

引用格式:丁怀博,陈兵兵,李思功,等. Cr 涂层对锆合金包壳管脉冲 TIG 焊接工艺的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 52(23): 55-57.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20210892
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

Cr 涂层对锆合金包壳管脉冲 TIG 焊接工艺的影响

丁怀博¹, 陈兵兵¹, 李思功², 姚俊¹

(1. 中广核铀业发展有限公司, 广东 阳江 529500; 2. 中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要:对 Cr 涂层锆合金包壳管进行了脉冲 TIG 焊接, 并对 Cr 涂层包壳管的焊缝成型及组织进行了分析。结果表明, Cr 涂层包壳管的焊缝成型较好, 但 Cr 蒸汽在钨极表面附着, 且易与钨极中的 W 发生匀晶反应, 加速了钨极烧损。Cr 涂层引起接头表面的氧化色加重, 在焊缝的涂层侧形成蓬松层, 高温水腐蚀后蓬松层出现脱落。涂层 Cr 元素熔入焊缝后促进晶粒细化, 也造成一定的焊缝夹杂。

关键词: Cr 涂层; 锆合金; 包壳管; TIG 焊接

中图分类号: TG444+.74; TG457.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2023)23-0055-03

Influence of Cr Coating on Pulsed TIG Welding Process of Zircaloy Cladding Tube

DING Huaibo¹, CHEN Bingbing¹, LI Sigong², YAO Jun¹

(1. CGNPC Uranium Resources Co., Ltd., Yangjiang 529500, China; 2. CNPRI Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Cr coated zircaloy cladding tube was welded by pulsed TIG welding, the weld forming and the microstructure were studied. The results indicate that the weld forming of Cr coated cladding tube is good, but Cr vapor attaches to the tungsten electrode, and reacts with W, which speeds up the electrode erosion. Cr coating leads to serious oxidation in the joint, and a fluffy layer is formed at the coating side of the weld. After water corrosion test, obvious peeling occurs in the fluffy layer. Cr element in the coating fuses into the weld and promotes grain refinement, but also results in inclusions in the weld.

Key words: Cr coating; zircaloy; cladding tube; TIG welding

锆合金包壳管具有良好的耐腐蚀性、抗辐照生长以及高温力学性能^[1], 被广泛应用于核燃料的制造。在福岛核事故后, 随着核电工业的不断发展, 各国对高能耗、高可靠性燃料的需求不断提高。锆合金材料的性能改进研究日益引起关注, 并在锆合金表面处理改性方面取得了较多成果^[2-5]。

通过在锆合金管材表面涂覆一定厚度的 Cr 保护层, 利用 Cr 耐腐蚀性高、抗氧化能力强的特点来抑制锆合金与水的接触, 可以有效降低锆水反应的发生, 从而提高反应堆事故工况的安全性。但涂覆的 Cr 涂层锆合金包壳管在熔化焊中会明显引起焊缝 Cr 含量增加, 从而对焊缝质量产生影响。本研究

采用脉冲 TIG 焊接 Cr 涂层锆合金包壳管, 通过对比无涂层和 Cr 涂层包壳管的脉冲 TIG 焊接过程及接头形态, 重点研究了 Cr 涂层锆合金包壳管脉冲 TIG 焊接成型及焊缝组织, 为 Cr 涂层锆合金包壳管的焊接工程应用提供理论基础和试验支持。

