

形变量和冷却速度对 SCM435 冷镦钢形变诱导铁素体相变的影响

陈继林^{1,2,3} 冯光宏¹ 杨 栋² 薛正国² 马洪磊² 张宏亮¹ 王宝山¹ 马 健¹

(1 钢铁研究总院冶金工艺研究所,北京 100081;2 邢台钢铁有限责任公司,邢台 054027;

3 河北省线材工程技术研究中心,邢台 054027)

摘 要 通过热模拟试验研究了两相区轧制,研究了形变量(15%~40%)和冷却速度 0.8 °C/s 和 1.2 °C/s 对 SCM435 冷镦钢的形变诱导铁素体相变的影响。结果表明:SCM435 钢在奥氏体和铁素体两相区(750~850 °C)轧制,在 0.8 °C/s 的冷速下,随形变量增加,形变诱导铁素体体积分数呈升高趋势,并存在粒状珠光体组织,硬度呈先降低再升高的趋势;在 1.2 °C/s 的冷速下,随形变量增加,形变诱导铁素体体积分数呈降低趋势,并出现了粒状贝氏体组织,硬度呈升高趋势。

关键词 形变量 SCM435 钢 形变诱导铁素体相变 硬度 冷却速度

Effect of Deformation and Cooling Rate on Deformation-Induced Ferrite Transformation in SCM435 Cold Heading Steel

Chen Jilin^{1,2,3}, Feng Guanghong¹, Yang Dong², Xue Zhengguo²,
Ma Honglei², Zhang Hongliang¹, Wang Baoshan¹ and Ma Jian¹

(1 Metallurgical Technology Institute, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027; 3 Hebei Engineering Research Center for Wire Rod, Xingtai 054027)

Abstract The effect of rolling with 15%~40% and cooling rate 0.8 °C/s and 1.2 °C/s in dual phase region on deformation-induced ferrite transformation in SCM435 cold-headed steel is studied by thermal simulation test. The results show that rolling of SCM435 steel in the austenite and ferrite two-phase zone (750~850 °C), at a cooling rate of 0.8 °C/s, with amount of deformation increasing, the deformation-induced ferrite volume fraction increases, and there is a granular pearlite structure, and the hardness first decreases and then increases; at a cooling rate of 1.2 °C/s, with amount of deformation increasing, the deformation-induced ferrite volume fraction decreases, and a granular bainite structure appears, and the hardness increases.

Material Index Deformation, SCM435 Steel, Deformation Induced Ferrite Transformation, Hardness, Cooling Rate

汽车工业在制造业中占有很大比重,是世界上规模最大和最重要的产业之一,对工业结构升级和相关产业发展有很强的带动作用。21 世纪以来,随着汽车产业的发展带动了汽车零部件的快速进步,紧固件行业“十四五”规划中,将重心围绕汽车、新能源等领域,大力研发汽车用高强度、高性能、轻量化紧固件产品。

对于 10.9 级及以上高强度螺栓用冷镦钢,实现冷镦钢线材在线软化的关键在于进行低温大变形轧制^[1-3],并通过控制冷却技术进行保温,使钢中片状珠光体转变为粒状珠光体。近几年,随着减定径机组的应用,以及超重载 V 型轧机和斯太尔摩冷却线等设备的改进,热机轧制工艺技术在线棒材生产中发展起来,成为线棒材生产的最新技术。线棒材热

机轧制是指经过常规粗中轧制的轧件;被冷却到二相区温度进行控制精轧和控制冷却的生产工艺^[4-5]。其实质是让双相区的先共析铁素体和奥氏体发生变形,并控制它们的变形程度,积蓄足够的应变能,紧接着控制冷却以控制形变奥氏体相变,达到获得期望的组织性能^[6]。

1 试验材料及方法

试验材料在规格 Φ12 mm SCM435 热轧盘条上取样,其化学成分见表 1 所示。其生产工艺流程为:高炉铁水→80 t 转炉冶炼→80 t LF 精炼→大方坯连铸(280 mm × 325 mm)→大方坯开坯(160 mm × 160 mm)→热轧坯加热→控轧控冷→热轧盘条。

