

冷拔 60Si2MnA 弹簧钢制簧过程的断裂分析

曹 杰 丁朝晖

(安徽工业大学冶金工程学院, 马鞍山 243002)

摘 要 $\Phi 11.8$ mm 冷拔 60Si2MnA 弹簧钢($\% : 0.58\text{C}, 1.77\text{Si}, 0.79\text{Mn}, 0.15\text{Cr}, 0.015\text{P}, 0.005\text{S}$)的生产流程为 80 t LD-LF-VD-热轧至 $\Phi 12$ mm 盘条-冷拔工艺。对卷簧时断裂弹簧进行金相、力学、组织分析表明,热轧材表面质量和冷拔后弹簧钢的力学性能良好,钢中存在 20 μm 以上大颗粒非金属夹杂和冷拉过程产生的表面划痕是卷簧时弹簧断裂的诱因;控制钢中大颗粒夹杂物产生和改善冷拔润滑避免拔制过程产生深的划痕,可防止断裂发生。

关键词 60Si2MnA 弹簧钢 卷簧断裂 夹杂物 表面质量

Analysis on Fracture of Cold Drawn Spring Steel 60Si2MnA During Spring Manufacturing

Cao Jie and Ding Zhaohui

(School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002)

Abstract The flowsheet of $\Phi 11.8$ mm cold drawn spring steel ($\% : 0.58\text{C}, 1.77\text{Si}, 0.79\text{Mn}, 0.15\text{Cr}, 0.015\text{P}, 0.005\text{S}$) is 80 t LD-LF-VD-hot rolled $\Phi 12$ mm coil-cold drawing process. The metallographic, mechanical and structural analyses on fracture of spring during coiling spring show that the surface quality of hot rolled products and mechanical properties of cold drawn spring steel are better; the large nonmetallic inclusions with size more than 20 μm in steel and the surface scratch during cold drawing process are causes of fracture of spring during coiling manufacture; the control of large inclusions produced in steel and the improvement of cold drawing lubrication process to avoid deep scratch are available to prevent occurrence of fracture.

Material Index Spring Steel 60Si2MnA, Fracture of Spring in Coiling Manufacturing, Inclusions, Surface Quality

60Si2Mn(A)是国内用途最广、产量最大的一个弹簧钢钢种^[1],在交通运输行业主要用于汽车、拖拉机的减震弹簧等。弹簧长期承受交变应力,因而疲劳断裂是其主要破坏形式^[2-3],而影响弹簧钢质量的重要因素是钢中非金属夹杂物和脱碳等表面缺陷^[4]。钢厂生产的 60Si2MnA 弹簧钢在制簧过程中出现了断裂。所生产的 60Si2MnA 钢化学成分($\%$)为 0.58C, 1.77Si, 0.79Mn, 0.15Cr, 0.015P, 0.005S。采用 80 t 氧气顶吹转炉和 LF-VD 精炼纯净化工艺冶炼,经高线轧机轧制成 $\Phi 12$ mm 盘条,拉拔一道至 $\Phi 11.8$ mm。其热轧工艺为开轧温度 ≤ 1000 $^{\circ}\text{C}$,终轧温度控制在 850 $^{\circ}\text{C}$ 左右,轧后在斯太尔摩冷却线上控冷,相变冷却速度 ≤ 2.0 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。整卷拉拔后再进行绕簧,在绕簧过程中出现断裂,断裂率为 4.1%,严重影响弹簧的生产和成材率。

1 试验与检测方法

为分析 60Si2MnA 弹簧钢绕簧发生断裂的原因,首先分析了绕簧时发生断裂的宏观断口,并对断口类型作出初步判断;然后检测绕簧用盘条的金相组织、表面质量和拉伸力学性能,研究分析热轧材的

产品质量,表面质量主要在光学显微镜下检查热轧材脱碳层的深度以及拉拔前后表面裂纹和划痕情况;随后在扫描电镜下观察断口中夹杂物存在的情况,并用能谱分析非金属夹杂物的化学成分。

