如图 1 所示。激发光源 X 射线管发出的 X 射线直接照射到样品上，样品激发出 X 射线荧光，探测器接受样品中的对应元素的特征 X 射线荧光，并依据其能量对其进行分析，从而得到样品中元素的浓度。

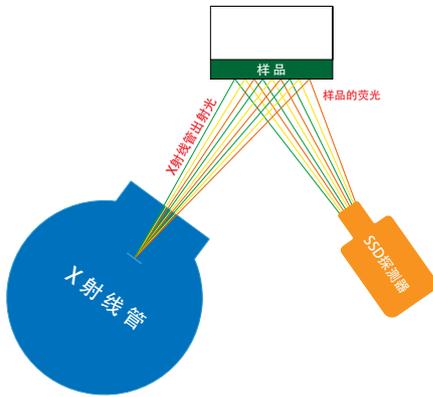


图 1 EDXRF 光谱仪的原理图

能量色散 X 射线荧光 (EDXRF) 光谱仪的光谱图如图 2 所示。该光谱仪所用激发源为银靶 X 射线管，图 2 的谱图是 SSD 探测器所测得的低能部分。

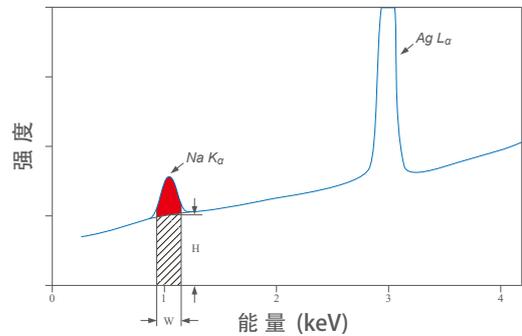


图 2 EDXRF 光谱仪的光谱图

图 2 中，有二个峰，分别是 X 射线光管靶的特征 X 射线 Ag 的 L_{α} 线 (2.984keV) 和样品中的特征 X 射线荧光 Na 的 K_{α} 线 (1.041keV)。峰以外及峰的下面的区域就是能谱的本底，它是由 X 射线光管的韧致辐射打在样品上后散射到探测器上而产生的。

图 2 中 Na 元素的峰背比为：

$$\left(\frac{N_{\text{峰}}}{N_{\text{背}}}\right)_{\text{ED}} = \frac{N_{\text{峰}}}{H \times W} \quad (1)$$

式中 $N_{\text{峰}}$ 是 Na 元素全能峰的净峰计数， $N_{\text{背}}$ 是 Na 元素全能峰的背景计数或日本底计数。 $N_{\text{峰}}$ 就是图中红色区域的面积， $N_{\text{背}}$ 就是图中黑色斜杠区域的面积，就是 $H \times W$ ， H 是本底的高度， W 是本底的宽度。

WDXRF光谱仪原理及其峰背比

波长色散 X 射线荧光 (WDXRF) 光谱仪的原理图如图 3 所示。激发光源 X 射线管发出的 X 射线直接照射到样品上，样品激发出 X 射线荧光，经入射狭缝或索拉狭缝后照射到晶体上，经晶体衍射，满足 Bragg 定律： $n\lambda=2d\sin\theta$ 的样品中对应元素的特征 X 射线荧光，将从后面的出射狭缝或索拉狭缝射出，并经探测器计数，从而得到样品中元素的浓度。

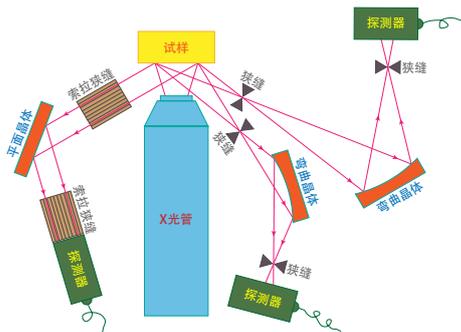


图 3 WDXRF 光谱仪的原理图

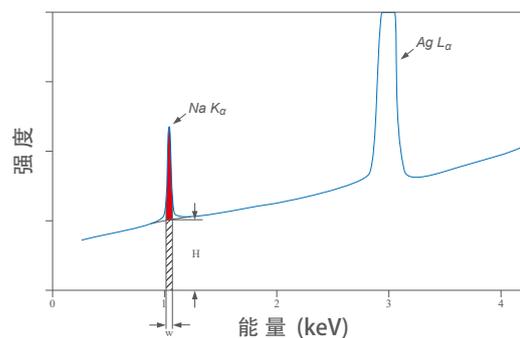


图 4 WDXRF 光谱仪的光谱图

波长色散 X 射线荧光 (WDXRF) 光谱仪的光谱图如图 4 所示。该光谱仪所用激发源也为银靶 X 射线管，图 4 的谱图是 WDXRF 光谱仪所测得的低能部分。按理 WDXRF 光谱仪的谱图应该是以波长为横轴的波谱图，但为了与能量色散的进行比较，我们在这里转换为了能谱图。

