

SWRCH35K 钢盘条冷镦开裂分析与工艺改进

苏振伟, 赵 贇, 屠兴圻, 周 森, 左锦中, 林 俊, 万文华

(中天钢铁集团有限公司技术中心, 常州 213011)

摘 要 采用光学显微镜对 SWRCH35K 钢冷镦开裂样品和 $\Phi 12$ mm 热轧盘条进行高倍检验。分析表明,冷镦开裂原因为热轧盘条表面存在完全脱碳层,导致强度下降,致使表层基体受冷镦成型过程中应力作用产生开裂。通过将钢坯加热温度从原 $1\ 000 \sim 1\ 150$ $^{\circ}\text{C}$ 降至 $950 \sim 1\ 050$ $^{\circ}\text{C}$,空燃比控制在 $0.4 \sim 0.6$,总加热时间由原 $95 \sim 212$ min 降至 $95 \sim 158$ min,有效消除了 SWRCH35K 钢热轧盘条的完全脱碳层,避免了螺栓、螺母的冷镦开裂。

关键词 冷镦开裂 螺栓、螺母 SWRCH35K 钢 完全脱碳层 加热工艺

Analysis on SWRCH35K Steel Wire Rod Cold Heading Cracking and Process Optimization

SU Zhenwei, ZHAO Yun, TU Xingkuang, ZHOU Miao, ZUO Jinzhong, LIN Jun, WAN Wenhua
(Technology Center, Zenith Steel Group Co Ltd, Changzhou 213011)

Abstract The cold heading cracked samples and $\Phi 12$ mm hot-rolled wire rods of SWRCH35K steel are inspected by optical microscope. Analysis results show that the reason for cold heading cracking is full decarburized layer exist on the surface of hot-rolled wire rod, led to decrease of strength, resulting in stress cracking of the surface layer during the cold upsetting process. By decreasing billet heating temperature from original $1\ 000 \sim 1\ 150$ $^{\circ}\text{C}$ to $950 \sim 1\ 050$ $^{\circ}\text{C}$, controlling air-fuel ratio $0.4 \sim 0.6$, and decreasing billet total heating time from original $95 \sim 212$ min to $95 \sim 158$ min, the full decarburized layer of SWRCH35K steel hot-rolled wire rod is effectively eliminated, and the cold heading cracking in the production process of bolts and nuts is avoided.

Material Index Cold Heading Cracking, Bolts and Nuts, SWRCH35K Steel, Full Decarburized Layer, Heating Process

冷镦钢主要用于生产螺栓、螺母、螺钉、螺柱、铆钉、销钉等紧固件,广泛用于汽车、铁路、造船、电子、家电、建筑等行业。常见的紧固件按照其强度级别分为 4.8 ~ 12.9 级,其中,强度级别达到 8.8 级及以上的螺栓类产品或 8 级及以上的螺母类产品称为高强度紧固件。

SWRCH35K 钢是冷镦钢主流钢种,主要用于生产 8.8 级螺栓和 8 级螺母,产品方面以热轧盘条最为常用,采用的主要加工工艺包括球化退火、拉拔和冷镦成型。钢厂生产 SWRCH35K 钢热轧盘条的工艺流程为:高炉铁水-120 t 转炉-120 t LF 精炼-160 mm \times 160 mm 钢坯连铸-钢坯加热-高线轧制-斯太尔摩线控冷,SWRCH35K 钢的化学成分要求如表 1 所示。热轧盘条的脱碳层要求 $\leq 1\%$ D (D 为盘条公称直径),且无完全脱碳层。下游用户反馈采用 SWRCH35K 钢热轧盘条为原料,采用“盘条-球化退火-酸洗-磷化-拉拔-冷镦成型-调质热处理-表面处理”工艺流程生产 8.8 级螺栓和 8 级螺母,在冷镦成型后发现螺栓和螺母均出现了开裂现象,生产螺栓和螺母的冷镦开裂率都在 5% 左右。通过对开裂样

表 1 SWRCH35K 钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of SWRCH35K steel / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Al
企标	0.32 ~ 0.38	0.10 ~ 0.35	0.60 ~ 0.90	≤ 0.025	≤ 0.025	≥ 0.02
内控	0.33 ~ 0.37	0.12 ~ 0.18	0.75 ~ 0.85	≤ 0.020	≤ 0.020	0.03 ~ 0.04

