

# 珠光体片间距的热力学控制及其 对钢力学性能的影响

莫文锋

(柳州职业技术学院机电工程学院, 广西 柳州 545616)

**摘 要:** 利用实验室炼钢、轧制、热处理等手段获得了成分一致但珠光体片间距不同的两种材料, 利用扫描电镜和万能试验机对比研究了珠光体片间距与力学性能之间的关系, 得到以下结论: 试验材料的珠光体片层间距的倒数  $S_p^{-1}(\mu\text{m}^{-1})$  与其珠光体转变过冷度  $\Delta T(^{\circ}\text{C})$  满足线性关系  $S_p^{-1}=9.020\ 1+0.033\ 58\Delta T$ , 可知该材料进行  $550\ ^{\circ}\text{C}$  等温处理可获得理论上最细珠光体片间距(约 61 nm)。随着极细珠光体片间距的细化, 由 105 nm 降至 72 nm 时, 材料强度上升的同时会出现塑性显著恶化, 其极限变形应变值由 0.18 降至 0.12, 这与传统细晶强化理论不一致, 其原因是细化的珠光体片层抑制了位错的自由运动。

**关键词:** 高强钢; 珠光体; 片层间距; 强度; 塑性; 电子背散射衍射

中图分类号: TF76, TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)05-0175-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.05.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Thermodynamic control of pearlite lamellar sheet spacing and its effect on mechanical properties of steel

Mo Wenfeng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Liuzhou Vocational and Technical College, Liuzhou 545616, Guangxi, China)

**Abstract:** A pearlite steel was prepared via laboratory steelmaking, and then after rolling and heat treatment to obtain two different samples with different pearlite lamellar spacing. The mechanical properties and microstructures of the materials were observed by scanning electron microscopy and universal testing machine. Results show that the reciprocal  $S_p^{-1}(\mu\text{m}^{-1})$  of pearlite lamellae and transformation super cooling degree of pearlite  $\Delta T(^{\circ}\text{C})$  satisfy the linear relationship of  $S_p^{-1}=9.020\ 1+0.033\ 58\Delta T$ . This indicates that the theoretical minimum pearlite lamellae spacing( $\sim 61\ \text{nm}$ ) can be obtained by isothermal treatment at  $550\ ^{\circ}\text{C}$ . With the thinning of the spacing between the very fine pearlite lamellar( from 105 to 72 nm), the strength increases but ductility will deteriorate significantly, and the ultimate deformation strain will decrease from 0.18 to 0.12. This result conflicts with the traditional grain refinement strengthening theory. The reason is that the refined pearlite lamellar restrains the free movement of dislocations.

**Key words:** high strength steel, pearlite, lamellar spacing, strength, ductility, EBSD

收稿日期: 2020-07-22

基金项目: 2020 年度广西高校中青年骨干教师基础能力提升项目(2020KY31012)。

作者简介: 莫文锋(1983—), 男, 壮族, 广西隆安人, 研究生, 讲师, 主要从事金属材料热加工及数值模拟、工业产品数字化设计与制造研究, E-mail: [kjxm888@163.com](mailto:kjxm888@163.com)。

## 0 引言

珠光体是一种渗碳体和铁素体组合形成的片层状机械混合物,可以按照其片间距<sup>[1]</sup>分为屈氏体(30~80 nm,又称极细珠光体)、索氏体(80~150 nm,又称细珠光体)和珠光体(150~450 nm)。珠光体由于具有极佳的强韧性匹配,且在实际生产中便于控制,因此得到了广泛的应用。强度和韧性是该类材料必要的性能指标,但是随着材料强度的增加,其组织中的裂纹扩展速率与屈服强度的平方成正比例关系,内部裂纹尖端位置的韧性会大幅度下降<sup>[2]</sup>。

