

高强度汽车紧固件用钢 SCr440 连续冷却和 等温冷却组织转变研究及应用

李战卫¹ 于学森¹ 沈奎¹ 张宇¹ 刘卫²

(1 江苏省(沙钢)钢铁研究院, 张家港 215625; 2 江苏沙钢集团有限公司棒线厂, 张家港 215625)

摘要 通过热模拟试验研究了高强度汽车紧固件用钢 SCr440 (0.40% C, 1.00% Cr) 的组织转变行为。从 850 °C 连续冷却时, 当冷速 ≤ 1 °C/s 时, 转变后的组织为铁素体和珠光体; 当冷速达到 2 °C/s 时, 组织中开始出现贝氏体和马氏体; 当冷速 ≥ 7 °C/s 时, 组织主要以马氏体和贝氏体为主。等温转变时, 珠光体转变的温度为 550 ~ 700 °C; 当转变温度降低到 550 °C 以下, 组织中出现贝氏体。依据热模拟试验结果, 进行工业轧制 $\Phi 18$ mm SCr440 钢盘条, 冷拔至 $\Phi 17$ mm, 再经球化退火 700 ~ 760 °C 及冷拔成 $\Phi 15.7$ mm 线材, 可用于制造 10.9 级汽车用法兰面螺栓。

关键词 汽车紧固件用钢 SCr440 连续冷却 等温转变

Study on Continuous Cooling and Isothermal Cooling Microstructure Transformation of High Strength Steel SCr440 for Automotive Fasteners and Application

Li Zhanwei¹, Yu Xuesen¹, Shen Kui¹, Zhang Yu¹, Liu Wei²

(1 The Institute of Research of Iron & Steel, Jiangsu Province Sha-steel, Zhangjiagang, 215625;
2 Bar and Wire Rod Plant of Jiangsu Shagang Group Co Ltd, Zhangjiagang, 215625)

Abstract The phase transformation characteristics of high strength steel SCr440 (0.40% C, 1.00% Cr) for automotive fasteners are studied by thermal simulation. From 850 °C by cooling rate ≤ 1 °C/s continuous cooling, the transformed structure is ferrite and pearlite, and bainite and martensite occur in structure with cooling rate reached 2 °C/s, by cooling rate ≥ 7 °C/s the main structure in steel is martensite and bainite. The pearlitic transformation temperature is 550 ~ 700 °C during isothermal conditions, and bainitic transformation occurs when the transformation temperature decreased below 550 °C. Based on thermal simulation results, the $\Phi 18$ mm SCr440 steel rod has been successfully rolled, and can be used to manufacture 10.9 grade automobile flange bolts by cold drawing to $\Phi 17$ mm rod, then spheroidizing annealing at 700 ~ 760 °C and cold drawing to $\Phi 15.7$ mm rod.

Material Index Steel for Automotive Fasteners, SCr440, Continuous Cooling Transformation, Isothermal Transformation

随着汽车轻量化发展要求, 高强度汽车紧固件的需求逐渐增多。与国外相比, 我国汽车紧固件用钢的研发水平目前还有差距, 部分关键部件紧固件用钢还要依赖进口, 无法满足高强度汽车紧固件的市场需求^[1-3]。SCr440 钢是日本 JIS G4053 标准中的牌号, 由于钢中 Cr 含量高, 淬透性好, 抗低温冲击性能优良, 广泛应用于制造 10.9 级高强度汽车紧固件。用户最终产品用途为加工汽车轮毂用法兰面螺栓, 锻造过程中变形量大, 没有切边工序, 不能有任何开裂, 因此对原材料即盘条的表面质量和组织性能要求较高。本文基于新的化学成分设计, 对汽车紧固件用钢 SCr440 的组织转变进行热模拟研究, 为控冷工艺的制订提供参考。

