

## 温度对马氏体和铁素体晶格常数影响规律

齐海东 王晶 陈中军 吴忠华 宋西平

### Influence of temperature on lattice constants of martensite and ferrite

Qi Hai-Dong Wang Jing Chen Zhong-Jun Wu Zhong-Hua Song Xi-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 098301 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211954

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211954>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

铸造奥氏体不锈钢中铁素体与奥氏体位向关系及其对声衰减的影响

Orientation relationship between ferrite and austenite and its influence on ultrasonic attenuation in cast austenitic stainless steel

物理学报. 2018, 67(23): 238102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181251>

基于第一性原理的含空位  $\alpha$ -Fe和H原子相互作用研究

Investigation of interaction between  $\alpha$ -Fe metal and H atom by ab-initio method

物理学报. 2020, 69(5): 053101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191775>

温度对小角度对称倾斜晶界位错运动影响的晶体相场模拟

Phase field crystal simulation of the effect of temperature on low-angle symmetric tilt grain boundary dislocation motion

物理学报. 2019, 68(17): 170504 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190051>

延性金属层裂强度对温度、晶粒尺寸和加载应变率的依赖特性及其物理建模

Dependence of spall strength on temperature, grain size and strain rate in pure ductile metals

物理学报. 2022, 71(3): 034601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210702>

不同温度压力对浓度反演精度的定量分析

Quantitative analysis of accuracy of concentration inversion under different temperature and pressure

物理学报. 2021, 70(7): 073201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201672>

双旋光双反射结构的温度-辐射自稳定性原理和实验研究

Principle and experimental study of self-stability of reflector based on two magneto-optical crystals and two mirrors under effect of temperature and radiation

物理学报. 2019, 68(16): 164202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190429>

# 温度对马氏体和铁素体晶格常数影响规律\*

齐海东<sup>1)</sup> 王晶<sup>1)3)</sup> 陈中军<sup>2)</sup> 吴忠华<sup>2)</sup> 宋西平<sup>1)†</sup>

1) (北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

2) (中国科学院高能物理研究所, 北京同步辐射装置, 北京 100049)

3) (中国核动力研究设计院, 成都 610213)

(2021年10月20日收到; 2022年1月21日收到修改稿)

采用同步辐射技术研究了温度对马氏体和铁素体晶格常数的影响规律. 研究表明, 马氏体和铁素体的晶格常数均随着温度的升高而逐渐增大, 但马氏体的衍射峰有分峰现象, 而铁素体的衍射峰没有分峰现象. 对马氏体的{110}和{200}衍射峰进行分峰处理, 得到马氏体晶格常数  $a$  和  $c$  随温度升高逐渐增大, 但晶格常数  $a$  的增大速度要大于  $c$  的速度, 即马氏体的正方度逐渐降低. 当温度升至 500 °C 时, 马氏体正方度  $c/a = 1$ . 铁素体的晶格常数随温度的变化规律与马氏体晶格常数  $a$  的基本相同, 而与马氏体晶格常数  $c$  的明显不同, 表明了温度对马氏体晶格常数的影响本质. 除此以外, 通过对同步辐射数据的分析, 建立了马氏体和铁素体晶格常数随温度变化的数值方程.

**关键词:** 温度, 马氏体, 铁素体, 晶格常数

**PACS:** 83.10.Tv, 61.66.Dk, 61.05.-a, 33.20.Rm

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211954

## 1 引言

1895年, 法国学者 Osmond<sup>[1]</sup> 为纪念德国冶金学家 Adolph Martens, 将钢铁材料经淬火后得到的显微组织命名为马氏体. 迄今为止, 关于马氏体的研究已经深入到材料研究的各个领域, 比如钢铁材料中的低碳马氏体、高碳马氏体、隐晶马氏体以及有色金属中的热弹马氏体等. 有关马氏体微结构方面的研究也不断取得新进展, 研究内容涉及不同条件下位错、孪晶和晶格常数的变化规律<sup>[2-4]</sup>. 在马氏体晶格常数研究方面, 碳含量对马氏体晶格常数有着显著的影响<sup>[5-8]</sup>. 最早在 1928年, Kurdjumov 等采用 X 射线衍射的方法研究了马氏体中碳含量对晶格常数的影响, 并给出马氏体晶格常数与碳含量之间的定量关系<sup>[9,10]</sup>:

$$c = a_0 + \alpha p, \quad a = a_0 - \beta p, \quad c/a = 1 + \gamma p, \quad (1)$$

