

应用与开发

油气管道工程用高强度感应加热弯管母管 热模拟试验验收及应用*

刘迎来, 许 彦, 王 鹏

(中国石油集团工程材料研究院有限公司, 西安 710077)

摘 要: 针对长输管道工程感应加热弯管母管入厂验收中遇到的母管焊缝热影响区夏比冲击吸收能数值离散性异常、管体屈强比超标及原材料替代等问题进行了分析讨论。基于热模拟方法形成了适用于多种特定母管的个性化感应加热弯管的热煨制工艺, 并完成批量工程建设用 X80 高强度感应加热弯管生产。同时列举了多个力学性能及成分指标存在明显偏离母管工程规范的案例, 验证了现行感应加热弯管母管选材规范允许采用热模拟评定方法验收的正确性和可行性。

关键词: 弯管母管; 热模拟试验; 试验验收; 选材

中图分类号: TG156

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.05.006

Thermal Simulation Test Acceptance and Application of High-strength Induction Heating Bending Base Pipe for Oil and Gas Pipeline Engineering

LIU Yinglai, XU Yan, WANG Peng

(CNPC Tubular Goods Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: The problems of Charpy impact absorption energy in heat-affected zone (HAZ) of base pipe weld, excessive yield ratio of pipe body and substitution of raw materials are analyzed and discussed. Based on the thermal simulation method, a personalized induction heating bending process suitable for a variety of specific pipe is formed, and the production of X80 high strength induction heating bending pipe for batch construction is completed. The correctness and feasibility of the thermal simulation evaluation method in the current material selection specification for induction heating bending pipe are verified by several cases where the mechanical properties and composition indexes are obviously deviated from the engineering specification.

Key words: bending base pipe; thermal simulation test; test acceptance; material selection

0 前 言

高强度感应加热弯管的生产实际是热塑性成型和淬火+回火的工艺过程, 本质上相当于对 TMCP 针状铁素体钢进行了一次离线的快速加热和冷却+回火热处理, 等效于对适度添加了 Mo、V 等强碳化物元素的厚壁干线钢管完成了热态深加工。经此过程, 原针状铁素体组织经过了一次

奥氏体状态的热塑性形变后, 快速冷却再结晶, 最终组织转变为回火态的板条铁素体+粒状贝氏体及少量 M-A 组元的混合组织。组织决定性能, 针状铁素体钢是一种非平衡态组织, 热稳定性较差, 铁素体和贝氏体一旦受热, 其微观组织中相同趋向铁素体束内针状板条会产生合并、变宽, 板条间 M-A 组元存在退化现象, 发生向平衡相组织转变的趋势, 致使材料性能发生变化。API

*基金项目: 国家石油天然气管网集团有限公司科学研究与技术开发项目“热煨弯管、三通管件性能优化设计及环焊缝质量提升”(项目编号 SJSJ202206)。

SPEC 5L中对TMCP控轧钢热稳定性有明确限定,当加热温度超过580℃时,材料强度会降低^[1]。研究发现,借助淬火快冷方式可显著抑制再加热而导致的管线钢TMCP控轧效应降低或丧失现象,这也是为了控制X80钢级感应加热弯管直管段性能而强制要求选用整体热煨制工艺的缘由所在^[2]。据文献[3]研究结果,含Mo、V、Ti等元素的C-Mn-Nb超低碳贝氏体钢在不高于1150℃温度范围内再加热,材料金相组织虽然存在长大的趋势,但晶粒度不会产生明显的粗化现象,且基体中析出相的尺寸、分布弥散度依然可控,材料仍可保持良好的加热稳定性。大量低碳贝氏体钢加热试验结果表明,对添加Mo、V等微合金钢进行适当的淬火+回火热处理,不仅可保留原材料TMCP控轧细晶组织的特性,也可使其金相组织的均匀性进一步获得改善,得到综合的强韧性^[4-5],更好满足工程建设的需要。

