

船舶316L不锈钢管K-TIG焊 试验及应用

刘亚伟, 黄琼, 李博文, 雷振锋, 李奇勋

广船国际有限公司 广东广州 511462

摘要: 针对高效深熔钨弧焊 (K-TIG) 在LNG双燃料船舶供给系统316L不锈钢管对接焊中的应用进行研究, 并从焊接质量、焊接效率、接头性能、材料和人工消耗等方面与传统钨极钨弧焊进行对比。结果表明: K-TIG焊接技术适用于LNG双燃料船舶供给系统316L不锈钢管在车间等固定场所内的焊接, 可大幅提高焊接效率, 减少人工和材料消耗, 同时具备在船舶行业奥氏体不锈钢管焊接中推广应用的潜力。

关键词: K-TIG; LNG; 316L不锈钢管

The K-TIG welding test and application of 316L stainless steel pipe in ship

LIU Yawei, HUANG Qiong, LI Bowen, LEI Zhenfeng, LI Qixun

Guangzhou Shipyard International Co., Ltd., Guangzhou 511462, Guangdong, China

Abstract: This research focuses on the application of high-efficiency keyhole tungsten-inert gas (K-TIG) welding in butt welding of 316L stainless steel pipes in the LNG dual-fuel ship supply system. It compares K-TIG welding with traditional tungsten-inert gas welding in terms of welding quality, welding efficiency, joint performance, material consumption, and labor costs. The results show that K-TIG welding technology is suitable for the welding of 316L stainless steel pipes in fixed locations such as workshops in the LNG dual-fuel ship supply system. It can significantly improve welding efficiency, reduce labor and material consumption, and has the potential to be widely used in the welding of austenitic stainless steel pipes in the shipping industry.

Keywords: K-TIG; LNG; 316L stainless steel pipe

1 序言

随着全球温室效应的加剧, 绿色航运受到业界的普遍关注, 为此国际海事组织 (IMO) 和海上环境保护委员会 (MEPC) 制定了越来越严格的船舶能效指数 (EEDI) 要求^[1]。相对于采用燃油的船舶, 采用天然气为燃料的船舶在减少碳排放和氮氧

化物污染方面优势突出, 并可有效降低船舶能效指数 (EEDI), 使得采用LNG+燃油的双燃料发动机技术的船舶越来越受关注^[1, 2]。据克拉克森发布的数据显示, 在2021年全球新船订单中近30%的船舶使用液化天然气 (LNG) 作为燃料, 且到2022年底, 全球有170个港口可为船舶提供LNG加注服务^[3], 进一

基金项目: 广东省海洋经济发展专项GDNRC[2024]20。

第一作者: 刘亚伟, 工程师, 主要从事船舶制造工艺研究, E-mail: 18318571166@163.com。

步推动了LNG双燃料船舶的建造与运营。

船舶LNG双燃料供给系统管系需要依据《使用气体或其他低闪点燃料船舶国际安全规则（IGF规则）》和相关船级社规范进行选型和设计，LNG双燃料供给系统管系通常采用奥氏体不锈钢双壁管形式来增加安全性^[4]。为保证LNG双燃料系统管系的焊接质量和焊缝性能，通常采用钨极氩弧焊进行焊接^[5]，并尽可能在车间焊接，减少现场焊接。LNG双燃料供给系统管系接头众多，采用手工钨极氩弧焊（TIG焊）整体焊接效率偏低，且焊接质量受焊工技能影响较大，因此结合高效深熔氩弧焊（K-TIG焊）特点^[6-11]，开展了LNG双燃料船舶供给系统316L不锈钢管焊接研究与应用工作。

2 试验方案

结合LNG双燃料供给系统管系中奥氏体不锈钢管的材质和尺寸，采用TIG焊和K-TIG焊分别进行规格 $\phi 168\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、 $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 的316L不锈钢管对接焊试验，从坡口加工、装配要求、焊接参数、焊缝成形、焊缝颜色、焊接效率和接头理化性能等方面进行对比，并验证K-TIG焊在LNG双燃料供给系统奥氏体不锈钢管对接中的适用性。