式中  $p$  为高温奥氏体的碳含量;  $a_0$  为体心立方  $\alpha$ -Fe 的晶格常数;  $\alpha, \beta, \gamma$  为实验参数, 分别为  $0.116 \pm 0.002, 0.013 \pm 0.002$  和  $0.046 \pm 0.001$ . 1990年, Cheng 等<sup>[11]</sup> 收集了大量不同碳含量下的马氏体晶格常数的数据, 并在两者间建立了碳含量适用范围更广、更可靠的关系式. 刘晓和康沫狂<sup>[12]</sup> 于 2000年采用 X 射线衍射的方法测定了不同碳含量的马氏体的晶格常数, 通过对衍射峰分峰处理得到了马氏体点阵常数与碳含量  $p$  ( $0.18\% < p < 0.55\%$ ,  $p$  为质量百分数) 之间的定量关系:

$$c = 0.28664 + (0.0020 \pm 0.0002)p, \quad (2a)$$

$$a = 0.28723 - (0.0013 \pm 0.0002)p. \quad (2b)$$

2007年, Becquart 等<sup>[13]</sup> 基于嵌入原子势方法和从头算算法模拟了马氏体中碳原子对晶格常数的影响. 模拟结果表明, 马氏体晶格常数与碳含量之间呈现良好的线性关系, 随着马氏体中碳含量的

\* 国家自然科学基金 (批准号: 21171018, 51271021) 和新金属国家重点实验室基金 (批准号: 2019-ZD06, 2021Z-18) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xpsong@skl.ustb.edu.cn

增大, 晶格常数  $c$  逐渐增大,  $a$  逐渐减小. Becquart 等<sup>[13]</sup> 将模拟得到的不同碳含量下马氏体的晶格常数与 Cheng 等<sup>[11]</sup> 的结果相比较, 发现不同碳含量下模拟得到的  $a$  的数值与 Cheng 等的结果相一致, 而  $c$  的数值要略低于 Cheng 等的结果. 2017 年, Chentouf 等<sup>[14]</sup> 基于第一性原理中的密度泛函理论, 模拟了马氏体晶格常数与碳含量之间的关系, 拟合结果显示, 马氏体的晶格常数与碳含量之间存在良好的线性变化关系. Chentouf 等<sup>[14]</sup> 将模拟的结果与 Cheng 等<sup>[11]</sup> 和 Becquart 等<sup>[13]</sup> 得到的结果进行比较, 结果显示, Chentouf 等的模拟结果与 Cheng 等得到的结果十分相近, 与 Becquart 等模拟得到的结果略有差别.

除了碳含量外, 温度也是影响碳钢马氏体晶格常数的重要因素. 1980 年, Chen 和 Winchell<sup>[15]</sup> 通过 X 射线衍射研究了温度对 Fe-Ni-C 合金中马氏体晶格常数的影响, 发现随着温度的变化, 晶格常数  $c$  发生了显著变化, 但晶格参数  $a$  和  $b$  变化的不明显. 然而, 他们认为马氏体在高温下会发生再取向, 无法建立晶格常数和温度之间的定量关系. 2006 年, Rammo 和 Abdulah<sup>[16]</sup> 基于 1) 马氏体为体心立方结构, 2) 空位浓度是影响高温下马氏体晶格常数变化的重要因素这两个假设, 提出了一种用于预测温度对马氏体晶格常数影响的数学模型:

$$\Delta a(T) = \left( \alpha \Delta T - \frac{C_v(T)}{3} \right) a_0, \quad (3)$$

式中,  $\Delta a$  表示晶格参数的变化量,  $\alpha$  表示马氏体的热膨胀系数,  $\Delta T$  表示温度的升高量,  $C_v$  表示晶格中的空位浓度,  $a_0$  表示原始晶格常数. 然而, (3) 式目前还没有经过实验验证. 2020 年, Wang 等<sup>[17]</sup> 通过中子衍射研究了奥氏体向马氏体转变过程中晶格参数的变化, 发现刚生成马氏体呈现体心正方结构, 但其正方度 ( $c/a$ ) 随着时间的推移迅速降低. 然而, 他们没有指出在这个过程中  $c$  和  $a$  各自是如何变化的.