细晶强化是目前公认的唯一可以同时改善钢材强度和韧性的强化方式<sup>[1]</sup>,对珠光体片间距进行细化已被证明可以提高珠光体材料综合力学性能。目前细化珠光体片间距的方法主要有两类:对珠光体材料进行大量冷加工变形,包括拉拔和轧制等;另一种是利用热力学原理,增加从奥氏体向珠光体转变的驱动力,增加珠光体转变过程中的形核数量。前者方式依赖大量的形变,因此仅适用于极细钢丝和极薄钢板<sup>[3]</sup>;而后者方式不受材料外形尺寸的限制,应用范围更加广泛<sup>[4]</sup>。

前人对珠光体材料的断裂韧性与其原奥氏体晶粒尺寸<sup>[5]</sup>、珠光体团簇尺寸<sup>[6]</sup>、珠光体片间距<sup>[7]</sup>等微观组织之间的关系已经进行了广泛且深入的研究。其中,Baker<sup>[8]</sup>等人的相关研究成果表明:珠光体团

簇尺寸对材料的韧性影响较原奥氏体晶粒尺寸更大,而且通过测试珠光体片间距在100~330 nm的材料在-80℃的断裂韧性,发现材料的断裂韧性随珠光体片层间距的降低出现先降低后升高的现象。文献[9]显示:珠光体片间距在140~280 nm的材料拉伸断口中心存在环状塑性特征,其边部则呈脆性特征。然而,对未变形的极细片间距的高强度珠光体材料而言,材料韧性与其片间距之间的关系尚未经充分证实,且韧性与强度的匹配关系需要进一步研究。

笔者试验选用的两种材料的化学成分和原始奥氏体晶粒尺寸一致,在热力学计算基础上,通过不同的热处理工艺获得了不同珠光体片间距。通过研究两种材料的应力-应变曲线和断裂韧性,获得了极细珠光体材料的强度和韧性与其珠光体片间距之间的关系,填补了该领域的空白,以期对珠光体材料在实际生产过程中的组织控制提供理论依据。

## 1 试验材料及方法

试验材料主要化学成分如表1所示,经测量,该材料的奥氏体开始转变温度 $A_{r3}$ 约765℃,珠光体最低转换温度约550℃,且贝氏体起始转变温度约520℃,贝氏体起始转变温度低于珠光体最低转换温度,因此具有获得全珠光体的条件。

表1 试验材料主要化学成分  
Table 1 Main chemical compositions of test materials

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Co	%
0.72	1.35	0.55	0.009	0.012	0.80	0.35	3.02	

首先利用50 kg电炉冶炼和模铸得到150 mm×55 mm×30 mm的铸坯,再经1 000℃马弗炉加热15 h后热轧成为15 mm的厚板,将厚板切割为多块70 mm×30 mm×15 mm的小块,最后通过马弗炉将试样在1 000℃中加热保温1 h后,急速转移至750℃和620℃等温炉中分别保温45 min和65 min,以获得不同片层间距的珠光体组织,将750℃和620℃等温转变后的试样分别命名为1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>。

对1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>试样进行切割分块,经研磨、抛光和4%硝酸酒精腐蚀后,采用JSM-7600F型场发射扫描电子显微镜进行珠光体片层间距测量,每种试样至少测量25张图片,每张图片上至少有两个有效数据,每个有效数据为连续10层铁素体和渗碳体相叠

加的厚度,每种试样保证至少50个有效数据。对试样进行电子背散射衍射(EBSD)检测,试样的扫描面积为400 μm×400 μm,步长为0.3 μm,所有试样的解析率均超过90%。将试样切割为15 mm×2 mm×3 mm,利用H25KS万能试验机在恒定应变率0.001 s<sup>-1</sup>下测量试样的屈服强度、抗拉强度以及应力-应变曲线。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 等温转变温度对珠光体片层间距的影响

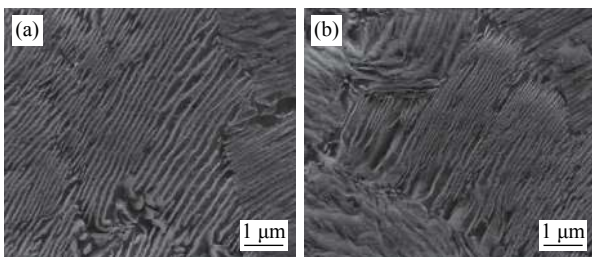
珠光体转变过程依赖碳原子的扩散,而碳原子的扩散速率主要受到相变温度的影响,当等温温度较高时,珠光体转变过程中的过冷度较小,形核位置