将盘条加工成 Φ8 mm × 15 mm 的圆柱体试样,

表1 SCM435 钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of SCM435 steel/%

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | O |
|------|------|------|-------|--------|------|------|--------|
| 0.35 | 0.18 | 0.82 | 0.001 | 0.0008 | 0.98 | 0.22 | 0.0015 |

本试验在热模拟实验机 GLEEBLE-1500 上进行。为保证试验温度的精准控制,首先采用热膨胀法得到材料的 $Ar_1 = 732\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $Ar_3 = 826\text{ }^\circ\text{C}$,试验工艺见图1所示。为了表征不同形变量下的组织演变规律,采取两道次变形,热模拟试验工艺见图2所示:将试样以 $20\text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速度加热到 $1080\text{ }^\circ\text{C}$,保温 5 min ,然后以 $10\text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速度冷却到 $840\text{ }^\circ\text{C}$,以 10 s^{-1} 的应变速率进行压下量为 20% 的第一道次压缩变形;然后以 $10\text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速度冷却到 $750\text{ }^\circ\text{C}$,再以 20 s^{-1} 的应变速率分别进行 15% 、 25% 、 40% 的第二道次压缩变形,变形后

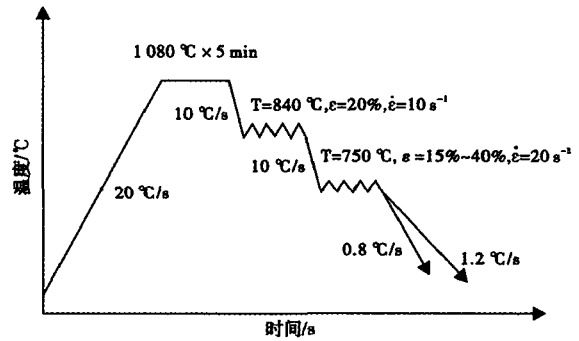


图2 SCM435 钢热模拟试验工艺

Fig.2 Thermal simulation test process of SCM435 steel

对试样进行控制冷却,冷却速度分别为 0.8 、 $1.2\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。

热模拟后,将试样进行镶嵌、研磨、抛光后,用 4% 硝酸酒精溶液进行浸蚀,采用 LEICA DM2700 型金相显微镜、JSM-5610LV 型扫描电子显微镜进行分析观察试样的组织形态。铁素体体积分数采用 ImageTool 软件处理分析,试样硬度在硬度测试仪 HV-1000 上进行。

2 试验结果及分析讨论

2.1 试验材料在不同形变量后的显微组织

通过热膨胀分析, $Ar_3 = 826\text{ }^\circ\text{C}$,结合试验材料接近 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 过冷度的影响,第一道次变形奥氏体组织应处于未再结晶区,由于取向梯度不足于形成具备迁动条件的大角度晶界,不发生再结晶,但在 10 s^{-1}