目前采用实验的方法来研究温度对马氏体晶格常数的影响还鲜有报道. 同步辐射技术具有高强度、高亮度、光谱连续、频谱范围广、准直性好等优点<sup>[18,19]</sup>, 相比于传统 X 射线衍射技术, 同步辐射技术更适用于测算马氏体的晶格常数. 本文拟采用同步辐射技术研究温度对马氏体和铁素体晶格常数的影响, 特别是温度对马氏体晶格常数  $c$  和  $a$  各自的影响规律, 并结合实验数据推导马氏体和铁素体

晶格常数随温度变化的函数解析式, 为马氏体和铁素体材料的研究提供依据和参考.

## 2 实验

### 2.1 试样制备

实验所用热模钢为购买来的商业用钢 (牌号为 H13), 其化学成分为 C (0.35%—0.45%, 质量分数, 后同), Si (0.60%—1.30%), Mn (0.20%—0.60%), Cr (4.50%—5.50%), Mo (1.00%—1.80%), 以及 V (0.80%—1.50%). 通过对热模钢进行淬火得到马氏体, 热模钢的淬火工艺采用感应加热, 使材料温度快速加热至 1050 °C, 保温 150 s, 然后油淬. 通过对淬火钢进行回火处理得到铁素体, 回火工艺为淬火后的材料加热至 580 °C, 保温 2 h, 然后空冷.

### 2.2 测试方法

采用北京同步辐射光源 (BSRF)4B9A 线站对热作模具钢进行变温同步辐射衍射实验. 4B9A 线站装置主要由样品台、同步辐射入射束以及 Mythen 探测器组成, 其中, 4B9A 光束所采用的光源能量为 8049.4285 eV, 波长为 0.15403 nm; Mythen 探测器由 24 个模块构成, 每个模块由 1280 像素组成, 共计 30720 像素, 总共覆盖 120° 的  $2\theta$  角度范围, 可用于马氏体衍射全谱的同时测量. 每个像素对应的角度 ( $2\theta$ ) 范围约 0.004°. 实验采用 Anton Paar 加热炉, 加热温度范围: 室温—1600 °C. 试验时, 同步辐射的实验温度分别为 25, 200, 400, 500, 600, 650, 700 °C. 晶格常数测试采用步进式扫描, 扫描角度为 43°—46°, 62°—66°, 步长为 0.005°, 计数为 200000. 为确定铁素体-奥氏体转变温度, 本实验还进行了 40—100° 的连续扫描, 扫描速度为 6 (°)/min. 同步辐射衍射的试样尺寸见图 1.

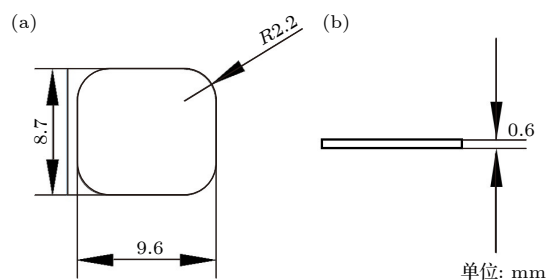


图 1 同步辐射衍射试样尺寸图

Fig. 1. Dimension of samples for synchrotron radiation diffraction.

### 3 实验结果

#### 3.1 温度对马氏体晶格常数的影响

图 2(a) 和图 2(b) 是不同温度下马氏体{110}和{200}晶面的衍射图谱. 由图 2 可知, 随着温度的升高, 马氏体{110}, {200}晶面衍射峰逐渐向低角度偏移, 说明其晶面间距增大, 相应的晶格常数也增大. 由图 2 还可看出, 当温度等于或低于 400 °C 时, {110}, {200}晶面衍射峰出现了分峰现象, 即  $\alpha$ -Fe 的 {110} 晶面衍射峰分裂为 (101) 和 (110) 两个晶面对应的衍射峰, {200} 晶面衍射峰分裂为 (002) 和 (200) 两个晶面对应的衍射峰, 而当温度高于 400 °C 后, 这种分峰现象消失. 这种现象与马氏体的正方度有关. 这是因为当温度不高于 400 °C 时, 马氏体的晶体结构为体心正方, 晶格常数  $a$  和  $c$  不相等, 使得 (110) 和 (101), 以及 (002) 和 (200) 晶面间距不再相等, 相应地在其原来的衍射峰位置

附近就会出现两个衍射峰, 即发生了衍射峰的分峰现象 [8,12,20]. 当温度高于 400 °C 时, 马氏体的晶体结构转变为体心立方, 此时晶格常数  $a$  和  $c$  相等 [21,22], 使得 (110) 和 (101), 以及 (002) 和 (200) 晶面间距相等, 未出现衍射峰的分峰现象.

