

正火温度对汇管用控轧钢组织及力学性能的影响

刘迎来 王高峰 聂向辉 许彦

中国石油集团石油管工程技术研究院, 陕西 西安 710077

摘 要:利用箱式加热炉,在实验室条件下模拟油气管道工程站场汇管在火焰加热成型时其支管附近材料受热的过程,以及X60、X70和X80钢级强度下4种组分的厚壁筒节材料在650℃回火后的控轧钢组织及力学性能的变化规律。结果表明:X60、X70和X80钢级强度下,4种组分的厚壁筒节材料在300~1050℃不同温度下加热保温再经650℃回火后,低于奥氏体加热温度下的组织呈回火贝氏体+少量铁素体组织形貌,在相变点以上加热,原材料组织则转变为粗化的铁素体加少量珠光体组织。加热后材料的屈服强度和硬度检测值随加热温度的递增呈先升再降后又升高的趋势;选取的材料在700~1000℃加热区间均存在一个强度低谷,屈服强度最小值较原材料实测值降低94~212 MPa,远达不到原材料强度水平;材料夏比冲击吸收能量随加热温度升高而降低,尽管-20℃检测结果仍能满足工程设计要求,但在高温区吸收能量值的离散性相对原材料明显增大。

关键词:控轧钢;汇管;金相组织;强度低谷;力学性能

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2015.05.019

0 前言

汇管是油气输送管道工程站场上用于汇集再分配介质的重要管道组件,由直管筒节、带支管筒节及封头等组成。基于汇管的支管成型方式不同,汇管的制造方式大体可分为三种:一是广泛用于低压管道的直管筒节加接管开孔补强焊接的组焊制造形式;二是直管筒节加热拔制三通组焊制造形式;三是选用厚壁钢管,通过局部加热,采用热挤压支管开口成型方法,直接拔制出支管^[1-2]的制造形式。第二种制造方式可在汇管环焊缝组焊前对单个元件根据设计力学性能的要求进行热处理,第三种制造方式相当于非连续加热,只能进行最终回火热处理。第二、三种制造方式规避了焊制汇管结构中筒节与支管相贯面处角焊缝的焊接施工及探伤检测方面的技术“瓶颈”问题,因而在管道工程中得到推广应用^[3]。当前,由于冶金和轧钢技术的不断提升,以Therm Mechanical Control Process(TMCP)控制轧制状态交货的超低碳微合金材料被大量

应用于汇管生产。汇管属于大型管道结构组件,综合质量不仅与原材料性能有关,也与制造工艺过程直接相关。据相关文献可知^[4-6],专用成分的TMCP控制轧制材料经淬火二次加热后,基本可保持原材料优良的综合性能,但正火加热后综合性能变化问题研究成果尚未公开报道。鉴于此,选用汇管用厚壁钢管进行正火加热温度对组织及力学性能影响规律的研究,以期能为重大工程建设用汇管的选材及制造工艺设计提供技术支持。

1 试验材料及方法

图1为热挤压拔制汇管支管现场形貌。采用直管筒节加热拔制支管开口,将厚壁钢管局部加热至 A_{c3} 点以上,采用热挤压拔制出支管开口,这种制造工艺使钢管受热很不均匀,加之厚壁钢管长度一般为10 m左右或更长,以及产品结构形状不规则,制造厂不具备对其进行淬火的热处理条件,通常只能以回火或消除应力热处理状态交货。

收稿日期:2015-06-23

基金项目:中国石油集团公司重大专项“第三代大输量天然气管道工程关键技术研究课题”(2012 E-2801-05)

作者简介:刘迎来(1964-),男,陕西宝鸡人,高级工程师,学士,主要从事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的处理等工作。



a) 支管口位置局部火焰加热



b) 筒体上热挤压拔制出的支管

图 1 热挤压拔制汇管支管现场形貌

1.1 试验材料

为确保试验结果更好地接近加热挤压拔制支管开口的汇管实际制造工艺,从利用直接局部加热拔制汇管支管的壁厚 43 mm X 80(1 号样)、40 mm X 70(2 号样)、

36 mm X 60(3 号样)及 45 mm X 60(4 号样)的 4 种直筒节上,分别取 300 mm × 280 mm(横向 × 纵向)的 8 块试块,其化学成分见表 1。