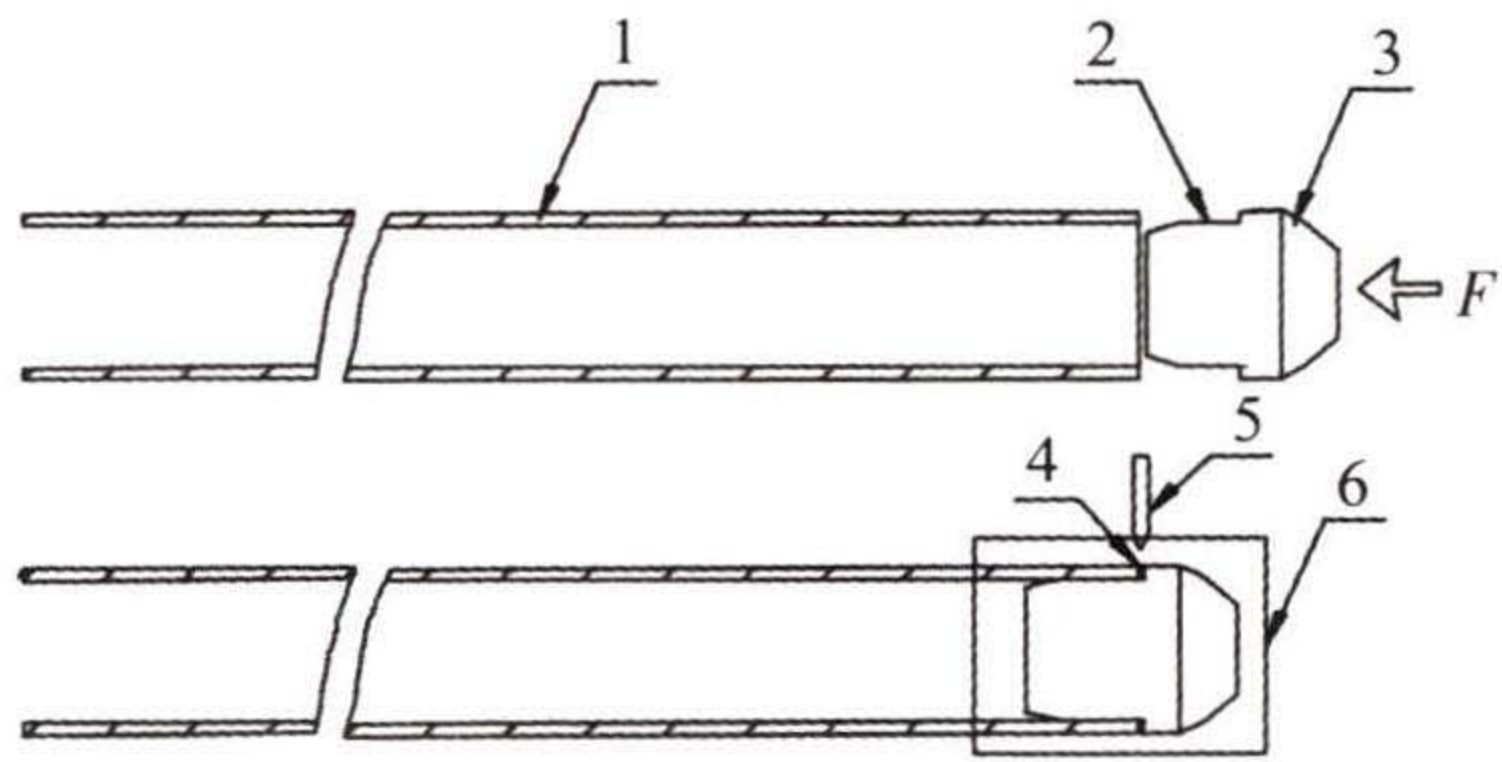
1 试验材料和方法

试验材料为国产核级锆合金管材与 Zr-4 棒材, 管材尺寸为 $\phi 9.5 \text{ mm} \times \delta 0.57 \text{ mm}$ 。涂层锆合金管表面为磁控溅射涂覆的纯 Cr 层, 厚度包括 15、20 和 25 μm 。试验前将 Zr-4 棒材加工成特定结构的端塞, 充分清洁后按照图 1 的形式顶压使得端塞肩部和管材端部贴合, 再进行焊接。由于锆合金在高温下性质活泼, 对 H、O、N 以及操作环境中的粉尘等具有较强的亲和力^[6], 因此本焊接试验在密封环境下进行, 焊室真空度 $\leq 10 \text{ Pa}$ 。采用脉冲 TIG 焊接工艺^[7-8], 钨极直径 1.6 mm, 钨极锥度 15° , 保护氦压 $\geq 0.14 \text{ MPa}$ 。焊接工艺参数见表 1。