图 4 与图 2 一样，有二个峰，分别是 X 射线光管靶的特征 X 射线 Ag 的 L_{α} 线和样品中的特征 X 射线荧光 Na 的 K_{α} 线。峰以外及峰的下面的区域就是能谱的本底，它是由 X 射线光管的韧致辐射打在样品上后散射到探测器上而产生的。

图 4 中 Na 元素的峰背比为：

$$\left(\frac{N_{\text{峰}}}{N_{\text{背}}}\right)_{\text{WD}} = \frac{N_{\text{峰}}}{H \times w} \quad (2)$$

式中 $N_{\text{峰}}$ 是 Na 元素全能峰的净峰计数， $N_{\text{背}}$ 是 Na 元素全能峰的背景计数或日本底计数。 $N_{\text{峰}}$ 就是图中红色区域的面积， $N_{\text{背}}$ 就是图中黑色斜杠区域的面积，就是 $H \times w$ ， H 是本底的高度， w 是本底的宽度。

MMEDXRF 光谱仪原理及其峰背比

多单色激发能量色散 X 射线荧光 (MMEDXRF) 光谱仪的原理图如图 5 所示。与前面二种光谱仪不同，其激发光源 X 射线管发出的 X 射线不是直接照射到样品上，而是先照射到单色光学器件上，如晶体、单质材料等上。用衍射晶体作光学器件其单色化是最好的，由于 Na 的测量难度，所以测 Na 我们一般用晶体。经晶体衍射，满足 Bragg 定律： $n\lambda = 2d \sin \theta$ 的 X 射线才能照射到样品上，一般该晶体制作成只能衍射 X 射线管靶材的特征 X 射线。经单色化后的 X 射线照到样品上，样品激发出 X 射线荧光，探测器接受样品中的对应元素的特征 X 射线荧光，并依据其能量对其进行分析，从而得到样品中元素的浓度。

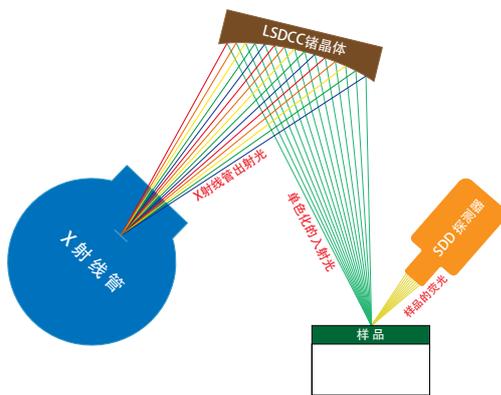


图 5 MMEDXRF 光谱仪的原理图

多单色激发能量色散 X 射线荧光 (MMEDXRF) 光谱仪的光谱图如图 6 所示。该光谱仪所用激发源也为银靶 X 射

线管，图 6 的谱图是 MMEDXRF 光谱仪所测得的低能部分。

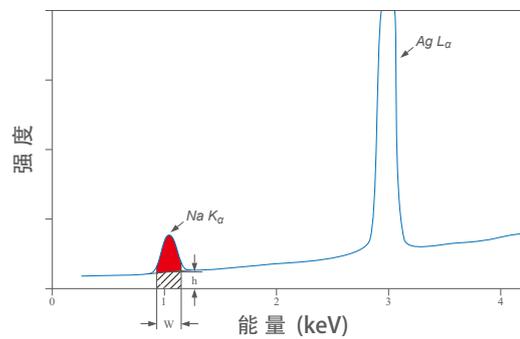


图 6 MMEDXRF 光谱仪的光谱图

图 6 与图 2 一样，有二个峰，分别是 X 射线光管靶的特征 X 射线 Ag 的 L_{α} 线和样品中的特征 X 射线荧光 Na 的 K_{α} 线。峰以外及峰的下面的区域就是能谱的本底，与上面二种光谱仪不同，它是由 X 射线光管的韧致辐射打在晶体上后散射，该散射再打在样品上后又散射到探测器上而产生的。