试验用316L不锈钢管化学成分和主要性能见表1，坡口形式和装配要求如图1所示。试验用焊丝化学成分及性能见表2，焊接参数见表3，焊道布置如图2所示。由图2可知，同规格316L不锈钢管对接采用K-TIG焊比TIG焊有更少的焊道数。

表1 316L不锈钢管化学成分和性能

规格/mm	化学成分（质量分数，%）								性能		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	抗拉强度 /MPa	伸长率（%）	晶间腐蚀
$\phi 168 \times 5$	0.008	0.322	1.12	0.032	0.003	17.11	10.36	2.05	590	57	合格
$\phi 168 \times 9$	0.009	0.324	1.15	0.032	0.003	17.13	10.53	2.08	580	58	合格

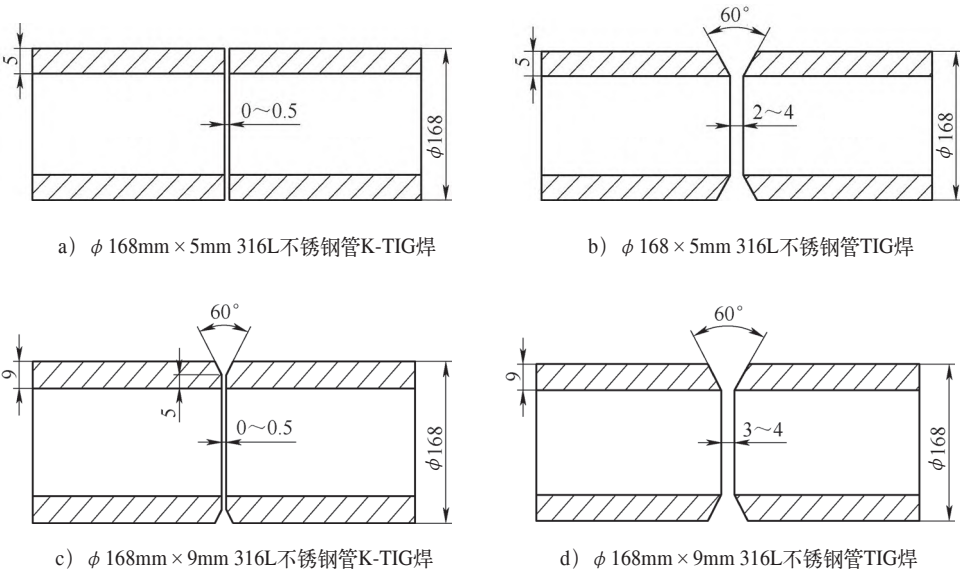


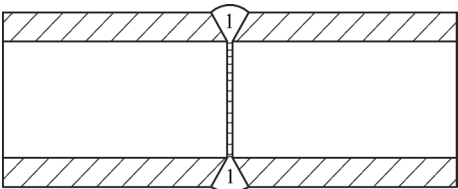
图1 坡口和装配示意

表2 焊丝化学成分及性能

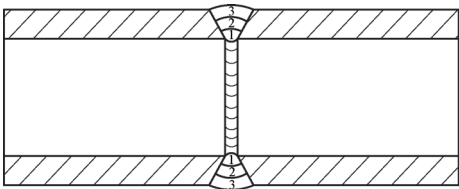
牌号	AWS 型号	规格 /mm	化学成分（质量分数，%）								性能		
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	抗拉强度 /MPa	伸长率（%）	晶间腐蚀
GTS-316L	ER316L	$\phi 2.4$	0.014	0.53	1.78	0.016	0.010	18.81	11.69	2.10	577	38	合格
		$\phi 1.2$	0.014	0.51	1.89	0.014	0.010	19.00	11.90	2.07	586	38	合格