为了求得温度不高于 400 °C 时马氏体的晶格常数  $a$  与  $c$ , 需要对不同温度下的衍射峰进行分峰处理, 即采用 PeakFit v4 软件对马氏体的 {110} (或 {200}) 晶面的衍射峰进行分峰处理, 以得到相应的 (110) 及 (101) 晶面对应的衍射角 (或 (200) 及 (002) 晶面对应的衍射角). 图 3(a) 和图 3(b) 分别为温度 400 °C 时, {110} 和 {200} 晶面衍射峰分峰处理过程图. 从图 3 可以看出, (110) 及 (101) 晶面对应的衍射角分别为 44.23° 和 44.21°, (200) 及 (002) 晶面对应的衍射角分别为 64.33° 和 64.14°. 由于 (200) 及 (002) 衍射角相差 0.19°, 而 (110) 及 (101) 衍射角相差 0.02°, 所以 {110} 晶面的分峰现象没有 {200} 晶面显著.

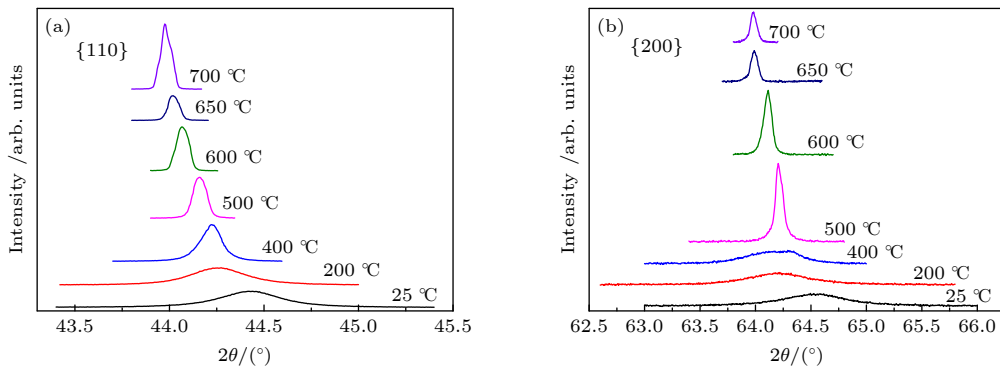


图 2 不同温度下马氏体{110}和{200}晶面的衍射谱 (a) {110}晶面; (b) {200}晶面

Fig. 2. Diffraction patterns of {110} and {200} crystal planes of martensite at different temperatures: (a) {110} crystal planes; (b) {200} crystal planes.

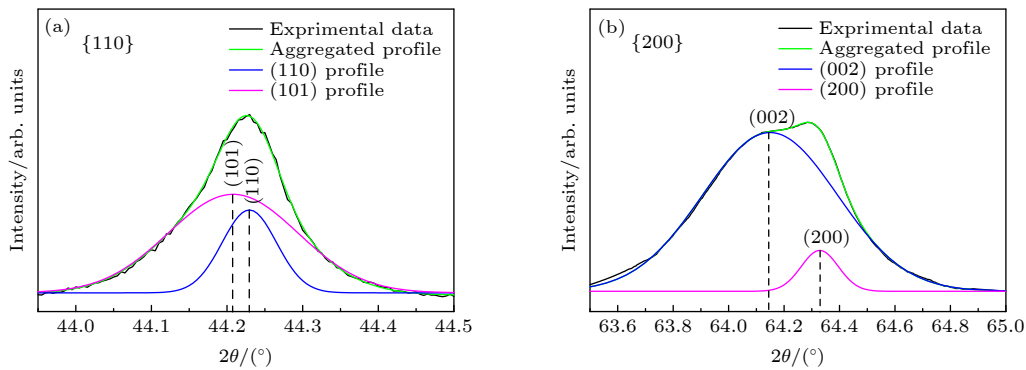


图 3 400 °C 时马氏体{110}和{200}晶面衍射峰分峰处理图 (a) {110}晶面; (b) {200}晶面

Fig. 3. Splitting process of {110} and {200} diffraction peaks of martensite at 400 °C: (a) {110} crystal planes; (b) {200} crystal planes.

