

# 直缝埋弧焊管焊缝夏比冲击性能试验研究

王林林, 杨鹏飞, 范洁, 韩铁利, 吴振宇, 王立柱

(巨龙钢管有限公司, 河北 青县 062658)

**摘要:** 随着控轧控冷技术的发展, 钢厂出于成本考虑, 在钢板中添加的合金元素含量逐渐减少, 导致制管后的管线用钢管焊缝的夏比冲击功下降。为了提高直缝埋弧焊管焊缝的夏比冲击性能, 选择了 2 种焊丝、5 种焊剂, 进行了 X65 钢级直缝埋弧焊管焊材的交叉匹配试验; 分析了不同焊材匹配方案下焊缝的冲击性能、化学成分及组织, 并确定出最优方案。试验结果可为后续类似钢级的微量合金管线钢的焊接提供参考。

**关键词:** 直缝埋弧焊管; X65M 管线钢; 合金含量; 冲击功; 焊接工艺

DOI:10.19938/j.steelpipe.1001-2311.2021.5.13.16

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Charpy Impact Energy of LSAW Pipe

WANG Linlin, YANG Pengfei, FAN Jie, HAN Tieli, WU Zhenyu, WANG Lizhu

(Julong Steel Tube Co., Ltd., Qingxian 062658, China)

**Abstract:** Along with the development of the TMCP technology, in order to control the cost by the steel works, the contents of alloy elements as added in the pipeline steel plate is getting less and less, which directly leads to the decrease of Charpy impact energy of the weld seam of the finished linepipe. To enhance the Charpy impact energy of the said linepipe, two types of welding wires, and five welding agents are selected to conduct the cross-matching test to the welding materials of the X65 LSAW pipe; and analyses are made for the impact energy, the chemical composition and the microstructure of the weld subjected to different welding material matching solutions so as to determine the best solution. The test result is worth using as the reference for welding of the micro-alloyed linepipe steel in similar steel grade in the future.

**Key words:** LSAW pipe; X65M linepipe steel; alloy content; impact energy; welding process

从 20 世纪 80 年代至今, 我国油气输送管材的钢级从以铁素体+珠光体组织(晶粒尺寸为 8  $\mu\text{m}$  左右, 珠光体相含量占 30%左右)为主的 X42~X65 中低强度钢(C 含量 0.06%~0.09%, Nb+V+Ti 含量  $\leq$  0.12%)<sup>[1-2]</sup>, 发展到了以针状铁素体主导的复相组织的 X70、X80 高强度管线钢(C 含量 0.02%~0.05%, S 含量  $\leq$  0.005%)<sup>[3-4]</sup>。在发展初期, 由于国内钢厂的技术水平还较弱, 主要通过添加一定量的 Mn、Mo、Cr、Ni、Cu 等合金元素来确保管线钢钢板的强度和韧性<sup>[5]</sup>。但随着控制轧制和控制冷却(TMCP)技术的发展<sup>[6-7]</sup>, 钢厂出于成本考虑, 更多的是通

过提高控轧控冷技术来保证管线钢钢板的力学性能, 合金元素添加量总体呈下降趋势, 而合金元素添加量的减少将导致焊管焊缝中的合金含量也随之降低, 焊缝夏比冲击功降低<sup>[8-9]</sup>, 管线项目要求焊管焊缝的夏比冲击功较高时, 则很可能发生焊管夏比冲击试验不合格的情况。按照 API Spec 5L—2018《管线钢管规范》和 GB/T 9711—2017《石油天然气工业 管线输送系统用钢管》要求, 管线用管的夏比冲击试验不合格时, 不能进行复取, 被取样管材将直接被降废处理, 这给工厂造成很大的损失。在合金元素添加量有限的情况下, 目前主要通过优化焊接工艺来改善焊缝的低温冲击韧性<sup>[10]</sup>。巨龙钢管有限公司利用现有焊材进行了焊材交叉匹配试验, 制定超低合金含量钢板的最佳焊接工艺, 并在

王林林(1984-), 男, 工程师, 主要从事直缝埋弧焊管的焊接和制造工作。

某项目中成功应用。现对该焊材交叉匹配试验进行介绍。

## 1 试验材料

试验用钢板为某钢厂提供的 X65M 钢板。按照 ASTM A 751—2014a《钢制品化学分析标准试验方

法、实验操作和术语》检验 X65M 钢板的化学成分, 检验设备为 ARL 4460 直读光谱仪; 在 NI750C 冲击试验机上, 按照 ASTM A 370—2017《钢制品力学性能试验的标准试验方法和定义》进行-30℃夏比冲击试验, 试样尺寸为 55 mm×10 mm×10 mm。X65M 钢板的化学成分见表 1, 冲击试验结果见表 2。

