

西气东输感应加热弯管工艺参数的研究*

余大涛** 李为卫 霍春勇 高惠临
(中国石油天然气集团公司管材研究所) (西安石油学院)

余大涛 李为卫等:西气东输感应加热弯管工艺参数的研究,油气储运,2003,22(11) 53~57。

摘 要 通过热模拟技术,研究了西气东输工程用 X70 钢级感应加热弯管在不同工艺过程中力学性能和组织结构的变化规律,评价了弯管的组织、性能特征,揭示了工艺—组织—性能间的关系,为弯管的生产提供了优化的工艺参数。研究表明,当加热温度为 950~1 050℃、冷却速度为 20~40℃/s、保温时间为 1 min、回火温度为 530℃时,生产出的弯管具有优良的性能,能够满足西气东输工程的需要。

主题词 西气东输 管道 弯管 工艺参数 研究

一、前 言

弯管是管道重要的管件之一,主要起到两方面的作用,一是根据需求改变管道的方向,例如穿越山坡、河流;二是结构力学作用,可以缓冲管道所在地域的地层迁移、地震以及外界环境温度变化等附加在直管上的拉、压应力和扭矩作用^[1,2]。西气东输工程需要大量的大口径、高强度、高韧性的 X70 钢级弯管,考虑到弯管的试制与试验价格十分昂贵,而且试验周期长,因而,本研究采用热模拟技术,以对西气东输感应加热弯管的工艺参数进行研究,可为大口径弯管的生产提供优化的工艺参数,该热模拟技术具有廉价、快速和准确的特点。

二、弯管试验过程

1、试验材料

试验材料采用日本新日铁公司为西气东输工程生产的 X70 级直缝埋弧焊(LSAW)焊管,规格为 1 016×21.0 mm。试验钢母材的化学成分见表 1,常规力学性能见表 2。

表 1 试验钢的化学成分

化学成分	含量 %	化学成分	含量 %
C	0.065 0	Ti	0.017 0
Si	0.180 0	Mo	0.020 0
Mn	1.530 0	Cr	0.022 0
P	0.010 0	Ni	0.068 0
S	0.003 5	W	0.010 0
Nb	0.046 0	B	0.000 6
V	0.006 0		

表 2 试验钢的力学性能

σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ %	σ_s/σ_b	冲击功 (J)
579	620	25	0.93	260

2、试验程序

试验过程包括两个阶段。第一阶段进行正交试验设计,即采用正交试验,对加热温度、推进速度、冷却速率、回火温度等多个工艺参数进行优选。第二阶段在正交设计的基础上,分别研究不同工艺参数对弯管组织和性能的影响规律。

(1) 正交试验 试验安排 4 个因素,每个因素进行 3 种水平的正交试验。 $L_9(3^4)$ 因素水平表见表 3, $L_9(3^4)$ 正交试验表和正交试验结果见表 4^[3]。

* 中国石油天然气集团公司资助项目,2001411—5。

** 710065,陕西省西安市电子 2 路东段 21 号;电话:(029)8726157。

表 3 正交试验因素与水平表

水平	加热温度 (°C)	冷却速率 (°C/s)	保温时间 (min)	回火温度 (°C)
1	950	10	2.0	500
2	1 000	15	1.5	530
3	1 050	20	1.0	560

表 4 L₉(3⁴) 正交试验表

编号	峰值 温度 (°C)	冷却 速率 (°C/s)	保温 时间 (min)	回火 温度 (°C)
1	950	10	2.0	500
2	950	15	1.5	530
3	950	20	1.0	560
4	1 000	10	1.5	560
5	1,000	15	1.0	500
6	1 000	20	2.0	530
7	1 050	10	1.0	530
8	1 050	15	2.0	560
9	1 050	20	1.5	500

试验值

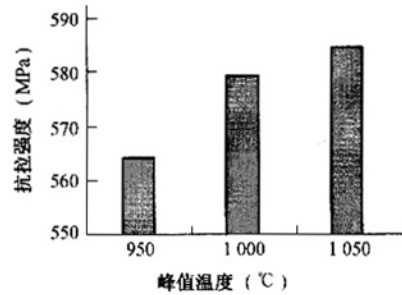
编号	试验值				冲击功 (J)
	σ_b (MPa)	σ_s (MPa)	σ_s/σ_b	δ %	
1	548	465	0.85	31	180
2	568	483	0.85	32	198
3	575	482	0.84	30	206
4	570	468	0.82	27	191
5	585	478	0.84	28	188
6	582	488	0.84	28	192
7	580	485	0.84	26	202
8	582	498	0.85	25	199
9	590	498	0.84	27	205