表 1 不同试验材料化学成分

试样	钢级强度	壁厚 /mm	化学成分 $w /(\%)$									
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	V
1 号	X 80	43	0.049	0.27	1.57	0.007	0.001 3	—	0.21	0.23	0.045	0.025
2 号	X 70	40	0.066	0.22	1.50	0.013	0.001 2	—	0.22	0.20	0.037	0.020
3 号	X 60	36	0.063	0.16	1.29	0.011	0.002 5	0.18	0.20	0.19	0.041	—
4 号	X 60	45	0.100	0.27	1.22	0.010	0.003 5	0.39	0.01	0.15	0.024	0.040

1.2 试验方法

1.2.1 热处理模拟试验

采用厚壁钢管筒节局部加热拔制汇管支管的热处理模拟试验:参考汇管成型典型工艺参数,在箱式电阻炉内,对 8 块试块分别加热到 300、500、600、700、900、950、1 000、1 050 °C,保温 55 min 后出炉空冷至室温,然后再加热到 650 °C 保温 100 min 后空冷至室温。

1.2.2 力学性能及金相分析

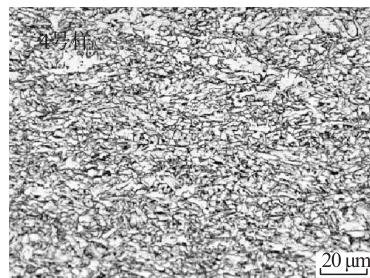
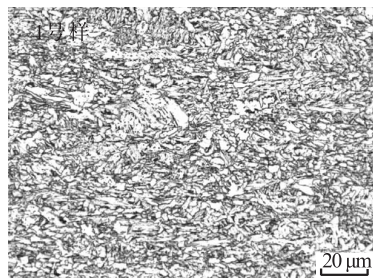
分别从筒节和热处理后的试块壁厚中心处,沿横向取直径 12.7 mm、标距长 50 mm 的圆棒状拉伸试样,在 UH-F 500 KNI 拉伸试验机上,依据 ASTM A 370-2012a《钢产品力学性能试验的标准试验方法和定义》进行拉伸试验;取 10 mm × 10 mm × 55 mm 的夏比 V 型缺口试样,在 ZBC 2752-B 冲击试验机上,按照 ASTM A 370-2012a《钢产品力学性能试验的标准试验方法和定义》进行 -30 °C 下的夏比冲击试验。从热处理前后的试样上分别取全壁厚金相分析样,采用 4% 硝酸酒精腐蚀后,在 Axiovert 405 M 型金相显微镜上观察其组织,对于原材料和 ≤700 °C 加热温度试样按照 GB/T 4335《低碳钢冷轧薄板铁素体晶粒度测定法》评定其晶粒度,对于 ≥900 °C 加热温度试样按照 GB/T 6394《金属平均晶粒度测定

法》评定其晶粒度。

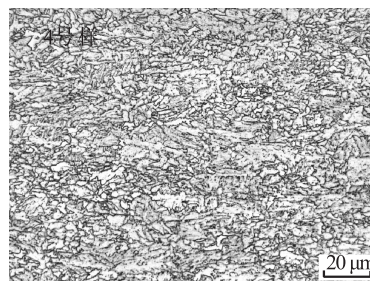
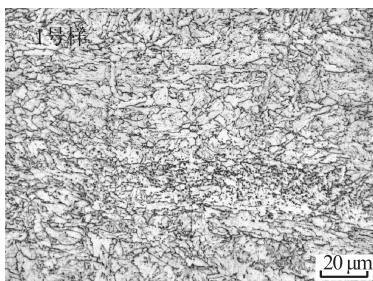
2 试验结果及分析

