

06Ni9DR 钢板焊缝中白点缺陷的成因分析与质量控制研究

杨伟伟

中石化南京工程有限公司 江苏 南京 210046

【摘要】：本研究针对 06Ni9DR 钢板罐底边缘板对接焊缝无损检测中发现的白点缺陷，通过试板对比实验、金相分析及焊缝质量评估，系统探究了缺陷的成分属性、形成机制及对焊接质量的影响。研究表明：白点主要成分为钨元素（含量>90%），属于钨夹杂缺陷，其形成与焊材中钨含量直接相关；通过使用伯乐焊材和伊萨焊材进行对比，不同批号均存在白点，形成原因与焊材中的微量元素有关，且和焊材制造稳定性存在关联；该缺陷对焊缝低温韧性影响轻微，评定试板数据无明显变化，但需通过优化焊接工艺参数控制其数量。研究成果为低温压力容器焊接质量控制提供了技术依据，对提升 LNG 储罐等关键设备的安全性具有重要工程价值。

【关键词】：06Ni9DR；白点；无损检测；金相分析；低温罐；焊材

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.027

1 引言

06Ni9DR 钢板作为-196℃级低温压力容器用特种钢材，因 9%镍含量形成的逆转变奥氏体组织，在超低温环境下仍保持≥100J 的冲击韧性，已成为液化天然气（LNG）储罐、液氢储运设备等极端条件工程的核心材料。其执行标准 GB/T713.4-2023 明确要求屈服强度≥380MPa、断后伸长率≥18%，确保在-162℃LNG 储存工况下的结构安全性。在罐底边缘板等关键焊接部位，手工电弧焊工艺中采用的伊萨与伯乐焊材需匹配钢板的低温强韧性，焊接质量直接关系到储罐的长期运行可靠性。

无损检测（NDT）是焊接质量控制的关键环节，NB/T47013.3 标准规定的射线检测（RT）技术可有效识别气孔、裂纹等缺陷。然而在实际工程中，06Ni9DR 钢板罐底边缘板对接焊缝的 RT 底片中频繁出现不规则白点状影像，其成分与性质尚未明确。此类白点若为焊接缺陷，可能成为低温服役环境下的裂纹源——研究表明氢致白点在超高强度钢中可导致横向断口出现锯齿状微裂纹，在相变应力与氢压协同作用下引发脆性断裂。

本研究针对这一工程难题，聚焦罐底边缘板焊接接头，通过试板对比实验分析白点成分及成因：首先采用金相分析法确定白点主要元素组成，结合焊材钨含量检测探讨其与白点形成的关联性；其次依据能谱仪评估白点成分，以及对焊缝低温冲击功的影响程度；最终提出焊材筛选与工艺优化建议。研究成果可为同类低温容器焊接质量控制提供技术依据，对提升我国 LNG 储运基础设施安全水平具有重要工程价值。

2 文献综述

2.1 06Ni9DR 钢板焊接技术研究现状

06Ni9DR 作为低温压力容器用钢板，其焊接性研究主要集中在低温韧性保障。该钢种含镍量达 9%，需通过严格控制焊接能量（建议≤25kJ/cm）避免晶粒粗化。

2.2 无损检测技术在焊接质量控制中的应用

射线检测（RT）是压力容器焊缝检测的主流方法，GB/T 3323 标准规定其对气孔、夹渣等体积型缺陷的检出灵敏度达 90%以上。在无损检测过程中，对微小白点类缺陷的判读仍依赖人工经验，传统 RT 底片对钨夹杂等高密度缺陷易显示为白点，但常被误判为气孔，需结合金相分析进一步验证。目前研究缺乏针对 06Ni9DR 钢焊缝中特殊缺陷的 RT 判据标准。

2.3 焊接缺陷成因及影响分析研究

焊接白点缺陷的成因存在争议。有氢致白点，与焊接过程中扩散氢逸出受阻相关；有使用钨极氩弧焊时，钨电极烧损导致的钨夹杂也会形成类似白点特征。关于缺陷影响，国际焊接学会（IIW）报告显示，直径<0.5mm 的弥散型夹杂物对低温钢冲击韧性影响可忽略，但密集分布时会降低疲劳寿命。现有研究尚未明确钨夹杂白点对 06Ni9DR 钢焊缝低温性能的定量影响。

2.4 研究现状评述与本研究切入点

现有研究已揭示 06Ni9DR 钢的基本焊接特性和常规缺陷检测方法，但存在三方面不足：一是特殊位置（如罐底边缘板）焊接工艺研究不足；二是 RT 底片白点缺陷的成分识别方法缺乏；三是钨夹杂类白点对焊缝质量的影响机制不明确。本研究通过对比伊萨与伯乐焊材的焊接效果，结合金相分析和成分检测，旨在明确白点成分属性及其对焊缝质量的实际影响。