伴随着高强度管线钢离线和在线热处理的深入研究,基于大量的试验成果积累,以西气东输感应加热弯管母管技术条件为代表的母管选材规范的建立,形成了完善的感应加热弯管质量控制技术,并在相当长的时间内引领了X70、X80感应加热弯管制造技术的进步。但总结回顾许多已建成投产的管道工程建设案例发现,感应加热弯管母管的选材问题仍然是困扰感应加热弯管制造技术发展的“瓶颈”,具体表现在:通常工程技术人员更容易接受标准推荐的母管材料,而对借助热模拟筛选专用母管存在一定的抵制现象^[6]。基于此,笔者结合几个典型高强度感应加热弯管母管选材案例的实践,验证了当前感应加热弯管规范中允许采用弯管热煨制模拟试验方法进行其母管符合性验收的合理性,期望提升对油气管道工程用感应加热弯管母管选材技术规范的认识,以为同类工程问题提供参考。

1 高强度感应加热弯管母管制造中的管体性能控制

1.1 管体母材局部屈服比超标

在弯管母管成分设计中,弯管热煨制装备水喷淋冷却系统的额定冷却能力相对管线钢轧板生产线冷却系统要弱得多,通常在母管成分设计时,原则

上要在控制材料焊接性的前提下,在干线管成分的基础上适当的添加Mo、V、Ti等微合金元素以提高母管的淬透性,确保母管热煨制弯管冷却后能够获得足够多的淬火组织,以抑制材料因再加热造成控轧效应的损失。管线钢在上述因再加热所造成的控轧效应的损失主要来源于以下方面:一是轧钢阶段选取相对偏低的板材终轧温度;二是母管制造阶段,板材冷成型卷曲成为圆筒状、扩径及内压试验等形变诱发晶格畸变、位错移动而产生的硬化贡献。这种通过形变得到的强度贡献是不稳定的,不同于在成分控制上添加合金元素来提高弯管母管的淬透性,后者对屈服强度的贡献部分,在再次热加工后可得到延续。由此可见,即使母管屈服比超出母管技术规范的经验限定值,选用合理的工艺,借助再加热仍可获得均衡稳定的弯管性能。

1.2 母管焊缝热影响区夏比冲击吸收能数值离散性异常

大直径感应加热母管通常选用直缝埋弧焊管,其制管焊接属于大线能量焊接。母管制造阶段,管体纵焊缝热影响区在焊接外加热输入高的峰值温度的作用下,热影响区中单道焊的粗晶区和多道焊的临界粗晶区因粗大晶粒和M-A组元的产生,使其夏比冲击韧性数值可能出现非正态的离散型分布,个别数值甚至低于标准要求,而成为焊接接头局部脆化区^[7-8]。上述现象多出现在大厚壁管体纵焊缝热影响区,可能与当前高强度焊管控制焊缝延迟开裂措施有关,不能将焊接热输入量降得更低以获得厚壁母管热影响区更好的韧性,提高厚壁管纵焊缝热影响区韧性是母管质量持续提升有待攻克的难题。但通过调质处理,可有效细化材料粗大的组织,改善其性能^[9-15]。

1.3 干线管替代薄壁弯管母管

长输管道工程建设中,根据相关设计规范要求,感应加热弯管的壁厚要高于与之相连接的直管,而穿越不同地域的管线钢管壁厚各不相同,弯管壁厚需与之对应,这样就造成弯管的需求规格往往较多,数量可能有限。另一方面也有生产成本的问题。基于此,对于薄壁弯管,存在选用合适的干线管替代弯管母管的需求。

材料淬透性主要决定于化学成分,但对于具体工件产品可否淬透还与其壁厚有关,工件壁厚小于最小淬透深度,即使材料自身淬透性低也可

以获得足够的淬透组织，达到淬火目的。因此，对于薄壁弯管母管可否利用干线管问题，借助模拟试验确定可能是一个好的选择。

2 母管选材及热煨制模拟验证案例

感应加热弯管的母管选材技术是建立在大量油气管道工程用弯管热模拟及制造经验总结基础上获得的，现行母管技术规范考虑了多种可能的选材影响因素，其涉及炼钢、轧板、制管、弯管热煨制塑性成型和后续热处理等多个环节，重点控制集中在化学成分和热煨制工艺。基于此，母管规范允许从两个方面着手，第一种方法要求原材料完全满足限定的技术指标要求；第二种在可焊性满足施工要求前提下，可通过验证试验的方法开展选材，即对钢管进行热煨制模拟试验，要求模拟试样的综合性能必须符合感应加热弯管设计规范要求。