利用布拉格方程,  $2d\sin\theta = n\lambda$ , 当知道马氏体 (110) 和 (101) 晶面对应的衍射角  $2\theta$  值时, 就可以求得晶面间距  $d(110)$  和  $d(101)$ . 再根据四方点阵的晶面间距公式<sup>[23]</sup>(4) 式, 求出体心正方马氏体的晶格常数  $a_1$  和  $c_1$ .

$$d = \frac{a_1}{\sqrt{h^2 + k^2 + (a_1/c_1)^2 l^2}}, \quad (4)$$

式中,  $h, k, l$  为晶面指数;  $a_1, c_1$  为体心正方马氏体的晶格常数. 同理, 也可以由 (200) 和 (002) 晶面的衍射角求出相应的  $a_2$  和  $c_2$  的晶格常数.

当温度高于 400 °C 时, 晶格常数  $a$  与  $c$  相等. 根据立方点阵的晶面间距公式<sup>[24]</sup> (5) 式, 可分别求出体心立方 {110} 及 {200} 晶面晶格常数  $a_3$  和  $a_4$ .

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}. \quad (5)$$

对 25, 200 及 400 °C 下的 {110} 及 {200} 衍射峰进行分峰处理, 得到相应的不同晶面的衍射角, 然后再根据 (4) 式计算出相应的晶格常数, 其结果见表 1. 表 1 还包含有 400 °C 以上时立方晶格常

数  $a_3$  和  $a_4$  的变化值. 可以看出, 当温度不高于 400 °C 时, 随着温度的升高, 马氏体的正方度  $c/a$  逐渐降低.

为定量描述马氏体的晶格常数随温度变化关系, 对不同温度下马氏体的晶格常数数据进行线性回归拟合处理, 得到  $a-T, c-T$  关系曲线, 如图 4 所示. 由图 4 可以看出, 随着温度的升高, 马氏体的晶格常数  $a$  和  $c$  均逐渐增大, 但晶格常数  $a$  随温度增大的速率大于  $c$ .

通过线性拟合得到晶格常数随温度变化的规律方程, 对于 {110} 晶面:

$$c_1 = 2.8853 + 2.9598 \times 10^{-5}T, \quad T \leq 400 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (6a)$$

$$a_1 = 2.8763 + 4.4911 \times 10^{-5}T, \quad T \leq 400 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (6b)$$

$$a_3 = 2.8743 + 4.7657 \times 10^{-5}T, \quad T > 400 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (7)$$

对于 {200} 晶面:

$$c_2 = 2.8927 + 2.0544 \times 10^{-5}T, \quad T \leq 400 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (8a)$$

$$a_2 = 2.8799 + 3.7290 \times 10^{-5}T, \quad T \leq 400 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (8b)$$

$$a_4 = 2.8751 + 4.6171 \times 10^{-5}T, \quad T > 400 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (9)$$

表 1 不同温度下马氏体的晶格常数和正方度  
Table 1. Lattice constant and squareness of martensite at different temperatures.

晶格常数	温度/°C							
	25	200	400	500	600	650	700	
{110}	$a_1$	2.8762	2.8877	2.8932	—	—	—	—
	$c_1$	2.8844	2.8942	2.8957	—	—	—	—
	$a_3$	—	—	—	2.8981	2.9023	2.9063	2.9071
	$c/a$	1.0029	1.0023	1.0009	1	1	1	1
{200}	$a_2$	2.8791	2.8906	2.8933	—	—	—	—
	$c_2$	2.8924	2.8982	2.9002	—	—	—	—
	$a_4$	—	—	—	2.8984	2.9022	2.9056	2.9074
	$c/a$	1.0046	1.0026	1.0024	1	1	1	1