表3 316L不锈钢管对接焊接参数

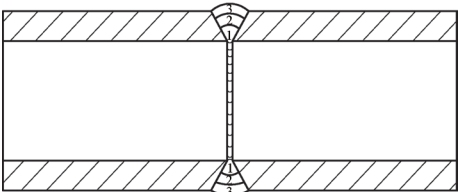
规格/mm	焊接方法	焊道	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 / (cm/min)	送丝速度 / (mm/min)	热输入 / (kJ/cm)	保护气 (Ar) 纯度 (%)	气体流量/ (L/min)		
									焊枪	保护罩	管内部
$\phi 168 \times 5$	TIG	1	92	12	2.9	—	22.8	≥ 99.999	25	—	25
		2	92	12	6.8	—	9.7		25	—	25
		3	92	12	6.5	—	10.2		25	—	25
$\phi 168 \times 5$	K-TIG	1	400	16	37.1	1750	10.4		25	25	25
$\phi 168 \times 9$	TIG	1	92	12	2.9	—	22.8	≥ 99.999	25	—	25
		2	92	12	6.5	—	10.2		25	—	25
		3	92	12	6.8	—	9.7		25	—	25
		4	92	12	6.9	—	9.6		25	—	25
		5	92	12	6.9	—	9.6		25	—	25
		6	92	12	6.8	—	9.7		25	—	25
$\phi 168 \times 9$	K-TIG	1	400	16.6	22.0	—	18.1		25	25	25
		2	200	12.8	11.2	1300	13.7		25	25	25
		3	200	12.8	13.6	1200	11.3		25	25	25



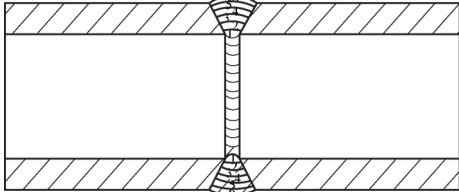
a) $\phi 168\text{mm} \times 5\text{mm}$ 316L不锈钢管K-TIG焊



b) $\phi 168\text{mm} \times 5\text{mm}$ 316L不锈钢管TIG焊



c) $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 316L不锈钢管K-TIG焊



d) $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 316L不锈钢管TIG焊

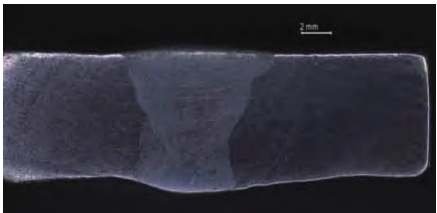
图2 焊道布置示意

3 试验结果及分析

3.1 接头金相与性能

(1) 宏观金相分析 对 $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 的 316L 不锈钢管 K-TIG 焊和 TIG 焊对接接头分别进行宏观金相试验。结果显示,焊缝与母材熔合质量良

好, TIG 焊缝横截面上下宽度相近, K-TIG 焊缝横截面上宽下窄,焊道分布更均匀,接头宏观形貌如图3 所示。



a) TIG 焊



b) K-TIG 焊

图3 $\phi 168 \times 9\text{mm}$ 316L 不锈钢管对接接头宏观形貌

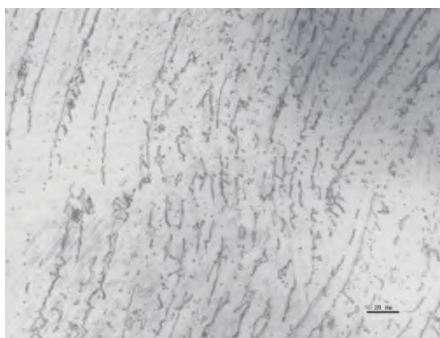
(2) 微观金相分析 $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 的316L不锈钢管对接TIG焊焊缝组织为奥氏体基体和条状 δ 铁素体,焊缝表面比根部 δ 铁素体条状更明显,数量更多,焊缝微观组织如图4所示。 $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 的316L不锈钢管对接TIG焊热影响区组织为奥氏体基体+少量条状 δ 铁素体,热影响区微观组织如图5所示。

$\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 的316L不锈钢管对接K-TIG焊焊缝组织为奥氏体+骨骼状 δ 铁素体,黑色 δ 铁素体分布在白色奥氏体晶界,形成有明显方向性的粗大柱状晶,焊缝根部的晶粒明显大于焊缝表面,焊缝微观组织如图6所示。K-TIG焊打底、填充、盖面