根据感应加热弯管规范要求，就母管部分性能指标检测结果存在偏离现象的典型案例，分别

进行热模拟验证评价，筛选母管并确认标准条款的适用特性。

2.1 案例1

案例1为某项目用X80钢级 $\Phi 1\,219\text{ mm}\times 26.4\text{ mm}$ 和 $\Phi 1\,219\text{ mm}\times 33\text{ mm}$ 焊缝热影响区不合格母管弯管热煨制及评价。弯管母管化学成分见表1，两种规格的母管都属于C-Mn-Nb加Mo、V等微合金元素的针状铁素体钢，其金相组织的晶粒度评定结果为11级，符合项目设计要求，但依照母管订货规范对其进行入厂组批检测，发现抽检母管热影响区 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热影响区夏比冲击吸收能量试验数值离散性大（轧制态性能见表2），部分母管热影响区夏比冲击吸收能量的单个数值低于技术规范限定的最小数值要求。

母管热煨制和评价采用以下要求，根据表2中可知，夏比冲击性能满弯管规范要求。

弯管热煨制模拟主要控制参数及样件弯曲角度：热煨制温度为 $960\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，推进速度为 $25\pm 5\text{ mm/s}$ ，冷却介质为7%NaCl水溶液，喷水压力为 $0.08\pm 0.02\text{ MPa}$ ， $550\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火，保温 100 min ；模拟弯管样件弯曲角度为 10° 。

表1 弯管母管化学成分

壁厚/mm	化学成分/%												
	$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Nb})$	$w(\text{V})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{Cu})$	CE_{pcm}
26.4	0.07	0.18	1.73	0.012	0.001	0.27	0.19	0.28	0.055	0.04	0.016	0.11	0.21
33	0.07	0.18	1.71	0.011	0.001	0.26	0.20	0.32	0.051	0.05	0.013	0.11	0.20
设计要求	0.05~0.15	0.10~0.42	1.50~1.85	≤ 0.020	≤ 0.005	≤ 0.45	0.15~0.50	≤ 1.00	0.025~0.11	≤ 0.06	≤ 0.040	≤ 0.35	≤ 0.28

表2 两种规格母管纵焊缝热影响区热煨制前后夏比冲击试验结果

规格/(mm×mm)	炉号	热模拟管号	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热区冲击吸收能量/J	
			热模拟前	热模拟后
$\Phi 1\,219\times 26.4$	11421476	WY21JL200554W	20、15、30	250、245、240、242、235、240
$\Phi 1\,219\times 26.4$	11421476	WY21JL200558W	65、50、70	260、160、160、110、100、75
$\Phi 1\,219\times 33$	11421474	WY21JL200585W	67、57、36、162、172、177	208、232、284、236、228、210
$\Phi 1\,219\times 33$	11421475	WY21JL200577W	39、221、167、139、199、199	210、240、248、270、245、252
$\Phi 1\,219\times 33$	11423500	WY21JL204808W	170、188、50	121、121、142、277、268、258
$\Phi 1\,219\times 33$	11423501	WY21JL204832W	47、52、37	71、148、66、271、231、273
弯管设计要求			单值 ≥ 100 ，均值 ≥ 135	单值 ≥ 60 ，均值 ≥ 90

按照模拟试验工艺先后在A公司完成57根 $\Phi 1\,219\text{ mm}\times 26.4\text{ mm}$ 和79根 $\Phi 1\,219\text{ mm}\times 33\text{ mm}$ X80钢级感应加热弯管批量生产，在B公司组织

完成106根 $\Phi 1\,219\text{ mm}\times 33\text{ mm}$ X80感应加热弯管批量生产，经甲方指定的第三方组批抽检，A、B公司生产的弯管性能均符合技术规范要求。