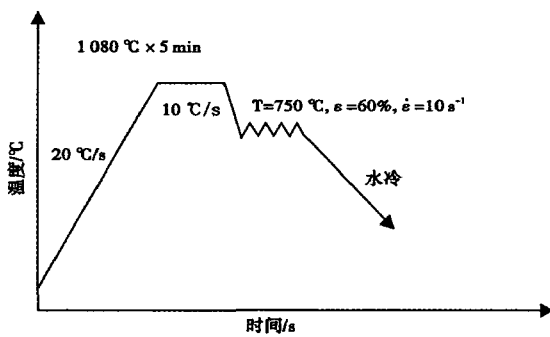


图1 SCM435 钢热膨胀工艺曲线

Fig.1 Thermal expansion process curve of SCM435 steel

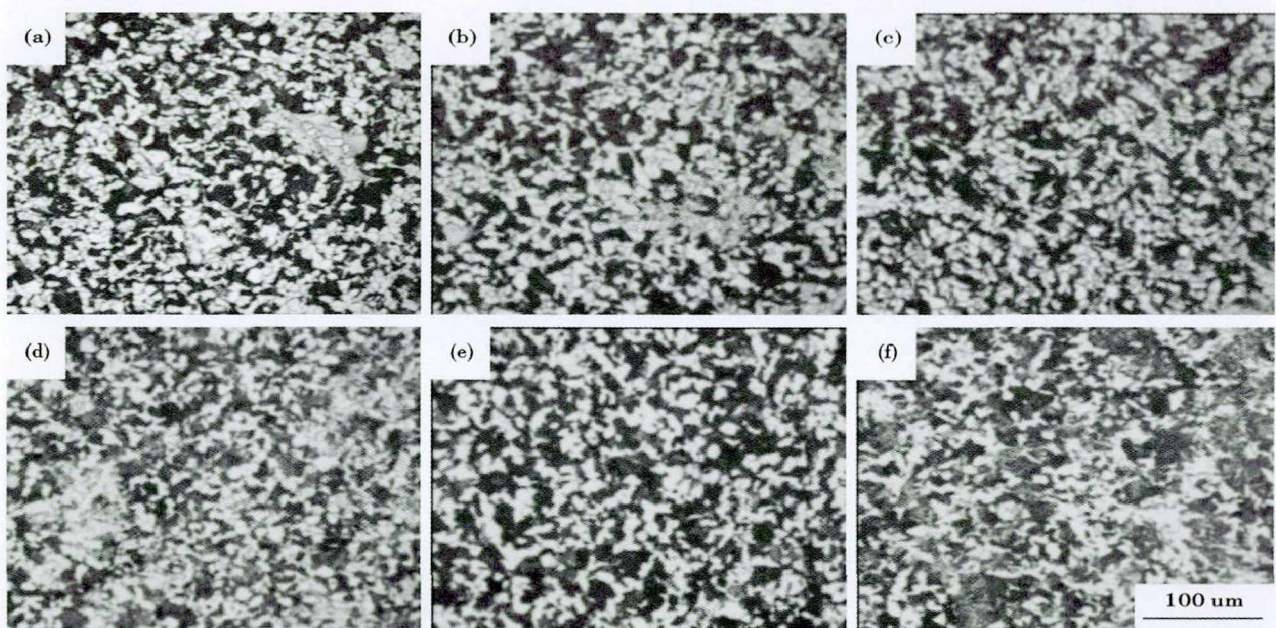


图3 SCM435 钢第二道次形变量 15% (a)(d)、 25% (b)(e) 和 40% (c)(f), 冷速 $0.8\text{ }^\circ\text{C/s}$ (a)(b)(c)、 $1.2\text{ }^\circ\text{C/s}$ (d)(e)(f) 的组织形貌

Fig.3 Morphology of structure of SCM435 steel at secondary pass with reduction 15% (a)(d)、 25% (b)(e) and 40% (c)(f) and cooling rate $0.8\text{ }^\circ\text{C/s}$ (a)(b)(c)、 $1.2\text{ }^\circ\text{C/s}$ (d)(e)(f)

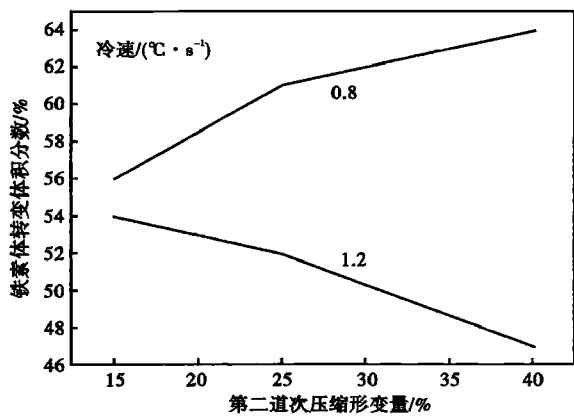


图 4 第二道次形变量和冷却速度对 SCM435 钢铁素体体积分数的影响

Fig. 4 Effect of reduction at secondary pass and cooling rate on volume fraction of ferrite of SCM435 steel

