

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

董 庆^{1,2,3}, 张育明^{1,2}, 王冬晨⁴, 李永超^{1,2,3}, 王宁涛^{1,2,3}, 张 旭^{1,2}

(1. 河北邢钢科技有限公司, 河北 邢台 054799; 2. 邢台钢铁有限责任公司, 河北 邢台 054027;

3. 河北省线材工程技术创新中心, 河北 邢台 054027; 4. 河北机电职业技术学院 材料与建筑工程系, 河北 邢台 054000)

摘要:针对大规格 S45C 钢热轧盘条强度偏低和存在魏氏体组织问题, 研究了控轧控冷工艺对盘条微观组织和力学性能的影响, 对轧制过程中的加热温度、进精轧温度、卷取温度和冷却速度进行了优化调整, 并对比分析了原工艺和优化工艺下 S45C 钢热轧盘条的微观组织和力学性能。结果表明: 优化工艺后, 热轧盘条的抗拉强度和硬度较原工艺明显增加, 抗拉强度提高了 21 MPa, 硬度增加了 3 HRB, 同时伸长率和断面收缩率略有增加; 优化工艺轧制的盘条的魏氏体组织基本消失, 同时晶粒尺寸得到细化, 晶粒度由 7.0 级增加为 8.0 级, 珠光体片层变薄且片层间距减小, 由 0.33 μm 缩小至 0.26 μm 。优化工艺通过降低加热温度和轧制温度以及控制冷却方式, 提高了 S45C 钢热轧盘条的强度, 改善了魏氏体组织。

关键词: S45C 钢; 控轧控冷工艺; 盘条; 微观组织; 力学性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.023

中图分类号: TG335.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 10-0150-04

Influence of controlled rolling and controlled cooling process on microstructure and mechanical properties for S45C steel rod coil used in automobile shock absorber piston rods

Dong Qing^{1,2,3}, Zhang Yuming^{1,2}, Wang Dongchen⁴, Li Yongchao^{1,2,3}, Wang Ningtao^{1,2,3}, Zhang Xu^{1,2}

(1. Hebei Xinggang Technology Co., Ltd., Xingtai 054799, China; 2. Xingtai Iron and Steel Co., Ltd., Xingtai 054027, China;

3. Hebei Province Engineering and Technology Innovation Center for Wire Rod, Xingtai 054027, China;

4. Department of Materials and Architectural Engineering, Hebei Institute of Mechanical and Electrical Technology, Xingtai 054000, China)

Abstract: For the problems of low strength and Widmanstatten structure of large-sized S45C steel hot-rolled rod coil, the influence of controlled rolling and controlled cooling on the microstructure and mechanical properties of rod coil was studied. The heating temperature, finisher entry temperature, coiling and controlled cooling temperature and cooling rate in the rolling process were optimized and adjusted, and the microstructure and mechanical properties of S45C steel hot-rolled rod coil under the original process and the optimized process were compared and analyzed. The results show that the tensile strength and hardness of the hot-rolled rod coil increase significantly after optimizing the process, increasing by 21 MPa and 3 HRB, respectively, while the elongation and section shrinkage increase slightly. The Widmanstatten structure of the rod coil rolled by the optimized process is basically disappeared, and the grain size is refined, the grain size increases from 7.0 grade to 8.0 grade. The pearlite lamellae is thinner and the lamellae spacing is reduced from 0.33 μm to 0.26 μm . By reducing the heating temperature and rolling temperature and controlling the cooling method, the strength of S45C steel hot-rolled rod coil is improved, and the Widmanstatten structure is improved.

