



夹送辊对大规格活塞杆用 S45C 线材表面组织的影响

宗 浩

(江阴兴澄特种钢铁有限公司二轧钢厂 江阴 214400)

摘 要:采用金相、冷镦等试验方法,研究优化高速线材轧制工艺中的夹送辊孔型系统和夹持压力,解决活塞杆用钢 S45C 表面组织粗大问题(影响材料疲劳强度与耐磨性)。分析表明,夹送辊孔型设计及轻重压参数设定不当导致钢表面局部应力集中,诱发组织粗大化。降低吐丝机夹送辊轻压和重压(降低 0.2 MPa)可明显降低产品表面应力,缓解表面组织粗大程度;夹送辊孔型优化,吐丝机夹送辊与红钢点接触优化为面接触,能够缓解夹持应力,配合降低夹送辊轻重压,解决活塞杆用钢 S45C 表面组织粗大问题;综上所述,最佳生产工艺为 B 孔型,重压 0.35 MPa,轻压 0.15 MPa。获得的组织为均匀的铁素体+珠光体,边部未有组织粗大问题。经客户验证,优化后活塞杆用钢 S45C 表面组织均匀性显著提升,满足高精度使用要求,为同类产品工艺改进提供了可靠路径。

关键词:高速线材夹送辊;组织粗大;孔型;轻重压;S45C 钢

DOI:10.20057/j.1003-8620.N250542 **中图分类号:**TG335.6-3

Influence of Pinch Rollers on the Surface Microstructure of S45C Wire Rod for Large-Sized Piston Rods

Zong Hao

(No.2 Rolling Steel Branch, Jiangyin Xingcheng Special Steel Co., Ltd., Jiangyin 214400, China)

Abstract: Using metallographic examination, cold heading, and other experimental methods, this study investigates the optimization of the pinch roll groove system and clamping pressure in high-speed wire rod rolling processes to address the issue of coarse surface microstructure in piston rod steel S45C, which affects material fatigue strength and wear resistance. Analysis indicates that improper design of the pinch roll groove and inappropriate light/heavy pressure parameter settings lead to localized stress concentration on the steel surface, inducing coarse microstructure. Reducing the light and heavy pressure of the laying head pinch roll by 0.2 MPa significantly decreases surface stress and mitigates the degree of coarse surface structure. Optimizing the pinch roll groove by changing the contact between the laying head pinch roll and the red steel from point contact to surface contact alleviates clamping stress. Combined with reduced pinch roll pressure, this approach effectively resolves the coarse surface microstructure issue in piston rod steel S45C. In summary, the optimal production process involves using groove B with a heavy pressure of 0.35 MPa and a light pressure of 0.15 MPa. The resulting microstructure is uniform ferrite and pearlite, with no coarse structure at the edges. Customer validation confirms that the optimized S45C piston rod steel exhibits significantly improved surface microstructure uniformity, meeting high-precision application requirements and providing a reliable pathway for process improvements in similar products.

Key Words : High Speed Wire Clamp Roller; Coarse Microstructure; Hole Type; Light and Heavy Pressure; S45C Steel

汽车活塞杆用钢早期多以普通碳素结构钢为主,虽成本低,但在高强度、高韧性及抗疲劳性能方面存在局限^[1-3];随着汽车工业对轻量化、高可靠性的需求提升,合金结构钢(如 40Cr、42CrMo 钢等)凭借更优的综合力学性能得到广泛应用;近年来,在成本控制与性能优化的双重驱动下,具有优异性价比的中碳优质碳素结构钢 S45C 逐渐成为主流选择。

S45C 钢广泛应用得益于其显著优势:其一,适中的 $w[C]$ (约 0.45%)经调质处理后,能有效平衡强度与韧性,满足活塞杆高周疲劳性能要求;其二,良

好的加工性能使其易于进行切削、磨削等精密加工,确保活塞杆表面光洁度与尺寸精度,为后续关键的表面热处理(提升耐磨耐蚀性)奠定基础;其三,相较于合金钢,其成本更低、工艺成熟、材料来源广泛,具备优异的经济性,契合汽车制造业大规模生产的成本控制原则^[4]。汽车活塞杆加工客户在验收过程中发现 S45C 钢基体组织存在组织粗大问题,在后续加工过程中造成活塞杆表面开裂等产品交付问题,黄俊文等^[5]通过降低加热温度和采用低温轧制方法解决组织粗大问题,但低温轧制对轧机