(2) 结果分析 对正交试验的结果进行分析,各因素对抗拉强度的影响见图 1。

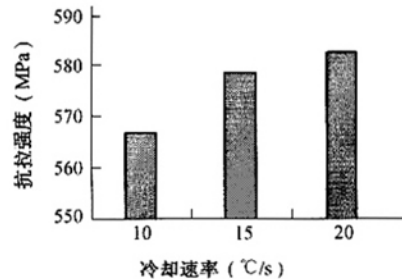
根据上述分析结果,将各工艺参数对抗拉强度的影响程度列于表 5^[3],对弯管屈服强度的影响程度列于表 6,对弯管冲击韧性的影响程度列于表 7。

表 5 工艺参数对抗拉强度的影响程度

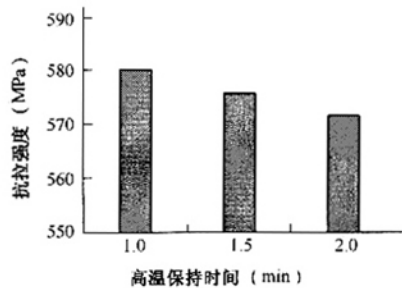
水平	加热温度 (°C)	冷却速率 (°C/s)	保温时间 (min)	回火温度 (°C)
K ₁	564	566	571	574
K ₂	579	578	576	577
K ₃	584	582	580	576



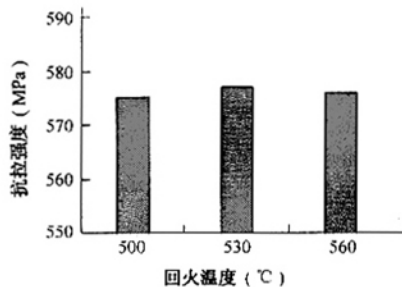
(a) 加热温度对试验结果的影响



(b) 冷却速率对试验结果的影响



(c) 高温保持时间对试验结果的影响



(d) 回火温度对试验结果的影响

图 1 各因素对抗拉强度的影响

表 6 工艺参数对弯管屈服强度的影响程度

水平	加热温度 (°C)	冷却速率 (°C/s)	保温时间 (min)	回火温度 (°C)
K ₁	477	473	484	484
K ₂	481	490	483	485
K ₃	494	490	485	483

表 7 工艺参数对弯管冲击韧性的影响程度

水平	加热温度 (°C)	冷却速率 (°C/s)	保温时间 (min)	回火温度 (°C)
K ₁	194	191	187	191
K ₂	187	195	198	194
K ₃	202	201	198	199

综合上述分析结果可见,加热温度和冷却速率对弯管的力学性能有显著的影响,其中加热温度的影响程度较为突出,保温时间和回火温度的影响程度依次减弱,其中回火温度对弯管的强度水平有较小的影响。同时可以看出,在本试验所选用的三种水平下,取得了最佳力学性能的工艺参数,见表 8。

表 8 优化组合的工艺参数

加热温度 (°C)	冷却速率 (°C/s)	保温时间 (min)	回火温度 (°C)
1 050	20	1.0	530

2、单因素试验

为探索感应加热弯管工艺、组织、性能之间的规律性,在正交试验的基础上,在更广泛的范围内改变加热温度、冷却速度、回火温度,从而深入研究这些工艺参数对弯管强度和韧性的影响。

(1) 加热温度—组织—性能的关系 研究了在 850~1 200°C 范围内不同加热温度下,弯管强度、塑性和韧性的变化规律。弯管力学性能与加热温度的关系见图 2 和图 3。

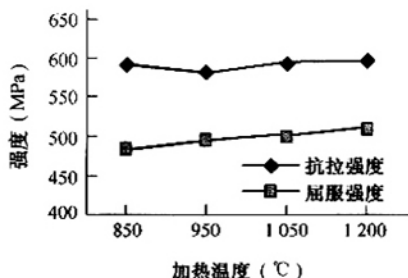
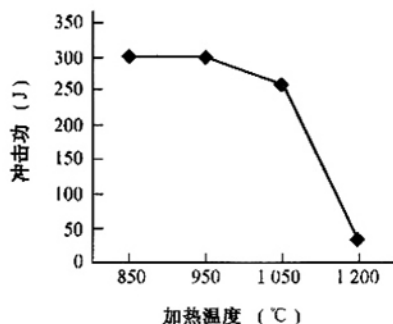
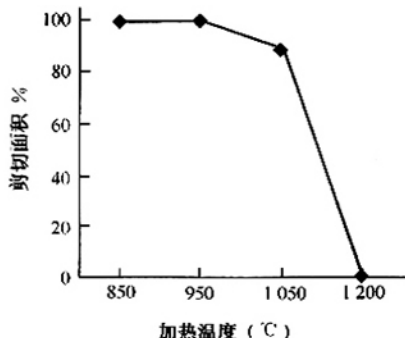