2.1 加热温度对显微组织的影响

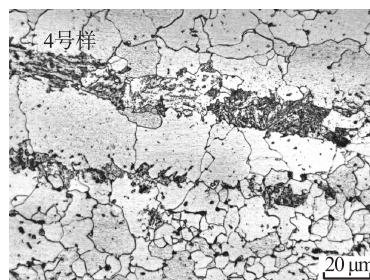
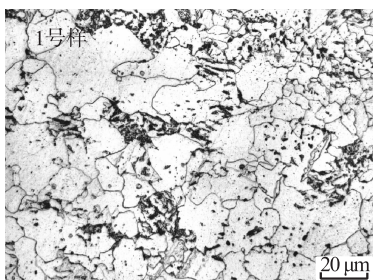
4 种直筒节为 TMCP 控轧状态,金相组织均为粒状贝氏体加少量多边铁素体和珠光体;铁素体晶粒度评定结果 1 号样、2 号样均为 11 级,3 号样为 11.6 级,4 号样为 10 级。在光镜下,对在不同加热温度下保温后空冷到室温,再经 650 °C 回火热处理后的试样进行分析发现,在 700 °C 及以下加热的试样,铁素体及晶界有析出物产生,基体组织和晶粒度无明显变化;当加热温度升高到 900 °C 后,以粒状贝氏体为主的细小控轧钢组织特征基本消失,转变为多边铁素体加少量珠光体组织,且铁素体组织以明显的混晶现象存在,在光镜下约三分之一多视域晶粒长大到了 7 级;当加热温度继续升高,铁素体组织有向块状铁素体转变的趋势,但晶粒长大趋于稳定,无继续粗化的现象。对 4 种组分的厚壁筒节材料在 1 050 °C 加热后的金相试样晶粒度评定结果也均为 7 级,这可能与试验材料中 Mo、V、Nb 等强碳化物形成元素所产生的析出物对奥氏体晶粒长大的抑制作用有关^[4-7]。图 2 为 1 号和 4 号样在各温度下的金相组织形貌。



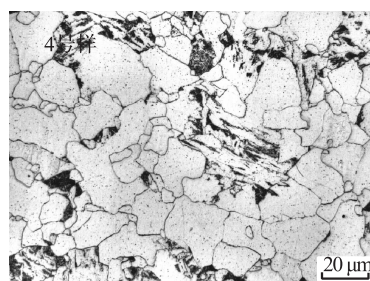
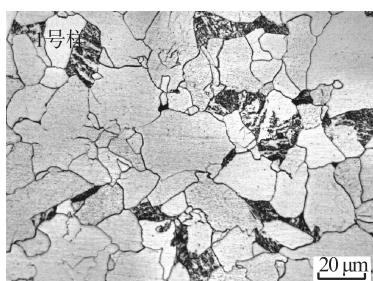
a) 原材料的金相组织



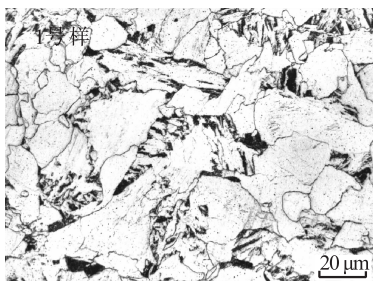
b) 700 °C 热处理后组织



c) 900 °C 热处理后组织



d) 1 000 °C 热处理后组织



e) 1 050 °C 热处理后组织

图 2 汇管用钢经不同温度加热,650 °C 回火后金相组织

2.2 加热温度对力学性能的影响

2.2.1 加热温度对抗拉强度的影响

加热温度对抗拉强度的影响见图3。图3中20℃所对应的抗拉强度为原材料测试值。在不低于500℃加热状态下,1号、2号和3号样材料抗拉强度变化不明显,但随着加热温度提高,抗拉强度呈先降后升趋势,且900~950℃达到最低值,其中1号样抗拉强度较原材料实测值减小194 MPa,2号样抗拉强度减小148 MPa,3号样抗拉强度减小155 MPa,4号样抗拉强度对温度很敏感,加热后强度明显降低,高温加热变化趋势与前3种试样相同,试验温度范围内抗拉强度最大降幅实测值达191 MPa。