表 1 X65M 钢板的化学成分(质量分数)

试样编号	C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	V	Nb	Ti	B	$P_{cm}$	%
1	0.06	1.44	0.22	0.012	0.003	0.003	0.006	0.014	0.012	0.004	0.035	0.011	0.000 3	0.15	
2	0.08	1.51	0.24	0.014	0.006	0.004	0.008	0.013	0.013	0.004	0.036	0.012	0.000 3	0.17	
3	0.07	1.41	0.21	0.013	0.004	0.003	0.006	0.020	0.011	0.004	0.035	0.010	0.000 3	0.15	
4	0.08	1.48	0.23	0.015	0.004	0.005	0.008	0.016	0.018	0.004	0.038	0.011	0.000 5	0.17	
5	0.08	1.48	0.22	0.013	0.003	0.005	0.020	0.019	0.022	0.004	0.040	0.015	0.000 5	0.17	
6	0.07	1.50	0.24	0.012	0.004	0.004	0.006	0.012	0.016	0.004	0.038	0.010	0.000 4	0.16	
协议要求	≤0.10	≤1.60	≤0.45	≤0.022	≤0.010	≤0.15	≤0.30	≤0.30	≤0.30		V+Nb+Ti≤0.15		≤0.000 5	≤0.23	

表 2 X65M 钢板的冲击试验结果

试样编号	冲击功/J				剪切面积百分比/%			
	1	2	3	平均值	1	2	3	平均值
1	446	414	412	424	100	100	100	100
2	252	234	233	240	95	91	91	92
3	380	416	248	348	100	100	90	97
4	322	176	183	227	100	86	90	92
5	245	263	199	236	93	96	90	93
6	296	320	273	296	100	100	92	97

对于钢板元素含量, 很多标准仅规定了上限值, 未规定下限值, 导致不同钢厂生产的钢板的合金元素含量波动较大, 钢板的夏比冲击试验结果虽然合格, 但是冲击功数值离散度较大。后续应进一步对钢板的元素含量加严控制, 如中俄东线天然气

管道工程项目技术要求中对 X80M 钢级钢板 Mo、Ni 元素的下限进行了限制<sup>[11]</sup>, 冲击试验结果就十分理想。

## 2 试验方案

### 2.1 管段试验

焊接试验预焊及预焊修补均使用 CHW-60C 气体保护焊丝; 内焊与外焊使用不同厂家生产的 H08MnMoTiB 焊丝和烧结焊剂, 焊丝化学成分见表 3。内焊和外焊均为三丝焊, 一丝与二丝焊丝的直径为 4.0 mm, 三丝直径为 3.2 mm, 焊接线能量为 2 kJ/mm<sup>[12]</sup>。在合理的焊接线能量范围内, 随着焊接线能量的降低, 焊缝及热影响区的组织呈细化趋势, 同时可减少焊缝中氧和氮的含量<sup>[13-14]</sup>。焊材匹配情况见表 4。

表 3 H08MnMoTiB 焊丝化学成分(质量分数)

焊丝	C	Mn	Si	P	S	Mo	Cr	Cu	Ti	B	%
a	0.07	1.60	0.16	0.010	0.006	0.32	-	0.002	0.006	0.003 5	
b	0.05	1.56	0.16	0.009	0.002	0.36	0.05	0.050	0.005	0.005 0	

制成管段后, 在焊缝处截取夏比冲击试样, 并加工成 55 mm×10 mm×10 mm 全尺寸试样, 在 NI750C 冲击试验机上, 按照 ASTM A 370—2017 标准进行-20℃夏比 V 型冲击试验, 结果见表 4。

对比发现, 使用 a 焊丝, 搭配 e 或 g 焊剂时, 钢管焊缝冲击功均较高。随后, 对两组焊材匹配分

别做了焊接工艺评定试验, 发现拉伸与弯曲等性能也都全部合格。

### 2.2 批量生产

通过管段试验确定出焊丝应选用 a, 焊剂可以选用 e 和 g 焊剂。用这两种焊材匹配方案批量生产了某项目 X65M 钢级Φ559 mm 规格直缝埋弧焊管,

表 4 焊材匹配情况及试验管段冲击功

管段编号	焊丝	焊剂	冲击功/J			
			1	2	3	平均值
1	a	c	65	53	59	59
2	a	d	57	63	57	59
3	b	e	56	57	53	55
4	a	e	90	87	73	83
5	b	d	75	66	66	69
6	a	f	69	72	73	71
7	a	g	111	111	137	120