两个弯管公司采用同一钢管公司生产的弯管母管、相同热煨制工艺生产的弯管，性能检测结果虽然均符合规范要求，但A公司弯管的夏比冲击性能明显优于B公司弯管，这也进一步验证了弯管综合质量除与原材料相关外，弯管热煨制装备水平和关键技术人员素质差异也是决定其质量的重要影响因素。

2.2 案例2

案例2为L555M/X80M钢级Φ1 219 mm×33 mm钢管代替原设计L485MΦ1 219 mm×30.2 mm感应加热弯管母管的热模拟验证试验评价及生产。该项目需用3件60°L485 Φ1 219 mm×30.2 mm感应加热弯管，但由于采购不到L485M Φ1 219 mm×30.2 mm感应加热弯管母管，计划利用现有L555M/X80M Φ1 219 mm×33 mm干线钢管替代，L555M/X80M干线钢管化学成分见表3。由表3可知，该管体成分不符合L485弯管母管技术规范要求，主要是Mn高于技术规

范要求，而Mo低于规范要求。这种材料替代同时属于用较大壁厚、高钢级材料替代低钢级薄壁材料。

鉴于感应加热弯管原设计为L485，优先考虑感应加热弯管与连接干线钢管等强度链接，该弯管模拟试验采用整体热煨制方式，主要控制参数及样件弯曲角度为：热煨制温度为1 000±20℃，推进速度为30±5 mm/s，冷却介质为4% NaCl水溶液，喷水压力为0.05±0.02 MPa，600±20℃回火，保温100 min；模拟弯管样件弯曲角度为15°。

依据规范对模拟煨制的15°L485 Φ1 219 mm×33 mm弯管进行力学性能试验，结果见表4。模拟生产的感应加热弯管实物力学性能检测结果符合L485强度级别产品性能要求，属于母管不等强度、壁厚正偏差替代，按此工艺完成3件60°Φ1 219 mm×33 mm感应加热弯管的生产。

表3 L555M/X80M干线钢管化学成分

项目	化学成分/%												
	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cr)	w(Mo)	w(Ni)	w(Nb)	w(V)	w(Ti)	w(Cu)	CE _{Pcm}
试样	0.06	0.30	1.75	0.006	0.003	0.25	—	0.23	0.076	—	0.016	0.23	0.17
设计要求	0.05~0.15	0.10~0.30	1.30~1.65	≤0.020	≤0.015	≤0.35	0.10~0.30	≤0.80	0.025~0.08	≤0.06	≤0.040	≤0.35	≤0.25

表4 弯管热模拟样件力学性能检测结果

取样位置		抗拉强度/屈服强度/		伸长率/%	-20℃夏比冲击吸收能量/J
		MPa	MPa		
直管段	管体	610	542	26	248、251、206
	焊缝	614			143、148、157
	热影响区				241、243、253
过渡区	开始	615	548	24	245、263、263
	结束	616	544	24	277、299、273
弯曲段	内弧侧	620	533	26	244、249、246
	中性区	610	527	26	236、243、243
	外弧侧	620	524	26	274、289、291
	焊缝	616			161、173、147
	热影响区				238、267、248
设计要求	母材	570~780	485~635	≥17	单值≥60， 均值≥90
	接头	≥570			单值≥55， 均值≥70

2.3 案例3

案例3为某项目用X80 Φ1 219 mm×33 mm强韧性不合格弯管母管的热模拟验证试验评价及生产。该感应加热弯管母管入厂检验，其化学成分符合母管标准要求，但屈服强度、屈强比及冲击韧性不符合母管规定的参数要求，母管力学性能检测结果见表5。

初步分析，屈服强度和屈强比超标原因可能主要来源于制管用板材终轧温度偏低、直

表5 母管力学性能检测结果

炉号	热模拟管号	屈服强度/MPa	屈强比/%	轧制状态-20℃热区冲击吸收能量/J
S81862	1833033	743	0.96	50、86、103
S81862	18333066	717	0.90	66、175、36
S81862	18333069	708	0.89	53、49、44
设计要求		555~705	≤0.93	单值≥100， 均值≥135