负荷产生较大影响,本研究通过夹送辊孔型优化和夹送辊压力调整解决S45C钢组织粗大的问题,为同类产品工艺改进提供了新的可靠路径。

1 试验材料及方法

本试验用S45C坯料其化学成分见表1,其制造工艺流程是通过150 t转炉→150 t精炼炉→150 t真空脱气→大方坯300 mm×350 mm连铸,坯料经过大棒粗轧机开坯成200 mm×200 mm的中间方坯,缓冷过后的坯料经过表面探伤+修磨后进行全剥皮,确保盘条轧制前的坯料表面无缺陷。

S45C钢坯料经特殊钢线材分厂试验轧制成 $\phi 24.5$ mm的盘条。盘条的轧制工艺路径为:坯料-修磨-加热-高压水除鳞-粗轧-中轧-预精轧-减定径-吐丝-斯太尔摩冷却。为了研究线材夹送辊孔型和压力对钢的组织影响,确保夹送辊辊径、压缩机功率、吐丝和控冷参数相同,单一变量保证试验准确性。具体试验参数见表2,每个工艺轧制3卷盘条,对轧制后的成品盘条进行取样,观察金相组织形貌;将取的整圈盘条进行酸洗,观察不同线材夹送辊孔型对线材表面质量影响特点。

2 试验结果

2.1 组织粗大产生原理及影响

S45C钢的奥氏体再结晶温度在900~950℃,生产线材产品时,为了保证吐丝机顺利吐丝集卷采用夹送辊夹送引导,保证钢的表面氧化铁皮和降低划伤,采用中温吐丝。生产S45C产品时,使用夹送辊夹持将红钢顺利送到吐丝机进行吐丝,夹送辊

($\phi 330$ mm)夹持在红钢表面形成夹持应力产生小变形,小变形储能不足,无法驱动奥氏体动态/静态再结晶,粗大原始晶粒保留^[5-7],吐丝温度为880~900℃,边部温降快+小变形,温度低于再结晶临界点进一步阻碍晶粒细化,未再结晶的粗大奥氏体冷却相变时,珠光体沿原晶界稀疏形核并长大^[8-10],综合以上因素形成边部组织粗大现象。图1为夹送辊原A孔型、优化B孔型、优化C孔型;

2.2 表面质量影响

每个工艺在盘卷头尾剪切10圈后头尾各取一整圈盘条,等分剪成8段使用盐酸溶液酸洗去除表面氧化铁皮,观察不同线材夹送辊孔型对线材表面质量的影响规律,结果表明,原A孔型夹送辊生产盘条表面存在明显的夹痕,并且成四角分布,夹痕深度约为0.02~0.03 mm,如图2(a)所示;优化B孔型与盘条基圆相近,孔型基圆与红钢表面平滑过渡,未发现表面存在明显夹痕,表面光洁,如图2(b)所示;优化C孔型包裹度较大(孔型弧长与盘条周长的比值),受张力影响,热轧红钢在夹送辊孔型内抖动时,造成红钢表面与夹送辊孔型内壁频繁撞击,造成盘条花斑,深度为0.01~0.02 mm,如图2(c)所示,故针对盘条表面质量选取优化夹送辊B孔型。

2.3 盘条金相组织

每个工艺在盘卷头尾剪切10圈后头尾各取1段样,经过切割、磨削、砂纸打磨、抛光后,用4%硝酸酒精混合溶液腐蚀后进行金相组织观察组织形貌。结果显示,原工艺生产盘条进行组织表面存在明显组织粗大现象,呈对称分布,深度为0.50~

表1 S45C钢化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of S45C steel

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ti
标准范围	0.42~0.50	0.15~0.38	0.60~0.95	≤0.030	≤0.035	≤0.20	0.02~0.06	≤0.06
实际值	0.46	0.31	0.80	0.009	0.005	0.07	0.035	0.03