Key words: S45C steel; controlled rolling and controlled cooling process; rod coil; microstructure; mechanical properties

S45C 钢为日标 JIS G4051^[1] 中的牌号, 属于机械结构用碳钢, 热处理后具有良好的综合力学性能, 被应用于轴杆类零部件。轴杆零件作为一个运动频

繁、技术要求高的运动部件, 在服役时需承受交变的拉-压载荷以及侧向力和扭转载荷的作用。若轴杆的强度和硬度过低, 则活塞杆运行过程中可能会发生变形; 若强度和硬度过高, 则会导致韧性下降, 活塞杆运行过程中可能会发生断裂失效。通过表面淬火处理可以进一步提升轴杆产品的强度、表面硬度和疲劳性能, 有效提高零件的使用寿命和可靠性。此外, S45C 钢热轧盘条组织中存在的异常魏氏体组

收稿日期: 2023-02-07; 修订日期: 2023-05-09

作者简介: 董 庆 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: badibt01@sina.com

通信作者: 王冬晨 (1990-), 男, 硕士, 中级工程师

E-mail: 708979025@qq.com

织在后续冷拉加工时会恶化表面质量^[2-3]，且会增加加热处理时的变形倾向。

本文针对大规格 S45C 钢热轧盘条强度偏低和魏氏体组织等问题，以直径为 $\Phi 24$ mm 的 S45C 钢盘条为研究对象，研究了控轧控冷工艺对盘条组织和力学性能的影响规律，为大规格 S45C 钢热轧盘条的性能优化提供参考。

1 试验材料及方法

试验用材料为邢台钢铁有限责任公司生产的 S45C 钢坯，主要化学成分见表 1。其冶炼和轧制工艺流程为：80 t 转炉→BOF-LF→铸坯（280 mm×325 mm）→热轧坯（160 mm×160 mm）→钢坯加热→控制轧制→控制冷却，成品热轧盘条的规格为 $\Phi 24$ mm。原轧制工艺参数见表 2，为了对比研究加热温度、轧制温度和冷却速度对 S45C 钢盘条微观组织和力学性能的影响，将钢坯的加热温度、进精轧温度和卷取温度分别由 1110~1130 ℃、915~945 ℃和 890~910 ℃调整为 1070~1090 ℃、845~875 ℃和 810~830 ℃，同时对控冷工艺进行调整，优化前后工艺方案对比见表 2。利用WDW50微控电子万能

表 1 S45C 钢的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of S45C steel
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Fe
0.46	0.21	0.82	0.005	0.013	0.12	余量

表 3 原工艺与优化工艺下 S45C 钢热轧盘条的力学性能

Table 3 Mechanical properties of S45C steel rod coil by hot rolling under original process and optimized process

类型	抗拉强度/MPa		伸长率/%		断面收缩率/%		硬度/HRB	
	测量值	平均值	测量值	平均值	测量值	平均值	测量值	平均值
原工艺	649~672	661	19~27	23	40~48	43	86~91	89
优化工艺	667~696	682	20~29	24	40~49	45	90~94	92

2.2 原工艺和优化工艺轧制盘条的微观组织

原工艺和优化工艺所轧制盘条的显微组织形貌如图 1 所示，可见：原工艺轧制 S45C 钢盘条的微观组织由铁素体+珠光体及异常组织魏氏体组成，晶粒度为 7.0 级；优化工艺轧制的 S45C 钢盘条的微观组织为铁素体+珠光体，晶粒度为 8.0 级，工艺优化后组织中的魏氏体组织基本消失，同时晶粒尺寸得到细化。另外，利用扫描电镜对不同工艺样品的微观组织进一步观察，微观组织电镜扫描形貌见图 2，可见优化工艺轧制的 S45C 钢盘条的珠光体片层变薄且片层间距减小，间距为 0.26 μm （原片层

试验机对原工艺和优化后工艺下试验钢盘条进行力学性能测试，采用洛氏硬度计测定盘条试样横截面半径 1/2 处的硬度值，并沿顺时针方向间隔 90°共测 4 个点后取硬度平均值，采用 Leica DM2700M 光学显微镜和扫描电镜进行显微组织观察。

表 2 S45C 钢的控轧控冷工艺参数
Table 2 Parameters of controlled rolling and controlled cooling process for S45C steel

类型	加热温度/ ℃	进精轧温度/ ℃	卷取温度/ ℃	风机状态
原工艺	1120±10	930±15	900±10	全部关闭
优化工艺	1080±10	860±15	820±10	步进梁风机全开， 1#~5#辊道风机打 开，其余关闭