收稿日期: 2021-04-01

作者简介: 丁怀博(1981-), 男, 河北冀州人, 工程师, 博士, 主要从事核燃料组件制造工艺研究; E-mail: dinghuaibo@cgnpc.com.cn

通讯作者: 陈兵兵(1991-), 男, 安徽阜阳人, 工程师, 硕士, 主要从事锆合金焊接工艺研究; E-mail: chenbingbingcwx@163.com



1-包壳管;2-压合面;3-端塞;4-焊缝;5-钨极;6-取样区

图1 压塞及焊接示意图

Fig.1 Schematic of end plug and welding

表1 焊接工艺参数

Tab.1 Welding process parameters

峰值电流 /A	基值电流 /A	管转速 /(r·min ⁻¹)	冷却时间 /s
29	14	11	20

2 试验结果与讨论

2.1 钨极烧蚀

对比 Cr 涂层锆合金与无涂层锆合金的焊接过程, Cr 涂层锆合金焊接时表现出严重的钨极烧损。根据观察统计, 焊接 6~8 支管材即可观察到钨极锥部出现明显的凝结物, 焊接 20 支管材时凝结物显著长大, 形成如图 2 所示的环状积瘤, 同时逐渐在积瘤的根部造成钨极的颈缩。该积瘤形态稳定性差, 在焊接过程中锥部持续形成鼓泡并破裂, 造成焊缝严重的夹钨倾向。