共计 1 200 余根, 根据相关技术要求取夏比冲击试样 54 组, 试验温度均为 -20 ℃, 冲击功情况见表 5 和如图 1 所示。

表 5 X65M 钢级 Φ559 mm 规格直缝埋弧焊管的冲击功

焊剂	取样组数	冲击功/J		
		单个最小值	单个最大值	整体平均值
e	32	57	148	95
g	22	67	156	110

表 6 X65M 钢级 Φ559 mm 规格直缝埋弧焊管焊缝化学成分(质量分数)

组批	试样编号	C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	V	Nb	Ti	B	$P_{cm}$
A	1	0.06	1.53	0.32	0.017	0.005	0.139	0.010	0.016	0.023	0.006	0.022	0.012	0.001 2	0.17
	2	0.07	1.55	0.32	0.017	0.005	0.143	0.010	0.016	0.022	0.006	0.022	0.013	0.001 2	0.17
	3	0.07	1.54	0.32	0.016	0.006	0.143	0.010	0.015	0.022	0.006	0.022	0.013	0.001 2	0.18
	4	0.07	1.60	0.33	0.017	0.006	0.136	0.011	0.014	0.024	0.006	0.022	0.013	0.001 1	0.18
B	1	0.06	1.62	0.32	0.015	0.005	0.155	0.023	0.017	0.024	0.006	0.021	0.017	0.001 6	0.17
	2	0.06	1.60	0.32	0.015	0.005	0.141	0.015	0.016	0.020	0.006	0.023	0.015	0.001 0	0.17
	3	0.06	1.59	0.33	0.017	0.005	0.149	0.020	0.015	0.018	0.006	0.022	0.016	0.001 0	0.17
	4	0.07	1.58	0.34	0.017	0.005	0.165	0.016	0.018	0.030	0.006	0.019	0.020	0.001 5	0.18

从表 7 可以看出, 使用 g 焊剂时, 焊缝内的 Mn、Mo、Ni 含量以及 Ti 含量都略有增加。一定含量的 Mn、Ni 等元素能起到固溶强化的作用, 同时还可改善材料韧性, 使得焊缝在调质后具有足够高的强度和韧性。在碳钢及低合金钢的焊缝中, Mn 是最常加入的元素, Mn 含量在一定范围时, 焊缝的强度和韧性会随着 Mn 含量的增加而增加; 此外, Mn 含量的增加还可促进焊缝中针状铁素体增加、多边形铁素体减少, 有利于得到细化的针状铁素体。Ni 可使焊缝的连续冷却转变曲线(CCT 曲线)右移, 因而可促进针状铁素体形成, 使焊缝韧性提高。Mo 是促进针状铁素体形成元素, 因而适当的

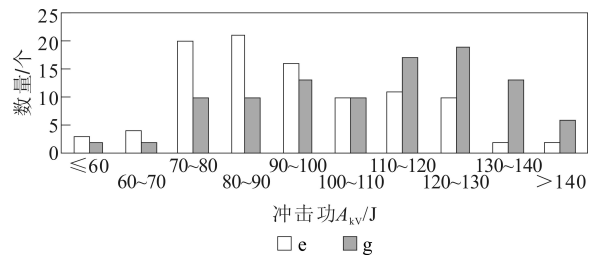


图 1 用两种焊剂焊接的 X65M 钢级 Φ559 mm 规格直缝埋弧焊管的冲击功分布

从图 1 可以看出, 使用 e 焊剂进行焊接时, X65M 钢级 Φ559 mm 规格直缝埋弧焊管的冲击功主要分布在 70~100 J, 而使用 g 焊剂时的冲击功主要分布在 90~140 J。

### 3 分析

将使用 e 焊剂焊接的 X65M 钢级 Φ559 mm 规格直缝埋弧焊管编号为 A 组, 使用 g 焊剂焊接的直缝埋弧焊管编号为 B 组, 按照 ASTM A 751—2014a 标准, 采用 ARL 4460 直读光谱仪分析这两组直缝埋弧焊管焊缝的化学成分, 结果见表 6。

Mo 含量有利于提高焊缝韧性。在钢中加入适量的 Ti 等强碳化物形成元素, 可以减小奥氏体晶粒长大倾向, 从而得到细晶粒钢<sup>[15]</sup>。

X65M 钢级 Φ559 mm 规格直缝埋弧焊管焊缝的金相组织如图 2 所示。从图 2 可以看出, B 组钢管的晶粒得到了细化, 要小于 A 组钢管晶粒的尺寸, 晶粒尺寸的细化有助于提升焊缝的夏比冲击性能, 与上述冲击试验结果相一致。