的应变速率进行压下量,奥氏体晶粒在变形过程中垂直于压下方向被拉长,原奥氏体晶界随着形变位错的堆积界面面积逐渐增大,这为接下来的铁素体相变提供了形核条件,在第一道次 20% 的形变量下已经有先共析铁素体的析出。通过不同的形变量后得到了晶粒度细小的显微组织,如图 3 所示。

通过对比不同形变量下的显微组织可见:在 15%、25%、40% 的形变量下均获得了均匀的金相显微组织,整体晶粒度在不同形变量下变化不大。从组织状态看,在 15% 形变量下,组织中观察到局部铁素

体聚集的混晶现象,见图 3(a),随着形变量的增加,铁素体均匀分布,在 40% 的形变量下得到细小的多边形铁素体,见图 3(c),但经过铁素体析出量分析,在 0.8 °C/s 的冷速下,随着形变量的增加,铁素体转变体积分数呈增加趋势,如图 4 所示。材料在 750 °C 压缩变形,随着变形的进行,形变位错密度在晶界处继续堆积,奥氏体晶粒被变形带拉长并逐渐呈链状割离,形成不稳定的亚晶界,亚晶界面能及形变储存能逐渐增大,促使形变组织中的残余奥氏体及经回复亚结构演变成几乎没有变形“胚”的大角度界面迁移,使得亚晶界的位错重排列并形成以大角度包围的低位错密度区域,促使材料组织在两相区随着形变的进行,亚稳态的亚结构开始先共析铁素体和珠光体转变,即发生了奥氏体的形变诱导铁素体相变或者铁素体的动态再结晶现象^[7]。形变量较低时,应变硬化有限,位错密度呈不均匀分布,致使亚晶尺寸的局部不均匀,致使在铁素体转变过程出现了局部混晶,但从成品的组织分布看,整体晶粒度达 10 级以上,较常规控轧控冷下的 7 级晶粒度有较明显的细化。另外,冷速在 1.2 °C/s 时,形变诱导铁素体转变的体积分数随着形变量的增加呈下降趋势,可能是亚稳态的亚晶回复,在后续的冷却过程中,回复的奥氏体及残余奥氏体发生珠光体及贝氏体等组织的转变。