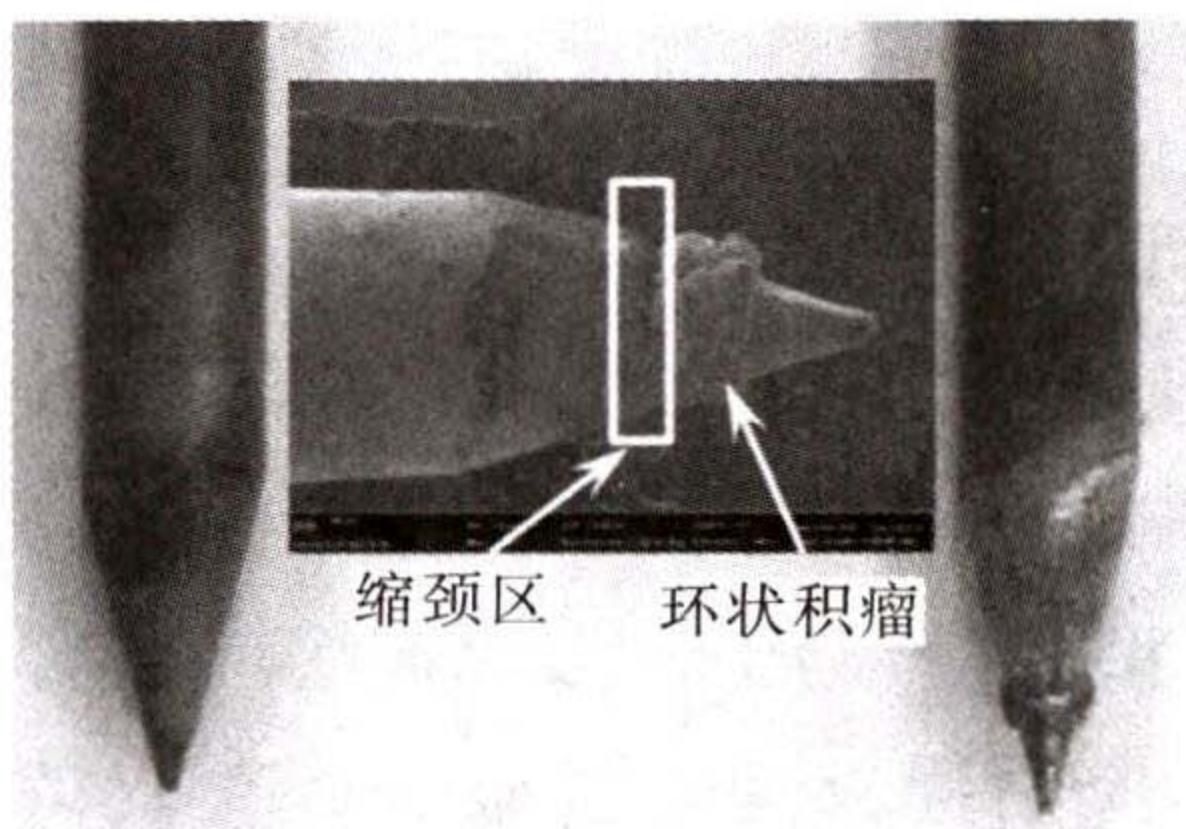


图2 焊后钨极形态

Fig.2 Morphology of tungsten electrodes after welding

利用能谱仪 (EDS) 对积瘤各区域成分进行分析, 如图 3 所示。与普通钨极锥部的成分不同, 焊接

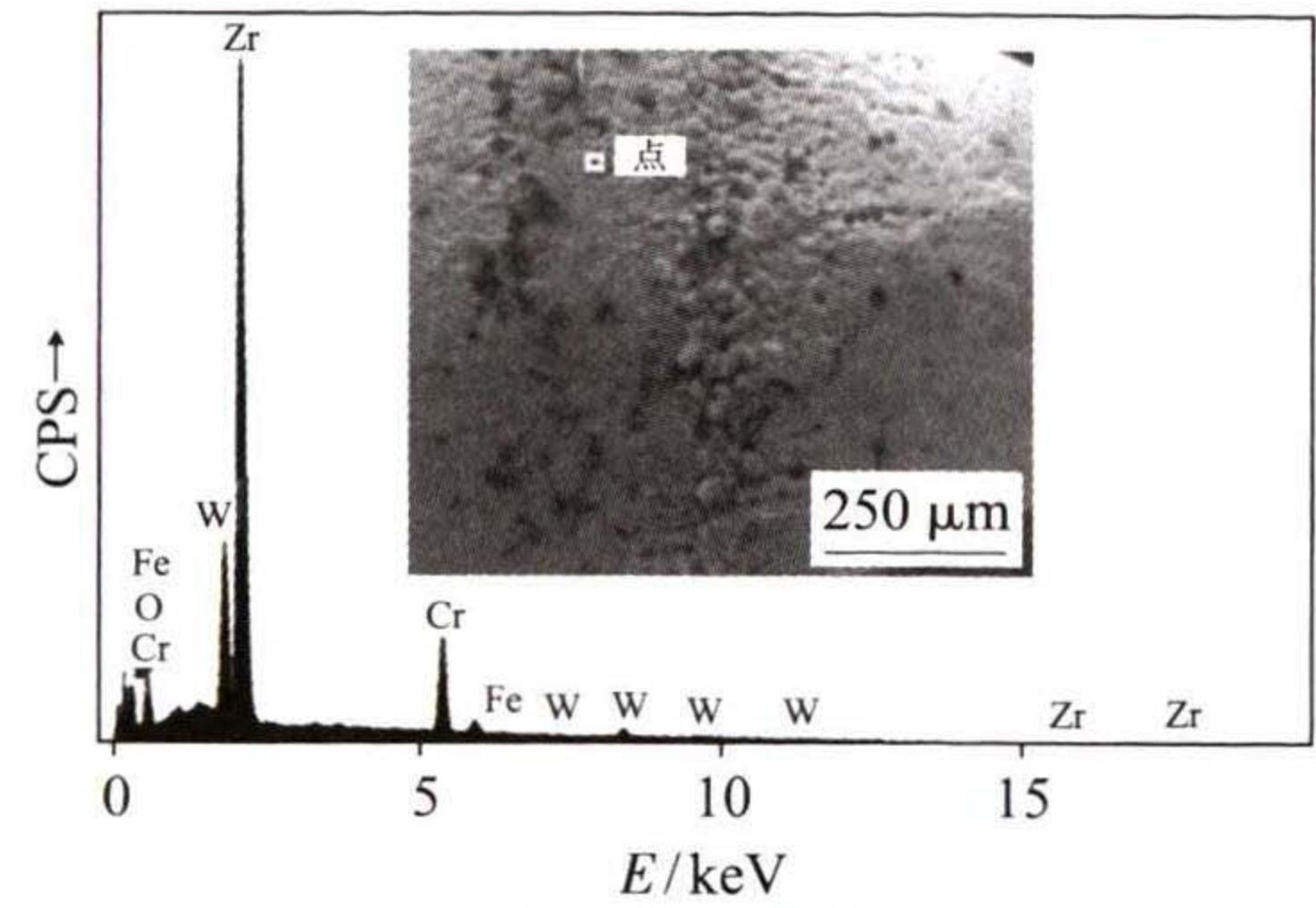


图3 焊接 Cr 涂层锆合金的钨极 EDS 能谱分析

Fig.3 EDS analysis of tungsten electrode for welding Cr coated Zircaloy

Cr 涂层锆合金包壳管的钨极表层含有较多的 Cr 成分, 尤其在积瘤后侧的颈缩区 Cr 含量异常升高, 达到 15%。Cr 和 W 具有很强的互溶性^[9], 当低沸点的 Cr 蒸汽在钨极表面低温区大量附着时, 高温下会与 W 发生匀晶反应, 成为降低钨极耐高温性能并造成钨极局部区域烧损颈缩的主要原因。

2.2 接头宏观形貌

宏观上无涂层和 Cr 涂层的两种焊缝致密完整, 可以观察到细密的鱼鳞纹, 所有焊缝均未发现明显的表面气孔、裂纹等缺陷, 但与无涂层锆合金接头相比, Cr 涂层的接头出现明显的黑色氧化层, 分布在焊缝的两侧, 见图 4。同时, Cr 涂层的接头焊缝表面光洁性变差, 在涂层侧形成明显的蓬松层。接头在 16 MPa, 360℃ 条件下进行 72 h 的水腐蚀试验, 无 Cr 涂层的锆合金表面形成致密的黑色氧化膜, Cr 涂层的表面仍保持银灰色, 热影响区无脱落产生, 但焊缝处出现明显的脱落缺口, 如图 5 所示。该脱落均出现在涂层侧, 基本确定为突起的富 Cr 蓬松层。

2.3 焊缝形态

与 Cr 涂层焊缝相比, 无涂层焊缝形成明显的粗大柱状晶, 且柱状晶的晶界几乎垂直于熔合线延伸, 见图 6(a)。Cr 涂层焊缝的晶粒多呈等轴状, 尺寸明显变小, 晶粒得到细化, 涂层厚度增加可以促进晶粒