1 试验材料和方法

试验钢来源于高线轧制的直径为 14 mm 的盘

条, 其生产工艺流程为: 120 t 顶底复吹式转炉-LF 精炼-300 mm × 390 mm 方坯连铸-开坯 140 mm × 140 mm-高线轧制, 化学成分 (%) 为: 0.40C, 0.20Si, 0.75Mn, 0.010P, 0.005S, 1.00Cr, 加工为热模拟试样。

采用 Gleeble-3800 进行热模拟试验, 连续冷却转变试验工艺如下: 将试样以 10 °C/s 的速率从室温升温至 1050 °C, 保温 10 min, 以 5 °C/s 的速度冷却至 950 °C, 保温 5 s 后, 再以 3 s⁻¹ 的变形速率给予试样 60% 的压缩变形量, 并在 6 s 内冷却到 850 °C, 最后分别以 0.25、1、2、3、5、7、9、11、15、20、25 °C/s 的速率冷却至室温, 获得不同冷速下的热膨胀曲线。

等温转变试验工艺如下: 将试样以 10 °C/s 的速率从室温升温至 1050 °C, 保温 10 min, 以 5 °C/s 的速度冷却至 950 °C, 保温 5 s 后, 再以 3 s⁻¹ 的变形速率给予试样 60% 的压缩变形量, 并在 6 s 内冷却

到 850 ℃, 然后以 50 ℃/s 的冷速分别冷却至 450、475、500、525、550、575、600、625、650、675、700 ℃, 保温 20 min, 转变完成后快速冷却至室温, 获得不同温度下的热膨胀曲线。

对热模拟后的试样进行线切割和研磨抛光, 用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀, 采用 Zeiss 光学显微镜观察热模拟试验后的显微组织, 用 Wilson Tukon 2500 维氏硬度计和金相分析软件分别测定不同冷速下的维氏硬度和相含量, 结合热膨胀曲线分别测定过冷奥氏体的动态 CCT 曲线和动态 TTT 曲线。

对工业试制盘条进行球化退火及冷拔, 对盘条和冷拔后的精线取样进行研磨抛光, 用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀, 采用 Zeiss 光学显微镜观察显微组织, 根据 JB/T 5074 对球化组织进行评级, 并用 Wilson CLB3 布氏硬度计检测硬度, 试制 10.9 级汽车用法兰面螺栓。

2 试验结果与分析

2.1 SCr440 钢的连续冷却转变及动态 CCT 曲线

图 1 为不同冷速下 SCr440 钢的光学显微组织。当冷速为 0.25 ℃/s 时, 转变组织为块状铁素体和珠光体; 当冷速增加到 1 ℃/s 时, 珠光体相含量增

多, 铁素体晶粒尺寸减小, 主要原因是随着冷速增加, 过冷度增大, 形核数增多^[4], 单位时间内转变生成的相增多, 因此显微组织观察结果为晶粒尺寸细化和珠光体相增多; 当冷速增加到 2 ℃/s 时, 铁素体尺寸进一步减小, 开始出现贝氏体和马氏体; 随着冷速继续增加, 贝氏体和马氏体含量逐渐增多, 珠光体含量逐渐减少; 当冷速增加到 7 ℃/s 时, 组织主要以马氏体和贝氏体为主; 当冷速增加到 11 ℃/s 以上时, 组织主要以马氏体为主。

用金相分析软件统计不同冷速下的组织中各相含量, 如图 2 所示。当冷速从 0.25 ℃/s 开始增加时, 铁素体含量逐渐减少, 由 35% 降低到 3 ℃/s 时的 3% 以下, 而珠光体含量则先增多后减少, 从 0.25 ℃/s 时的 65% 增加到 1 ℃/s 的 75% 左右, 随后逐渐减少, 直至 7 ℃/s 时接近于 0。当冷速从 2 ℃/s 开始增加时, 马氏体含量逐渐增多, 从 10% 逐渐增加到 15 ℃/s 时的 98% 以上, 贝氏体含量先增多后减少, 从 28% 增加到 5 ℃/s 的 44%, 随后逐渐减少直至消失。

