

钢铁结构材料中磷元素晶界偏析现象的岛津电子探针表征

EPMA-086

摘要：本文聚焦钢铁结构材料中磷（P）的晶界偏析现象，使用岛津电子探针显微分析仪对此进行了表征。磷作为钢中常见杂质元素，适量时可起到固溶强化的作用，但过量或晶界偏析会严重危害钢材性能，如引发冷脆性、降低焊接与耐腐蚀性能等。文中展示采用合适的测试方法对不同含量磷的相关实验，都获得了理想的结果。结果表明，岛津电子探针在有害磷元素的含量及分布的相关工艺研究和参数制定中可以发挥重要作用。

关键词：晶界偏析 微量元素 元素磷 面分析 电子探针

技术特点：

- ❖ 岛津电子探针凭借高位 52.5° 的 X 射线检出角与兼具灵敏度和分辨率的全聚焦分光晶体，对超低含量的元素具有出色的检测能力，能精准捕捉到钢铁材料中微量磷元素的分布情况，为研究磷的晶界偏析现象提供可靠的元素分析数据；
- ❖ 岛津电子探针测试结果能够展示元素在材料中的分布特征，可为研究磷在钢铁结构材料中的分布规律提供直观的图像和数据信息，有效地支持对晶界偏析现象的深入探究。

磷是钢中常见的杂质元素之一，其含量和分布对钢材的性能有显著影响。磷在铁中的溶解度较大，能够进入铁的晶格中，起到固溶强化的作用，提高钢的强度和硬度，在某些低合金钢或工具钢中，适量的磷可以提高材料的耐磨性和抗拉强度。磷可以降低钢的塑性，增加脆性，改善钢的切削加工性能，在某些特殊的钢种如易切削钢通过适当增加磷的含量提高切削效率。

但是钢中过量的磷会对结构钢的性能产生不利的影响，其最大的危害是冷脆性，同时在热加工条件下也具有一定的热脆性，降低焊接性能，降低耐腐蚀能力，影响钢的综合机械性能。

由于磷的危害较大，现代钢铁生产中通常会严

格控制钢中的磷含量。一般来说，优质钢的磷含量应控制在 0.025% 以下，而对于一些高强度钢、低温用钢和焊接结构钢，磷含量甚至要求控制在 0.01% 以下。通过合理的冶炼工艺（如脱磷处理）和原材料选择，可以有效降低钢中的磷含量，确保钢材的性能满足使用要求。

即使是微量的磷，如果在钢中的分布不当，也有一定的危害，特别是存在沿晶偏析现象时，危害更为巨大。磷元素在晶界富集时的危害是多方面的，尤其是在低温和焊接条件下，磷的晶界偏析会降低晶界结合强度，显著影响钢材的力学性能和使用安全性。

■ 仪器

岛津 EPMA-1720 型和 EPMA-8050G 电子探针显微分析仪



EPMA-1720



EPMA-8050G

■ 试样制备

两组试样切割后，经过镶嵌、机械磨制并抛光处理。

■ 结果与讨论

根据定性分析谱图中信号强度和测试条件的关系，拟定合适的分析条件。采用不同的放大倍数，对试样 1# 表面上微区进行元素面分布表征（Mapping Analysis），使用仪器 EPMA-1720 的测试结果见图 1。结果明显显示了元素磷在晶界处存在富集现象。