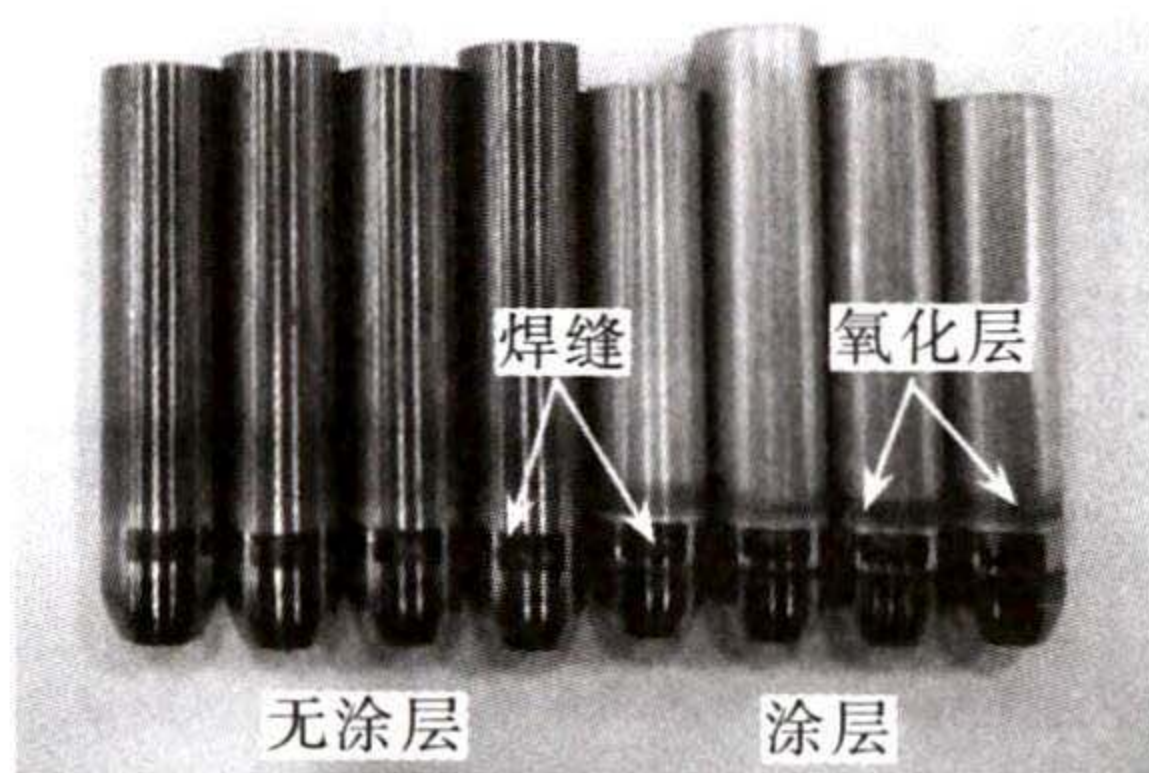


图4 接头宏观形态

Fig.4 Macroscopic appearance of joints

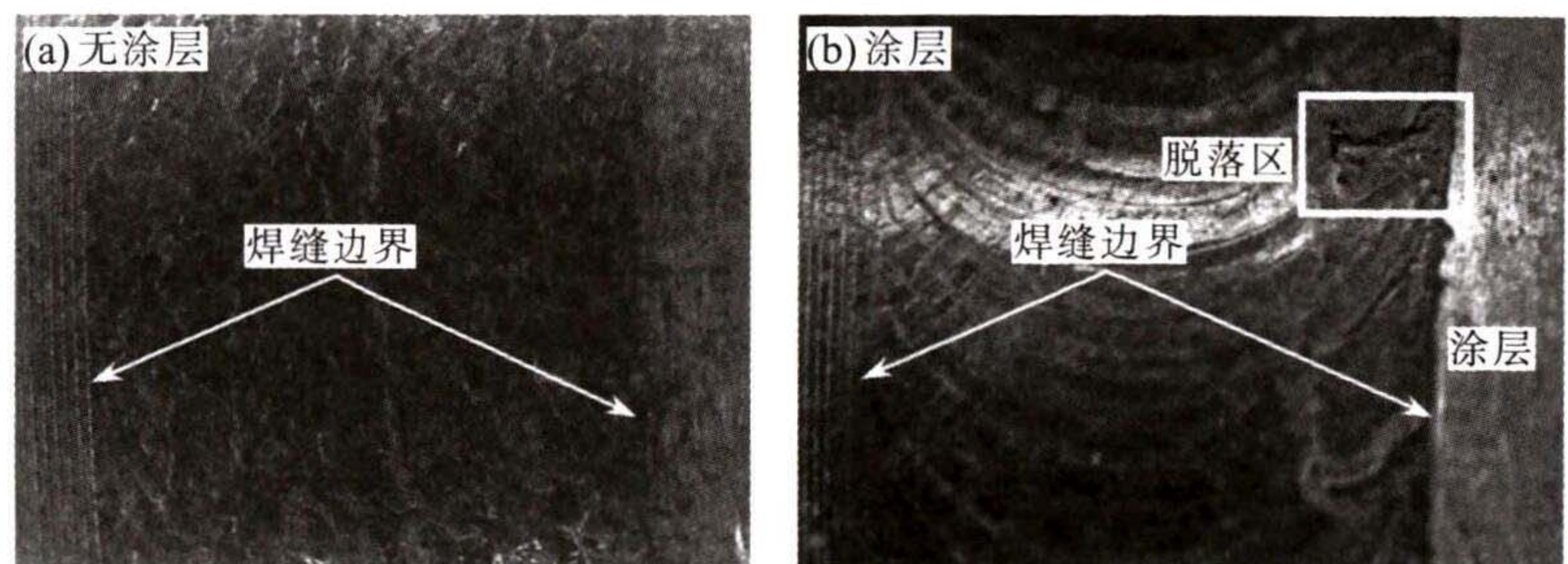


图5 水腐蚀后焊缝的形貌

Fig.5 Weld appearance after water corrosion

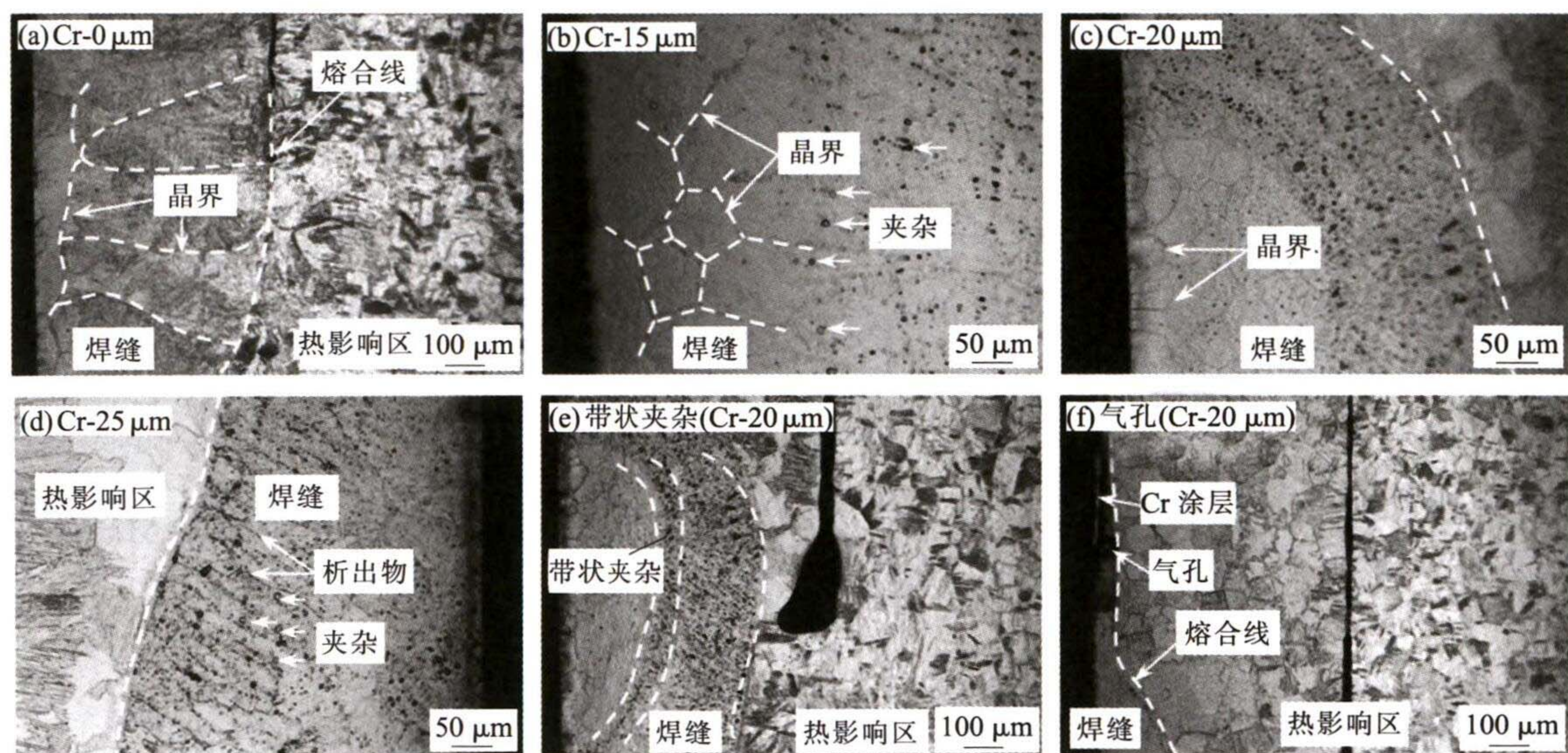


图6 不同厚度Cr涂层焊缝的显微组织

Fig.6 Microstructure of the welds with different thickness of Cr coating

的细化,但当Cr涂层厚度达到 $25\mu\text{m}$ 时在晶界处观察到析出物,见图6(b)~6(d)。在Cr涂层的影响下,焊缝形成一定的颗粒状夹杂,其边界圆滑,呈近似圆球状,这些夹杂物在整体上表现出一定的带状分布,见图6(e),且主要集中在焊缝的中、底部区域,尤其沿熔合区几乎呈连续分布。涂层厚度的增加对夹杂物的尺寸无明显影响,但显著增加夹杂数量,并致使夹杂物呈明显的放射状。