根据不同冷速下测得的热膨胀曲线和显微组织分析结果, 绘制出了 SCr440 钢的动态 CCT 曲线, 如

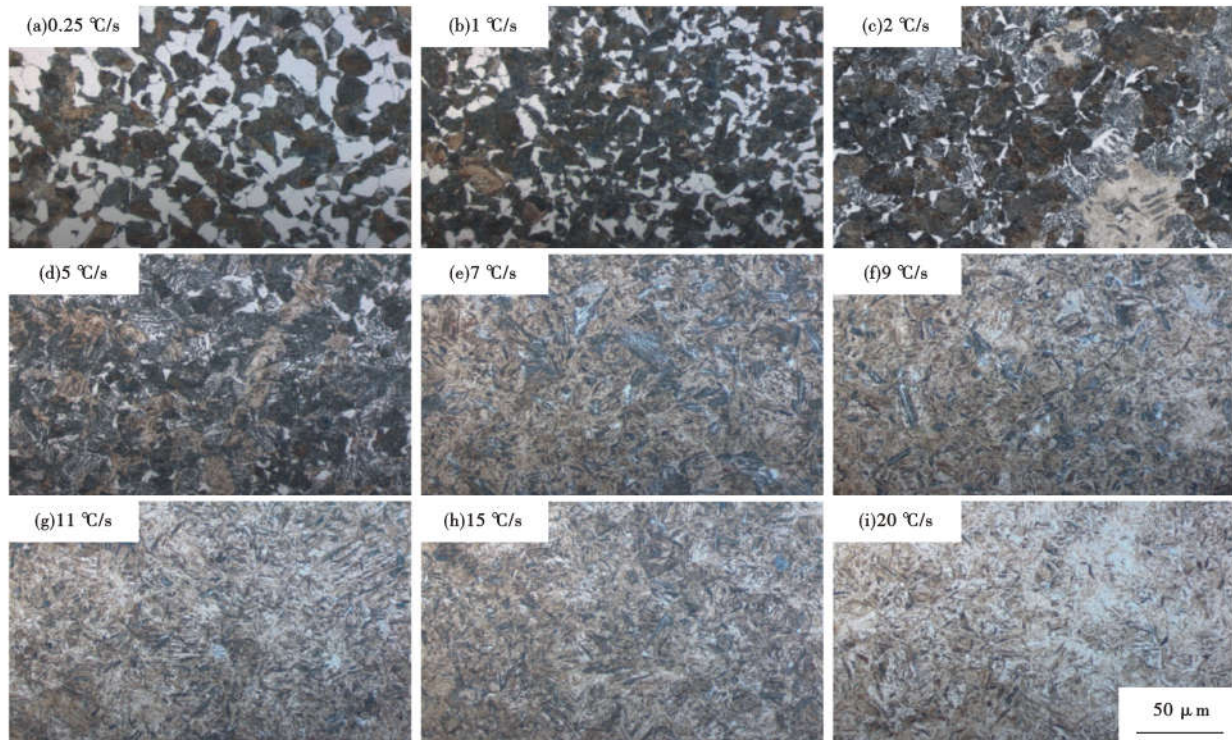


图 1 SCr440 钢 850 ℃ 冷却速度/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$): 0.25(a), 1(b), 2(c), 5(d), 7(e), 9(f), 11(g), 15(h) 和 20(i) 的光学显微组织
Fig. 1 Optical microstructure of SCr440 steel cooling from 850 ℃ by cooling rate/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$): 0.25(a), 1(b), 2(c), 5(d), 7(e), 9(f), 11(g), 15(h) and 20(i)