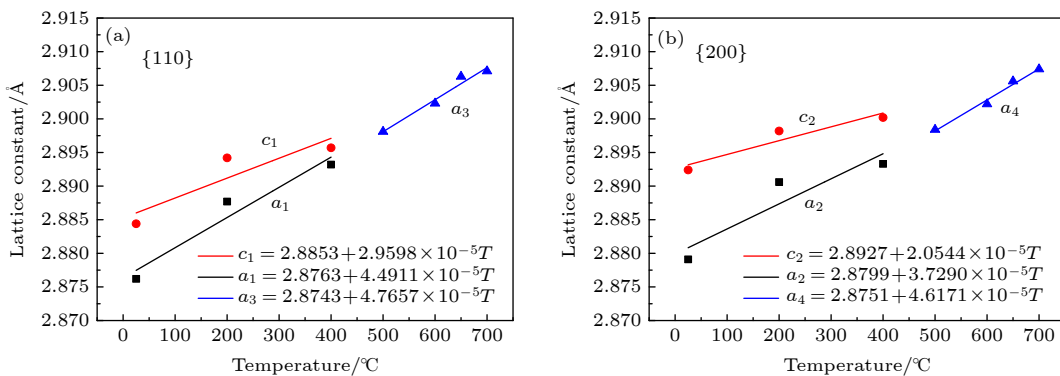


图 4 不同温度下马氏体的晶格常数 (a) {110} 晶面; (b) {200} 晶面

Fig. 4. Lattice constants of martensite at different temperatures: (a) {110} crystal planes; (b) {200} crystal planes.

### 3.2 温度对铁素体晶格常数的影响

经过回火处理后,伴随着马氏体中碳的析出,基体由马氏体转变为铁素体,其晶体结构也由体心正方转变为体心立方,相应的其衍射晶面不会再出现分峰现象,这样就可以精确地测定不同温度下铁素体的晶格常数.图5是400℃时淬火和回火状态下热模钢中{200}晶面衍射的对比图,可以看出,回火态热模钢的{200}晶面衍射峰确实不存在明显的分峰现象.

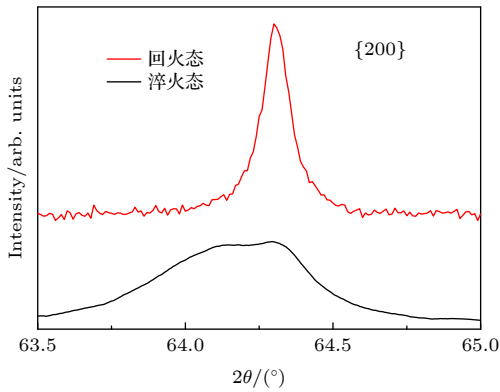


图5 400℃时淬火态和回火态钢{200}晶面的衍射谱  
Fig. 5. Diffraction patterns of (200) crystal plane in quenched and tempered steel at 400 °C.

图6为不同温度下回火态热模钢的同步辐射衍射图谱.可以看出,随着温度的升高,回火态钢中铁素体的(110), (200), (211)等晶面衍射峰向低角度方向移动,说明其晶格常数增大.同时由图6还可以看出,回火态钢在600℃以上时出现奥氏体相,即有奥氏体转变发生.

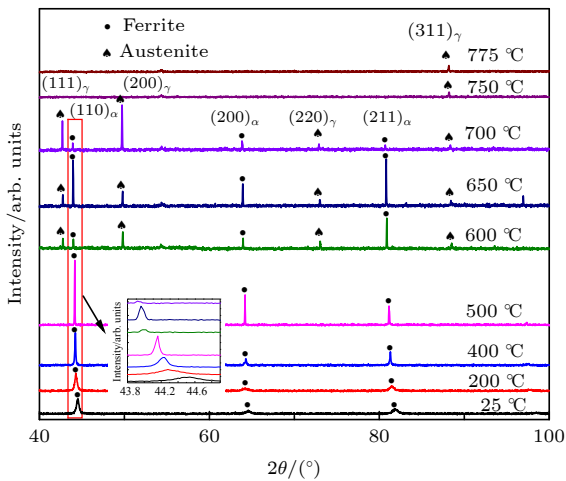


图6 不同温度下回火态钢的衍射谱  
Fig. 6. Diffraction patterns of tempered steel at different temperatures.