2 试验结果及分析

2.1 原工艺和优化工艺轧制盘条的力学性能

原工艺和优化工艺所轧制盘条的力学性能检测结果见表 3。可见，原工艺条件下 S45C 钢热轧盘条的抗拉强度范围为 649~672 MPa，平均抗拉强度为 661 MPa，硬度范围为 86~91 HRB，平均硬度为 89 HRB。优化工艺生产的 S45C 钢热轧盘条的抗拉强度可提高至 667~696 MPa，平均抗拉强度为 682 MPa，硬度范围为 90~94 HRB，平均硬度为 92 HRB。工艺优化后热轧盘条的抗拉强度较原工艺提高了 21 MPa，硬度增加了 3 HRB，同时伸长率和断面收缩率也略有增加。

间距为 0.33 μm)。晶粒尺寸和珠光体组织的细化在提高 S45C 钢热轧盘条抗拉强度和硬度的同时，对塑性也有一定的改善作用，这解释了上述不同工艺所轧盘条的力学性能差异的原因。

2.3 结果分析

相关理论及研究表明^[4-10]，控轧控冷工艺对热轧盘条组织和力学性能影响显著。本文为改善大规格 S45C 钢热轧盘条强度偏低和存在魏氏体组织的问题，对轧制过程中的加热温度、进精轧温度、卷取温度及冷却速度进行了调整。根据上述 S45C 钢盘条样品的力学性能检验和微观组织评价结果可知，

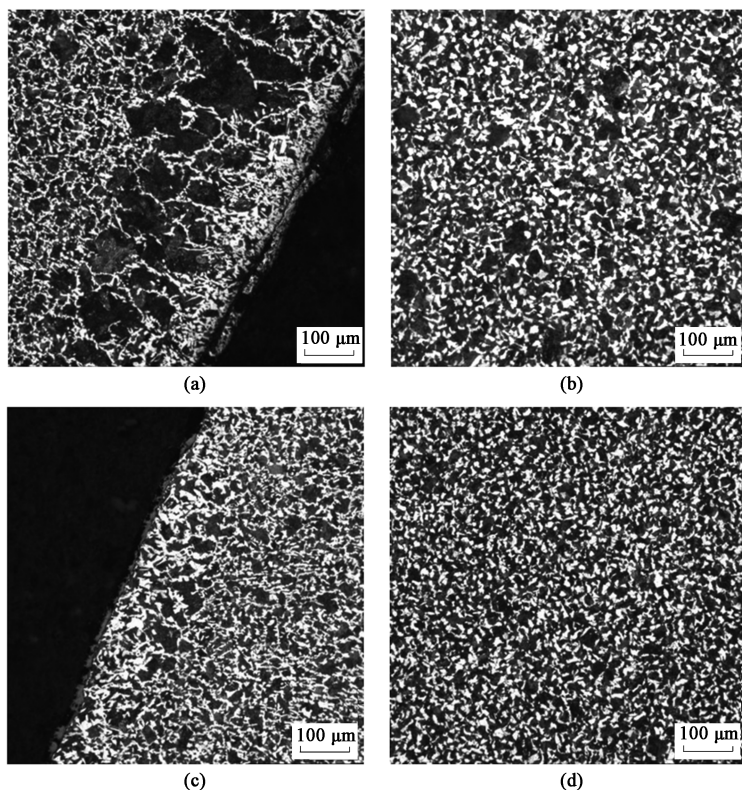


图 1 原工艺和优化工艺下热轧盘条的显微组织

(a) 原工艺, 表面 (b) 原工艺, 心部 (c) 优化工艺, 表面 (d) 优化工艺, 心部

Fig. 1 Microstructures of hot rolled rod coil under original process and optimized process

(a) Original process, surface (b) Original process, center (c) Optimized process, surface (d) Optimized process, center