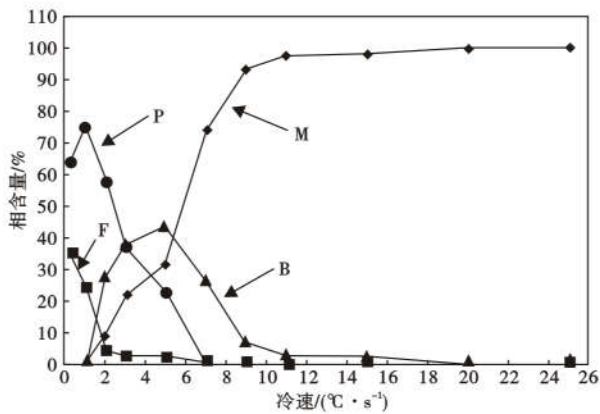


图 2 冷速对 SCr440 钢相转变含量的影响

Fig. 2 Effect of cooling rates on transformed phase content of SCr440 steel

图 3 所示。在 0.25℃/s 和 1℃/s 的较低冷速冷却时,仅发生铁素体和珠光体转变,相变开始温度分别为 753℃和 738℃,转变后的 HV10 硬度值分别为 210 和 238。当冷速增加到 2℃/s 时,随着过冷度增大,开始出现贝氏体和马氏体,贝氏体和马氏体转变温度分别为 505℃和 294℃,转变后的组织为铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体的混合组织, HV10 硬

度值为 307。随着冷速增加,铁素体和珠光体含量逐渐减少,贝氏体和马氏体含量逐渐增多,硬度逐渐增加。当冷速增加到 7℃/s 时,主要发生铁素体、贝氏体和马氏体转变,组织主要以马氏体和贝氏体为主, HV10 硬度值达到 530。当冷速增加到 15℃/s 以上时,主要发生马氏体转变, HV10 硬度值达 584。