品和热轧盘条进行检验分析,确定盘条表层存在完全脱碳层是造成冷镦钢开裂的原因。通过优化加热工艺,有效消除了 SWRCH35K 钢热轧盘条的完全脱碳现象,从而解决了螺栓、螺母冷镦开裂问题。

1 开裂样品检验

1.1 开裂螺栓和螺母

螺栓样品开裂位于头部,该位置是螺栓冷镦成型过程中变形量较大处,裂口为垂直形貌,而变形量较小的螺栓杆部未发现开裂,螺栓开裂样品及宏观形貌如图 1(a);螺母样品开裂位于法兰边缘处,该位置是螺母冷镦成型过程中变形量较大处,裂口也为垂直形貌,而变形量相对较小的螺母侧面未发现开裂,螺母开裂样品及宏观形貌如图 1(b)。

将螺栓、螺母开裂处横向切割后制样,在光学显微镜下进行高倍检验,发现螺栓和螺母金相组织都是球化组织,螺栓开裂深度 $22.54\mu\text{m}$,螺母开裂深度 $191.96\mu\text{m}$,开裂处均存在完全脱碳层,裂纹均为典型的穿晶开裂,如图2。

为进一步确认样品是否存在表面缺陷以及变形量较小处是否有开裂,分别在螺栓杆部和螺母侧面横向切割后制样,在光学显微镜下进行高倍检验。高倍条件下确认了螺栓杆部和螺母侧面均无开裂和表面缺陷,但同样发现两个样品表层金相组织都存在和开裂处同样的完全脱碳层。

1.2 盘条检测

为追溯完全脱碳层是否为原料上就存在,对加工螺栓和螺母的 SWRCH35K 钢热轧盘条横向切割后制样,采用光学显微镜进行金相检验。金相检验发现热轧盘条显微组织为铁素体+珠光体,盘条表层存在完全脱碳层,完全脱碳层深度 $26.64\mu\text{m}$,如图3。

2 开裂原因分析

冷镦开裂是冷镦钢加工紧固件过程中最常出现的问题之一,造成冷镦开裂的原因很多,主要包括表面缺陷、应力开裂和冷镦成型工艺三方面^[1-3]。表面缺陷通常是造成冷镦开裂的最主要原因,具体的缺陷类型包括折叠、裂纹、结疤、深划伤、冷态擦伤和撞伤等^[4];应力开裂,一般是由于塑性不足导致,具体的原因有球化等级低、晶粒粗大、混晶、拉拔减面率过大等^[5];冷镦成型工艺方面,主要是指成型过程和道次设计,以及成型模具的材质和安装等。

开裂螺栓和螺母样品均未发现表面缺陷,说明开裂不是表面缺陷造成。开裂螺栓和螺母样品金相组织为铁素体和球化珠光体,球化等级达到5级,球化效果较好,可以满足样品螺栓和螺母的正常冷镦

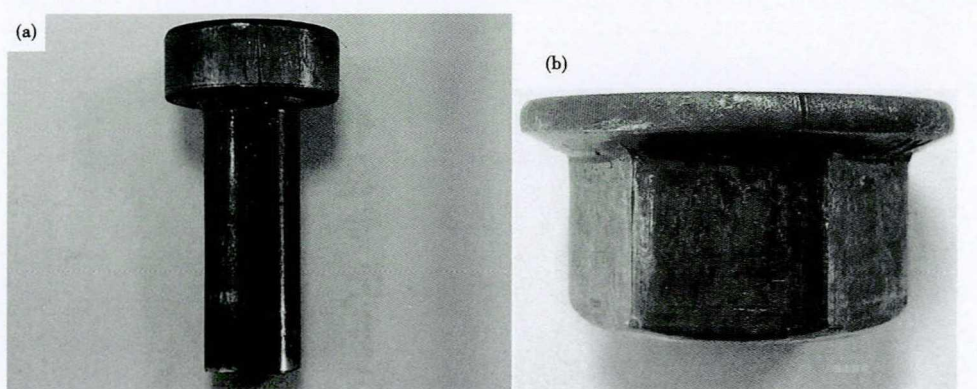


图1 开裂螺栓(a)和螺母(b)样品

Fig.1 Samples of cracked bolt (a) and nut (b)