缝管成型及钢管水压试验等形变强化作用,焊缝热影响区夏比冲击吸收能量离散和偏低与钢管纵焊缝焊接热输入影响相关。基于此,拟同时在甲、乙两个公司采用三套相同的工艺要求,分别独立进行弯管模拟试验,依次完成3根15°样件煨制,主要控制参数为:热煨制温度为 $1\,000\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $960\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $940\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,推进速度为 $25\pm 5\text{ mm/s}$,冷却介质为4%NaCl水溶液,喷水压力为 $0.08\pm 0.02\text{ MPa}$, $600\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回

火,保温100 min。

甲公司模拟弯管样件力学性能检测结果显示,第一套工艺煨制的弯管样件强度符合要求,但多个部位处样件的韧性检测值数值分布十分离散,且不能完全满足设计要求;第二套工艺煨制的弯管样件强韧性指标符合要求,但夏比冲击吸收能量数值较为离散;第三套工艺煨制的弯管综合性能匹配最为理想,表6为其力学性能检测结果。

表6 第三套热煨制模拟样件力学性能检测结果

取样位置		抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	屈强比/%	伸长率/%	-20℃夏比冲击吸收能量/J
直管段	管体	699	584	0.83	27.5	242、252、197
	焊缝	743				137、126、140
	热影响区					265、217、253
过渡区	开始	706	591	0.84	27.0	304、305、290
	结束	705	596	0.58	23	307、299、273
弯曲段	内弧侧	701	590	0.84	27.5	266、289、280
	中性区	706	581	0.82	22.5	274、239、288
	外弧侧	699	595	0.84	26.5	222、289、291
	焊缝	634				169、164、167
	热影响区					222、234、238
设计要求	母材	625~780	555~705	≤ 0.93	≥ 16	单值 ≥ 70 ,均值 ≥ 90
	接头	≥ 625				单值 ≥ 55 ,均值 ≥ 70

乙公司模拟弯管样件力学性能检测结果显示,试制的3根弯管不同部位试样的强韧性指标没有一套完全合格,且数值十分离散。总结分析结果,其主要与感应加热弯管机冷却系统喷水流速低,淬火后金相组织中形成了占比较高的铁素体,致使强度偏低。同时弯管弯曲成型过程中,管体加热变形处同一横截面加热温度控制均匀性差,局部组织存在过热现象,致使弯管外弧侧等温度偏高部位组织的晶粒急剧粗化长大,材料韧性恶化。

对弯管母管进行热模拟试验验收,实际上是针对一种预选的材料,技术人员在感应加热弯管制造装备能力有限的条件下,开展感应加热弯管热煨制工艺优化的过程。通过弯管试制件评定,验证和确认该材料热加工态的性能与煨制工艺的协调性,若试制弯管的

综合性能可满足弯管产品规定要求,则表明所选定的材料可用做弯管母管。在完成上述模拟试验选材工作后,甲公司利用同批原材料和第三套弯管热煨制工艺生产某项目用X80 $\Phi 1\,219\text{ mm}\times 33\text{ mm}$ 感应加热弯管近150根,其中组批抽检弯管综合性能均符合项目用弯管技术规范要求。

案例3表明,由于弯管批量生产工艺是通过其热煨制试验评定确定的,采用相同工艺和相同的材料进行感应加热弯管生产,其质量是可控的,即采用热模拟试验方式验收弯管母管是可靠、可行的。另一方面,对于特定的母管所制造的感应加热弯管,其综合性能不仅与热煨制工艺有关,弯管生产技术人员的能力和装备水平对其质量也有重要影响。

2.4 案例4

案例4为某项目用X70M $\Phi 711\text{ mm}\times 17.5\text{ mm}$ 干线钢管替代弯管母管的热模拟验证试验评价及生产。该某项目计划用X70M $\Phi 711\text{ mm}\times 17.5\text{ mm}$ 干线钢管做感应加热母管，母管化学成分见表7，由表7可知，关键合金元素C、Mn、Mo、V等含量明显偏低，均按照专用弯管母管要求的下限控制。根据需要采用如下两套弯管热模拟试验方案，并完成弯管试制样件的评价，结果见表8和表9。