少,因此生成的珠光体片层间距更大。研究<sup>[10]</sup>表明:珠光体片层间距的倒数  $S_p^{-1}$  与过冷度  $\Delta T$  之间呈反比例关系,可以由公式  $S_p^{-1}=A+B \times \Delta T$  表示,其中 A 和 B 为待定常数。

经 750 °C 和 620 °C 等温处理后,1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>试样的扫描电镜典型形貌见图 1,试样的显微组织为全珠光体,且 2<sup>#</sup>组织珠光体片间距更细小,经定量统计,1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>试样的珠光体片间距均值分别为 105 nm 和 72 nm。结合该材料的  $A_3$  约 765 °C,可以推导出该材料珠光体片层倒数  $S_p^{-1}$  与珠光体转变过冷度  $\Delta T$  关系可用以下公式表示:

$$S_p^{-1} = 9.020 1 + 0.033 58 \Delta T$$

其中,  $S_p^{-1}$  单位为  $\mu\text{m}^{-1}$ ,  $\Delta T$  单位为 °C。按照该公式理论上可知,该材料在珠光体最低转换温度 550 °C 时进行等温处理后可获得的最细珠光体片间距为 61 nm。



(a) 1<sup>#</sup>样, 750 °C 等温 (b) 2<sup>#</sup>样, 620 °C 等温

图 1 试样的扫描电镜显微组织

Fig. 1 Scanning electron microscopy of the samples

### 2.2 等温转变温度对力学性能的影响

1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>试样的应力-应变曲线如图 2 所示,具体数据见表 2。粗片层珠光体的 1<sup>#</sup>试样的屈服强度和抗拉强度分别为 790 MPa 和 1 155 MPa,而细珠光

体片层的 2<sup>#</sup>试样的屈服强度和抗拉强度分别为 1 075 MPa 和 1 285 MPa。

金属材料在拉伸变形过程中发生断裂的最大变形程度被称为该金属的变形极限,这是一种评价材料塑性的方法<sup>[11]</sup>。从两试样拉伸过程中的应力-应变曲线(图 2)中可以看出,1<sup>#</sup>试样的极限变形应变值约为 0.18,而 2<sup>#</sup>试样为 0.12,1<sup>#</sup>试样的极限变形能力更优,这与 1<sup>#</sup>试样的伸长率更高一致。综合两试样的珠光体片间距(1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>试样分别为 105 nm 和 72 nm)可得:随着试样珠光体片层间距的降低,材料塑性下降,这与传统的细晶强化结论不一致。

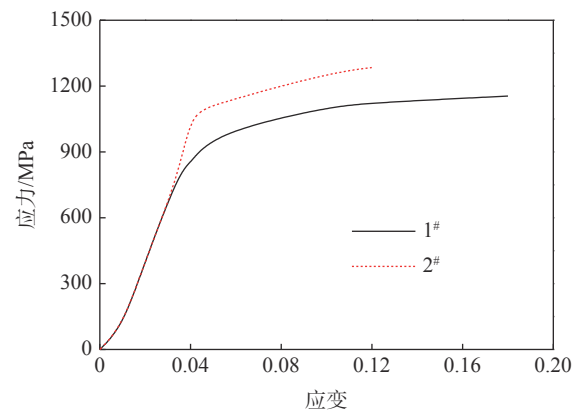


图 2 拉伸试样的应力-应变曲线

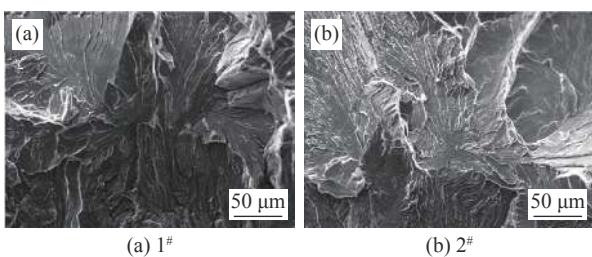
Fig. 2 Stress-strain curves of tensile specimens