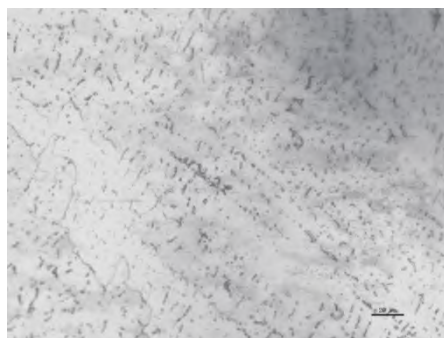
焊缝焊接热输入量依次减小,导致打底、填充、盖面焊缝金属冷却速度加快,最终形成焊缝根部与表面晶粒大小差异^[12]。 $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 的316L不锈钢管对接K-TIG焊热影响区组织由奥氏体及其分布在基体上的 δ 铁素体构成,热影响区微观组织如图7所示。由于焊接热输入量的影响,导致热影响区高温停留时间存在差异,从而导致根部热影响区晶粒大于表面热影响区^[12]。

3.2 接头性能分析

对 $\phi 136\text{mm} \times 9\text{mm}$ 的316L不锈钢管对接K-TIG焊和TIG焊接头进行拉伸、弯曲、 -196°C 冲击、晶间腐蚀和 δ 铁素体含量等试验,结果均满足船级社

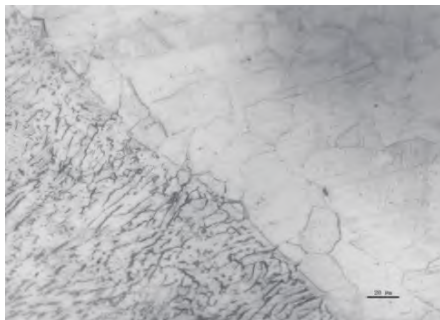


a) 表面焊缝 (500×)

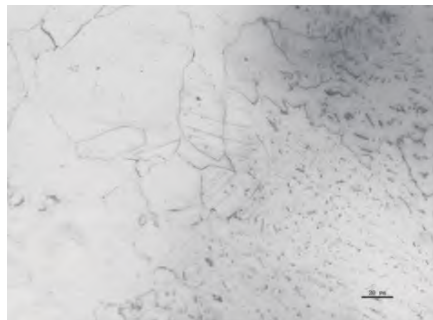


b) 根部焊缝 (500×)

图4 $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 316L不锈钢管对接TIG焊焊缝微观组织

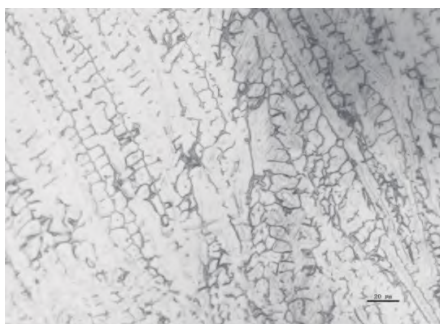


a) 表面热影响区 (500×)

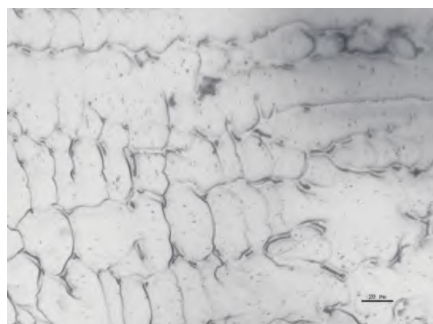


b) 根部热影响区 (500×)

图5 $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 316L不锈钢管对接TIG焊热影响区微观组织



a) 表面焊缝 (500×)



b) 根部焊缝 (500×)

图6 $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 316L不锈钢管对接K-TIG焊焊缝微观组织

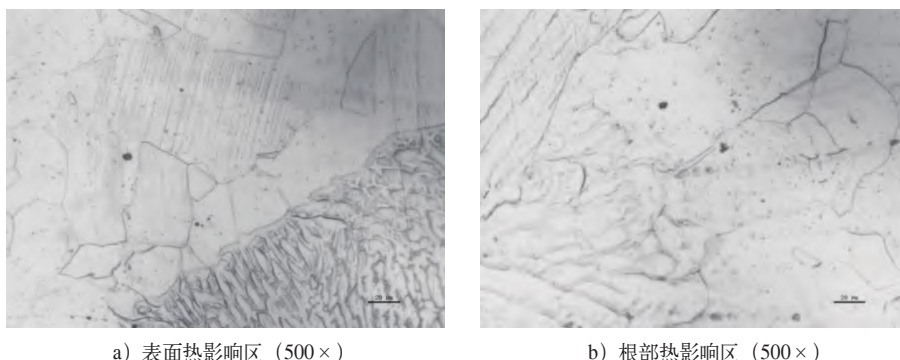


图7 $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 316L不锈钢管对接K-TIG焊热影响区微观组织

