

马氏体钢 40Cr10Si2Mo 线材表面裂纹原因分析和工艺改进

孙增森 邱永田 姜方 白李国 张荣兴 王刚

(邢台钢铁有限责任公司不锈钢公司, 邢台 054000)

摘要 40Cr10Si2Mo 钢 $\Phi 6.5$ mm 线材产品经过调质处理和矫直研磨后,发现磨光棒表面存在表面裂纹。通过进行 40Cr10Si2Mo 钢淬火回火模拟试验,得出造成 40Cr10Si2Mo 钢线材表面出现裂纹的原因为线材热轧后冷却时间短,冷却速度快,热轧线材表面存在较大的残余应力,从而形成表面裂纹。通过对 40Cr10Si2Mo 钢的生产工艺进行了优化改进,包括延长斯太尔摩辊道缓冷时间,终轧温度和吐丝温度由原来的 900 ~ 950 $^{\circ}\text{C}$ 和 850 ~ 900 $^{\circ}\text{C}$ 均调整为 800 ~ 850 $^{\circ}\text{C}$,线材轧制后 24 h 内退火,从而避免了 40Cr10Si2Mo 钢线材表面裂纹的产生。

关键词 马氏体气阀钢 40Cr10Si2Mo 应力裂纹 冷却工艺

Analysis on Surface Cracks of Martensitic Steel 40Cr10Si2Mo Wire and Process Improvement

Sun Zengmiao, Di Yongtian, Jiang Fang, Bai Ligu, Zhang Rongxing and Wang Gang
(Xingtai Iron and Steel Co., Ltd, Stainless Steel Company, Xingtai 054000)

Abstract After quenching and tempering, straightening and grinding, the surface cracks are found on the polished rod surface of steel 40Cr10Si2Mo $\Phi 6.5$ mm wire rod. Through the simulation test of quenching and tempering of steel 40Cr10Si2Mo, it is obtained that the reason for the surface crack of steel 40Cr10Si2Mo wire rod is the short cooling time after hot rolling, the cooling speed is fast, and there is a large residual stress on the surface of the hot rolled wire rod leading to form the surface crack. The production process of steel 40Cr10Si2Mo is optimized and improved, including prolonging Stelmo roller slow cooling time, adjusting the finishing rolling temperature and lay-off temperature from 900 ~ 950 $^{\circ}\text{C}$ and 850 ~ 900 $^{\circ}\text{C}$ to 800 ~ 850 $^{\circ}\text{C}$, and within 24 hours after rolling to anneal the wire, the surface crack of steel 40Cr10Si2Mo product has been avoided.

Material Index Martensitic Valve Steel, 40Cr10Si2Mo, Stress Crack, Cooling Process

40Cr10Si2Mo 钢是马氏体气阀钢、耐热钢的代表钢种主要用于生产汽车、摩托车、通用机械等发动机的进气阀,还可用于制作耐热紧固标准件。40Cr10Si2Mo 属于马氏体钢,热轧盘条具有较高的抗拉强度,一般通过退火热处理改善线材的组织 and 力学性能,加工后通过调质处理实现高硬度与韧性的结合,并具有一定的耐蚀性^[1-2]。

热处理炉的保护气氛控制不当造成表面裂纹^[3],表面缺陷不合格^[4]均导致表面产生裂纹。山东钢铁公司对马氏体气阀钢的冷加工生产工艺进行了分析,研究了盘圆表面质量、退火质量、拉拔变形量对冷拉加工的表面裂纹敏感性的影响^[5]。

邢台钢铁公司(下称邢钢)自开发生产马氏体气阀钢线材产品以来,有用户反馈 40Cr10Si2Mo 钢

$\Phi 6.5$ mm 规格线材产品经过调质处理后,并进行磨光棒表面质量检验时,发现磨光棒表面存在较多表面裂纹,对产品质量造成了较大影响。

1 试验材料及方法

邢钢 40Cr10Si2Mo 线材由 60 t AOD-LF 一步法铁水冶炼工艺,经 9 m 弧不锈钢连铸机生产成 150 mm 方连铸坯,再经 1 150 $^{\circ}\text{C}$ 加热,终轧 900 ~ 950 $^{\circ}\text{C}$,吐丝 850 ~ 900 $^{\circ}\text{C}$,24 h 内 900 $^{\circ}\text{C}$ 6 h 退火。试验材料即为邢钢 40Cr10Si2Mo 线材,其中磨光棒为用户反馈的 $\Phi 5.65$ mm 裂纹问题样品,调质态;退火态母材为邢钢 40Cr10Si2Mo 钢 $\Phi 6.5$ mm 其他批次的退火线材。