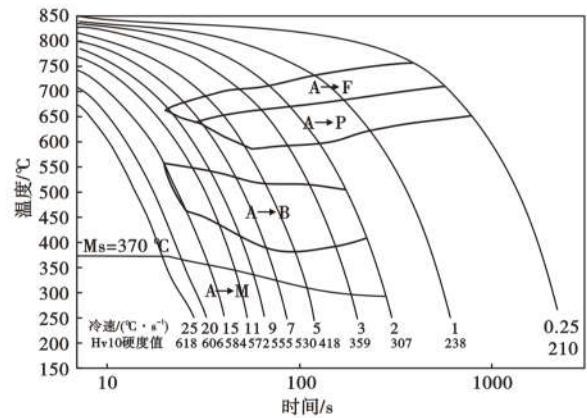


图 3 SCr440 钢的动态连续冷却转变 (CCT) 曲线

Fig. 3 Dynamic CCT (continuous cooling transformation) curves of SCr440 steel

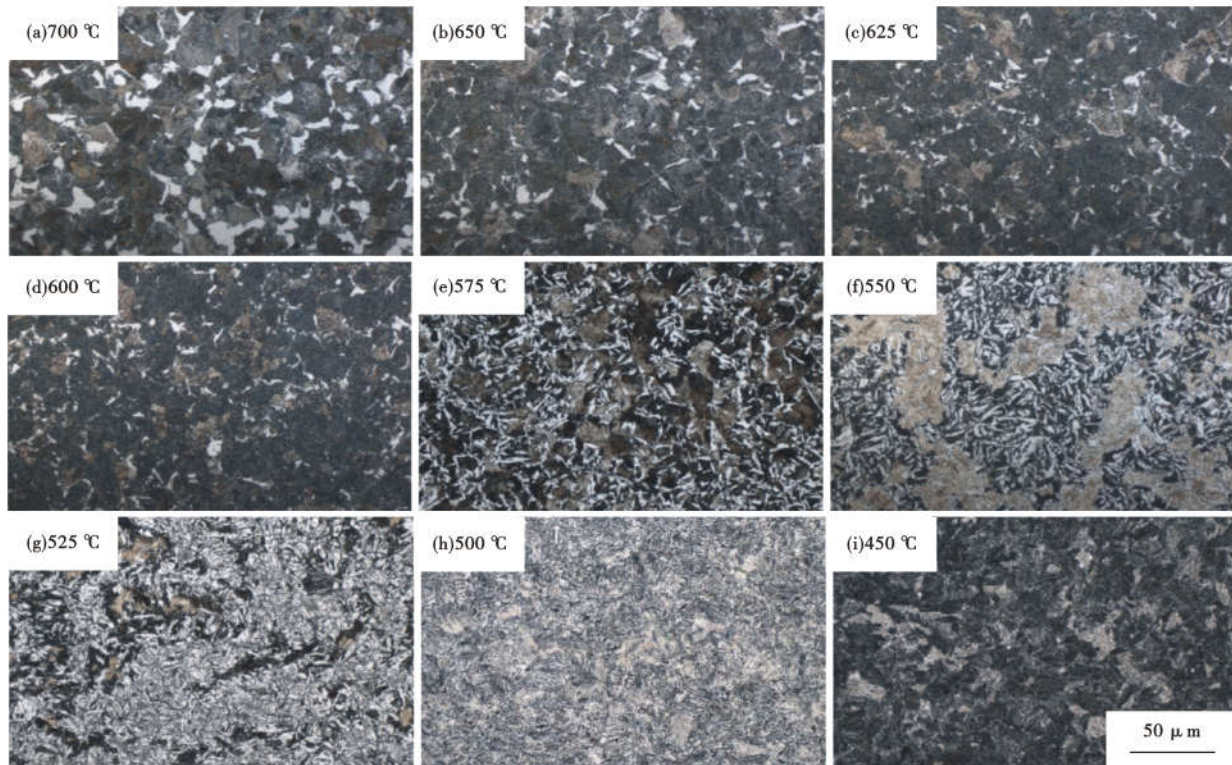


图 4 SCr440 钢从 850℃冷却至 700℃(a), 650℃(b), 625℃(c), 600℃(d), 575℃(e), 550℃(f), 525℃(g), 500℃(h) 和 450℃(i) 等温转变后的光学显微组织

Fig. 4 Optical microstructure of SCr440 steel with isothermal transformation from 850℃ cooling to 700℃(a), 650℃(b), 625℃(c), 600℃(d), 575℃(e), 550℃(f), 525℃(g), 500℃(h) and 450℃(i)

对于 SCr440 钢,避免发生贝氏体和马氏体转变的冷速为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以下。

2.2 SCr440 钢的等温转变及动态 TTT 曲线

图 4 为 SCr440 钢经不同温度等温转变后的光学显微组织。在 $700\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,SCr440 钢等温转变后的显微组织均为珠光体和块状铁素体,在该温度区间内,随着转变温度的降低,过冷度逐渐增大,铁素体晶粒尺寸逐渐减小,珠光体球团逐渐细化,珠光体含量逐渐增多。当转变温度降低到 $575\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,铁素体形状由块状转变为针状,主要原因是由于温度降低,部分相变由扩散方式转变为切变方式,转变生成了非等轴状的针状铁素体^[5]。当转变温度继续降低到 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,珠光体球团尺寸进一步细化,并出现马氏体组织,出现马氏体组织的原因是在此温度下 20 min 的保温时间不够长,相变不完全导致残余奥氏体经快速冷却后转变为马氏体。当转变温度降低到 $525\sim 425\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,转变后的组织主要以贝氏体为主,贝氏体含量随着保温温度的降低逐渐增多。其中 $525\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 转变后出现的少量马氏体均为热模拟试验中保温后残余奥氏体在快冷条件下形成的。