1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>试样的拉伸断口形貌如图 3 所示,两种材料的断口均呈脆性河流解理状。通过对两种试样断口的解理面尺寸进行测量,得到 1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>的河流花纹平均尺寸分别为 87 ~ 112  $\mu\text{m}$  和 85 ~ 105  $\mu\text{m}$ ,两者没有很大区别。研究表明,试样组织形成河流纹路主要是由于拉伸断裂行为在微小取向差的平面上进行而造成的<sup>[12]</sup>。

表 2 试样的力学性能结果

Table 2 Mechanical properties of the specimens with different pearlite lamellar spacing

编号	平均珠光体片间距/nm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
1 <sup>#</sup>	105	790	1 155	17.7
2 <sup>#</sup>	72	1 075	1 285	11.6



(a) 1<sup>#</sup> (b) 2<sup>#</sup>

图 3 试样拉伸断口边部形貌

Fig. 3 Fracture edge morphology of tensile specimens

### 2.3 等温转变温度对珠光体晶粒尺寸的影响

1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>试样的电子背散射衍射 (EBSD) 检测结果如图 4 所示,其中取向差大于 13°的晶界围成区域被认定为一个完整晶粒,按此方法可得到两试样的晶粒尺寸范围均为 80 ~ 110  $\mu\text{m}$ ,处于同一水平。该尺寸范围与拉伸断口的河流花纹尺寸范围一致,拉伸断口的河流花纹尺寸可以近似表征其组织中的珠光体团簇尺寸。