其中, $\Phi 5.65$ mm 磨光棒样品用于进行金相检

表 1 试验 40Cr10Si2Mo 钢化学成分 / %
Table 1 Chemical compositions of test steel 40Cr10Si2Mo / %

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
40Cr10Si2Mo	0.35 ~ 0.45	1.90 ~ 2.60	≤ 0.70	≤ 0.035	≤ 0.030	8.00 ~ 10.00	≤ 0.60	0.70 ~ 0.90	≤ 0.30
磨光棒	0.36	2.19	0.35	0.019	0.001	9.27	0.05	0.84	0.01
退火态母材	0.38	2.07	0.34	0.021	0.002	9.49	0.05	0.83	0.01

表 2 40Cr10Si2Mo 钢淬火回火模拟试验方案

Table 2 Simulated test scheme for quenching and tempering of steel 40Cr10Si2Mo

热处理工艺	温度 / $^{\circ}\text{C}$	保温时间 /h	冷却方式
淬火试验	1 050	1	水冷
回火试验	700	3	空冷
	750	3	空冷
	800	3	空冷

验分析; $\Phi 6.5$ mm 退火态母材用于进行淬火回火模拟试验,之后进行金相检验分析。

金相腐蚀剂:6% FeCl_3 溶液。具体试样的化学成分如表 1 所示。淬火回火模拟试验方案如表 2 所示。

2 试验结果

2.1 磨光棒样品检验

2.1.1 裂纹宏观观察

样品表面的裂纹呈断续的短裂纹或长裂纹,分布无明显规律,裂纹深度较深;由于样品经过了矫直研磨,裂纹形态整体呈沿纵向螺旋状,裂纹有截止端,表现出明显的应力释放特点。如图 1 所示。

2.1.2 裂纹检验

对 40Cr10Si2Mo 钢 $\Phi 5.65$ mm 磨光棒裂纹样品进行切割并制金相试样,观察其表面裂纹深度及形貌情况,如图 2 所示。

磨光棒表面裂纹深度较深,样品裂纹深度达 $694\ \mu\text{m}$,裂纹深度较深,开裂由外向内,垂直于线材横截面中心。

2.1.3 金相组织检验

对试样进行腐蚀后观察金相组织,盘条的退火组织正常,金相组织为回火索氏体,裂纹深处附近的组织有脱碳现象。

2.2 淬火回火模拟试验

邢钢生产 40Cr10Si2Mo 成品材的交货状态为退火态,而用户的加工工艺为:退火态母材-调质处理-矫直-研磨。因此,将线材淬水处理得到淬火裂纹。之后进行回火处理,并进行金相组织检验。

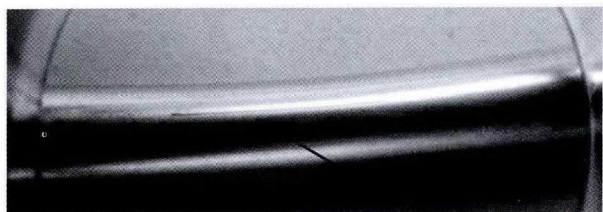


图 1 40Cr10Si2Mo 钢 $\Phi 6.5$ mm 线材表面裂纹宏观形貌
Fig. 1 Macro-morphology of surface cracks of steel 40Cr10Si2Mo $\Phi 6.5$ mm wire rod