表2 S45C钢 $\phi 24.5$ mm盘条试验工艺参数
Table 2 Test process parameters for S45C steel $\phi 24.5$ mm wire rod

工艺方案	夹送辊孔型	重压/ MPa	轻压/ MPa	加热温度/℃	吐丝 温度/℃	辊道速度/(m·s ⁻¹)	保温罩数量/个
原工艺	原A孔型	0.65	0.30				
工艺1	原A孔型	0.35	0.15				
工艺2	优化B孔型	0.65	0.30	1 120	880~900	0.30	4
工艺3	优化B孔型	0.35	0.15				
工艺4	优化C孔型	0.65	0.30				
工艺5	优化C孔型	3.50	1.50				

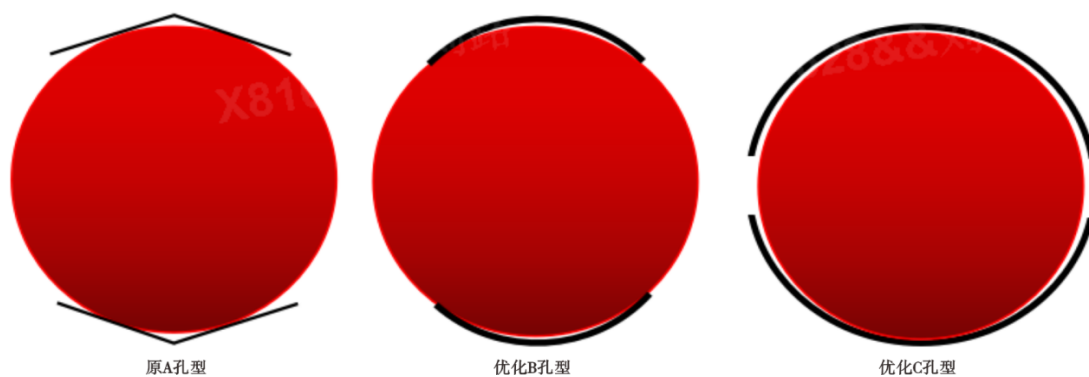


图 1 高速线材吐丝机夹送辊孔型图

Fig. 1 Hole pattern diagram of high-speed wire rod spooling pinch roll grooves

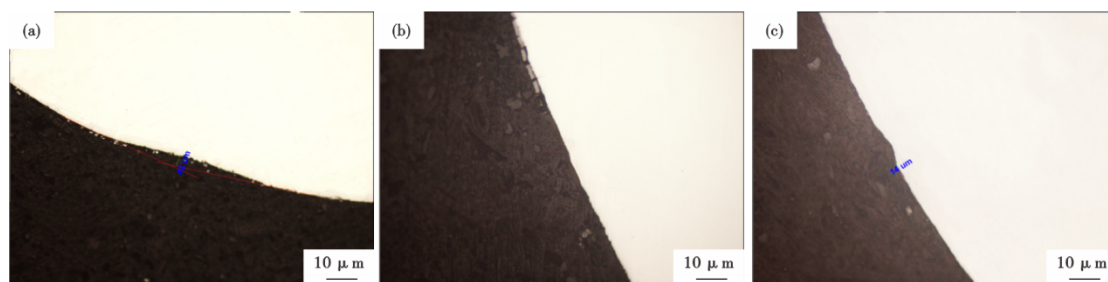


图 2 S45C 钢 $\phi 24.5$ mm 盘条不同夹送辊孔型对成品表面的影响:(a)原 A 孔型夹持后表面,(b)优化 B 孔型夹持后表面,(c)优化 C 孔型夹持后表面

Fig. 2 Influence of different pinch roll pass configurations on the surface of finished products made of S45C steel $\phi 24.5$ mm wire rod : (a) Original A-hole clamped rear surface, (b) Optimized B-hole clamped rear surface, (c) Optimized C-hole clamped rear surface

