

of them were higher than the potential value of 3# solution (aqueous solution). In practice, the components of chloride ion standard solution should be the same as that of the solution to be tested. Using chloride ion standard solutions, it was showed that when chloride ion concentration is between 0 and 200 mg/L, the standard curve was highly linear, reproducible, and precise, and had a high correlation coefficient.

Key words: Chloride specific ion electrode; Desalination of iron archaeological artifacts; Alkaline solution; Surfactant

(责任编辑 潘小伦)

· 科技信息 ·

利用中子断层摄影技术对青铜塑像进行无损检测

发现于瑞士 Oberweningen 一罗马庄园内的青铜雕像“Mars”高 7.9cm, 重达 308.8g, 其每一面全部封闭, 为了能直接从外部了解其内部的材料分布和结构组成, 利用中子断层摄影技术对该青铜雕像进行无损检测。

实验利用 Paul Scherrer 研究院的瑞士国家中子源。为了得到中子图像, 使用两套独立设备: NEUTRA, 可提供准直和平平均的热中子束; ICON, 可形成冷中子图像。另外, 在 NEUTRA 上装备一个 320kV 的 X 射线管。中子图像探测系统由冷却的、高灵敏度的电感耦合装置和中子敏感闪光屏构成。此外, 还有垂直对齐于检测轴的旋转台, 用以将物件绕轴旋转。

许多青铜制品都含有较高含量的 Sn 或 Pb, 使用 X 射线方法分析时, X 射线在产生极大的衰减; 而热中子对于 Sn、Pb、Cu 等重质量数元素拥有很好的穿透能力。尤其对于像 Mars 这种尺寸大、厚度厚的物件。实验发现, 150keV 的 X 射线无法穿透样品。而使用中子辐射摄影, 虽然能清晰看到该雕像的内部分布, 但是沿着传输方向的所有层面会出现叠加和混合的现象, 所以无法进行一些定量分析。

中子断层摄影分析技术则没有上述限制, 其样品每一步骤都能沿着垂直或者平行轴旋转至少 180 度, 经过数学方法可得到各体积元的衰减系数的三维分布 ($\Sigma(x, y, z)$) 信息, 重构算法的应用, 让这些投影可提供整个体积的完整信息。

实验图像显示, 该青铜雕像结构包含三种材料: 头像外面部分、底座和头像内部填充物, 其中前两者有相近的衰减行为, 即两者拥有相近的灰度, 而填充物材料则全然不同, 其材料衰减较小。另外, 填充物没有完全填满内部区域, 而留有一些空白区域, 液滴分散于整个区域。内部填充物的外表面呈多孔、似泡沫状, 而外部青铜材料的内表面则相对平滑, 可推断其制造过程为先制作外部结构再进行填充。此外, 还可观察到外部上用来进行填充的区域。通过观察、分析, 能进一步推测该雕像制作流程、装配工艺、作用等其他相关信息。

理想状态下, 重构的体积由各体积元的衰减系数 $\Sigma(x, y, z)$ 构成, 在材料混合的情况下, 其总的 Σ 数值为以下迭加:

$$\Sigma_{\text{tot}} = \sum_i \sigma_i N_i = \sum_i \sigma_i \frac{\rho_i L}{M_i}$$

从断层摄影所得数据的直方图上发现有两个明显的峰分别对应于 Cu 和 Pb。推断“Mars”其外部材料为青铜, 内部为铅, 所推导出的衰减系数可以与理论数据相比较, 发现青铜部分包含 Cu 和 Sn, 而对于 Σ 值 Sn 的存在可以忽略不计; 另外, 实验所得的数值相对于已实际确定的衰减系数而言偏小, 故今后需要对于中子断层摄影定量分析的精确性进一步改善, 如使用分散矫正函数等。此外, 根据直方图的极限值, 在一个确定的 Σ 范围内, 还可以使用可视化软件的分块工具计算体积元的数量, 体积元数乘以体积元体积就能得到分块部分的体积。

实验表明, 对于一些金属文物, 特别对于含有 Pb、Sn、Cu 等重元素且拥有较大尺寸和厚度的物件来说, 中子断层摄影技术是很好的无损检测方法。不仅可以准确分析其内部结构, 还可以根据推导所得衰减系数确认所用材料和主要成分, 而今后需要进一步提高数据精确度。

顾 雯 参考文献 Neutron Tomography as a Valuable Tool for the Non-destructive Analysis of Historical Bronze Sculptures. ARCHAEOLOGY, 52(2), 2010: 272-285.