2 试验与检测结果分析

2.1 宏观断口

60Si2MnA 弹簧钢绕簧发生断裂的宏观断口见图 1。可以看出,宏观断口断裂面清洁,金属晶粒较为粗糙,色泽为浅灰色,没有明显的韧窝。宏观断口形貌特征一般包括裂纹源区、裂纹快速扩展区和终断区^[5]。图 1 中断口的裂纹源区和裂纹扩展区均可以看到表征裂纹扩展方向的放射状条纹,根据断口放射状条纹的走向可以判断,裂纹起始于弹簧钢盘条弯曲方向的外表面。拉拔后的轧材在绕簧时发生弯曲,外表面承受的是拉伸应力,所以断裂先在弹簧钢盘条弯曲方向的外表面发生。由图 1 还可以看出,断口处及附件区域无塑性变形的特征,因此初步判断断裂属于脆性断裂。

2.2 表面质量与组织性能

利用盐酸溶液酸洗,去除轧材表面的氧化皮和

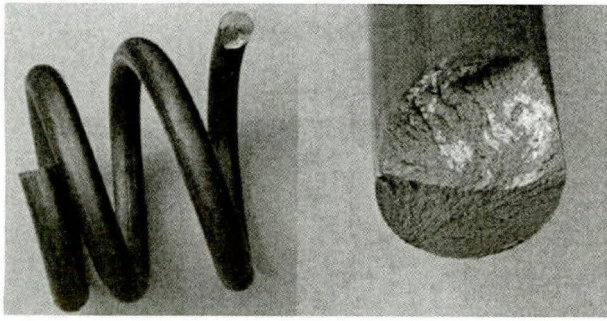


图1 60Si2MnA 弹簧钢宏观断口形貌

Fig. 1 Macro-morphology of spring steel 60Si2MnA fracture

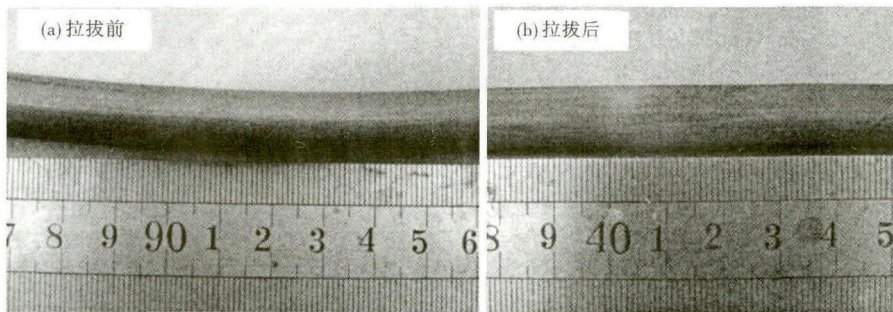


图2 60Si2MnA 弹簧钢的热轧材(a)和冷拔材(b)的外观质量

Fig. 2 Appearance quality of hot rolled rod (a) cold drawn rod (b) of spring steel 60Si2MnA

锈蚀物,轧材拉拔前后的外观质量见图2。在光学显微镜下观察表面裂纹和划痕情况以及脱碳层的深度,检测结果见图3。

对发生断裂的60Si2MnA 弹簧钢盘条进行了外观质量检查。检查未见热轧材明显外观缺陷(图2a),但热轧材经过拉拔后外观较为粗糙(图2b)。截取断口附近横截面,在光学显微镜下观察截面上脱碳以及表面裂纹和划痕情况,边部脱碳的组织为图3(a,b)中的白亮带。结果表明,所检测试样表面没有发现裂纹和严重的划伤缺陷,试样均存在不同程度的脱碳,表面没有全脱碳层组织,单边总脱碳层深度均在 $51.3\ \mu\text{m}$ 以下,即小于盘条直径的0.4%,低于标准2%的要求。热轧材内部典型金相组织为

少量铁素体加索氏体组织(图3c),所检测试样未见组织异常。从拉拔后盘条表面质量检测结果看,拉拔造成了轧材表面较多的划伤,虽然划伤不深,但有些比较尖锐。虽不能判断绕簧中的断裂与拉拔造成的划伤有直接关系,但可能诱发断裂。