0.70 mm, 宽度为 2.20 ~ 2.50 mm; 工艺 1 在原工艺孔型基础上降低夹送辊轻压和重压(降低 0.2 MPa), 组织粗大区域明显改善, 深度为 0.20 ~ 0.30 mm, 宽度为 0.8 ~ 1.0 mm, 如图 3(b) 所示, 如上两个组织均无法交付客户使用; 工艺 2 优化线材夹送辊孔型, 孔型与盘条包裹度为 35%, 盘条表层组织存在轻微零星组织粗大, 如图 3(c) 所示; 工艺 3 为在工艺 2 的基础上降低夹送辊轻压和重压(降低 0.2 MPa), 盘条表层组织得到明显改善, 未见组织粗大现象, 如图 3(d) 所示; 工艺 4 为在工艺 3 的基础上增加夹送辊孔型包裹度到 87%, 受盘条抖动原因, 成品表面存在零星不连续组织粗大, 深度 0.40 ~ 0.60 mm, 宽度 2.5 ~ 3.0 mm, 如图 3(e) 所示, 工艺 5 为在工艺 4 的基础上降低夹送辊轻压和重压(降低 0.2 MPa), 粗大组织明显改善, 但仍零星不连续存在, 如图 3(f) 所示, 但无法交付客户。

工艺 3 生产出产品表面无组织粗大现象, 交付客户使用验证各项性能优良, 工艺 3 为最佳工艺。

2.4 冷顶锻结果

针对工艺 1、3、5 生产出产品检验组织粗大对

后续客户加工的影响, 对其成品盘条取样进行 1/2 冷顶锻试验, 从图 4 中可知, 工艺 3 冷顶锻后的试样表面光滑, 未见裂纹和毛糙, 其冷顶锻结果满足 GB/T29087—2012 标准中高级要求(即进行 1/2 普通级冷顶锻试验, 表面应光滑, 不得有裂纹、折叠等有害缺陷, 允许存在深度不大于 0.10 mm 的轻微压痕、麻面), 工艺 1 和 2 表面存在毛糙缺陷。说明工艺 3 产品满足客户拉拔等冷变形要求。

3 结果分析与讨论

线材夹持产生的形变在奥氏体晶粒内引入了高密度位错, 储存畸变能, 在随后的高温吐丝及冷却过程中, 这些储存能为驱动力, 作为组织粗大的源动力。通过优化夹送辊夹持面积和夹持力, 降低畸变能。从工艺试验后的表面质量、组织形貌结果可知, 降低夹送辊的轻压和重压(降低 0.2 MPa)能够显著减缓成品盘条表面组织粗大程度, 由工艺 1、3、5 可知, 当夹送辊轻压和重压压力降低 >0.25 MPa, 存在红钢夹持力不足无法吐丝问题; 优化夹送辊孔型, 由原来菱形孔型(共用性较好)优化为圆形孔型, 孔