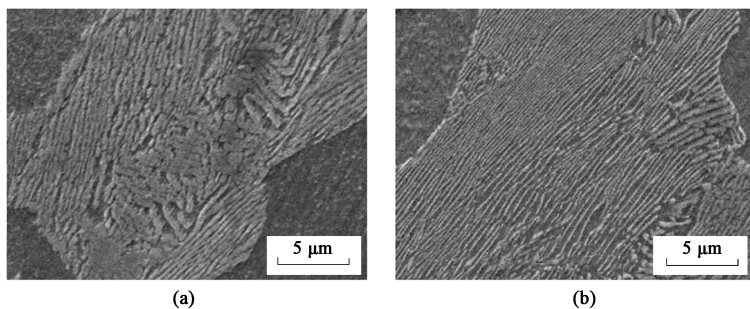


图 2 原工艺和优化工艺下热轧盘条组织扫描电镜形貌

(a) 原工艺 (b) 优化工艺

Fig. 2 Scanning electron microscopes morphologies of hot rolled rod coil structure under original process and optimized process

(a) Original process (b) Optimized process

优化工艺所轧盘条的抗拉强度和硬度较原工艺明显增加, 塑性略有提高, 同时魏氏体组织基本消失。

钢中魏氏体组织的形成主要取决于其化学成分(碳含量)、奥氏体晶粒度和冷却速度^[10], 本文试验钢中成分不变, 其中奥氏体晶粒度对魏氏组织形成的影响相比冷却速度更为明显, 奥氏体晶粒粗大导致魏氏体组织形成温度升高且形成范围增大, 即使在较低的冷却速度下也能形成魏氏体组织^[6-7]。为避免钢坯原始奥氏体组织晶粒粗大, 在满足消除铸

坯组织遗传影响及轧线轧机能力限制条件下, 将加热温度适当降低; 同时, 为降低轧制过程及卷取后盘条温度过高对回复再结晶后晶粒长大的影响, 优化工艺采用较低的精轧温度和卷取温度, 其原因为变形温度的降低, 使得晶粒长大的驱动力减小, 晶粒长大过程受到抑制, 使得再结晶晶粒变得细小。同时, 适当增加冷却速度以降低盘条在高温状态的停留时间, 但冷却速度不宜过快, 应低于魏氏体组织形成的临界冷却速度^[11-13], 因此, 优化工艺开启

步进梁风机和辊道1#~5#风机,使盘条温度冷却至接近魏氏体形成温度,随后在辊道内缓冷以避开魏氏体组织形成区域。珠光体组织方面,相比原工艺,优化工艺轧制的盘条组织中珠光体片层变薄且片层间距减小,这与优化工艺轧制温度降低导致珠光体转变温度下降或过冷度增加有关,而过冷度与珠光体片层之间的关系成反比,即 $S_0 = \frac{8.02}{\Delta T} \times 10^{-4}$,其中, S_0 为珠光体片层间距, ΔT 为过冷度。

热轧盘条的强度和硬度提高与优化工艺所轧盘条得到的细化晶粒和珠光体组织有关。晶粒尺寸变小使得晶界面积增加,同时珠光体细化后片层间距缩小,相界面积增加,塑性变形时对位错运动的阻碍增加,因此,导致盘条的抗拉强度和硬度的升高。此外,晶粒细化后塑性变形更为均匀,应力集中较小,且珠光体片层细化也会使得盘条塑性有所增加^[14-15],因此,优化工艺轧制盘条的强度提升的同时,塑性也略有提升。

3 结论

(1) 优化工艺轧制盘条的抗拉强度较原工艺提高21 MPa,硬度增加3 HRB,同时伸长率和断面收缩率略有增加;优化工艺轧制盘条的晶粒度为8.0级,较原工艺7.0级细,珠光体片层间距由0.33 μm 缩小至0.26 μm 。力学性能的改善与优化工艺轧制得到细化的晶粒和珠光体组织有关。

(2) 通过调整加热温度以避免钢坯原始奥氏体组织晶粒粗大,通过降低进精轧温度和卷取温度,同时适当增加轧后冷却速度以抑制回复再结晶后晶粒长大,使得优化工艺所轧盘条组织中的魏氏体组织得到显著改善。

(3) 优化工艺通过降低加热温度和轧制温度及控制冷却方式,使所轧盘条的力学性能和魏氏组织得到显著改善。

参考文献:

[1] JIS G4051—2023, 机械结构用碳素钢 [S].
JIS G4051—2023, Carbon steels for machine structure use [S].