图 6 中 Na 元素的峰背比为：

$$\left(\frac{N_{\text{峰}}}{N_{\text{背}}}\right)_{\text{MME}} = \frac{N_{\text{峰}}}{h \times W} \quad (3)$$

式中 $N_{\text{峰}}$ 是 Na 元素全能峰的净峰计数， $N_{\text{背}}$ 是 Na 元素全能峰的背景计数或日本底计数。 $N_{\text{峰}}$ 就是图中红色区域的面积， $N_{\text{背}}$ 就是图中黑色斜杠区域的面积，就是 $h \times W$ ， h 是本底的高度， W 是本底的宽度。

三种光谱仪峰背比的比较

对上面三种光谱仪的峰背比进行比较，就是比较 (1)、(2)、(3) 式的大小。

现在来看图 2、4、6 三个光谱图。

为便于比较我们已经将其都变为能谱图，并且假设这些光谱仪的分辨率足以将相邻元素区分开来，所以在只考虑 Na 元素的情况下未将周围其他元素的谱画出，并只画出了低能部分，而事实并非没有。

图 2、6 中的 W 就是 (1) 和 (3) 式中的 W ，是感兴趣区的宽度，这二种光谱仪都是能量色散的，所以宽度是一样的，一般取能量分辨率的 1.2 倍 ~ 1.8 倍。能量分辨率 (Energy resolution) 是指，针对两种不同能量的入射粒子，光谱仪所能够测定最小的能量间隔。能量分辨率定义为 FWHM (全能峰高度一半处的峰宽度) 与峰位能量的比值，或直接用 FWHM 表示。能量色散光谱仪的分辨率就是所用 SSD 探测

器的分辨率，一般在 130eV 左右。

图 4 中的 w 就是 (2) 式中的 w ，也是感兴趣区的宽度，同样取能量分辨率的 1.2 倍~ 1.8 倍。不同于能量色散的，波长色散光谱仪的分辨率是晶体区分入射粒子波长的能力，在 X 射线的长波段，也就是低能段，一般在 25eV 左右。

所以，在低能段，一般情况：

$$\frac{W}{w} \geq 4 \quad (4)$$

图 2、4 中的 H 就是 (1) 和 (2) 式中的 H ，是全能峰 Na 峰的背景或日本底的高度。由于这二种光谱仪的激发光源 X 射线管发出的 X 射线是直接照射到样品上，所以这个高度是一样的。

图 6 中的 h 就是 (3) 式中的 h ，也是全能峰 Na 峰的背景或日本底的高度。MMEDXRF 光谱仪与前面二种光谱仪不同，其激发光源 X 射线管发出的 X 射线不是直接照射到样品上，而是先照射到晶体上再照射到样品上的，所以

其照射到样品上的韧致辐射相对于有用的靶的特征 X 射线就大大地减少了。

所以 h 远小于 H ，一般情况：

$$\frac{H}{h} \geq 16 \quad (5)$$

需要指出：(4)和(5)式是在图 2、4、6 中红色的区域，也就是 Na 峰的面积，即 Na 元素全能峰的净峰计数 $N_{峰}$ 相同的情况下才成立。

综上所述，可得到三种光谱仪峰背比的比例为：

$$\begin{aligned} & \left(\frac{N_{峰}}{N_{背}}\right)_{ED} : \left(\frac{N_{峰}}{N_{背}}\right)_{WD} : \left(\frac{N_{峰}}{N_{背}}\right)_{MME} \\ &= \frac{N_{峰}}{H \times W} : \frac{N_{峰}}{H \times w} : \frac{N_{峰}}{h \times W} \\ &= 1 : 4 : 16 \end{aligned} \quad (6)$$

也就是说，在 Na 元素全能峰的净峰计数 $N_{峰}$ 相同的情况下，MMEDXRF 光谱仪的峰背比大约是 WDXRF 光谱仪的 4 倍，EDXRF 光谱仪的 16 倍。