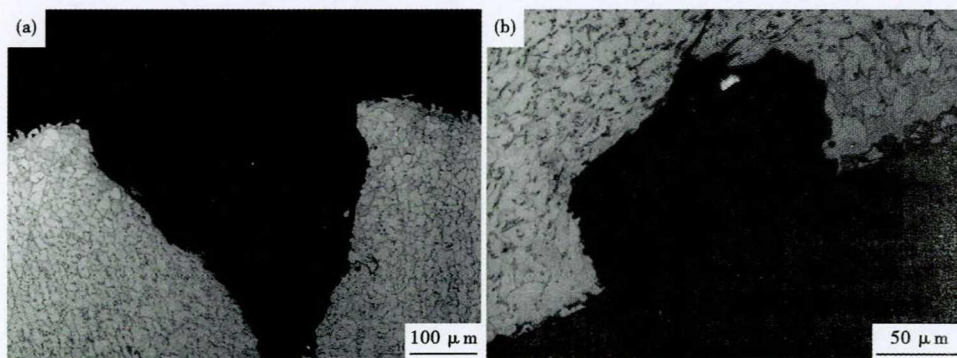


图2 螺栓(a) $\times 200$ 和螺母(b) $\times 500$ 穿晶开裂组织形貌

Fig.2 Transgranular cracking structure morphology of bolt (a) $\times 200$ and nut (b) $\times 500$

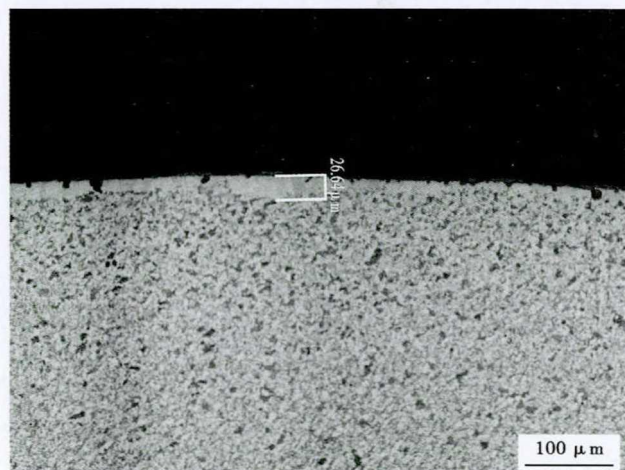


图3 SWRCH35K 钢 $\Phi 12\text{ mm}$ 热轧盘条完全脱碳层

Fig.3 Full decarbonization layer of SWRCH35K steel $\Phi 12\text{ mm}$ hot rolled coil

成型要求^[6]。样品金相检验未发现组织粗大或混晶现象,晶粒度方面也正常^[6]。用户加工工艺为:盘条($\Phi 12.0\text{ mm}$)-球化退火-酸洗、磷化-拉拔($\Phi 11.5\text{ mm}$)-冷镦成型-调质热处理-表面处理,盘

条经过球化退火后的冷拉拔减面率仅为 8% 左右,不会造成球化后材料塑性的明显下降。冷镦成型工艺方面,下游用户采用的成型过程和道次、成型模具均为成熟工艺,已使用多年,且生产样品螺栓和螺母的冷镦开裂率都在 5% 左右,可以排除冷镦成型工艺方面的问题。

螺栓开裂位于头部,螺母开裂位于法兰边缘,两种产品开裂处均为冷镦成型变形量较大的位置,而冷镦变形量较大的位置所受成型应力也相对较大。根据图 2 的检验结果,螺栓和螺母开裂处两侧均发现了明显的完全脱碳层,裂纹穿晶开裂,而完全脱碳层内的基体强度会显著下降,且开裂处又是受成型应力较大的地方,这是造成冷镦开裂的直接原因。对比图 3 的检验结果,虽然螺栓杆部和螺母侧面也有完全脱碳层,但由于受成型应力较小,并未出现开裂。热轧盘条上存在明显的完全脱碳层,这是造成螺栓和螺母冷镦开裂的根本原因。