图 2 强度与加热温度的关系



(a) 冲击功与加热温度



(b) 剪切面积与加热温度

图 3 韧性与加热温度的关系

对不同加热温度下 X70 弯管的晶粒进行了测试,结果表明,随着加热温度的升高,X70 弯管的晶粒尺寸增加,晶粒尺寸对弯管的韧性比对强度有更大的影响,这与通常的结论一致,见表 9。

表 9 不同加热温度下的晶粒度

加热温度 (°C)	晶粒度	加热温度 (°C)	晶粒度
850	11	1 050	6
950	9	1 200	4

显微分析结果表明,X70 弯管力学性能的变化与在不同加热温度下材料显微组织的变化紧密相关。随着加热温度的增加,X70 弯管的显微组织发生明显的变化。相变动力学表明,奥氏体晶粒尺寸对冷却后的相变产物有重要影响,奥氏体晶粒越粗大,其稳定性越高,冷却后形成的非扩散产物也越多。同时,高温下合金元素的充分溶解,有利于提高过冷奥氏体的稳定性,也有利于针状铁素体等非平衡组织的形成。当加热温度较低时,X70 弯管的组织形态为珠光体和多边形铁素体。当加热温度为 950~1 050°C 时,X70 弯管的基本组织形态为针状

铁素体(或粒状贝氏体),同时,随着奥氏体化温度的提高,增加了Nb、V、Ti的碳氮化合物的溶解,有利于微合金元素的沉淀强化作用,因而赋予材料良好的强韧配合^[4,5]。一旦加热温度接近1200℃,不仅晶粒尺寸增加,而且出现由晶界出发生长的粗大上贝氏体和马氏体组织,引起材料韧性的恶化。

(2)冷却速度—组织—性能的关系 研究了在5~40℃/s冷却速度下,X70弯管强度、塑性和韧性的变化规律,测试结果见图4和图5。

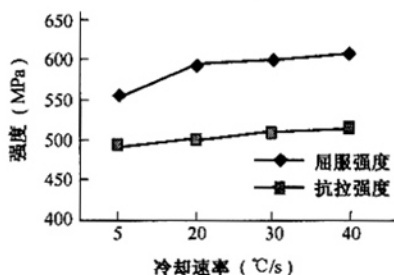
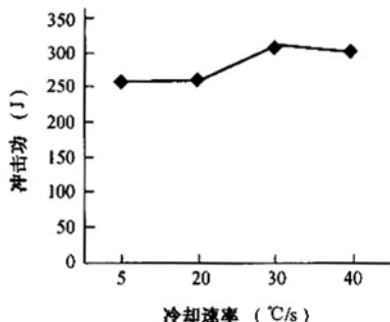
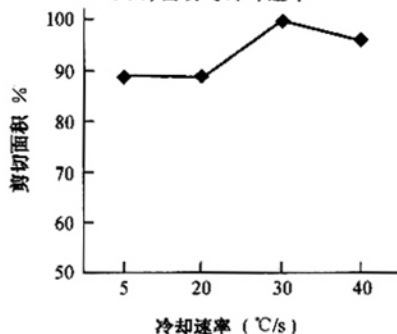


图4 强度与冷却速率的关系



(a)冲击功与冷却速率



(b)剪切面积与冷却速率

图5 韧性与冷却速率的关系

上述试验结果表明,当冷却速度较低(5℃/s)时,X70弯管的拉伸性能(如 σ_s)低于西气东输工程

感应加热弯管的技术要求。以30~40℃/s的冷却速率,可使X70弯管获得较好的强韧水平。

显微组织分析结果表明,当冷却速率较低时,X70弯管的主体组织为珠光体和多边形铁素体。随着冷却速率的增加, γ - α 相变温度降低,从而促进了针状铁素体的形成,由于针状铁素体形成过程中的过饱和固溶、细小的亚结构和多位向析出形态,因而赋予X70弯管良好的强韧特性^[4]。

(3)回火温度—组织—性能的关系 研究了450~600℃回火温度下,X70弯管强度、塑性和韧性的变化规律。X70弯管力学性能与回火温度的关系见图6和图7。

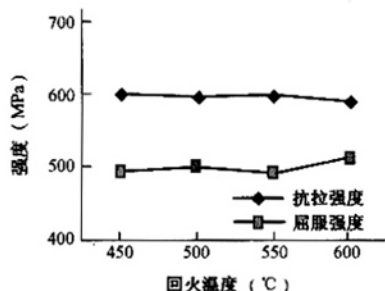
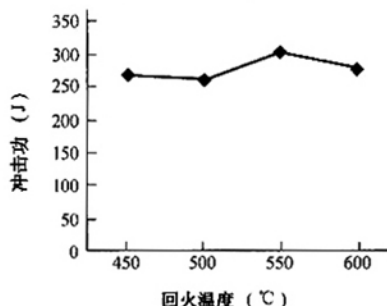
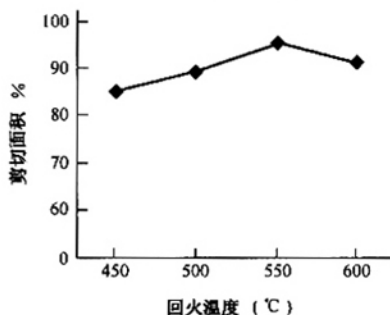