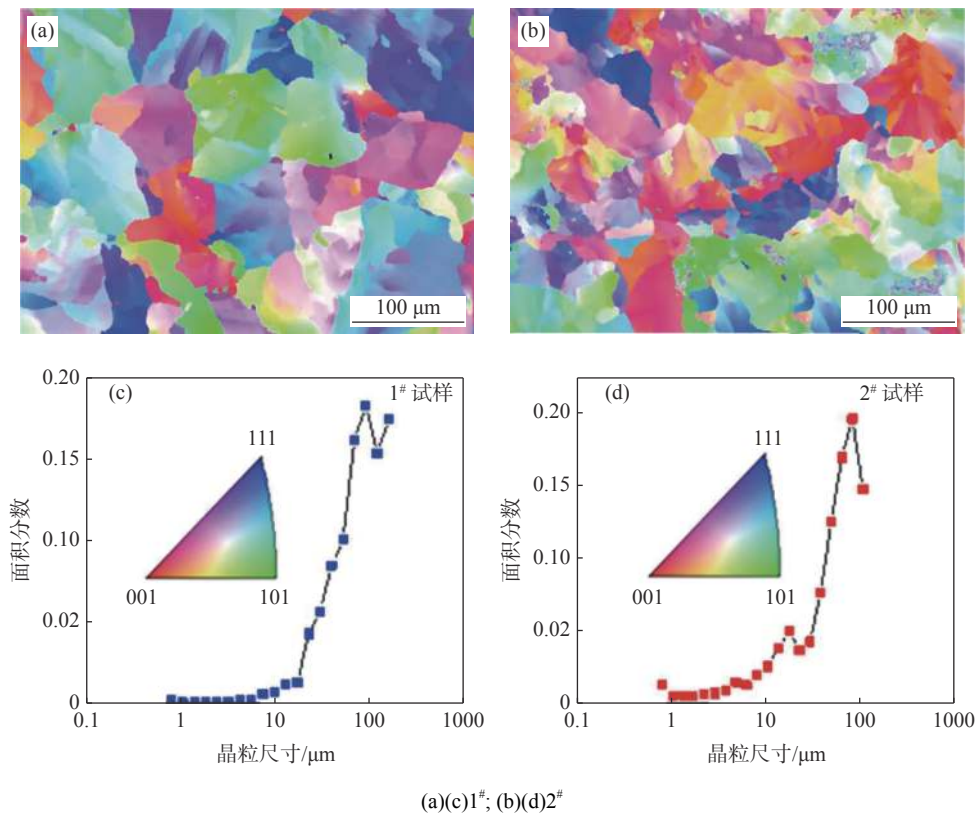


图4 试样的晶粒取向,以及面积分数与颗粒直径的比例关系  
Fig. 4 The grain orientation and relationship between area fraction and particle diameter

单个珠光体团簇中的铁素体之间仅包含小角度边界和微小取向差,由于相邻奥氏体晶界的取向差也大于 $13^\circ$ <sup>[13]</sup>,因此可认为两材料的奥氏体晶粒尺寸和珠光体团簇尺寸均类似,说明两材料在珠光体转变之前的等温过程的加热程度相同。两种材料的珠光体团簇尺寸类似,片间距有一定的差别,但力学性能存在差别,可以说明珠光体片间距是影响其力学性能的关键因素。

已有结论表明<sup>[5]</sup>:在细珠光体(片间距约100~200 nm)材料的变形过程中位错分布较均匀,珠光体材料组织中会发生渗碳体片层的变形来均匀调节内部应力,不会造成应力局部集中导致快速断裂。细小珠光体断裂的微观机理是由渗碳体片层过载造成的<sup>[9]</sup>,渗碳体片层会在珠光体团中沿最大主应力方向平行排列,并在临界应力状态下发生断裂。珠光体片层更细,其组织中的微裂纹需要更大的解理应力进行扩展,因此片间距更细的2#材料具备更高的屈服强度和抗拉强度。但由于拉伸过程中组织内的位错大幅度增值,而细小的珠光体片间距会限制位错的运动,因此2#试样在拉伸过程中的塑性变形程度更低,塑性更差,这是与传统细晶强化结论不一致的主要组织原因。

基于以上试验数据和分析,对于珠光体材料而言,在未变形条件下控制珠光体片间距过程中,小于100 nm范围内的珠光体片间距细化会提高材料的屈服强度和抗拉强度,但是也会降低材料的塑性。对于不同性能需求的材料而言,可以进行适当的珠光体片间距控制以匹配其强度和塑性。另外,可以尝试将变形和增大珠光体转变驱动力两种方式相结合,进一步探索珠光体材料最优强塑性匹配极限。

### 3 结论

在理论计算的基础上,利用热处理手段,奥氏体等温转变分别在 $620^\circ\text{C}$ 和 $750^\circ\text{C}$ 下进行得到不同片间距的全珠光体钢,探讨了未变形条件下珠光体材料机械性能与其片间距之间的关系,结论如下:

1)材料的珠光体片层的倒数 $S_p^{-1}(\mu\text{m}^{-1})$ 与珠光体转变过冷度 $\Delta T(^\circ\text{C})$ 满足线性关系 $S_p^{-1}=9.0201+0.03358\Delta T$ 。对该材料在珠光体最低转换温度 $550^\circ\text{C}$ 时进行等温处理后,理论上可获得的最细珠光体片间距为61 nm。