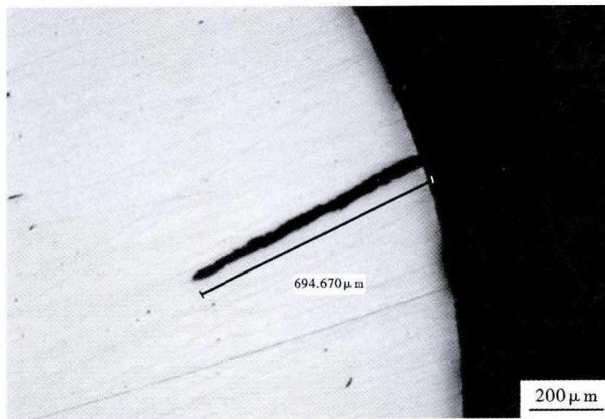


图 2 40Cr10Si2Mo 钢 $\Phi 5.65$ mm 磨光棒断面表面裂纹形貌
Fig. 2 Morphology of surface crack at $\Phi 5.65$ mm polishing rod section of steel 40Cr10Si2Mo

经淬火后得到的裂纹,裂纹垂直于线材横截面中心,由外向内扩展;金相组织为马氏体组织,裂纹附近未见脱碳现象。

淬火样品经 $700\ ^{\circ}\text{C}$ 和 $750\ ^{\circ}\text{C}$ 的 3 h 回火处理后,金相组织均为回火索氏体,裂纹附近未见脱碳现象。

淬火样品经 $800\ ^{\circ}\text{C}$ 的 3 h 回火处理后,金相组织为铁素体基体 + 小颗粒球状碳化物,碳化物的球化较为明显,已接近退火组织;同时,裂纹附近开始出现脱碳现象。

3 结果分析及工艺改进

3.1 表面裂纹特点

(1)宏观特点:样品表面的裂纹呈断续的短裂纹或长裂纹,分布无明显规律;由于样品经过了矫直研磨,裂纹形态整体呈沿纵向螺旋状,裂纹有截止端,表现出明显的应力释放特点。(2)问题试样的裂纹深度较深,开裂由外向内,垂直于线材横截面中心。(3)裂纹附近有脱碳现象。

而从完成的淬火回火模拟试验的分析检验结果看,淬火裂纹处经过回火处理,回火温度需要达到 $800\ ^{\circ}\text{C}$ 以上,裂纹附近才会产生脱碳现象。而用户的调质处理工艺的回火温度小于 $700\ ^{\circ}\text{C}$,因此,本次 40Cr10Si2Mo 产品的表面裂纹在退火态母材表面就已存在。

3.2 结果分析

研究表明^[6-7],4Cr13 线材轧后冷却较快时,沿其径向存在较大的温度梯度使沿径向各点应变增量的差值较大,从而在其内部产生较大的应力。当线材表面的拉应力超过材料的抗拉强度,便产生了表面裂纹。在线材轧后连续冷却至 $375\sim 590\ ^{\circ}\text{C}$,由于

850 ℃ 以下碳化物在晶界选择脱溶,易于形成开裂的源头,并且在继续深冷的过程中,裂纹易于沿晶界传播及发展。产生的纵向(轴向)裂纹主要是由切向拉应力造成的,沿轴向从表面向内部扩展,其走向与轴向平行。

结合 40Cr10Si2Mo 钢种特性,分析认为该裂纹为马氏体钢种线材在轧制后的冷却过程中冷却速度过快,产生的热应力、相变应力等综合作用所产生的应力裂纹。裂纹附近有脱碳现象,分析原因为 40Cr10Si2Mo 钢热轧线材的应力裂纹产生后,在后续退火过程中,退火温度较高,保温时间较长(900 ℃ 退火保温 6 h),从而产生脱碳现象^[8-10]。

3.3 工艺改进对比

轧制线材空冷段温度的控制主要包括吐丝温度的控制、斯太尔摩辊道的冷却速率及温度的控制等,而空冷段的温度及冷却速率也直接决定了线材后续的金相组织、力学性能等^[11-13]。

通过调查分析相关资料,钢材表面裂纹的问题批次均集中在一车间生产,与其他车间相比,一车间的线材斯太尔摩辊道的长度要短 1/3 左右,热轧线材生产后在辊道保温罩内的冷却时间大为缩短,冷却速度加快;同时,由于受轧线设备能力的影响,一车