2.2 试验材料在不同形变量后的扫描组织

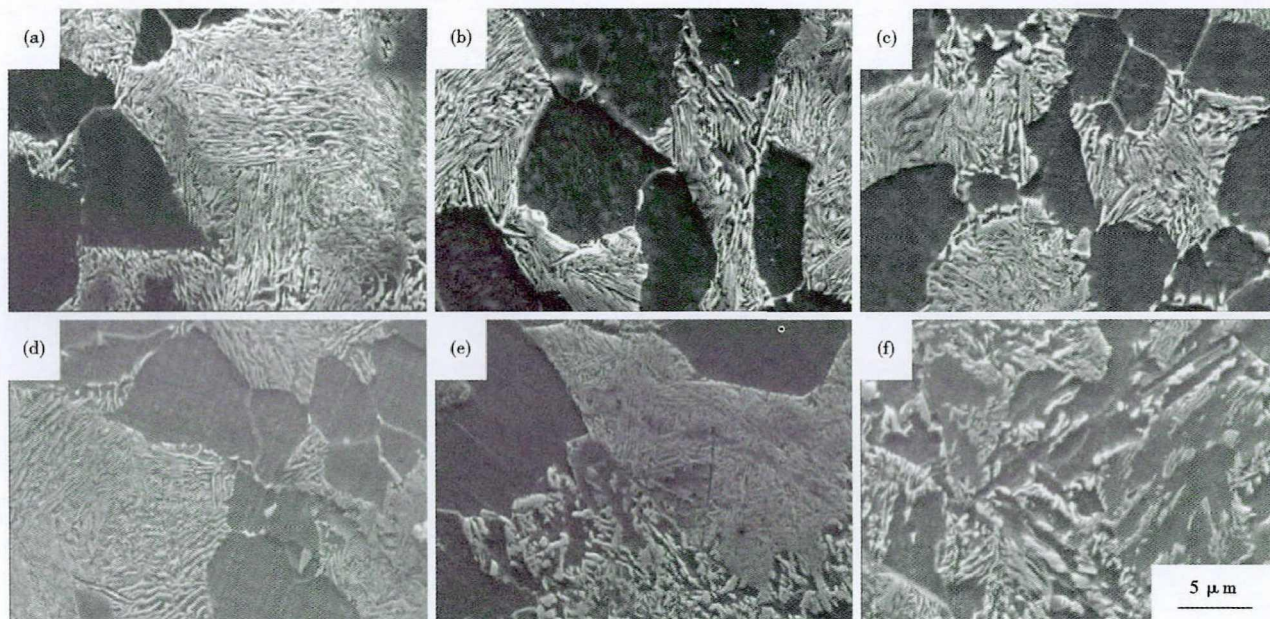


图 5 SCM435 钢形变量 15% (a)(d), 25% (b)(e) 和 40% (c)(f), 冷却速度 0.8 °C/s (a)(b)(c) 和 1.2 °C/s (d)(e)(f) 时 SEM 形貌

Fig. 5 SEM morphology of SCM435 steel with reduction 15% (a)(d), 25% (b)(e) and 40% (c)(f), cooling rate 0.8 °C/s (a)(b)(c) and 1.2 °C/s (d)(e)(f)

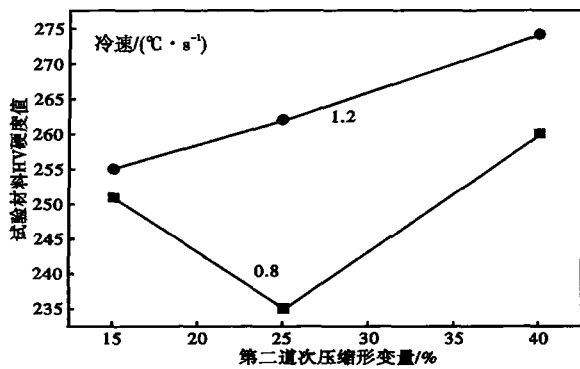


图6 SCM435钢第二道次形变量对HV硬度值的影响

Fig. 6 Effect of secondary pass reduction on HV hardness value of SCM435 steel

进一步对热模拟后的组织进行扫描观察,发现不同形变量及冷速下组织有明显的差别。冷速在 0.8 °C/s 时,在15%、25%、40%的形变量下的显微组织较一致,均是铁素体+片层珠光体及少量的粒状珠光体,只是在15%的形变量下,发现了集聚的珠光体组织,见图5(a),这与金相组织的局部铁素体聚集形成机理类似。但是冷速在 1.2 °C/s 时,材料组织较低速冷却下,有了明显的区别,15%的形变量下保持着铁素体+片层珠光体及少量的粒状珠光体的组织形态,当形变量达到25%时,材料组织中局部出现粒状贝氏体,如图5(e),随着形变量的进一步增加,珠光体组织逐渐减少,贝氏体组织比例增大,说明两相区轧制,形变诱导铁素体相变在先,冷速控制不当,未转变的奥氏体存在向贝氏体转变的可能。