针对夹杂的形成原因,分析认为主要有两点:①Cr涂层本身密度相对较大,受脉冲电弧的冲击作用自然向下沉积,形成Cr的纯金属夹杂;②沉积在熔池中底部区域的Cr与Zr合金化,形成局部的富Cr区。而夹杂物形态的分布则认为是脉冲电弧的冲击作用。

此外,受Cr涂层和母材熔点差异的影响(前者为 1907°C ,后者约 1840°C),焊缝在近表面明显向涂层侧延伸并形成楔形区,如图6(f)所示。由于在该区域内母材先于涂层熔化,Cr涂层对逸出气体形成阻挡作用,可观察到涂层内表面明显的链状气孔。

3 结论

(1) 采用脉冲TIG焊接Cr涂层包壳管,可以得到表面成型良好的焊缝,但Cr涂层显著降低钨极的耐高温性能,附着在钨极表面的Cr造成钨极颈缩并形成环状积瘤。

(2) Cr涂层明显增加接头的表面氧化倾向,并

在焊缝的涂层侧形成蓬松层,高温水腐蚀后蓬松层出现脱落。

(3) Cr涂层熔入焊缝使得焊缝晶粒得到明显的细化,同时焊缝中形成球形的夹杂。涂层厚度的增加可在一定程度上细化晶粒,但夹杂数量明显增加,且当涂层厚度为 $25\mu\text{m}$,出现明显的晶界析出物。

参考文献:

- [1] 刘鹏,杜忠泽,马林生,等.核级锆及锆合金腐蚀性能研究现状[J].热加工工艺,2011,40(22):22-24.