第一套方案的主要控制参数及样件弯曲角度：热煨制温度为 $1\,000\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，推进速度为 $35\pm 5\text{ mm/s}$ ，冷却介质为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水溶液，喷水压力为

$0.08\pm 0.02\text{ MPa}$ ， $600\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火，保温 100 min ；模拟弯管样件弯曲角度为 15° 。

第二套方案的主要控制参数及样件弯曲角度：热煨制温度为 $1\,000\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，推进速度为 $35\pm 5\text{ mm/s}$ ，冷却介质为含4%NaCl的 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水（井水），喷水压力为 $0.08\pm 0.02\text{ MPa}$ ， $600\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火，保温 100 min ；模拟弯管样件弯曲角度为 15° 。

采用恒温含4%NaCl水介质冷却条件试制弯管综合性能符合规范要求， $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水溶液冷却条件试制件没有通过评定，这表明当母管合金偏低时，冷却介质的冷却能力和温度对感应加热弯管强度性能有重要的影响作用。

表7 X70M $\Phi 711\text{ mm}\times 17.5\text{ mm}$ 干线钢管化学成分

项目	化学成分/%												
	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cr)	w(Mo)	w(Ni)	w(Nb)	w(V)	w(Ti)	w(Cu)	CE _{Pcm}
试样	0.06	0.25	1.54	0.011	0.006	0.13	0.13	0.02	0.04	0.01	0.016	0.30	0.16
设计要求	0.05~0.15	0.10~0.30	1.30~1.65	≤ 0.020	≤ 0.015	≤ 0.35	0.10~0.30	≤ 0.80	0.025~0.08	≤ 0.06	≤ 0.040	≤ 0.35	≤ 0.25

表8 第一套工艺试制弯管热模拟样件
力学性能检测结果

取样位置		抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长 率/%	-10℃夏比冲 击吸收能量/J
直管段	管体	642	517	38	272、208、228
	焊缝	671			160、164、189
	热影响区			207、191、193	
过渡区	开始	579	471	38	245、263、263
	结束	567	479	46	266、250、2 266
弯曲段	内弧侧	596	459	46	240、259、241
	中性区	606	493	48	240、222、243
	外弧侧	575	504	46	241、241、244
	焊缝	604			153、150、1 154
	热影响区			238、267、248	
设计要求	母材	570~780	485~635	≥17	单值≥60， 均值≥90
	接头	≥570			单值≥55， 均值≥70

表9 第二套工艺试制弯管热模拟样件
力学性能检测结果

取样位置		抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长 率/%	-10℃夏比冲 击吸收能量/J
直管段	管体	676	600	42	248,251,206
	焊缝				132,69,129
	热影响区	665			
过渡区	开始	617	495	46	241,263,265
	结束	616	544	40	277,299,273
弯曲段	内弧侧	609	488	36	248,275,252
	中性区	658	550	36	236,243,243
	外弧侧	671	576	37	195,242,130
	焊缝				169,160,194
	热影响区	617			
设计要求	母材	570~780	485~635	≥17	单值≥60, 均值≥90
	接头	≥570			单值≥55, 均值≥70

2.5 案例5

案例5为某项目用X80M $\Phi 1\,016\text{ mm}\times 18.4\text{ mm}$ 弯管母管的热模拟验证试验评价及生产。该母管化学成分见表10，因入厂检验发现其关键化学元素Mo、V成分控制均偏下限，经协商达成一致意

见，同时选用3个感应加热弯管制造公司各自采用此材料进行弯管热煨制试制，多次累计试生产15根工艺评定弯管，评价结果均不能满足X80感应加热弯管强度指标要求，最终2 000余t X80M $\Phi 1\,016\text{ mm}\times 18.4\text{ mm}$ 弯管母管直接报废。

表10 X80M Φ 1 016 mm \times 18.4 mm 弯管母管化学成分

项目	化学成分/%												
	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cr)	w(Mo)	w(Ni)	w(Nb)	w(V)	w(Ti)	w(Cu)	CE _{Pcm}
试样	0.07	0.22	1.75	0.015	0.001	0.08	0.22	0.02	0.048	0.02	0.016	0.17	0.20
设计要求	0.05~0.15	0.10~0.42	1.50~1.85	≤0.020	≤0.005	≤0.45	0.15~0.50	≤1.00	0.025~0.11	≤0.06	≤0.040	≤0.35	≤0.28