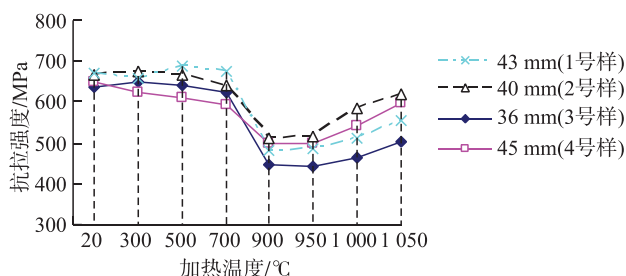


图3 加热温度对抗拉强度的影响

2.2.2 加热温度对屈服强度和硬度的影响

加热温度对屈服强度和硬度的影响见图4~5。4种组分的厚壁筒节材料为超低碳微合金钢,屈服强度在300~1050℃温度区间变化特征基本相同,屈服强度和硬度存在两个拐点,即在300℃加热保温后经650℃回火,相当于对材料进行了一次中温回火和一次高温回火,奥氏体中固溶的微量Nb、Mo和V等强碳化物形成元素会在贝氏体铁素体晶界或晶内以细小的碳化物或碳氮化物的形式弥散析出,产生沉淀强化作用,使强度升高。随加热温度升高,在高温回火状态下,由于铁素体晶界及晶内析出的碳化物或碳氮化物存在长大或粗化的趋势,一方面粗大的析出物使材料韧性下降,对组织的析出强化贡献作用逐渐降低,屈服强度、硬度测量值也呈下降趋势,这也是500℃加热样相比300℃强度下降的缘故^[8-9]。当加热温度700~900℃时,材料进入铁素体与奥氏体两相区温度范围,原TMCP控轧钢组织发生改变,形成部分再结晶组织,屈服强度随加热温度的提高不断减小,这一现象与Nb、Mo和V碳氮化物随加热温度递增,析出物减少、晶粒细化和沉淀强化减弱有关^[10]。加热温度升高到900℃以上时,金相组织全部奥氏体化,空冷后晶粒随加热温度的升高长大,屈服强度、硬度又开始递增,900℃两相区成为屈服强度最低点,1号样屈服强度下降94 MPa,2号样屈服强度下降161 MPa,3号样屈服强度下降212 MPa,4号样屈服强度下降191 MPa,原材料强度愈高,屈服强度下降愈大。当

加热温度至1050℃时,金相组织晶粒进一步长大,2号、3号、4号样的屈服强度、硬度快速升高,与原材料性能接近,但夏比冲击吸收能量值降到最小。

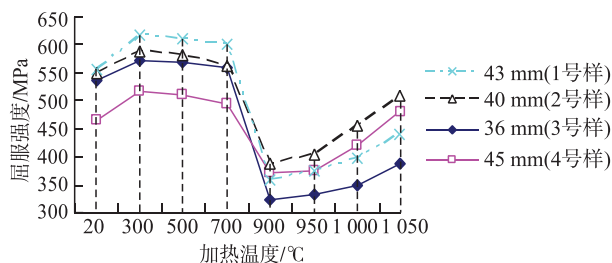


图4 加热温度对屈服强度的影响

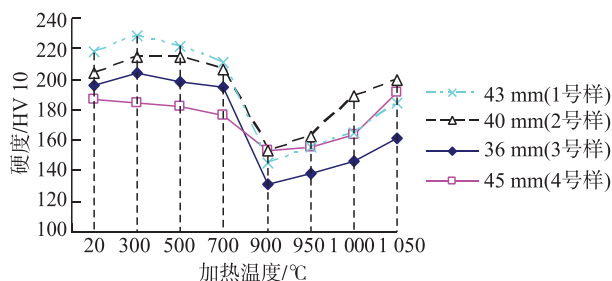


图5 加热温度对硬度的影响

2.3 加热温度对汇管支管附近性能的影响

加热温度对汇管支管附近性能的影响见图6。用筒节材料,借助火焰局部加热拔制汇管的支管开口,支管成型有效温度通常控制在850~1000℃,被加热部位裸露在环境下,火焰中金属最高温度很难精确测控,筒节支管周围金属温度变化范围很大,为满足支管成型需要,支管口温度必须加热到Ac₃点以上,远离该部位材料温度即环境温度。在这种工况环境下,据上述模拟试验结果可知,几乎不可能实现支管口附近材料强韧性指标完全受控,特别是汇管的支管及补强区材料,在其成型阶段的加热温度恰处于其强度随温度降幅最大的区间,且成型后受材料本身热加工特性和尺寸因素的限制,又不能进行汇管整体淬火热处理。显然,试验用厚壁筒节材料,在火焰加热条件下直接热挤压拔制支管,汇管的支管与筒节过渡区的材料性能较难控制。

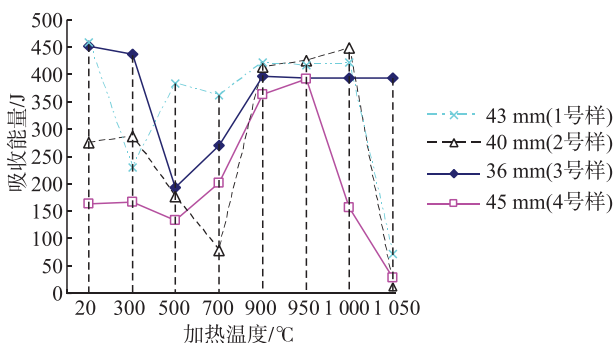


图6 加热温度对汇管支管附近性能的影响

3 结论

4种组分的厚壁筒节材料经不同温度加热空冷,再经650℃回火后,模拟试验样检测结果,性能存在一个低谷区,屈服强度的下降幅度与原材料强度有关,原材料强度等级愈高,下降数值愈大。