图 5 为 SCr440 钢的动态 TTT 曲线,呈现“双 C”型,上层为珠光体转变区,下层为贝氏体转变区。在 SCr440 钢中,Cr 作为碳化物形成元素,主要存在于渗碳体中,降低 C 的扩散速度^[6],抑制扩散性珠光体转变,提高珠光体转变温度,使珠光体转变与贝氏体转变区间分离,在 TTT 曲线上呈现为“双 C”型。珠光体转变的温度区间为 $550\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$,在该温度区间内,鼻尖温度约为 $625\text{ }^{\circ}\text{C}$,在该温度下珠光体转变的孕育期最短,为 2.7 s 左右,转变速度最快,转变完成时间最短,约为 65 s 。过冷奥氏体的转变速度主要受相变驱动力和原子扩散系数两个因素的影响^[7],当保温温度从 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始降低时,随着温度降低,过冷度增大,原子扩散能力减弱,相变驱动力增大^[8],刚开始转变过程主要受相变驱动力的影响,因此相变孕育期和相变完成时间逐渐缩短,但随着温度的进一步降低,相变驱动力对转变过程的影响开始减弱,原子扩散系数的影响开始增强,两者相互作用的结果表现为在鼻尖温度 $625\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近,相变的孕育期和完成时间最短。在 $625\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,随着温度升高,相变孕育期和相变完成时间逐渐延长,到 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,相变孕育期约为 17 s ,相变完成时间约为 500 s ;而在 $625\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,随着温度降低,相变孕育期和相变完成时间逐渐延长,到 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时相变完成时

间超过 40 min 。

贝氏体转变的温度为 $550\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$,在该温度区间内,随着转变温度的降低,相变开始时间和完成时间逐渐缩短,转变后组织中的贝氏体含量逐渐增加,贝氏体转变最快的温度为 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$,相变开始时间和完成时间分别约为 0.1 s 和 50 s 。在 $525\sim 575\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,相变速度特别慢,这与在热模拟试验过程中观察到的热膨胀曲线变化过程和显微组织分析结果相对应。

3 工业试制

基于对 SCr440 钢的组织转变研究,在大盘卷产线进行工业试制 $\Phi 18\text{ mm}$ 规格 SCr440 钢盘条,开轧温度控制为 $950\sim 980\text{ }^{\circ}\text{C}$,集卷温度为 $840\sim 870\text{ }^{\circ}\text{C}$,相变过程冷速控制为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以下,在 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上温度区间完成相变,避免产生贝氏体和马氏体,试制盘条的光学显微组织如图 6 所示,为珠光体和铁素体。盘条经球化退火及冷拔后,球化组织评级达到 $5\sim 6$

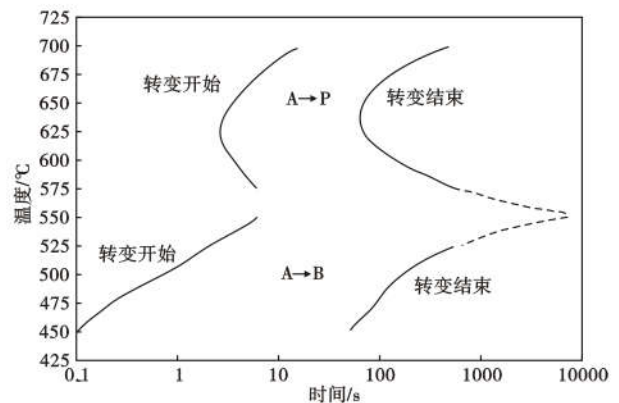


图 5 SCr440 钢的动态 TTT(时间-温度转变)曲线

Fig. 5 Dynamic TTT (time temperature transformation) curves of SCr440 steel

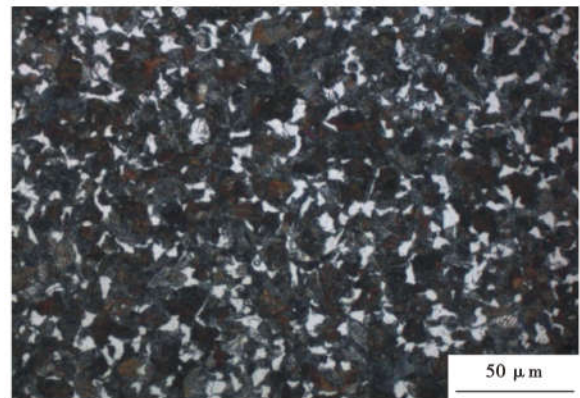


图 6 SCr440 钢 $\Phi 18\text{ mm}$ 热轧盘条光学显微组织

Fig. 6 Optical microstructure of hot rolled SCr440 steel $\Phi 18\text{ mm}$ wire rod