三种光谱仪的比较

XRF 光谱仪的好坏主要取决于其最重要的性能指标检测限，比较 XRF 光谱仪主要就是比较它们的检测限的高低。

XRF 光谱仪的检测限 LOD (limit of detection)，以浓度表示，是指由特定的分析步骤能够合理地检测出的最小分析信号 X_{LD} 求得的最低浓度 C_{LD} 。用信噪比法，是指由基质空白所产生的仪器背景信号标准偏差的 3 倍值的相应量，即：

$$C_{LD} = \frac{3C}{R - R_b} \sqrt{R_b/T} \quad (7)$$

式中， R_b 为背景(本底)计数强度， R 为已知浓度为 C 的低浓度试样的计数强度， T 为测量时间。

当以计数表示时，(7)式将变为：

$$C_{LD} = \frac{3C}{\sqrt{N_{峰}} \sqrt{\frac{N_{峰}}{N_{背}}}} \quad (8)$$

从 (8) 式可以看出，XRF 光谱仪的检测限与净峰计数 $N_{峰}$ 的平方根成反比，也与峰背比 $\frac{N_{峰}}{N_{背}}$ 的平方根成反比。结合 (6)，在 $N_{峰}$ 相同的情况下，MMEDXRF 光谱仪的检测限大约是 WDXRF 光谱仪的 1/2，EDXRF 光谱仪的 1/4。

通过提高 $N_{峰}$ 就能减小检测限， $N_{峰}$ 提高 $N_{背}$ 也提高，但峰背比是不变的， $N_{峰}$ 提高至 4 倍检测限减小一半。但这是有限制的，能量色散型光谱仪所用的 SDD 探测器在死时间达到 50% 后总计数率再提高将没有意义，也就是最高总计数率是一定的。这也是能量色散型光谱仪所用的 X 光管功

管功率很少有大于 50W 的原因。

MMEDXRF 光谱仪相比 EDXRF 光谱仪其探测到的韧致辐射散射极少，所以在总计数率相同的情况下 $N_{峰}$ 要比 EDXRF 光谱仪的高很多，大约 4 倍左右，结合峰背比，得到 MMEDXRF 光谱仪所能达到的检测限是 EDXRF 光谱仪的 1/8 左右，小 1 个数量级。

WDXRF 光谱仪的原理与其他二种能量色散的不同，样品激发的 X 射线荧光不是直接进入探测器的，所以在 X 光管功率相同的情况下计数率要小得多，又由于单道扫描的 WDXRF 光谱仪是一个一个元素分开测量的，故其所用的 X 光管都是高功率的。理论上，由于其进入探测器的只有特征荧光 X 射线，几乎没有限制，X 光管功率可以极高，但由于价格大小等因素，一般商品化 WDXRF 光谱仪所用的光管功率大约为 3.4 千瓦。为使轻元素，比如 Na 元素的探测限足够小，单道扫描的光谱仪都需要增加固定道，用以单独测量某轻元素。

单道 WDXRF 光谱仪所能达到的检测限比 EDXRF 光谱仪的小的多，但比 MMEDXRF 光谱仪大一点。多道同时或有固定道的单道 WDXRF 光谱仪所能达到的检测限比 MMEDXRF 光谱仪还小一点。

三种光谱仪的其他指标比较见表 1。

表1 EDXRF、WDXRF、MMEDXRF光谱仪的简明比较

类型	EDXRF光谱仪	WDXRF光谱仪	MMEDXRF光谱仪
原理	激发 X 射线直接照射到样品上，样品激发出的特征 X 射线荧光直接进入探测器，并依据其能量对其进行分析。	激发 X 射线直接照射到样品上，样品激发出的特征 X 射线荧光 X 荧光经晶体依据其波长分光，在不同衍射角测量不同元素的特征线。	激发 X 射线先照射到晶体或单质材料上，得到的单色化的 X 射线再照到样品上，样品激发出 X 射线荧光直接探测器并依据其能量对其进行分析。
结构	无扫描机构，只用一个探测器和多道脉冲分析器，结构简单得多，无转动件，可靠性高。简单	未满足全波段需要，配置多块晶体，根据单道扫描和多道同时测定的需要，设置扫描机构和若干固定通道。复杂	基本同 EDXRF 型，仅多 1 个或多个单色光学器件，如：晶体、单质材料等。
X光管	低功率，不需冷却水	高功率，需要冷却系统。 中功率，不需冷却系统。	低功率，不需冷却水
检测器	SDD	正比计数器，闪烁计数器	SDD
能量分辨率	>120eV	低能段：15eV-30eV	>120eV
检测限	重元素 10 ⁻¹ ppm ~ ppm 级 其他 ppm ~ 10ppm 级	重元素 10 ⁻² ppm ~ 10 ⁻¹ ppm 级 其他 10 ⁻¹ ppm ~ ppm 级	重元素 10 ⁻² ppm ~ 10 ⁻¹ ppm 级 其他 10 ⁻¹ ppm ~ ppm 级
峰背比比例 (净峰计数相同下)	1	4	16
准确度	好	很好	很好
重复性	好	很好	很好
系统稳定性	好	好	好
方便性	好	一般	好
分析速度	较快	单道一般，多道快	较快
人员要求	一般	较高	一般
价格	30 万左右	国产 60 万左右，进口 100 万以上	30 万左右

