

热轧 60Si2Mn 弹簧圆钢表面脱碳规律及控制

Decarbonization Distribution and Control on Hot Rolled 60Si2Mn Spring Round Steel

供稿|华望, 黄水华, 祝小冬 / HUA Wang, HUANG Shuihua, ZHU Xiaodong

内容导读

为改善热轧弹簧圆钢的表面脱碳质量,通过选取弹簧钢代表钢种之一的 60Si2Mn 钢,对热轧弹簧圆钢开展加热轧制实验,研究其表面脱碳层的分布规律。发现 60Si2Mn 热轧圆钢在其横截面的 4 个对角存在脱碳层较深区域,形成该规律的主要原因是方坯加热轧制过程中,方坯的角部接触火焰面积较大,同时存在一定的角部裂纹等缺陷,容易导致脱碳层加深。通过对方坯的角部进行倒角修磨处理使弹簧圆钢的表面脱碳质量得到有效改善。

弹簧是一种被广泛运用的机械元件,主要功能是吸收能量,减小设备各组件间的振动和冲击,发挥缓冲、支撑、密封、传力等作用。弹簧需要承受外界高频率的往复压缩运动,因此对其生产原材料弹簧钢的综合性能要求较高。高品质弹簧钢不仅要求具有高屈服强度和屈强比、较好的塑性和韧性、良好的加工性能和耐腐蚀性,还需要有良好的抗疲劳性能^[1]。由于弹簧钢碳含量较高,钢坯在高温条件下过热和过烧敏感性较大,容易出现严重的脱碳现象,脱碳会导致钢的硬度、表面耐磨性、抗疲劳性能、使用寿命、冲击韧性等机械性能明显降低。特别是弹簧钢表面出现铁素体全脱碳层时,可使弹簧的疲劳极限降低 50%,因此在生产过程中必须严格控制钢材表面的脱碳层^[2],中高碳钢表面脱碳层深度也是衡量该类产品质量的关键指标之一^[3]。

为了改善中高碳钢的表面脱碳问题,国内外进

行了大量的研究实验,主要集中在脱碳的产生机理和控制措施 2 个方面。一方面是脱碳产生机理,包括通过碳原子的扩散研究和模型建立,脱碳层与加热条件和轧制条件的定量关系研究^[4-5],得出加热温度、加热时间等因素对脱碳的影响。另一方面是脱碳的控制措施,主要包括防脱碳涂料的研制^[6],目前国内防脱碳涂料技术已经得到较广泛的运用,对于改善弹簧钢表面脱碳有一定效果。其主要原理是利用涂层材料在一定时间内吸收扩散到其中的氧,达到钢材本体不与氧接触而被氧化的目的,同时抑制弹簧钢表面的碳扩散,达到防止或减轻脱碳的目的^[7],部分实验研究显示防脱碳涂料可使 60Si2Mn 弹簧钢线材全脱碳层深度降低 60%^[8]。除防脱碳涂料研制外,加热炉智能控制技术^[9-10]也是一项控制措施,加热炉智能控制技术主要是通过自动控制技术实现加热温度、加热时间、燃烧氛围等参数的精确

控制,实现降低气耗和钢坯烧损的同时改善钢坯加热质量。但针对热轧弹簧圆钢表面脱碳的分布规律没有相关的研究。由于含 Si 弹簧钢中的 Si 和 C 元素含量较高,随着钢中 Si 元素的含量增加会加剧弹簧钢表面的脱碳缺陷,因此含 Si 弹簧钢的脱碳控制一直是热轧生产过程的一项技术难点。本文通过选取含 Si 弹簧钢代表钢种之一的 60Si2Mn 开展加热、轧制等实验,对热轧弹簧圆钢表面脱碳的分布规律开展相关研究,总结其分布规律并制定了相应改进措施。

实验材料及方法

实验工艺流程

实验在某钢厂的高速线材生产线进行,如图 1 所示,全线轧机配置为粗轧 6 架+中轧 6 架+预精轧 6 架+精轧 8 架+减定径 4 架。其中粗轧机组、中轧机组、预精轧机组分别由 6 架平立交替短应力

线轧机组成,均采用交流变频电机,可单独调速;中轧 11#至预精轧 18#轧机间设有立活套,可实现无张力无扭转轧制,保证线材进精轧的公差精度和表面质量,精轧由 8 架超重负荷“V”型 45°无扭转线材精轧机组和 4 架“V”型 45°线材减定径机组组成,采用的是摩根 6 代机型。精轧设备 8 架机组采用一台交流变频电机集体传动,通过增速箱传动机组;4 架减定径机组同样采用一台交流变频电机集体传动,采用椭圆-圆-圆-圆孔型系统,实现高速、单线、微张、无扭转轧制,保障产品尺寸公差精度。具体轧制工序工艺流程为:原料组坯→装炉→加热→出炉→高压水除磷→粗轧机组→1#飞剪(切头、事故碎断)→中轧机组→2#飞剪(切头切尾、事故碎断)→预精轧→水箱冷却→3#飞剪(切头、事故碎断)→精轧机组→水箱冷却→减定径机组→水箱冷却→吐丝机→风冷线→集卷筒→积放式悬挂输送机(P&F 链)运输→检验→包装→入库。