SWRCH35K 钢热轧盘条的生产工艺流程为:高炉铁水-120 t 转炉-120 t LF 精炼-160 mm × 160 mm 钢坯连铸-钢坯加热-高线轧制-斯太尔摩线控冷,该工艺属于典型的“一火材”工艺流程,对 SWRCH35K 钢种来说连铸坯上不会产生完全脱碳,那么产生完全脱碳的工序应该主要在钢坯加热的工序。钢坯加热工序直接影响热轧盘条的脱碳,涉及的工艺参数包括加热温度、加热时间、空燃比和炉压等^[7],应该从加热工艺方面进行改进,以解决热轧盘条存在完全脱碳层的问题。

3 钢坯加热工艺改进及结果验证

3.1 工艺改进方案

为消除 SWRCH35K 钢热轧盘条完全脱碳层,对钢坯加热工艺进行了全面优化,其中加热温度方面,适当降低了加热温度,同时增加了空燃比要求,并对炉尾气体进行残氧监控;加热时间方面,适当缩短了总加热时间;炉压控制方面,要求加热全程采用微正压控制,以避免负压时加热炉倒吸空气影响空燃比^[8-11]。

在同一轧线上分别采用原工艺和改进工艺生产 10 个批号 $\Phi 12.0$ mm 规格 SWRCH35K 钢热轧盘条,加热工艺以外的其他工艺参数保持不变,每个批号随机抽取 2 个样品进行脱碳层检验并对比。原工艺与改进工艺参数如表 2 所示。

3.2 结果验证

取原工艺和改进工艺生产的 $\Phi 12.0$ mm 规格

表 2 原工艺与改进工艺参数

Table 2 Original process and improved process parameters

方案	加热温度/℃	空燃比	总加热时间/min
原工艺	1 000 ~ 1 150	无要求	95 ~ 212
改进工艺	950 ~ 1 050	0.4 ~ 0.6	95 ~ 158

SWRCH35K 钢热轧盘条样品,利用光学显微镜进行脱碳检验,每种工艺检验 10 个批号,每个批号 2 个样品,共计 40 个样品。图 4 为原工艺及改进工艺生产盘条脱碳检验结果,主要针对是否存在完全脱碳层进行检验,同时检验总脱碳层深度辅助分析脱碳改善效果。由图 4 可知原工艺条件下 15% 盘条样品出现了完全脱碳层,而改进工艺生产的盘条样品未发现完全脱碳现象。另外,原工艺生产的盘条总脱碳层深度在 0.07 ~ 0.11 mm,平均 0.09 mm;改进工艺生产的盘条总脱碳层深度在 0.05 ~ 0.08 mm,平均 0.07 mm,可见改进工艺可以有效的消除 SWRCH35K 钢热轧盘条完全脱碳现象,并且可以减少总脱碳层深度。采用原工艺和改进工艺生产的盘条样品脱碳形貌如图 5。

将改进工艺应用于 SWRCH35K 钢热轧盘条批量生产,样品检验未发现存在完全脱碳层,目前工艺参数已固化。采用改进工艺生产的 SWRCH35K 钢热轧盘条批量交付下游用户,使用相同的加工工艺生产同样的螺栓和螺母,均未出现因完全脱碳层造成的冷镦开裂。

4 结论

(1) 完全脱碳层会造成螺栓、螺母等紧固件加

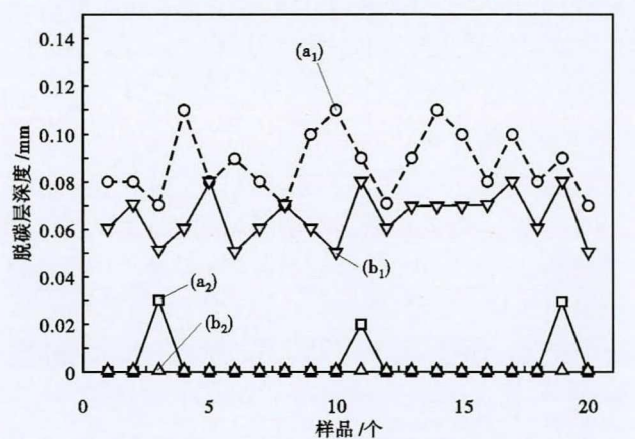


图 4 原工艺 (a₁) (a₂) 和改进工艺 (b₁) (b₂) 生产的 SWRCH35K 钢 $\Phi 12$ mm 盘条脱碳检验结果:(a₁) (b₁) 总脱碳层;(a₂) (b₂) 全脱碳层