间的终轧温度和吐丝温度设置均较高,热轧线材生产后的残余热应力更大;更大的残余热应力和相变应力综合作用在线材上释放导致线材表面开裂。

工艺改进前表面裂纹问题批次与改进后批次的工艺技术参数的对比分析,如表 3 所示。

经过工艺参数改进后,40Cr10Si2Mo 钢线材的终轧温度和吐丝温度均控制在 800 ~ 850 ℃,终轧温度和空冷段温度较之前要低 50 ~ 100 ℃。同时其他车间的斯太尔摩辊道较长,线材在缓冷辊道内以最低速度缓慢行进,在出辊道保温罩之前即已经完成了马氏体组织转变,最大限度地减少了残余热应力和相变应力对线材表面质量的影响。经检验,改进后的线材表面未发现开裂现象,退火后的组织为铁素体 + 球状碳化物,分布也比较均匀。

4 结论

(1) 由于 40Cr10Si2Mo 钢线材热轧后冷却过程中冷却速度过快,马氏体组织转变所产生的相变应力与热轧后残余热应力等相互作用,从而产生应力裂纹。

(2) 40Cr10Si2Mo 钢线材中温回火时无脱碳现象,在 800 ℃ 以上温度高温热处理时才开始出现脱碳现象;40Cr10Si2Mo 钢热轧线材应力裂纹产生后,在后续的高温退火过程中产生裂纹附近的脱碳现象。

(3) 通过改进 40Cr10Si2Mo 钢的轧钢工艺参数,降低终轧温度和吐丝温度至 800 ~ 850 ℃,延长斯太尔摩辊道缓冷时间,改进后的线材产品表面未发现裂纹现象,退火组织均匀,线材表面质量问题得到有效解决。

表 3 改进前后工艺参数对比

Table 3 Contrast of technological parameters before and after improvement

工艺	生产车间	斯太尔摩 辊道/m	辊道速度/ (m · s ⁻¹)	终轧温度/ ℃	吐丝温度/ ℃
改进前	一车间	80	起始段 0.12	900 ~ 950	850 ~ 900
改进后	其他车间	115	起始段 0.12	800 ~ 850	800 ~ 850

参考文献

- [1] 陆世英,张廷凯,杨长强. 不锈钢[M]. 北京:北京原子能出版社,1998:41-47.
- [2] 秦添艳. 内燃机气阀用钢的发展现状[J]. 上海金属,2011,33(2):50-52.
- [3] 李 芬,王飞华,莫东强,等. 5Cr8Si2 钢制气门裂纹分析[J]. 机电工程技术,2006,35(7):118-119.
- [4] 肖 彬. 马氏体气阀钢脆断理论在冷拔生产过程的应用[D]. 重庆:重庆大学,2009:2-5.
- [5] 王玲珑,王成龙. 马氏体气阀钢冷加工工艺探讨[J]. 河北冶金,2014(6):26-27.
- [6] 张彦文,王继辉,陈 宇. 4Cr13 钢棒热处理裂纹分析[J]. 金属热处理,2010,35(1):120-121.
- [7] 艾家和,董建新,胡尧和,等. 4Cr13 线材轧制后冷却速率对表面宏观应力和微观组织影响的研究[J]. 兵器材料科学与工程,2001,24(3):24-25.
- [8] 孙宝正. 2Cr13 轧材表面细微裂纹初步探讨[J]. 特钢通讯,1989,34:13-21.
- [9] 张 翔. 高碳钢 82B 线材的质量改进[J]. 轧钢,2001,18(4):21-22.
- [10] 孔祥华,唐 晋,孙瑞虹,等. SCM440 钢表面脱碳与开裂[J]. 材料热处理学报,2012,33(3):144-145.
- [11] 杨晓明. 钢帘线制品用线材生产一贯制探讨[J]. 轧钢,2012,29(5):47-49.
- [12] 丁 华,刘雅政,张立芬. 控冷工艺对 ER70S-6 钢相变和组织的影响[J]. 轧钢,2002,19(1):16-17.
- [13] 欧阳标. SWRH82B 线材控制冷却工艺分析[J]. 轧钢,2005,22(4):48-49.

孙增森(1986-),男,硕士(2015年北京科技大学),工程师,2008年北京科技大学(本科)毕业,400系马氏体不锈钢钢种开发。E-mail:414492438@qq.com

收稿日期:2020-04-16