### 4 结 语

受钢板合金元素含量下降的影响, 焊管焊缝夏比冲击功也会下降。管线用管项目要求焊管焊缝夏

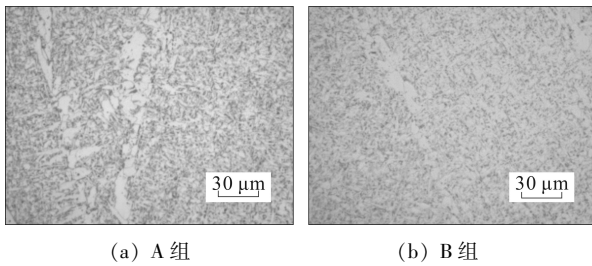


图2 X65M直缝埋弧焊管焊缝的金相组织

比冲击功较高时,必须提前作出预判,并改变焊接工艺,以避免产生损失;在批量制管开始前,最好先进行焊接工艺评定试验,优选出最适宜的焊材组合。

## 5 参考文献

- [1] NOURPANAH N, TAHERI F. A design equation for evaluation of strain concentration factor in concrete coated X65 pipelines[J]. *Marine Structures*, 2009, 22(4): 758-769.
- [2] NIU Jing, QI Lihua, LIU Yinglai, et al. Tempering microstructure and mechanical properties of pipeline steel X80 [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009(19): 573-578.
- [3] QIAO Guiying, XIAO Furen, ZHANG Xiaobing, et al. Effects of contents of Nb and C on hot deformation behaviors of high Nb X80 pipeline steels[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009(19): 1395-1399.
- [4] LIU Qingyou, SUN Xinjun, JIA Shujun, et al. Austenitization behaviors of X80 pipeline steel with high Nb and trace Ti treatment[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2009, 16(6): 58-62.
- [5] 陈小伟,王旭,王立柱,等. X80 管线钢焊接热影响区软化问题研究[J]. *焊管*, 2017, 40(6): 1-8.
- [6] 王国栋. 控轧控冷技术的发展及在钢管轧制中应用的设想[J]. *钢管*, 2011, 40(2): 1-8.
- [7] 彭龙洲,陈利明,杜新立,等. 简析控轧控冷技术在无缝钢管生产中的应用[J]. *钢管*, 2013, 42(4): 7-10.
- [8] 王燕. 焊接材料对 X70 直缝埋弧焊管焊缝组织性能的影响[J]. *钢管*, 2020, 49(3): 21-24.
- [9] 田鹏,王晓颖,尚成嘉,等. 低碳高锰 HFW 钢管焊缝冲击韧性的优化研究[J]. *钢管*, 2017, 46(6): 57-62.
- [10] 张文钺. 焊接冶金学: 基本原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [11] 中俄东线天然气管道工程技术规范 第 4 部分: X80 级直缝埋弧焊管技术条件: Q/SYGD 0503. 4—2016[S]. 2016.
- [12] 黎剑峰. 钢管直缝埋弧焊焊接规范对焊缝形状的影响[J]. *钢管*, 2002, 31(4): 33-36.
- [13] 徐道荣. 改善 3.5%Ni 钢焊接接头低温韧性的措施[J]. *焊接技术*, 1997(4): 22-23.
- [14] 张庆素. -70℃~101℃钢 SAW 熔敷金属低温韧性研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2010.
- [15] 赵波,雷庆,韩宏江,等. X70 钢级低温管件焊接及热处理工艺试验研究[J]. *钢管*, 2019, 48(6): 19-22.

(收稿日期: 2020-11-19; 修定日期: 2020-12-09)

## ● 简 讯

### “热轧无缝钢管在线组织性能调控关键技术、装备开发及应用”等项目 荣获 2021 年中国钢铁工业协会、中国金属学会冶金科学技术奖

2021年8月16日,2021年中国钢铁工业协会、中国金属学会冶金科学技术奖获奖项目公布,有113个项目获奖。其中,宝山钢铁股份有限公司、东北大学、烟台鲁宝钢管有限责任公司、宝钢工程技术集团有限公司的“热轧无缝钢管在线组织性能调控关键技术、装备开发及应用”项目荣获特等奖;太原钢铁(集团)有限公司、山西太钢不锈钢股份有限公司、北京科技大学、太原理工大学、一重集团大连核电石化有限公司、中国科学院金属研究所、中国原子能科学研究所的“核电用高品质不锈钢制造技术及品种开发”和鞍钢股份有限公司、北京科技大学、辽宁科技大学、广州航海学院、烟台中集来福士海洋工程有限公司的“极寒环境用高强韧易焊接海洋装备用钢关键技术创新及工程应用”项目荣获一等奖;钢铁研究总院、冶金工业信息标准研究院、钢研纳克检测技术股份有限公司的“国际标准 ISO 18338—2015 金属材料 室温扭转试验方法的制定”项目荣获二等奖;天津钢管制造有限公司的“508 mm 及以上酸性环境用高钢级抗腐蚀无缝管线管开发及应用”项目荣获三等奖。

(本 刊)