在亚稳态的奥氏体或亚晶组织发生形变诱导铁素体相变过程中,存在碳化物沿晶界析出并集聚,同时在晶界及晶面上发生碳的扩散,使得周围未转变的奥氏体出现了富碳现象,对于少量的未完全转变的奥氏体组织由于碳化物的析出和晶内形核,在缓冷处理下,可以直接转变为粒状珠光体^[8],同时,已形成的片状珠光体是在冷却过程中可以向粒状珠光体转化,从试验组织可见,冷速在 0.8 °C/s 所发生的粒状珠光体转变量较少,可以采取增加变形速率或降低冷却速度得到更大比例的粒状珠光体。在冷速较快时,奥氏体晶界的富碳在较短的时间内来不及珠光体转变,随温度的降低,转变为粒状贝氏体,最终形成了细晶铁素体组织+片层珠光体+粒状贝氏体的混合组织,贝氏体的出现将影响材料的性能。

2.3 试验材料在不同形变量后的硬度分析

对热模拟后的试样进行维氏硬度分析,通过对比不同形变量及不同冷速时的硬度,如图6所示,从硬

度变化可以发现组织变化对性能表征影响。

从热模拟后的试样的硬度检验结果可见,冷速在 0.8 °C/s ,随着形变量的增加,材料硬度呈先降低再升高的趋势,由于随着形变量的增加,铁素体的转变体积分数呈增加状态,但在形变量增加幅度偏低时,亚晶界形变储存能或者再结晶驱动力有限,晶粒细化与铁素体转变同时发生,铁素体的塑性化较细晶强化的影响明显,在25%的形变量下,材料硬度降低,但形变量达到40%时,晶粒细化的效果明显突出,硬度开始升高。冷速在 1.2 °C/s ,从组织转变趋势可以解释,随着冷速的增加,形变量越大,贝氏体转变量增多,致使硬度呈升高趋势。但总体而言,试验材料的硬度值较常规控轧冷状态下的材料硬度有明显的降低,通过两相区形变诱导铁素体相变可有效提高材料的塑性,降低材料的强度,为后续的材料改制及热处理提供良好的强塑性匹配。

3 结论

(1) SCM435钢在奥氏体和铁素体两相区($750\sim 850\text{ °C}$)轧制,可以获得较细的显微组织。在较低的冷速 0.8 °C/s 下,材料组织随形变量的增加,铁素体体积分数呈升高趋势,同时存在粒状珠光体组织;在较快的冷速 1.2 °C/s 下,随形变量的增加,铁素体体积分数呈降低趋势,同时出现了粒状贝氏体组织。

(2) 在奥氏体和铁素体两相区轧制,可显著降低材料的硬度。冷速较低时,形变量增加,材料硬度呈先降低再升高的趋势;冷速增加至 1.2 °C/s ,形变量越大,贝氏体转变量增多,致使硬度呈升高趋势。

参考文献

- [1] 胡孝三,于同仁,梁皖伦. 高强度冷锻钢热轧工艺模拟试验研究[J]. 钢铁, 2003, 38(12): 49-52.
- [2] 李拔,刘清友,贾书君,等. 临界区变形致低碳微合金钢晶粒的超细化[J]. 金属热处理, 2018, 43(5): 133-138.
- [3] 周恒. 低温轧制对含硼中碳钢组织性能影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010: 9-11.
- [4] 徐文琴,孙英达,程聪,等. 中碳钢热变形行为[J]. 材料热处理学报, 2014, 35: 117-123.
- [5] 冯运莉,周颖. 中碳钢过冷奥氏体形变过程中的组织演变[J]. 热加工工艺, 2015, 44(9): 1-5.
- [6] 王健,朱伟,刘荣杰,等. 形变和冷却工艺对X70HD管线钢形变诱导铁素体相变的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(2): 113-118.
- [7] 吕尚霖,杨忠民,项金钟,等. 铌钒微合金钢的动态再结晶行为[J]. 金属热处理, 2014, 39(9): 87-91.
- [8] 李辉平,贺连芳,杨肖丹,等. 形变和冷却对B1500HS硼钢马氏体相变的影响[J]. 机械工程学报, 2016, 52(10): 67-74.

陈继林(1986-),男,博士生,高级工程师,河北科技大学(本科)毕业,特钢线材研发和质量管理工作。
E-mail: chenjl@xtsteel.com

收稿日期: 2020-10-26