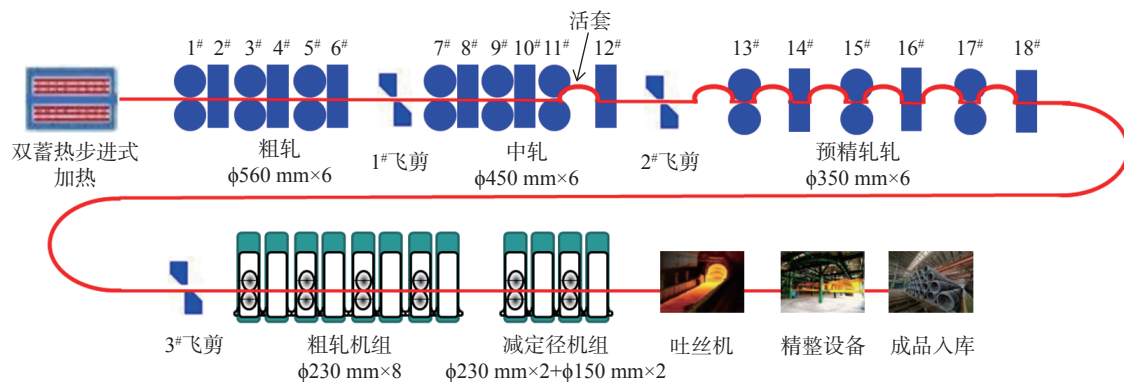


图 1 全线轧机配置示意图

实验选取的材料

实验材料采用钢坯牌号为 60Si2Mn,尺寸为 160 mm×160 mm 的方坯,其生产工艺流程为转炉→钢包精炼炉(LF)精炼→连铸→缓冷。钢坯的主要化学成分见表 1。

表 1 60Si2Mn 实验方坯的主要化学成分(质量分数) %

C	Si	Mn	Cr	P	S
0.600	1.580	0.840	0.040	0.010	0.004

加热实验方法

对脱碳层影响较大的加热工序采用的加热炉为侧进侧出燃气双蓄热步进梁式加热炉,加热炉的设

计生产能力为冷装 160 t/h,加热炉有效长度为 24.65 m,有效内宽为 12.8 m,炉筋管冷却方式为汽化冷却,燃烧介质为高炉煤气。加热过程将炼钢连铸坯料经缓冷后装钢入炉,在炉内各段温度包括加 1 段、加 2 段、均热段温度如表 2 所示。另外,为保障脱碳质量,加热过程空燃比(空气和煤气体积比)按 ≤ 0.6 进行控制,烟气残氧量(加热炉烟气的氧体积分数)按 $\leq 1.5\%$ 进行控制。

表 2 加热工艺

温度/°C			空燃比	烟气氧质量分数/%
加1段	加2段	均热段		
830~950	1020~1080	990~1050	≤ 0.6	≤ 1.5

轧制实验方法

将实验钢坯依次经过加热、粗轧、中轧、预精轧、精轧、减定径、风冷等工序轧成 $\phi 12$ mm 规格热轧盘条。轧制过程温度包括开轧温度、精轧温度、进减定径温度、吐丝温度，实验采用的温度参数如表 3 所示。

表 3 轧制工艺温度 $^{\circ}\text{C}$

钢种	开轧温度	进精轧温度	进减定径温度	吐丝温度
60Si2Mn	950 $\pm$ 30	890 $\pm$ 15	860 $\pm$ 20	810 $\pm$ 10

实验结果分析

对轧制后的 60Si2Mn 弹簧钢热轧盘条去除头尾带有轧制缺陷的部分，然后进行头尾取样并剪切加工成金相试样。对金相试样进行镶嵌、研磨、抛光后用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液侵蚀，使用徕卡显微镜 DMI5000M 对试样表面脱碳情况进行观察。采用 GB/T 224—2019《钢的脱碳层深度测定法》：在试样放大 100 倍下，以铁素体与其他组织组成物的相对量变化来区别，利用金相图像分析系统观察和定量测量从试样表面到未发生脱碳现象的区域之间的距离作为脱碳层深度，观察其脱碳层的

分布规律。在金相试样横截面上沿试样外圆圆周进行脱碳层深度检测，发现在弹簧圆钢金相试样横截面的 4 个对角存在脱碳层较深区域，如图 2 白色标记的对角 1、对角 2、对角 3、对角 4 区域，4 个对角区域外的其余区域脱碳层深度较浅，该规律在每个试样中均存在。