规范和相关标准要求，主要理化试验结果见表4、表5。其中，K-TIG焊和TIG焊接头拉伸、弯曲、晶间腐蚀试验结果基本相同，但在焊缝 δ 铁素体含量和接头 -196°C 低温冲击性能方面有差异。

K-TIG焊缝 δ 铁素体含量约为7.5%，TIG焊焊缝 δ 铁素体含量约为5%，且K-TIG焊接头在焊缝中

心、热影响区位置的 -196°C 低温冲击性能均高于TIG焊。结合316L不锈钢管对接接头微观组织和奥氏体不锈钢焊接理论，当焊缝中存在3%~12%的 δ 铁素体时，有利于提高焊接接头的抗热裂纹和晶间腐蚀能力，同时对接头低温冲击性能产生影响^[13-15]。

表4 $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 316L不锈钢管接头理化试验

焊接方法	规格/mm	材质	抗拉强度/MPa	断裂位置	弯曲试验	晶间腐蚀	铁素体含量(质量分数, %)
TIG	$\phi 168 \times 9$	316L	563	母材	合格, 无裂纹	合格, 无裂纹	5.0
K-TIG	$\phi 168 \times 9$	316L	561	母材	合格, 无裂纹	合格, 无裂纹	7.5

表5 $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 316L不锈钢管接头冲击性能试验

焊接方法	规格/mm	材质	冲击试样规格/mm	-196°C 夏比V型缺口冲击吸收能量/J				
				WM	FL	FL + 1	FL + 3	FL + 5
TIG	$\phi 168 \times 9$	316L	$7.5 \times 10 \times 55$	60.0	64.0	80.0	140.0	158.0
K-TIG	$\phi 168 \times 9$	316L	$7.5 \times 10 \times 55$	90.0	96.0	140.0	142.5	160.0

4 工艺应用

4.1 焊缝成形与质量

316L不锈钢管对接K-TIG焊工艺评定得到DNV和CCS船级社认证，并在LNG双燃料供给系统不锈钢管对接中实现应用，现场应用如图8所示。

316L不锈钢管对接K-TIG焊较TIG焊有着更均匀的焊缝成形，且焊缝保护更良好，焊缝表面多呈银白色或金黄色，焊缝成形和颜色对比如图9、图10所示。316L不锈钢管对接K-TIG焊每道焊缝自动连续焊接，可有效减少焊接接头，焊缝射线检测合格率达到99%，焊缝射线检测合格率高于TIG焊。