3 结 论

(1) 基于现有规范特定技术指标和采用热模拟试验方法是两种不同的弯管母管选择途径,前者适合于大批量、规模化感应加热弯制的生产需求情况,一般通过专门订购形式来实现,也是最便利的一种弯管原材料质量控制方式;后者更适合于少量、非规模化感应加热弯制的生产。鉴于管道建设需求的特殊性,两种母管的选材方式共存是技术发展和非标件质量控制经验的结合。

(2) 油气管道工程用感应加热弯管标准有关母管原材料验收规定,在焊接性满足规范要求情况下,弯管母管采用热模拟的弯管样件进行验收是可行的,能够有效控制感应加热弯管质量。

(3) 当对感应加热弯管母管采用热模拟试验评定方法验收时,其模拟件试验结果同时会受热煨制工艺参数、装备、环境温度等多种因素的作用,必要的工艺优化十分重要。

参考文献:

- [1] 美国石油协会.管线钢管规范:API SPEC 5L(46版)[S].华盛顿:美国石油协会出版业务部,2018.
- [2] 刘迎来,许彦,王高峰,等.中俄东线-45℃低温环境油气管道工程用X80钢级 Φ 1 422 mm \times 33.8 mm感应加热弯管研发[J].焊管,2019,41(7):48-54.
- [3] 刘迎来,王高峰,聂向辉,等.正火温度对汇管用控轧钢组织及力学性能的影响[J].天然气与石油,2015,33(5):79-83,12.
- [4] 刘迎来,池强,王鹏.加热温度对X80弯管钢组织与性能的影响[J].金属热处理,2010,35(10):29-32.

- [5] 刘迎来,李平全.西气东输管道工程用高强度感应加热弯管的选材研究[J].石油工程建设,2005(2):52-55,5.
- [6] 赵志伟,郭云龙,陈晓雯.X80钢级弯管母管典型问题及解决方法[J].钢管,2023,52(1):45-48.
- [7] 陈小伟,王建民,于操,等.X80弯管母管焊接热影响区冲击韧性及其影响因素[J].钢管,2022,51(5):14-19.
- [8] 毕宗岳.低碳微合金钢管焊接接头软化研究[J].焊管,2022,45(7):1-6.
- [9] 袁良增,姜金星,赵丽洋,等.加热温度对X80管线钢显微组织和低温韧性的影响[J].上海金属,2023,45(4):77-83.
- [10] 李学达,李春雨,曹宁,等.高强管线钢焊接临界再热粗晶区中逆转奥氏体的逆相变晶体学[J].金属学报,2021,57(8):967-976.
- [11] 赵金兰,刘腾跃,王长安,等.热处理对X80钢弯管力学性能和组织的影响[J].金属热处理,2017,42(6):127-129.
- [12] 袁良增,姜金星,赵丽洋,等.加热温度对X80管线钢显微组织和低温韧性的影响[J].上海金属,2023,45(4):77-83.
- [13] 许彦,刘迎来,聂向辉,等.不同热处理工艺下L245M钢级小弯曲半径感应加热弯管性能的研究[J].热加工工艺,2022,51(5):101-104,109.
- [14] 许彦,刘迎来,聂向辉,等.工艺参数对L360M钢级小弯曲半径弯管成型质量的影响[J].热处理技术与装备,2020,41(4):16-20.
- [15] 许彦,刘迎来,聂向辉,等.L415M钢级感应加热弯管过渡区管体的组织性能研究[J].热加工工艺,2016,45(16):175-178.

作者简介: 刘迎来(1964—),男,正高级工程师,主要从事油气输送管道工程用高强度弯管及管件新产品的研制开发、失效分析、技术支撑服务及重要输送管线现场事故处理等工作。

收稿日期: 2023-09-13

修改返回日期: 2024-03-15

编辑: 袁雪婷