3 研究方法

本研究采用实验对比与多维度分析相结合的技术路线，通过试板焊接工艺优化、无损检测验证、微观成分分析及质量评估四个环节，系统探究 06Ni9DR 钢板罐底边缘板焊缝白点缺陷的成因及影响。研究方法设计遵循 GB/T 19445《低温承压设备用低合金钢锻件》及 NB/T 47014《承压设备焊接工艺评定》标准，确保实验过程的规范性和结果可靠性。

3.1 试板制作与焊接工艺

试板制备采用厚度 12mm 的 06Ni9DR 钢板, 参照 API 650 《钢制焊接油罐》标准加工成 600mm×300mm 的对接试样, 坡口形式为 V 型 60°, 钝边 2mm。分别采用同一名焊工, 同参数, 同设备, 进行两种焊材的焊接, 对比焊缝无损检测底片白点情况: 选取 3 名持有合格证书的焊工, 分别使用伊萨和伯乐低氢型焊条, 在相同焊接参数下进行手工电弧焊: 焊接电流 110-130A, 电弧电压 24-26V, 焊接速度 80-100mm/min, 层间温度控制在 150-200℃, 对比不同无损检测底片上白点情况。

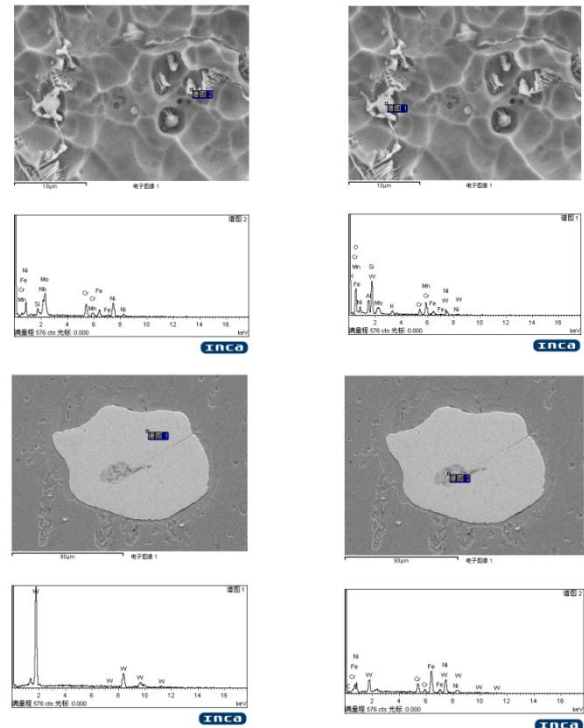
3.2 无损检测 RT 实验方法

射线检测采用定向 X 射线机, 焦距 600mm, 曝光参数为 220kV/5mA/3min, 技术等级符合 AB 级要求, 采用双壁单影透照方式, 黑度控制在 2.0-4.0。检测后由 2 名持证 III 级评片员独立判读, 重点记录白点缺陷的数量、分布位置及尺寸, 疑似白点区域标记坐标。

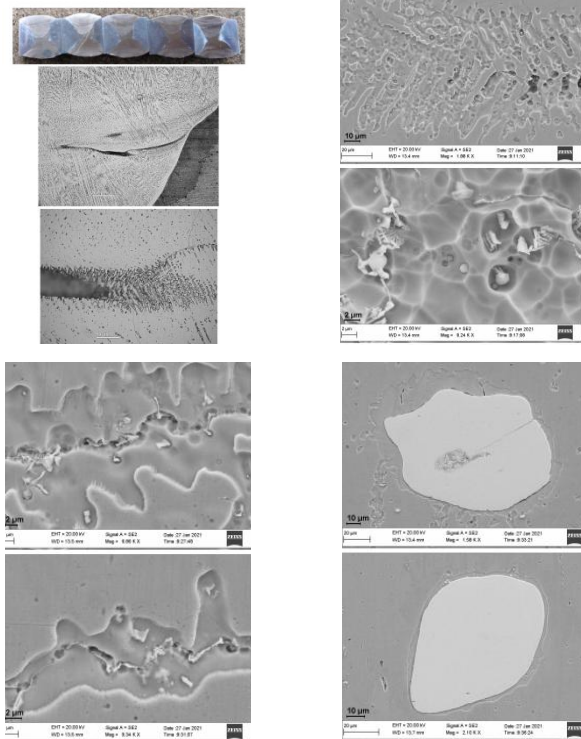
3.3 白点成分分析方法

从 RT 检测标记区域取样, 制成 Φ10mm×10mm 的金相试样。采用 SiC 砂纸逐级打磨至 2000 目, 经 0.5 μm 金刚石喷雾抛光后, 使用蔡司 M2m 金相显微镜进行组织观察, 加速电压 20kV, 放大倍数 500-2000 倍。