图6 强度与回火温度的关系



(a)冲击功与回火温度



(b)剪切面积与回火温度

图7 韧性与回火温度的关系

上述试验结果与正交试验结果基本一致,即 X70 弯管弯曲段在经受不同温度的回火后,其拉伸性能和冲击韧性变化较小。仔细分析测试结果可以发现,在 530~550℃ 区间回火, X70 弯管有较好的强韧配合。

三、结 论

通过对西气东输工程 X70 感应加热弯管的试验和研究,得到如下结论。

(1) 本正交试验推荐的 X70 弯管工艺参数分别为,加热温度为 1 050℃,冷却温度为 20℃/s,推进速度为 30 mm/min,回火温度为 530℃。

(2) 随加热温度的升高,弯管的一般趋势是强度增加,韧性降低。当加热温度处于 $A_{C1} \sim A_{C3}$ 范围时(如 850℃), X70 弯管的拉伸性能低于西气东输工程感应加热弯管的技术要求。当加热温度达到 1 200℃ 时,由于晶粒长大,弯管的韧性水平降低,低于弯管韧性的标准要求。当加热温度在 950~1 050℃ 时, X70 弯管可获得较好的强韧水平。

(3) 随冷却温度的增加, X70 弯管的强韧性增

加。当冷却速率为 30~40℃/s 时, X70 弯管可获得较好的强韧水平。

(4) X70 弯管弯曲段在经受不同温度的回火后,其拉伸性能和冲击韧性变化幅度较小。当回火温度在 530~550℃ 时,弯曲段有较好的强韧配合。

(5) 弯管在加工过程中的推进速度对性能有一定的影响,随推进速度的提高,弯管的强韧水平提高,当推进速度为 30 mm/min 时,可得到较好的强韧水平。

参 考 文 献

1. 刘迎来:石油管工程应用基础研究论文集,石油工业出版社(北京),2001。
2. 刘迎来等译:感应加热弯管技术的发展现状,石油专用管,1999(4)。
3. 庄楚强 吴亚森编:应用数理统计基础,华南理工大学出版社(广州),1992。
4. 王茂堂等:用控轧钢管制弯管,油气储运,1998,17(9)。
5. 高惠临编著:管道钢—组织、性能、焊接行为,陕西科学技术出版社(西安),1995。

(收稿日期:2002-12-24)

编辑:孟凡强

(上接第 31 页)

用较少的方案,而且工程设计最终设计方案只能选择一个,所以在此问题中采用最大隶属度法,取与最大的评判指标相对应的各择元素为评判结果,即所选择的设计方案。由排序结果可以看出,评判指标最大的为 3 号方案,选择 3 号设计方案为最优方案;次要方案为 2 号方案,与文献[2]得到的结果相同。优选设计方案 3 主要参数为,管子规格为 $\phi 478 \times 6$ mm,输气压力为 5.88 MPa,不建压气首站,建中间压气站 3 个,压缩比为 1.16,年折合费用为 36 890.89 元/(km·a)。由于采用了数学乘与数学和运算,设计方案的所有影响因素的信息没有丢失,可以全面反映设计方案的优劣。而且,由于考虑了权重的分配,对各影响因素既有所侧重又综合考虑,与灰色关联分析法相比,模糊决策法更能反映工程实际。

四、结 论

综合考虑工程设计的实际问题,采用模糊决策

方法,将影响设计方案选择的管径、输气压力、压缩比、压气站数及各投资运行费用等因素作为模糊量,并赋以不同的权重,通过模糊关系运算,得到评判各设计方案的评判指标。计算实例结果与采用灰色关联分析法得到的优选方案相符,说明采用模糊决策方法进行设计方案优选是可行的,可为天然气长输管道工程设计方案的首选提供新的理论根据和设计方法。

参 考 文 献

1. 刘 扬:石油工程优化设计理论及方法,石油工业出版社(北京),1994。
2. 李长俊主编:天然气管道输送,石油工业出版社(北京),2000。
3. 康正凌:复杂天然气管网系统工艺参数研究,西南石油学院油气储运工程硕士论文,1999。
4. 杨松林编著:工程模糊论方法及其应用,国防工业出版社(北京),1996。

(收稿日期:2002-12-20)

编辑:刘春阳