图8 316L不锈钢管对接K-TIG焊现场应用

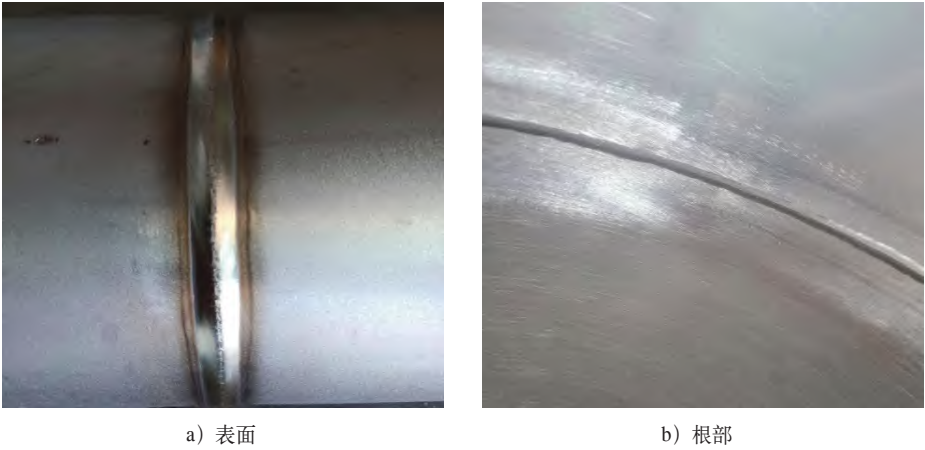


图9 316L不锈钢管对接K-TIG焊焊缝成形与颜色

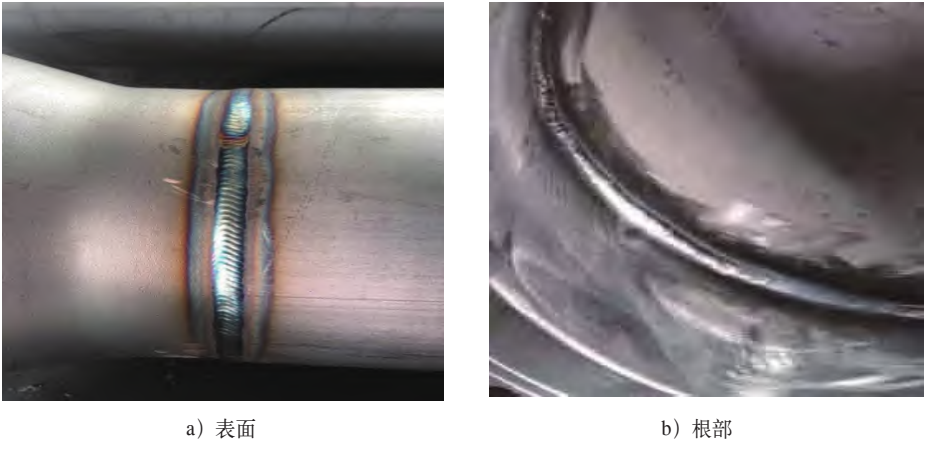


图10 316L不锈钢管对接TIG焊焊缝成形与颜色

4.2 焊接效率

K-TIG焊在焊道数、焊接时间和道间控温时间方面有明显优势，同规格316L不锈钢管对接采用K-TIG焊综合效率远高于TIG焊。对于壁厚<7mm的不锈钢管对接采用K-TIG焊可实现单面单道焊双面成形，而TIG焊则需多层多道焊接，其中 $\phi 168\text{mm} \times 5\text{mm}$ 不锈钢管对接K-TIG焊焊接效率是

TIG焊的29.9倍；对于壁厚 $\geq 7\text{mm}$ 的不锈钢管对接采用K-TIG或TIG焊均需多层多道焊接，但K-TIG焊有着更高的焊接效率，可减少焊接层道数，其中 $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 不锈钢管对接K-TIG焊焊接效率是TIG焊的5.1倍。不同规格316L不锈钢管对接分别采用K-TIG焊和TIG焊效率统计见表6。

表6 不同规格316L不锈钢管对接TIG焊和K-TIG焊效率统计

不锈钢管规格/mm	焊接方法	焊前准备时间/min	焊缝道数	道间冷却总时间/min	焊接时间/min	焊接效率/(mm/min)	综合焊接效率/(mm/min)
$\phi 168 \times 5$	TIG	10	4	20	41.9	12.6	7.3
	K-TIG	10	1	5	1.4	377.1	32.2
$\phi 168 \times 9$	TIG	10	6	45	55.7	9.5	4.8
	K-TIG	10	3	20	11	48.0	12.9

4.3 费用节省

单个 $\phi 168\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的316L不锈钢管对接接头焊接所消耗的坡口加工费、气体消耗费、焊接材料消耗费、焊接工时费等总费用对比，TIG焊是K-TIG焊的6.4倍；单个 $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 的316L不锈钢管对接接头焊接所消耗的坡口加工费、气体消耗费、焊接材料消耗费、焊接工时费等总费用对比，TIG焊是K-TIG焊的2.9倍。同规格316L不锈钢管对接TIG焊接头的焊丝、气体、焊工消耗等费用远高于K-TIG焊，不同规格316L不锈钢管对接K-TIG和TIG焊各项费用对比如图11所示。