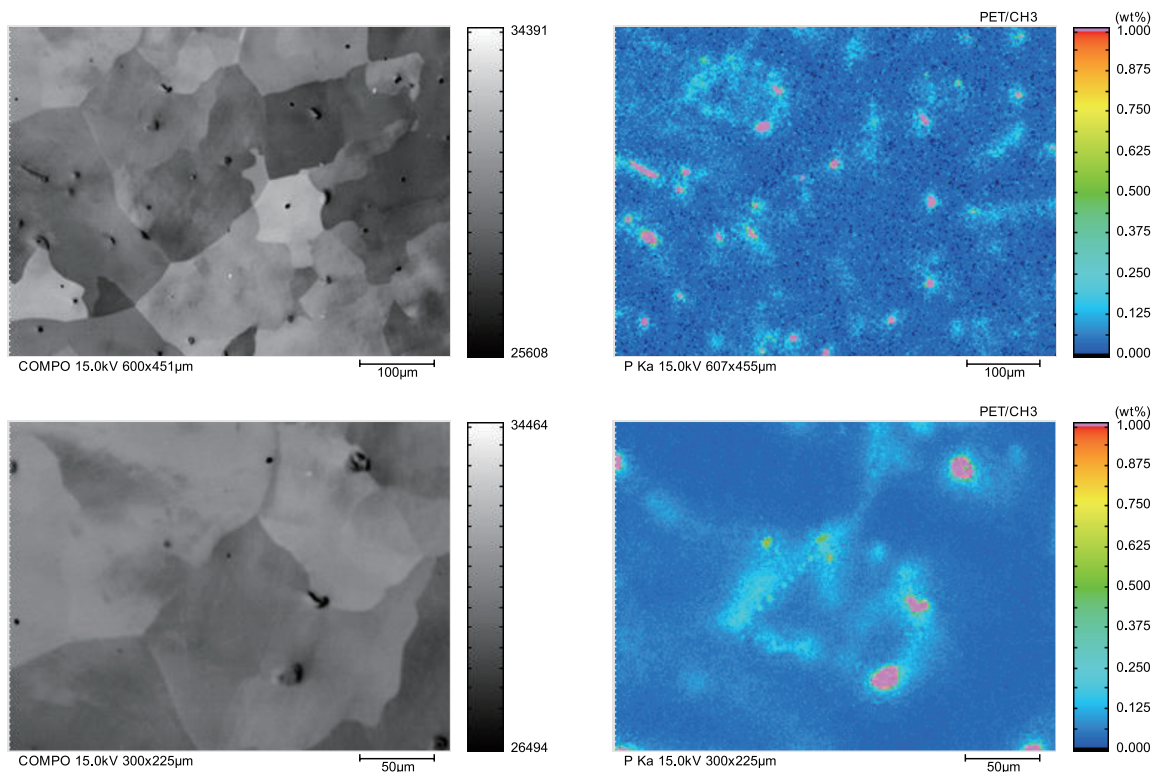


图 1 不同放大倍数下，1# 试样上背散射电子图像及其对应的元素 P 的分布特征

磷在晶界富集会影响到晶界的结合力和结合性能，带来的危害性表现在以下几个方面：

1、晶界脆化：这种现象在低温条件下尤为明显，导致材料在低温下的冲击韧性显著下降，易于裂纹的形成和传播。这种脆化现象被称为“磷致晶界脆化”，是钢材中的一个重要问题；2、焊接性降低：磷在焊接过程中可能会形成低熔点共晶相，导致热影响区更容易产生裂纹；3、耐腐蚀性能下降：虽然磷在某些情况下能形成保护性磷酸盐层，但高浓度的磷富集在晶界可能加速局部腐蚀，特别是点蚀和晶间腐蚀；4、加工性能和质量：在热加工过程中，磷富集会导导致晶界的脆性增加，影响材料的成型性能和产品质量的均匀性；5、疲劳性能：磷在晶界的富集也会降低钢材的疲劳寿命，晶界脆化会促进疲劳裂纹的起始和扩展；6、晶粒的粗化：尤其是在热处理过程中，磷的存在会抑制晶粒细化的效果，导致晶粒尺寸增大。粗大的晶粒会降低钢的强度和韧性，影响其综合力学性能。

为了减少这些危害，现代钢铁生产中通常会通过脱磷工艺严格控制钢中的磷含量，尤其是在低温用钢、焊接结构钢和高强度钢等对性能要求较高的钢材中，磷含量必须控制在较低的水平状态。

试样 2# 在冶炼中大幅度地控制了有害杂质元素的含量。使用一般的测试条件不能获得磷元素的有效分布数据，其结果见图 2，证实了其磷元素的含量极低。不过，根据力学综合性能评价，技术人员也怀疑此试样存在晶界的偏析情况。

岛津电子探针通过配置高位 52.5° 的 X 射线检出角以及全聚焦分光晶体，对超低含量的元素测试具有高灵敏度的特点，表现出更好的检出限。通过使用不同的测试方法，并调整测试参数进行元素磷在晶界处和晶内的峰形信号特征测试对比，使用仪器 EPMA-8050G 的测试结果见图 3，与技术人员的预期结果一致。