为判断60Si2MnA 弹簧钢热轧材拉拔后的力学性能,测量了钢的拉伸力学性能。检测试样为发生卷簧断裂的同卷热轧材。拉伸检测结果表明,热轧材拉拔后的综合力学性能较好,试样断口呈杯形,钢的抗拉强度 $R_m = 1\ 049.0\ \text{MPa}$,屈服强度 $R_{p0.2} = 916.2\ \text{MPa}$,伸长率 $A = 13.9\%$,断面收缩率 $Z = 45.3\%$ 。为判断拉伸试样断口的类型,采用电镜对拉伸试样断口进行了扫描。电镜下观察到的断口形貌见图4。可以看出,拉伸试样断口上分布有较多和较深的韧窝,断口处发生了明显的塑性变形,因此拉伸试样断裂属韧性断裂。

以上检测结果表明,60Si2MnA 弹簧钢热轧盘条表面质量基本合格,内部金相组织正常,热轧材拉拔后综合力学性能较好,不至造成绕簧过程中的脆性断裂。但制簧过程中的拉拔工序会造成盘条表面较多的划伤,可能成为绕簧断裂的诱因。

2.3 断口夹杂物分析

所检测试样表面质量、内部金相组织以及力学性能基本正常,说明钢的轧制生产工艺基本正确。脱氧后钢中氧含量可达 10×10^{-6} 。但钢中的非金属夹杂物也有可能破坏金属的连续性,造成制簧过程中的断裂。制簧过程中未断处的拉伸试样断口如图4所示,断口中未见大尺寸非金属夹杂物。借助

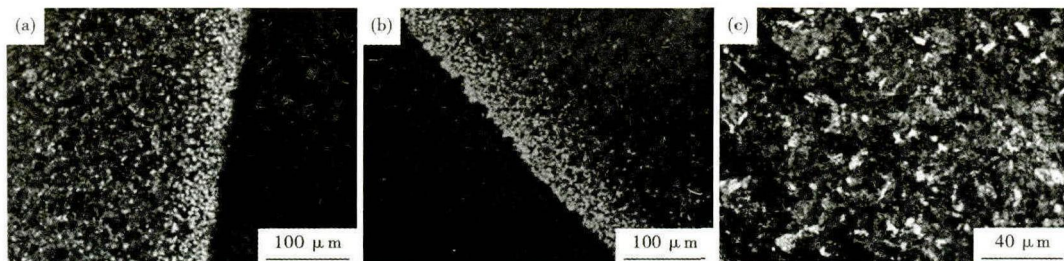


图3 60Si2MnA 弹簧钢(a)热轧材和(b)冷拔材的表面组织和(c)心部组织

Fig. 3 Surface structure of hot rolled rod (a) and surface (b), and central structure (c) of cold drawn rod, spring steel 60Si2MnA

扫描电镜对制簧过程发生断裂的断口进行观测,寻找非金属夹杂物。观测部位从靠近表面的裂纹源处开始,向其它方向移动。结果在裂纹源及附近区域找到了较大颗粒的非金属夹杂物,在扫描电镜下非金属夹杂物的形貌及能谱见图 5。

图 5 中的(a,b,c)非金属夹杂物分别来自不同断口。断口中非金属夹杂物的尺寸较大,其中夹杂物图 5(a,b)的尺寸超过了 $20\ \mu\text{m}$ 。断口中非金属夹杂物附近有明显的空洞存在。由此判断,断口裂纹源及附近区域的大颗粒脆性非金属夹杂物,在拉拔和绕簧的过程中,由于发生了变形,与周围金属基体分离,破坏了钢的连续性,造成了绕簧过程中的脆

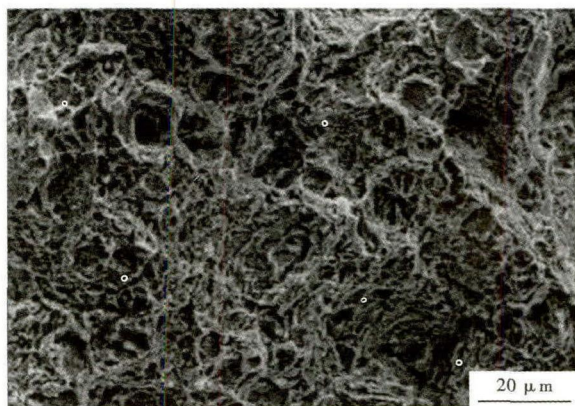


图 4 60Si2MnA 弹簧钢拉伸试样断口形貌
Fig. 4 Morphology of tensile fracture of spring steel 60Si2MnA