- [2] 张聪惠,刘大利,兰新哲,等.锆合金氧化膜对腐蚀性能影响研究现状[J].热加工工艺,2011,40(16):124-127.
- [3] 吴华,范洪远,应诗浩,等.表面处理对锆合金性能的影响[J].金属热处理,2006(1):17-19.
- [4] 胡汝骞,樊湘芳,丰振东,等.Zr4合金离子氮化和软氮化表面处理的研究[J].热加工工艺,2016,45(14):130-132.
- [5] 周军,樊湘芳,丰振东,等.Zr4合金表面多弧离子镀TiAlSiN涂层的微观形貌与性能[J].粉末冶金材料科学与工程,2017,5(22):97-102.
- [6] 胡旭坤,马安国,张兵强,等.锆及锆合金板材自动焊接技术[J].热加工工艺,2013,42(17):190-191.
- [7] 傅冀庆.AFA3G含钐燃料棒上端塞环缝TIG焊接研究[J].东方电气评论,2004(2):115-120.
- [8] 胡万伦,陈瑜.300MW核电站燃料棒脉冲钨极氩弧焊接工艺试验[J].核电工程与技术,2000,13(2):40-45.
- [9] 梁基谢夫.金属二元系相图手册[M].郭青蔚,译.北京:化学工业出版社,2009. [1]