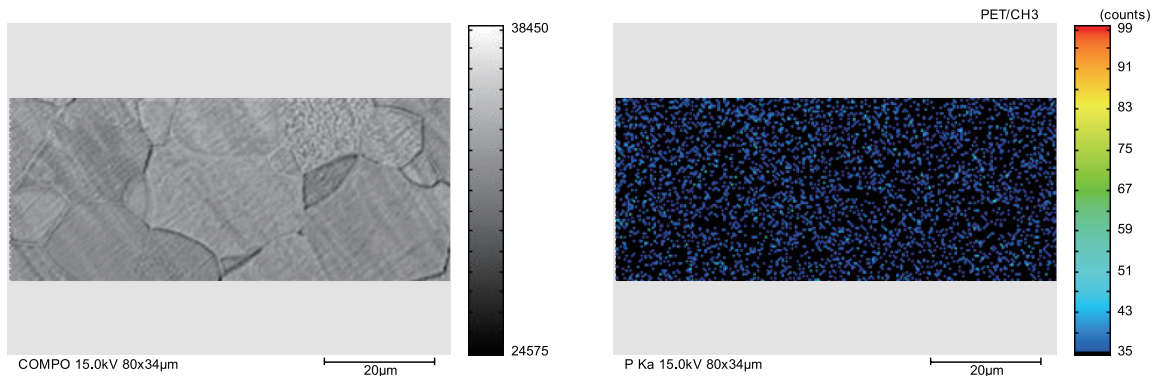


图 2 试样 2# 背散射电子图像及其对应的元素 P 的分布特征

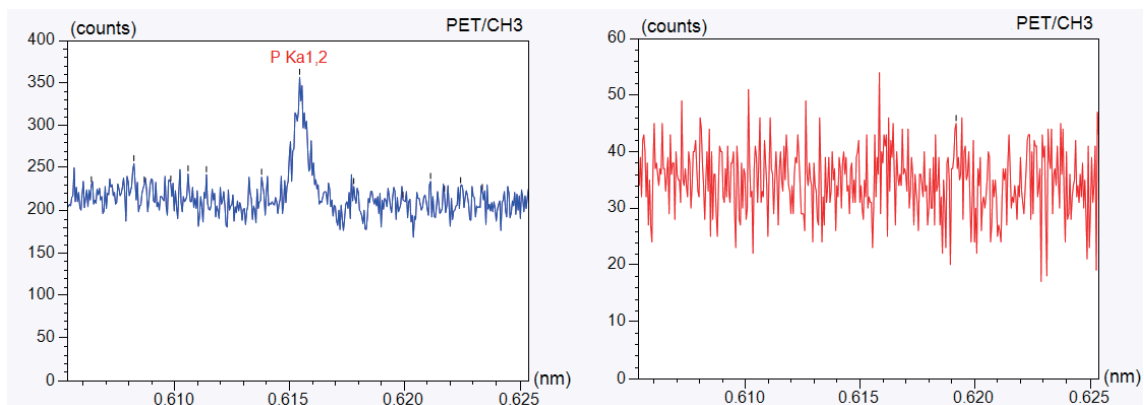


图 3 试样 2# 上晶界处和晶内对应的 P 元素信号峰的不同特征

结果表明，晶界处的磷元素含量有明显的信号，而晶内的磷元素特征峰不太明显则显示了其含量在此方法检出限左右，证明了磷在晶界富集的存在现象。因此，材料中磷元素含量是控制的一个方面，而不合理的热处理参数或焊接工艺也可能会将低含量的磷富集于晶界处，影响了结构钢材的使用安全性和可靠性。

■ 结论

磷在晶界富集会对钢铁材料的机械性能、加工性能和耐久性产生负面影响。为了减少这些危害，现代钢铁生产中通常会通过脱磷工艺严格控制钢中的磷含量。合理的热处理工艺和焊接工艺也可以有效减轻磷的负面影响，以确保钢材的使用安全性和可靠性。

岛津电子探针通过配置高位 52.5° 的 X 射线检出角以及兼具灵敏度和分辨率的全聚焦分光晶体，即使对超低含量的元素测试也具有很高的检测能力，可以精准捕捉到钢铁材料中微量磷元素的分布情况，为研究磷的晶界偏析现象提供可靠的元素分析数据。

岛津应用云