DM2500 MMEDXRF轻中元素光谱仪

DM2500 MMEDXRF 轻中元素光谱仪是本公司最新开发出的世界上近十几年才出现的具创新性的 MMEDXRF 光谱仪。其标准型是专门针对水泥行业设计制造的。测轻元素用高衍射效率点对点聚焦的对数螺线旋转双曲面晶体(LSDCC)作为单色光学器件，其只衍射特征 X 射线 Ag 的 L_α线，测中元素巧妙地合用衍射晶体锆作为二次靶，其产生特征 X 射线荧光 Ge 的 K_α线，极大地提高了仪器的灵敏度和峰背比。它还采用 X 射线向下照射系统，样品自旋装置，特别适合粉末压片样品。

DM2500 MMEDXRF 轻中元素光谱仪的校准数据见该产品样本表 1。这些校准曲线的相关系数Y大部分都大于 0.99，最小也有 0.9690，表示其线性误差**极小**。

DM2500 MMEDXRF 轻中元素光谱仪的重复性测量数据如表 2。按国家标准 GB/T 176—2017《水泥化学分析方法》的重复性要求，光谱仪的重复性必须满足：其示值标准偏差的 3 倍不大于 GB/T176 的重复性限，从表 2 可知，用 DM2500 光谱仪可以实现所有元素**远优于**国家标准 GB/T 176—2017 所要求的重复性。



DM2500 MMEDXRF 轻中元素光谱仪已达到国际领先水平。其性能指标好于同用 SDD 作探测器的传统 EDXRF 光谱仪，而价格基本相当。与 WDXRF 光谱仪相比，其大

部分性能指标接近或达到 WDXRF 光谱仪的性能指标，某些甚至超过。而价格仅为**一半**。

表2. 生料标准样品重复性测量数据分析 (%)

XS11 标样	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl ⁻	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
标准值	0.46	2.74	4.16	16.71	0.70	0.03	0.75	37.61	0.26	3.16
平均示值	0.45	2.67	4.18	16.86	0.69	0.03	0.75	37.75	0.26	3.17
示值标准偏差	0.006	0.0054	0.0094	0.032	0.001	0.001	0.003	0.035	0.001	0.013
3倍示值标准偏差3S	0.018	0.0162	0.0282	0.096	0.003	0.003	0.009	0.105	0.003	0.039
GB/T176重复性限r	0.05	0.15	0.20	0.20	0.15	0.005	0.10	0.25	0.05	0.15
3S/r	0.36	0.11	0.14	0.48	0.02	0.6	0.09	0.42	0.06	0.26
DM2500与国标的符合性	远优	远优	远优	远优	远优	远优	远优	远优	远优	远优

注：粉末压片样品。在 X 射线源为半功率(25W)，测量时间为 180s 的条件下，连续进行 11 次测量所得的结果。

结论

上海爱斯特电子有限公司自成立以来的 30 多年，始终深耕于水泥元素分析的 X 射线荧光光谱仪的研发制造。从公司成立起的放射源激发正比管作探测器的 EDXRF 光谱仪 DM1001、DM1010、DM1010A 钙铁分析仪，到 X 光管激发正比管作探测器的 EDXRF 光谱仪 DM1200 钙铁分析仪、DM1250X 荧光测硫仪、DM1240 硫钙铁分析仪、DM1230 硅铝分析仪、DM2100X 荧光多元素分析仪，这些价廉物美只要几万元最多十几万元的用正比管作探测器的 EDXRF 光谱仪都只能测量部分水泥行业需要测量的元素。十一年前本公司推出了多道 WDXRF 光谱仪 DM8000 多元素分析仪（波散），从而有了能完全符合国家标准能测所有水泥行业需要测量的元素的 XRF 光谱仪。但 DM8000 价格在 80 万左右。现今，本公司推出的结构更简单、使用维护更方便、性能指标更好的 **DM2500 MMEDXRF 轻中元素光谱仪**，其价格仅为其一半。所以我们认为：

DM2500 MMEDXRF 轻中元素光谱仪是水泥元素分析的最佳选择！

上海爱斯特电子有限公司
Shanghai East Electronic Co., Ltd.