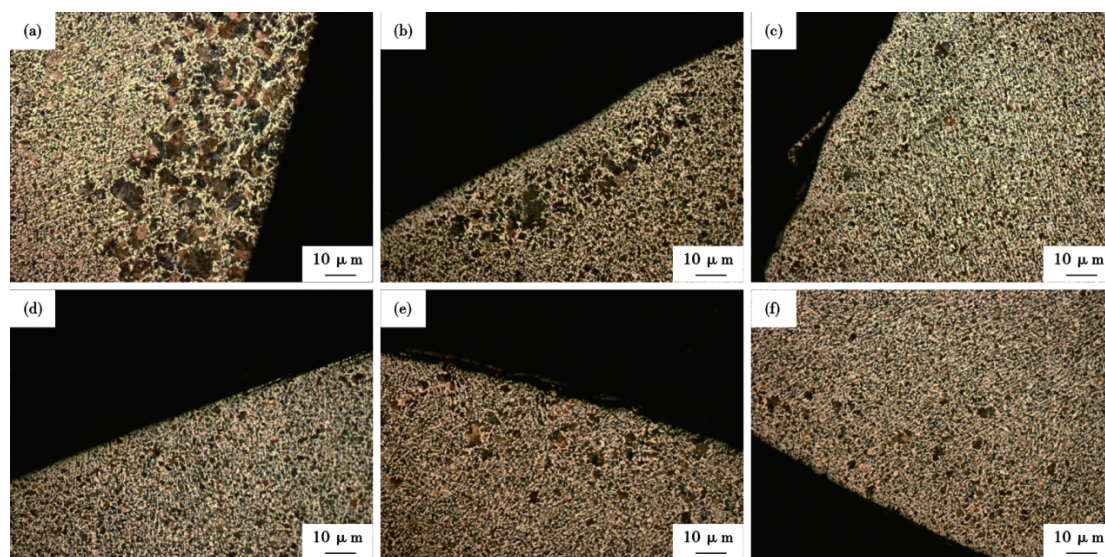


图3 S45C钢 $\phi 24.5$ mm盘条不同工艺的热轧组织图:(a)原工艺,(b)工艺1,(c)工艺2,(d)工艺3,(e)工艺4,(f)工艺5

Fig. 3 Microstructure diagram of hot-rolled S45C steel wire rod ($\phi 24.5$ mm) processed by different techniques : (a) Original process technology, (b) Process 1, (c) Process 2, (d) Process 3, (e) Process 4, (f) Process 5

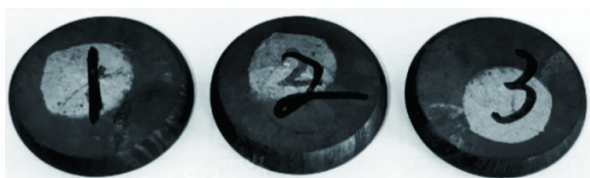


图4 不同工艺冷顶锻外观照片

Fig. 4 Appearance photos of cold forging with different processes

型与红钢包裹度35%,由工艺2、3可知,夹送辊夹持时点接触优化为面接触,压力得到分散,较大降低红钢表面应力,组织粗大得到解决;当包裹度增加到87%,由工艺4、5可知,夹送辊孔型包裹度增加导致孔型束缚红钢程度增加,当因张力、尺寸发生微小变化时,条形抖动与夹送辊孔型产生碰撞在盘条表面形成小应力,导致产品表面组织零星粗大。

参考文献

- [1] T/SSEA 0282-2023, 液压油缸活塞杆用非调质钢[S].
- [2] 李 冰, 张 磊, 孙艺凡. 活塞杆用中碳微合金化钢晶粒度的控制[J]. 特钢技术, 2017, 23(2):33-35+46.
- [3] 王国营. 减震器活塞杆用45钢的研制[J]. 河北冶金, 2019, (09):37-39.
- [4] 董 庆, 张育明, 王冬晨, 等. 控轧控冷工艺对汽车减震器活塞杆用S45C钢盘条微观组织和力学性能的影响[J]. 锻压技术, 2023, 48(10):150-153.
- [5] 黄俊文, 肖训军, 任学堂. 碳素冷锻钢边部粗大组织改善研究与实践[J]. 金属材料与冶金工程, 2023, 51(2):26-29.
- [6] 杨忠民, 王瑞珍, 车彦民. 普通碳素钢获得超细晶组织的工艺机制研究[C]//北京冶金年会. 2002.
- [7] 张少棠. 钢铁材料手册:碳素结构钢[M]. 中国标准出版社, 2010.
- [8] 李合意, 王 毅, 杨 浩, 等. 汽车活塞杆用45钢魏氏组织预防措施以及工艺优化[J]. 特殊钢, 2021, 42(05):69-71.
- [9] 薛伟江, 屈小波, 王 军, 等. 返红温度对钒钛微合金非调质钢45MnVTi组织性能的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(6):83-86.
- [10] 钱成云. 50Mn钢异常组织原因分析[J]. 特钢技术, 2011, 17(02):32-33.

工艺3生产的盘条表面质量、组织形貌、冷锻等综合性能最优,已经发客户片批量使用,各项加工性能满足客户高标准要求,客户反馈良好。

4 结论

1)针对活塞杆用钢S45生产,降低夹送辊轻压和重压(降低0.2 MPa)可明显降低产品表面应力,缓解表面组织粗大程度;夹送辊孔型优化,夹送辊与红钢点接触优化为面接触,较大缓解夹持应力,配合降低夹送辊轻重压,解决活塞杆S45C表面组织粗大问题;

2)最佳生产工艺为B孔型,重压0.35 MPa,轻压0.15 MPa,工艺获得的组织为均匀的铁素体+珠光体,边部未有组织粗大问题,表面质量和冷锻结果均满足客户使用要求。