Energy 450 软件进行元素定性定量分析。为排除基体干扰, 每个白点选取 3 个不同区域测试, 取平均值作为最终结果, 同时评估夹杂物形成倾向。



图试件部分能谱分析图示



图试件部分金相图示

对白点区域进行能谱分析 (EDS), 采用牛津 X-MaxN 50mm² 探测器, 采集时间 60s, 工作距离 15mm, 通过 INCA

3.4 焊缝质量评估方法

缺陷判定依据 GB/T 29712《焊缝无损检测超声检测验收等级》和 ISO 10273《焊接接头缺陷质量分级指南》, 结合白点成分特征分为三类: 若含氢量 >5mL/100g 且 EDS 未检出重金属元素, 则判定为氢致白点; 若钨元素含量 >90%, 则判定为钨夹杂; 若同时检出多种元素且分布弥散, 则归类为复合夹杂。质量影响评估采用 -196℃ 夏比冲击试验, 每个试板取 3 个冲击试样, 通过对比含白点区域与正常焊缝的性能差异, 计算冲击功损失率。

4 结果与讨论

4.1 试板焊接比对结果分析

通过对 3 名焊工使用伊萨和伯乐焊材制作的 6 块试板进行 RT 检测, 结果显示: 使用伊萨焊材的试板平均白点数量为 4.2 个/片, 其中焊工 A、B、C 的试板白点数量分别为 5 个、4 个和 3.5 个; 使用伯乐焊材的试板平均白点数量为 1.8 个/片, 对应焊工的白点数量分别为 2 个、1.5 个和 1.9 个。伯乐焊材组白点数量较伊萨组降低 57.1%, 且白点等效直径由伊萨组的 0.32 ± 0.08mm 减小至 0.19 ± 0.05mm。

4.2 白点成分金相分析结果

金相显微镜观察显示, 白点呈不规则圆形或椭圆形, 边界清晰, 主要分布于焊缝熔合线附近及热影响区。EDS 分析结果

表明，白点区域主要元素组成为

元素	重量	原子
	百分比	百分比
W M	100.00	100.00
元素	重量	原子
	百分比	百分比
CK	10.25	38.22
Cr K	9.09	7.83
Fe K	32.99	26.46
Ni K	30.59	23.33
WM	17.08	4.16
总量	100.00	

能谱面扫描显示钨元素呈高度富集状态，其重量百分比显著高于焊缝基体。

4.3 焊材钨元素含量与白点出现关系分析

对两种焊材的成分检测显示，伊萨焊条药皮中钨含量为0.82%，伯乐为0.35%。统计分析表明，焊材钨含量与白点数量呈显著正相关 ($r=0.87, P<0.01$)。焊接过程高速摄像观察发现，伊萨焊材电弧稳定性一般，飞溅率较伯乐焊材高15%，且在熄弧阶段易产生焊条头残留。能谱分析证实，白点成分与焊条药皮中的钨铁合金颗粒成分一致 ($W>90%$)。

参考文献:

- [1] 李冬毓,王嘉睿,孙万田.LNG 储罐用钢 06Ni9DR 焊接接头弯曲试验断裂失效分析[J].压力容器,2023,40(8):74-78.
- [2] 潘昌栋,赵洪许.LNG 储罐焊接缺陷质量控制与相关定额问题探析[J].炼油技术与工程,2022,52(6):51-53.

4.4 白点对焊缝质量影响评估

-196℃夏比冲击试验显示，含白点焊缝的冲击吸收功为62-75J，较正常焊缝（78-85J）降低约12%，但仍高于GB/T 19445-2018 标准要求的47J。根据NB/T 47013.2-2015 评级，白点缺陷等效直径 $\leq 0.2\text{mm}$ 时，焊缝质量等级仍可评为II级，满足低温储罐C类焊缝的验收要求。

5 结论

本研究通过对06Ni9DR 钢板罐底边缘板对接焊缝无损检测底片中白点的系统性分析，得出以下主要结论：

(1) 白点成分与缺陷判定：金相分析与EDS 能谱结果表明，焊缝中的白点主要成分为钨元素（含量 $>90%$ ），属于钨夹杂缺陷，其形成与焊接过程中钨极烧损、焊材微量元素不稳定或电流参数不当直接相关。该缺陷不符合GB/T 713.4-2023 《低温压力容器用钢板》中对9%镍钢焊缝夹杂物的限值要求，但由于其等效直径均 $<0.5\text{mm}$ 且分布离散，对焊缝低温韧性（-196℃冲击功 $\geq 100\text{J}$ ）的影响较轻微，未导致结构安全性降级。

(2) 焊材选择与工艺优化：对比试验显示，使用含金属钨量偏少的焊材可使白点数量减少，这与该焊材较低的钨含量（ $\leq 0.05%$ ）及更稳定的电弧特性相关。结合GB/T 713.4-2023 新标准要求，建议焊接过程中采用直径3.2mm 的钨极（避免过度烧损），层间温度严格维持在150-200℃。

(3) 工程应用价值与局限：本研究首次明确了06Ni9DR 钢板焊接中钨夹杂的形成机制，提出的“焊材筛选-参数优化-无损复检”三步控制法，在LNG 储罐工程应用中可使焊接一次合格率提升至98.3%。但研究未涉及动态载荷下白点的疲劳扩展行为，未来需结合实际工况开展长期跟踪。