[2] 职任涛,屠欢,肖纪美. 亚共析钢中魏氏组织形态的研究 [J]. 北京钢铁学院学报, 1983, (1): 140-149.
Zhi R T, Tu H, Xiao J M. Morphological study of widmanstatten ferrite in hypo eutectoid steel [J]. Journal of Beijing Iron and Steel Institute, 1983, (1): 140-149.

[3] 李智超,马栓柱,杜素梅. 亚共析钢魏氏组织的组织遗传现象研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 27 (2): 12-14.
Li Z C, Ma S Z, Du S M. Research on the hereditary phenomena

of widmanstatten patterns in hypoeutectoid steels [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2004, 27 (2): 12-14.

[4] 郭泽尧,彭碧辉. SWRCH45K 冷镦钢盘条显微组织均匀性研究 [J]. 金属制品, 2013, 39 (4): 43-46.
Guo Z Y, Peng B H. Research on microstructure uniformity of SWRCH45K cold heading wire rod [J]. Metal Products, 2013, 39 (4): 43-46.

[5] 王文清,赵志毅,王丽萍. SWRCH35K 冷镦钢大盘卷的生产实践 [J]. 轧钢, 2010, 27 (5): 59-61.
Wang W Q, Zhao Z Y, Wang L P. Practical production of SWRCH35K cold heading steel coil bar [J]. Steel Rolling, 2010, 27 (5): 59-61.

[6] 祝新民,冯光宏,张宏亮. 温度参数对中碳钢35K组织的影响 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (23): 36-42.
Zhu X M, Feng G H, Zhang H L. Influence of temperature parameters on microstructure of 35K medium carbon steel [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (23): 36-42.

[7] 杨浩. 35K 冷镦钢表层组织异常行为控制研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
Yang H. Control Abnormal Behavior of Surface Microstructures on Cold Heading Steel 35K [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.

[8] 阮士朋,王利军,陈继林,等. 控轧控冷工艺对SCM435钢盘条组织和性能的影响 [J]. 特殊钢, 2016, 37 (5): 45-47.
Ruan S P, Wang L J, Chen J L, et al. Effect of control-rolling-cooling process on structure and properties of steel SCM435 rod coil [J]. Special Steel, 2016, 37 (5): 45-47.

[9] 张永东. 控轧过程中冷却速度对35K钢盘条冷镦性能的影响 [J]. 钢铁研究, 2004, 32 (6): 40-42.
Zhang Y D. Effect of cooling rate on the cold forging property of steel 35K during its controlled rolling [J]. Research on Iron & Steel, 2004, 32 (6): 40-42.

[10] Zav'Yalov A S, Teplukhin G N, Dubinin P G, et al. Influence of alloyed elements on the formation of the Widmanstatten structure [J]. Metal Science & Heat Treatment, 1966, 8 (5): 341-344.

[11] Bodnar R L, Hansen S S. Effects of austenite grain size and cooling rate on widmanstatten ferrite formation in low-alloy steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1994, 25: 665-675.

[12] Todorov R P, Khristov K G. Widmanstatten structure of carbon steels [J]. Metal Science & Heat Treatment, 2004, 46 (1-2): 49-53.

[13] Radu T, Constantinescu S, Vlad M. Morphologies of Widmanstatten structures and mechanism formation in steels [J]. Materials Science Forum, 2010, (1): 636-637.

[14] 艾家和,赵同春,高惠菊,等. 控轧控冷工艺参数对60Si2MnA线材中珠光体形态的影响 [J]. 工程科学学报, 2002, 24 (5): 503-506.
Ai J H, Zhao T C, Gao H J, et al. Effect of controlled rolling and cooling process parameters on precipitated pearlite of 60Si2MnA spring steel wire rods [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, 24 (5): 503-506.

[15] 刘永铨. 钢的热处理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
Liu Y Q. Heat Treatment of Steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1987.