图 2 金相试样脱碳检测

4 个对角区域总脱碳层深度如图 3 所示。其总脱碳层深度为 0.12~0.90 mm，而非对角区域脱碳层深度如图 4 所示，其总脱碳层深度为 0.05~0.06 mm。

通过对热轧弹簧圆钢延横截面外圆圆周的脱碳层分布情况进行分析，可以发现在弹簧圆钢的 4 个

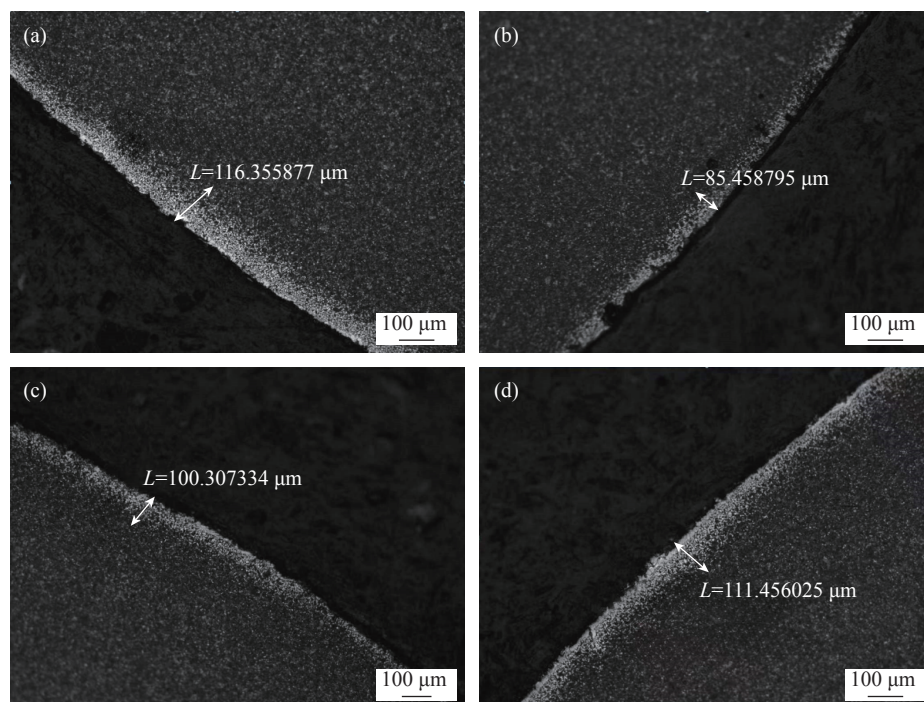


图 3 脱碳检测试样对角区域脱碳深度: (a) 对角 1; (b) 对角 2; (c) 对角 3; (d) 对角 4

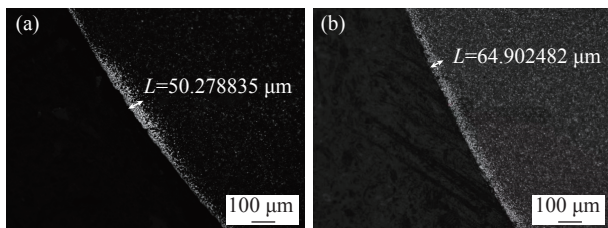


图4 随机选取脱碳检测试样非对角区域脱碳深度: (a) 区域1, (b) 区域2

对角存在脱碳层较深的区域。以本次实验选取的牌号为 60Si2Mn, $\phi 12$ mm 规格的弹簧圆钢为例, 其 4 个对角区域总脱碳层深度在 0.90~0.12 mm。参照国标 GB/T 33954—2017《淬火-回火弹簧钢丝用热轧盘条》中脱碳层的标准: $\phi 12$ mm 规格总脱碳层 ≤ 0.12 mm, 本次实验试样对角区域总脱碳层最大深度已达到弹簧钢丝用热轧盘条的脱碳质量标准上限, 存在一定的超标风险。而 4 个对角区域外的脱碳层深度较浅, 其总脱碳层深度在 0.05~0.06 mm, 可以满足弹簧钢丝用热轧盘条的脱碳质量标准要求, 并且富余量较大。从金相试样脱碳层检测结果可以看出: 对角区域的总脱碳层深度约为非对角区域总脱碳层深度的 2 倍, 对角区域的总脱碳层深度相对国家标准几乎无富余量, 而非对角区域的总脱碳层深度相对国家标准存在较大富余量, 如果能够消除对角区域的脱碳层较深的问题, 则可以大幅改善弹簧钢的脱碳质量。