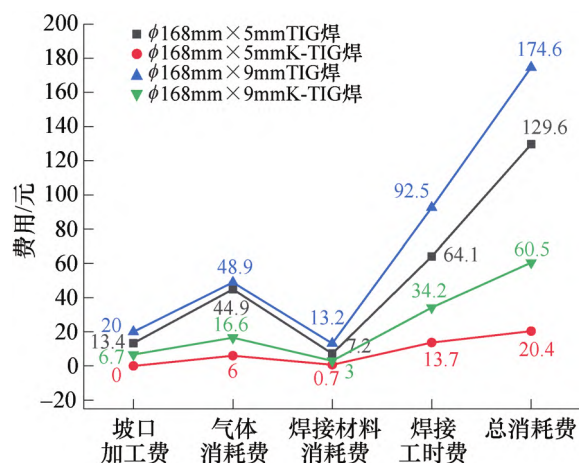


图11 不同规格316L不锈钢管对接K-TIG和TIG焊各项费用对比

5 结束语

1) 采用K-TIG焊的316L不锈钢管对接接头各项理化试验结果完全满足船级社规范和相关标准要求，且相对于TIG焊接头具有更好的 -196°C 低温冲击性能，适合在LNG双燃料供给系统中奥氏体不锈钢管对接焊中应用。

2) K-TIG焊由于具有较大熔深能力和焊接速度，相对于TIG焊， $\phi 168\text{mm} \times 5\text{mm}$ 不锈钢管对接焊接效率提升341%， $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 不锈钢管对接焊接效率提升169%。

3) K-TIG焊相较于TIG焊具有较高的焊接效率，可大幅降低坡口加工、不锈钢焊丝、保护气、焊接工时消耗等所产生的费用， $\phi 168\text{mm} \times 5\text{mm}$ 不锈钢管对接焊总消耗费用降低84.3%， $\phi 168\text{mm} \times 9\text{mm}$ 不锈钢管对接焊总费用降低65.3%。

4) 虽然K-TIG焊设备尺寸较TIG焊设备体积大，且需定置使用，暂时只适合在车间或固定场所中使用，但由于其在质量、效率、成本方面的优势，因此可在船舶奥氏体不锈钢管对接车间预制中推广应用。

参考文献：

- [1] 陈登，俞剑，付嵩嵩，等. 双燃料客滚船的能效指数分析[J]. 江苏船舶，2022，39（3）：12-14.
- [2] 马奔，曾辉，曹成立. 浅谈LNG运输船双燃料发动机燃气系统[J]. 广东造船，2022，41（3）：47-49.
- [3] 胡皓琼. LNG动力船舶订单数量大增[J]. 中国航务周刊，2022（7）：19.
- [4] 林其瀚. 双壁管在液化天然气供给系统中的应用[J]. 船舶标准化工程师，2022，55（2）：24-29.
- [5] 沈根平. 316L不锈钢管手工钨极氩弧焊焊接工艺[J]. 内燃机与配件，2021（3）：100-102.
- [6] 孔庆勇. 高效深熔弧焊系统特点研究及应用[J]. 科技资讯，2019，17（35）：50-52.
- [7] 徐良，欧阳凯，杨海峰. K-TIG焊接动态过程及组织和性能分析[J]. 焊接学报，2020，41（8）：68-72，101.
- [8] 曾凡勇，肖志威，柯联邦，等. K-TIG焊接技术研究进展及在核电中的应用前景[J]. 金属加工（热加工），2021（4）：40-46，50.
- [9] 柳阳，王秋平. 保护气对304N不锈钢K-TIG焊接头组织性能的影响[J]. 焊接，2017（9）：32-35，70.
- [10] 王晓军，杨健，周栋，等. Q345/316L异种钢K-TIG焊接接头的组织及性能[J]. 电焊机，2021，51（1）：66-72，121.
- [11] 陈俭峰，王昌盛，鲍碧霞. 深熔氩弧焊与等离子弧焊工艺性能对比分析[J]. 金属加工（热加工），2020（8）：37-39.
- [12] 熊剑. 304不锈钢K-TIG焊电弧特性及接头性能研究[D]. 南昌：南昌航空大学，2019.
- [13] 朱池. 化学品船不锈钢管自动氩弧焊焊接工艺试验及应用[J]. 金属加工（热加工），2019（2）：39-42.
- [14] 沈根平. 316L不锈钢管手工钨极氩弧焊焊接工艺[J]. 内燃机与配件，2021（3）：100-102.
- [15] 陈日昱，严晓君，田文博，等. K-TIG焊在应变强化S30408不锈钢压力容器上的试验研究[J]. 电焊机，2022，52（10）：72-79.