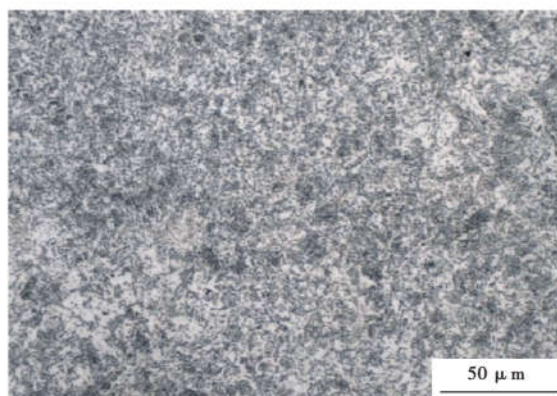


图 7 SCr440 钢 700 ~ 760 °C 球化退火冷拔 Φ15.7 mm 精线显微组织

Fig. 7 Microstructure of spheroidal annealing of steel SCr440 at 700 ~ 760 °C and cold-down to Φ15.7 mm fine wire

级,如图 7 所示,HBW 硬度值 205 ~ 218,HBW2.5 平均值 210,可用于制造 10.9 级汽车用法兰面螺栓。冷拔工艺流程为:热轧盘条(Φ18 mm)-冷拔(Φ17 mm)-球化退火-冷拔(Φ15.7 mm),退火温度 700 ~

760 °C,在炉时间 27 h。

4 结论

(1)连续冷却时,当冷速为 0.25 °C/s 和 1 °C/s 时,转变后的组织为铁素体和珠光体;当冷速为 2 °C/s 时,组织中开始出现贝氏体和马氏体;当冷速达到 7 °C/s 及以上时,组织主要以马氏体和贝氏体为主;避免发生贝氏体和马氏体转变的冷速为 2 °C/s 以下。

(2)等温转变时,珠光体转变的温度为 550 ~ 700 °C,其中在 625 °C 左右转变速度最快,约 65 s 完成相变;贝氏体转变的温度为 550 ~ 450 °C;在 525 ~ 575 °C 内,相变速度缓慢。

(3)基于对 SCr440 钢的组织转变研究,控制相变过程冷速为 2 °C/s 以下,相变温度在 550 °C 以上,试制 Φ18 mm 规格 SCr440 钢盘条,经球化退火及冷拔后,可用于制造 10.9 级汽车用法兰面螺栓。

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):33-35+38.
 [2]孙浩然.汽车紧固件用钢的发展动向[J].中国冶金,2011,21(7):7-9+36.
 [3]鲁修宇,夏艳花,周勇,等.我国汽车紧固件的现状与发展[J].热处理技术与装备,2015,36(6):76-80.
 [4]崔忠圻,覃耀春.金属学与热处理[M].北京:机械工业出版社,2007:243.
 [5]吴哲,张彩军,陈金,等.冷却速度和奥氏体晶粒对铁素体形核影响研究[J].钢铁钒钛,2018,39(3):134-138.
 [6]史永振.40Cr 轧制过程组织的转变规律与细化研究[D].唐山:华北理工大学,2020:8-9.
 [7]江卓俊,于学森,沈奎,等.高强紧固件用 B7 钢开发[J].金属热处理,2017,42(12):52-56.
 [8]刘宗昌,计云萍.过冷奥氏体转变时原子的位移规律[J].热处理技术与装备,2020,41(6):1-9.

李战卫(1984-),男,工程师,2009年重庆大学(本科)毕业,钢铁棒线材产品开发。E-mail:lzwfm@126.com
 张宇,男,博士,研究员级高工,钢铁材料棒线材产品开发。E-mail:tohoku_zy@163.com

收稿日期:2021-08-06

欢迎订阅 2022 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183 定价:25.00 元/期 150.00 元/年 邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 0714-6297888-8010