在箱式炉内,将控轧钢加热到850~1000℃,空冷至常温后,材料强度较原材料大幅度降低,试验结果反映了此类材料的热加工特性,由于该模拟试验条件与汇管具体制造工艺环境条件不一致,差别较大。为了充分了解汇管的支管开口综合性能,有必要对采用火焰加热挤压拔制支管制造工艺的汇管开展进一步的研究。

参考文献:

- [1] 张有渝,饶威,刘俊. 开口模压拔制高压汇管的设计与制造[J]. 天然气与石油,2007,25(6):33-35.
Zhang Youyu, Rao Wei, Liu Jun. Design and Manufacture of High Pressure Header with Mould Opening [J]. Natural Gas and Oil, 2007, 25 (6): 33-35.
- [2] 张有渝,叶卫江,孙国秀. 站场设备与管道组件的设计及制造[J]. 天然气与石油,2005,23(4):47-49.
Zhang Youyu, Ye Weijiang, Sun Guoxiu. Design and Manufacture of Station Equipment and Piping Components [J]. Natural Gas and Oil, 2005, 23 (4): 47-49.
- [3] 罗红梅,高庆春,刘发安,等. 开口模压拔制高压汇气管的安全设计[J]. 天然气工业,2009,29(11):120-123.
Luo Hongmei, Gao Qingchun, Li Fa'an, et al. Safety Design of High Pressure Header with Mould Opening [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29 (11): 120-123.
- [4] 刘迎来,池强,王鹏. 加热温度对X80弯管组织与性能的影响[J]. 金属热处理,2010,35(10):30-33.
Liu Yinglai, Chi Qiang, Wang Peng. Effect of Heating Temperature on Microstructure and Properties of X80 Steel Bends [J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35 (10): 30-33.
- [5] 张小立,冯强,刘迎来,等. 二次加热对高钢级管线钢韧性及其组织的影响[J]. 材料热处理学报,2008,29(6):66-69.
Zhang Xiaoli, Feng Qiang, Liu Yinglai, et al. Effect of Reheating on Toughness Index and Microstructure of High Grade Pipeline Steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29 (6): 66-69.
- [6] 赵春,霍春勇,虞毅,等. 高温变形对X70管线钢组织与性能的影响[J]. 机械工程材料,2008,32(5):84-85.
Zhao Chun, Huo Chunyong, Yu Yi, et al. Effect of Thermal Deformation on Microstructure & Properties of X70 Pipeline Steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 32 (5): 84-85.
- [7] 杨景红,刘清友,孙冬柏,等. 加热温度对微合金高强钢奥氏体组织及其再结晶的影响[J]. 钢铁研究学报,2009,21(3):37-41.
Yang Jinghong, Liu Qingyou, Sun Dongbai, et al. Effect of Heating Temperature on Microstructure and Recrystallation of Austenite in Nb-V-Ti Microalloyed High Strength Steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009, 21 (3): 37-41.
- [8] 马永杰,张光亮. TMCP工艺对Mn-Mo-Nb系针状铁素体钢的组织及力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2011,23(7):35-38.
Ma Yongjie, Zhang Guangliang. Effect of TMCP on Microstructure and Mechanical Properties for Mn-Mo-Nb Acicular Ferrite Steels [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23 (7): 35-38.
- [9] 李小宝. 回火温度对低碳高强贝氏体钢组织和性能的影响[D]. 沈阳:东北大学,2011.
Li Xiaobao. Effect of Tempering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon High Strength Bainitic Steel [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [10] 徐乃龙,王利,洪继要,等. 微合金碳氮化物析出行为及微合金钢性能研究[J]. 锻压技术,2014,39(5):121-125.
Xu Nailong, Wang Li, Hong Jiyao, et al. Study on Performance of Carbonitride Precipitation and Properties in Nb-Ti Microalloyed Steels [J]. Forging & Stamping Technology, 2014, 39 (5): 121-125.