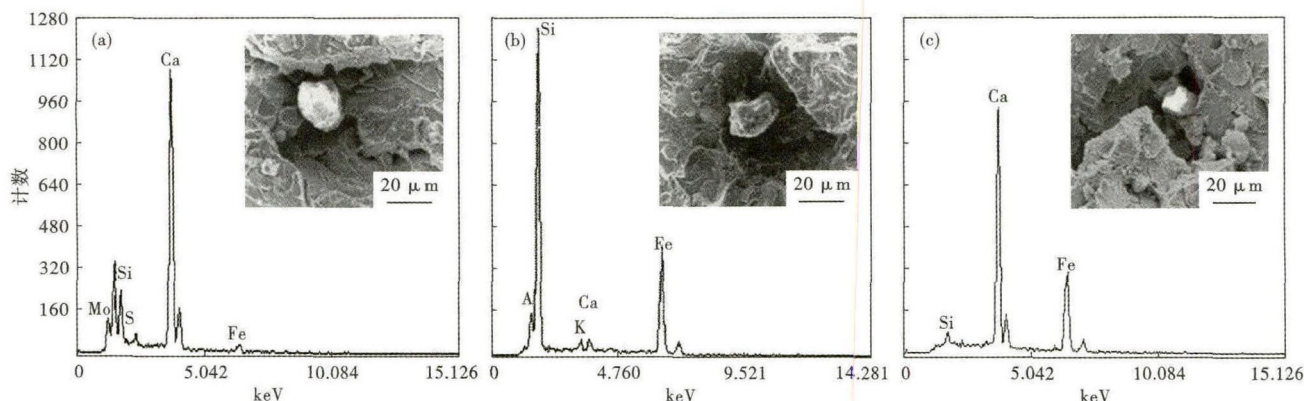


图 5 60Si2MnA 弹簧钢断口扫描及夹杂物能谱分析
Fig. 5 Morphology of inclusions in fracture and energy spectrum analysis, spring steel 60Si2MnA

性断裂。

为进一步确定 60Si2MnA 弹簧钢中非金属夹杂物的来源,对夹杂物进行了能谱分析。根据刘剑辉^[3]等人的研究结果,60Si2MnA 弹簧钢中夹杂物一般为 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系夹杂物,主要分为 2 类,一类是外面包裹有硫化钙的 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 夹杂物,一类是没有硫化物包裹的 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 夹杂物。从图 5 中的能谱分析可以看出,夹杂物的主要元素包括 Ca、Si、Mg、Al,此外还有 S 元素,可见此处检出的非金属夹杂物应是来自钢的冶炼过程。

3 结论

在拉拔和绕簧过程中,钢中脆性的大颗粒非金属夹杂物与周围金属基体之间分离,破坏了金属的连续性,造成了绕簧过程中的脆性断裂。引起 60Si2MnA 绕簧断裂的主要原因是钢中存在的 $\geq 20\ \mu\text{m}$ 的大尺寸非金属夹杂物,拉拔过程中产生的表面划痕为绕簧断裂的可能诱因。因此在钢的冶炼和

连铸环节要进一步控制非金属夹杂物的尺寸大小,在拉拔工序应注意防止产生过多过深的划痕。

安徽省自然科学基金项目资助(KJ2013A061)

参考文献

- [1] 王忠英,于桂玲. 60Si2Mn(A) 弹簧钢的脱氧工艺[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(2): 1-4.
- [2] 王 郢,李 宏,郭 佳,等. 超低氧弹簧钢 60Si2MnA 精炼过程夹杂物的研究[J]. 钢铁, 2008, 43(10): 29-33.
- [3] 刘剑辉,惠卫军,董 瀚,等. 超低氧弹簧钢 60Si2MnA 疲劳断口夹杂物来源研究[J]. 中国冶金, 2011, 21(12): 15-18.
- [4] 武建民,任江涛. 影响弹簧钢质量的要素分析[J]. 钢铁研究, 2011, 39(6): 30-34.
- [5] 赵 亮,李继康,董建新. 弹簧钢丝断裂原因分析[J]. 物理测试, 2011, 29(1): 30-33.

曹 杰(1971-),男,博士(北京科技大学),副教授,1994 年华东冶金学院(本科)毕业,钢的轧制工艺和组织性能研究。

收稿日期:2015-01-15