地址：上海市金山区朱泾工业区中发路 169 号

邮编：201500

传真：(021)57348305

电话(总机)：(021)64851191

网址：www.eastcc.com.cn，

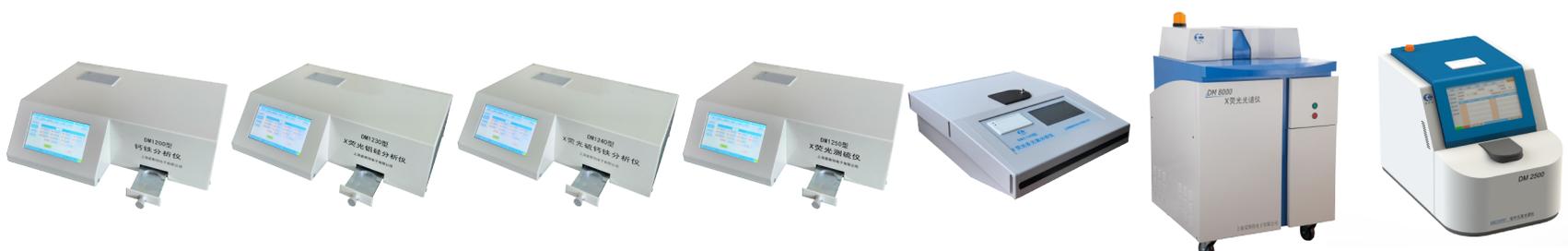
www.instrument.com.cn/netshow/SH100738/

电话(手机)：13801632300

电话(直线)：(021)54500549 64850549

E-mail: eastsc@163.com

表3. 本公司用于水泥行业元素分析的X射线荧光光谱仪的主要技术指标

型号	DM1200	DM1230	DM1240	DM1250	DM2100	DM8000	DM2500
名称	钙铁分析仪	X荧光铝硅分析仪	X荧光硫钙铁分析仪	X荧光测硫仪	X荧光多元素分析仪	多元素分析仪(波散)	MMEDXRF 轻中元素光谱仪
外观							
式样	台式	台式	台式	台式	台式	立式	台式
X射线管	电压: $\leq 10\text{keV}$ 电流: $\leq 0.5\text{mA}$ 功率: $\leq 5\text{W}$	电压: $\leq 4\text{keV}$ 电流: $\leq 1.0\text{mA}$ 功率: $\leq 4\text{W}$	电压: $\leq 10\text{keV}$ 电流: $\leq 0.5\text{mA}$ 功率: $\leq 5\text{W}$	电压: $\leq 4\text{keV}$ 电流: $\leq 1.0\text{mA}$ 功率: $\leq 4\text{W}$	电压: $\leq 10\text{keV}$ 电流: $\leq 0.5\text{mA}$ 功率: $\leq 5\text{W}$	电压: $\leq 50\text{keV}$ 电流: $\leq 8.0\text{mA}$ 功率: $\leq 400\text{W}$	电压: $\leq 50\text{keV}$ 电流: $\leq 2\text{mA}$ 功率: $\leq 50\text{W}$
探测器	超薄铍窗正比计数管	超薄铍窗正比计数管	超薄铍窗正比计数管	超薄铍窗正比计数管	超薄铍窗正比计数管	超薄窗流气正比计数管	SDD半导体探测器
测量元素	Ca、Fe	Al、Si	S、Ca、Fe	S	Al、Si、S、Ca、Fe	从Na(11)~U(92) 的任意10种元素	从Na(11)~Zn(30) 的任意元素
测量精度	优于国家标准GB/T 176—2017所要求的重复性						
符合标准	GB/T 176—2017, JC/T1085—2008, JB/T11145—2011等						
测量时间	推荐值: 30s	推荐值: 300s	推荐值: 60s	推荐值: 60s	推荐值: 310s	推荐值: 180s	推荐值: 180s
测量氛围	大气	大气	大气	大气	大气	真空	充气(或真空)
整机功耗	$\leq 50\text{W}$	$\leq 50\text{W}$	$\leq 50\text{W}$	$\leq 50\text{W}$	$\leq 150\text{W}$	$\leq 1000\text{W}$	$\leq 200\text{W}$
尺寸	470×365×130	470×365×130	470×365×130	470×365×130	560×470×150	790×760×1200	540×500×450
重量	15kg	15kg	15kg	15kg	23kg	195kg	35kg