2)珠光体片间距是影响珠光体材料力学性能的关键因素,随珠光体片间距的细化,材料的强度上升,塑性下降,其原因是细化的珠光体片层会限制微裂

纹扩展,同时会抑制位错的自由运动。

3)极细珠光体材料拉伸断口的脆性河流解理状纹路尺寸与其珠光体团簇尺寸范围一致,其原因为

试样组织在小范围内具有微小取向差时,拉伸断裂行为便会在同一平面上进行。

## 参考文献

- [1] Liu Yongquan. Heat treatment of steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1981.  
(刘永铨. 钢的热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1981.)
- [2] Gong Shuai, Ren Xuechong, Ma Yingxia, *et al.* Effect of heat-treatment on microstructure and fracture toughness of high-speed railway wheel steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(4): 150-155.  
(龚帅, 任学冲, 马英霞, 等. 热处理工艺对高速车轮钢显微组织和断裂韧性的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(4): 150-155.)
- [3] Yao Xusheng, Liu Yandong, Zuo Liang. Quantitative texture analysis of cold drawn pearlitic steel wires[J]. Iron and Steel, 2008, 43(3): 65-68.  
(姚旭升, 刘沿东, 左良. 冷拔珠光体钢丝帘线中织构演变的定量研究[J]. 钢铁, 2008, 43(3): 65-68.)
- [4] Wu Liwen, Tang Yanchuan, Zhao Zifei, *et al.* Effect of austenitizing and isothermal transformation temperature on microstructure and properties of high carbon steel wire rod[C]// China Society of Metals, Baosteel Academic Annual Meeting. Shanghai: China Society of Metals, 2015: 58-65.  
(吴礼文, 唐延川, 赵自飞, 等. 奥氏体化和等温转变温度对高碳钢盘条组织性能的影响[C]// 中国金属学会宝钢学术年会. 上海: 中国金属学会, 2015: 58-65.)
- [5] Wu Qinghui, Yang Zhongmin, Chen Ying, *et al.* Effect of transformation temperature on microstructure and properties of fully pearlite rail steel[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(10): 67-70.  
(吴庆辉, 杨忠民, 陈颖, 等. 相变温度对珠光体轨钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(10): 67-70.)
- [6] Jiang Tao, Lei Xinrong, Wu Hongdan, *et al.* Effect of heat treatment on hardness of carbon steel[J]. Hot Working Technology, 2011, (4): 167-169.  
(蒋涛, 雷新荣, 吴红丹, 等. 热处理工艺对碳钢硬度的影响[J]. 热加工工艺, 2011, (4): 167-169.)
- [7] Li Ping, Wang Lei, Zhou Qingfeng. Formation reasons and countermeasures of cementite network in the center of 82B wire rods[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26(9): 33-36.  
(李平, 王雷, 周青峰. 82B中心网状渗碳体产生原因及改善方法[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(9): 33-36.)
- [8] Kavishe F P, Baker T J. Effect of prior austenite grain size and pearlite interlamellar spacing on strength and fracture toughness of eutectoid rail[J]. Materials Science and Technology, 1986, 2(8): 816-822.
- [9] Zhang C L, Liu Y Z, Zhou L Y. Influence of pearlite interlamellar spacing on the deformation behavior and fracture characteristics in spring steel 60Si2MnA[J]. Appl. Mech. Mater., 2014, 456: 388-391.
- [10] Lu Xiuyu, Sun Ruji, Jiang Yuedong, *et al.* Study on hot simulation of isothermal lead bath for high strength wire rod[J]. Hot Working Technology, 2017, (12): 219-221.  
(鲁修宇, 孙汝继, 蒋跃东, 等. 高强线材等温铅浴热模拟研究[J]. 热加工工艺, 2017, (12): 219-221.)
- [11] Zhang Yunxiang. Study on microstructure evolution and performance prediction system of high strength wire rod during hot working[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010: 5-15.  
(张云祥. 高强度线材热加工的组织演变和性能预报系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010: 5-15.)
- [12] Zhu Shili, Hu Wenhao. Research on embrittlement mechanisms of lamellar pearlite in eutectoid steel[J]. Foundry Technology, 2010, 31(5): 584-588.  
(朱施利, 胡文豪. 共析钢中片状珠光体脆化钢材的机理研究[J]. 铸造技术, 2010, 31(5): 584-588.)
- [13] Chen Xianzhong, Yan Guanglin, Xu Wei, *et al.* Development of high toughness and super-high strength zinc electro-plating steel wire for rope[J]. Hot Working Technology, 2009, (6): 11-13.  
(陈贤忠, 鄢光霖, 徐伟, 等. 强韧性特高强度镀锌制绳钢丝的研制[J]. 热加工工艺, 2009, (6): 11-13.)