Fig. 4 Decarburization test results of SWRCH35K steel $\Phi 12$ mm coil by original process (a₁) (a₂) and improved process (b₁) (b₂): (a₁) (b₁) total decarburization layer; (a₂) (b₂) full decarburization layer

工过程中出现冷镦开裂,其机理是完全脱碳导致基体强度下降,致使冷镦成型过程中受应力产生开裂,开裂发生在变形量较大位置,裂纹特征为穿晶开裂。

(2) SWRCH35K 钢盘条采用常规加热工艺易产生完全脱碳层现象,并且下游用户通过球化退火、酸洗、磷化、拉拔等加工后无法消除,最终导致冷镦开裂。

(3) 通过适当降低加热温度,增加空燃比要求,适当缩短加热时间,控制炉压为微正压,可有效消除 SWRCH35K 钢盘条完全脱碳层问题,并明显降低

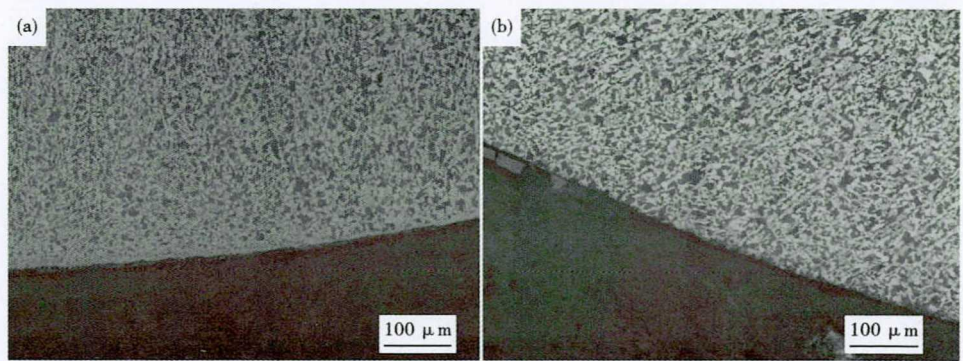


图5 原工艺(a)和改进工艺(b)生产的 SWRCH35K 钢 $\Phi 12$ mm 盘条脱碳形貌
Fig. 5 Morphology of decarburization of SWRCH35K steel $\Phi 12$ mm coil produced by original (a) and improved (b) processes

总脱碳层深度。经改进工艺固化后,批量生产的 SWRCH35K 钢盘条交付用户使用未出现因完全脱碳层造成的冷镦开裂。

参考文献

- [1] 沈德山,张先鸣. 汽车紧固件用冷镦线材的现状[J]. 金属制品,2009,35(3):33-36.
- [2] 和前进,潘金焕,姜钧普,等. 影响湘钢冷镦钢质量的主要因素[J]. 钢铁,2004,39(2):21-24.
- [3] 廖彪. 湘钢中碳冷镦钢盘条冷镦开裂研究[J]. 轧钢,2019,36(4):87-89.
- [4] 庞波,高秀华,邱春林,等. 影响冷镦钢质量因素的研究. 金属制品,2006,32(6):31-34.
- [5] 大野隆幸. 异形形钢の精密压延[J]. 塑性と加工,1993,34(384):69-74.
- [6] 介瑞华,李海,张洪彪,等. SWRCH35K 钢冷镦开裂分析和工艺优化[J]. 特殊钢,2017,37(6):45-48.
- [7] Sinha A K. Physical Metallurgy Handbook[M]. New York: McGraw-Hill,2003.
- [8] Mercier D and Decoopman X. Model to Determine the Depth of a Diffusion Layer by Normal Indentations to the Surface[J]. Surface & Coatings Technology,2008,34(13):47-52.
- [9] 陈银莉,左茂方,罗兆良,等. 60Si2Mn 弹簧钢表面脱碳理论及试验研究[J]. 材料热处理学报,2015,36(1):192-198.
- [10] 佟倩,张玮,柳洋波,等. 55SiCr 弹簧钢表面脱碳的研究[J]. 上海金属,2013,35(2):27-31.
- [11] 戴成珂,赵刚,徐耀文,等. 35CrMo 钢表面脱碳试验[J]. 钢铁,2016,51(7):60-65.

苏振伟(1987-),男,工程师,2015年安徽工业大学(本科)毕业,线材工艺和技术研究。E-mail:suzhenwei@zt.net.cn

收稿日期:2021-12-07