改进措施制定

为消除弹簧圆钢热轧盘条表面 4 个对角区域的脱碳层较深问题, 对产生该现象的原因进行分析。发现弹簧圆钢热轧盘条是由方坯经加热、轧制加工而成。方坯存在 4 个角, 在加热过程中 4 个角部接触加热火焰和加热炉内高温气体的接触面积较方坯 4 个面的接触面积更大, 因此更容易出现脱碳现象; 同时方坯角部区域在炼钢连铸工序的生产过程中容易出现细微裂纹等钢坯的原始缺陷^[11-12], 也可能导致脱碳层加深。为验证该问题, 对钢坯进行倒角实验, 即通过钢坯倒角修磨消除方坯的四个角部。与非倒角钢坯进行脱碳的对比实验, 如图 5 所示。通过钢坯倒角消除钢坯棱角及角部缺陷后再轧制, 成品圆钢的表面 4 个对角区域脱碳较深的现象得到有

效改善和控制, 而非倒角钢坯轧制成圆钢后成品取样检测, 横截面外圆周的脱碳层分布情况仍然存在 4 个对角区域脱碳层较深的问题, 其中倒角钢标准 $\phi 12$ mm 规格表面总脱碳层平均深度为 0.04~0.06 mm, 而非倒角钢坯轧制后表面脱碳层最深仍为 0.09~0.12 mm, 如图 6 所示。



图5 倒角钢坯 (a) 与未倒角钢坯 (b)

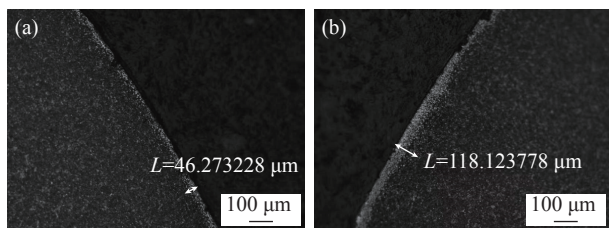


图6 轧制成品表面脱碳深度: (a) 倒角钢坯; (b) 未倒角钢坯

结束语

通过分析方坯加热轧制而成的 60Si2Mn 弹簧圆钢热轧盘条存在沿圆钢横截面外圆表面 4 个对角区域脱碳层较非对角区域更深的现象, 发现主要是由于方坯的 4 个角部相对钢坯 4 个面的其他区域在加热过程中接触火焰面积较大, 同时存在一定角部裂纹等缺陷, 导致脱碳更容易产生。通过对钢坯进行表面处理, 将炼钢连铸生产的方坯进行倒角修磨, 去除一定的棱角和角部缺陷部位, 改善弹簧钢热轧盘条四个对角区域脱碳层较非对角区域较深的问题, 从而使弹簧圆钢的表面脱碳质量得到有效改善和提高。

参考文献

- [1] 崔忠圻, 谭耀春. 金属学与热处理. 北京: 机械工业出版社,

- 2007
- [2] 蔡海燕, 张忠铎, 张弛. 60Si2Mn 弹簧钢表面脱碳的研究. 金属制品, 2005(3): 35
 - [3] 王友铭. 钢材的控制轧制和控制冷却. 北京: 冶金工业出版社, 1995
 - [4] 张鹏, 冯光纯. 60Si2Mn 弹簧钢的控轧控冷工艺. 特殊钢, 2001(2): 3
 - [5] 张艳军, 谭贝, 毛赞. 弹簧钢脱碳优化控制实践. 金属世界, 2019(6): 26
 - [6] 曹安然. 弹簧钢防高温氧化脱碳涂层的制备及性能研究 [学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2010
 - [7] 张小可, 林仁敢, 纪仁峰. 弹簧钢盘条脱碳质量改善生产实践. 宝钢技术, 2021(5): 74
 - [8] 杨兆全, 陈烨. 防脱碳涂料在 60Si2Mn 弹簧钢线材生产中的应用. 金属制品, 2018, 44(2): 15
 - [9] 陈南岳. 现代加热炉过程控制技术及其数学模型. 冶金自动化, 1985(3): 12
 - [10] 李鹏, 于现军, 黄元民, 等. 燃烧优化控制系统在步进加热炉上的应用. 金属世界, 2013(3): 83
 - [11] 段少平, 杨魁, 周详, 等. 连铸方坯角部裂纹分析和控制研究. 重型机械, 2022(5): 79
 - [12] 贾黎杰. 方坯铸坯角部裂纹原因分析及控制. 冶金与材料, 2022, 42(3): 141

作者简介: 华望 (1986—), 男, 江西省抚州市人, 轧钢工程师。2011 年毕业于东北大学材料加工工程专业, 主要研究方向: 热轧棒线材轧制工艺及产品质量控制。通信地址: 南昌市青山湖区冶金大道 560 号; E-mail: widiai741@163.com。