为了得到不同温度下铁素体晶格常数以及奥氏体晶格常数,首先对不同温度下各个衍射晶面对应的晶格常数进行计算,然后再根据 Nelson 公式((10)式)进行外推处理,如图7(a)和图7(b)所示,得到不同温度下各个衍射晶面外推的晶格常数,结果见表2所列,最后再对表2的数据进行线性拟合,得到铁素体和奥氏体的晶格常数随温度变化的关系曲线,如图7(c).对应的关系式见(11)式和(12)式.

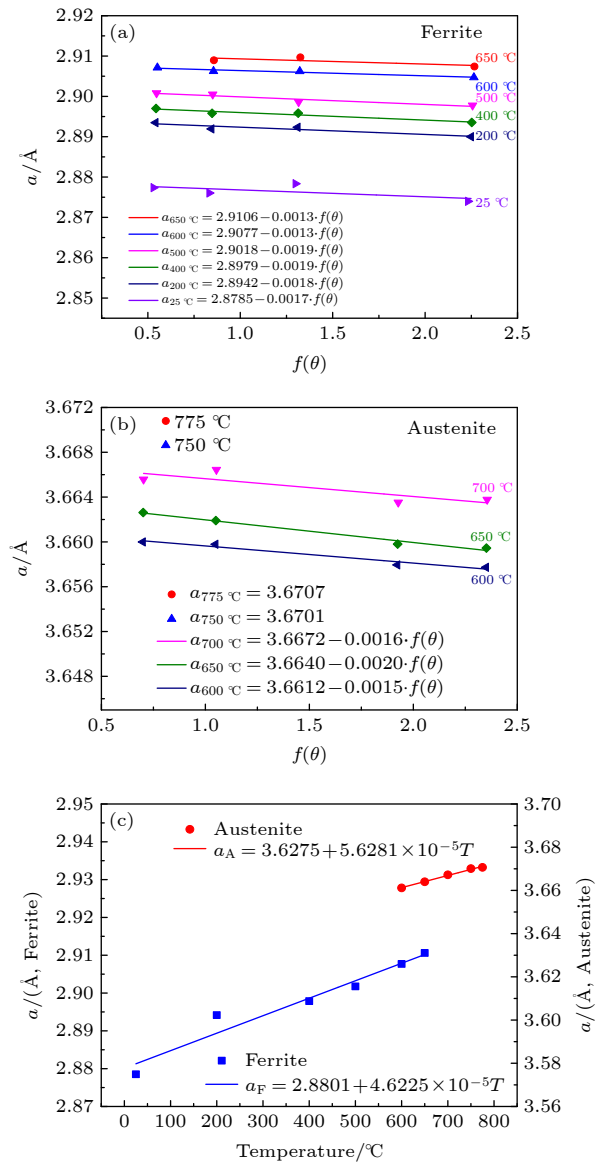


图7 回火态钢中晶格常数随温度的变化 (a)  $a_F-f(\theta)$  外推曲线; (b)  $a_A-f(\theta)$  外推曲线; (c) 不同温度下回火态钢的晶格常数

Fig. 7. Variation of lattice constant in tempered steel with temperatures (a)  $a_F-f(\theta)$  extrapolation curve; (b)  $a_A-f(\theta)$  extrapolation curve; (c) lattice constants of tempered steel at different temperatures.

表 2 不同温度下回火态钢的晶格常数  
Table 2. Lattice constants of tempered steel at different temperatures.

晶格常数	温度/°C								
	25	200	400	500	600	650	700	750	775
$a_F$	3.8785	2.8942	2.8979	2.9018	2.9077	2.9106	—	—	—
$a_A$	—	—	—	—	3.6612	3.6640	3.6672	3.3701	3.6706

$$f(\theta) = \frac{1}{2} \left( \frac{\cos^2\theta}{\sin\theta} + \frac{\cos^2\theta}{\theta} \right), \quad (10)$$

$$a_F = 2.8801 + 4.6225 \times 10^{-5}T, \quad T < 700 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (11)$$

$$a_A = 3.6275 + 5.6281 \times 10^{-5}T, \quad T \geq 600 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (12)$$

#### 4 分析讨论

由图 4 可以看出, 随着温度的升高, 马氏体晶格常数  $a$  和  $c$  均逐渐增大, 但  $a$  的增大速度要大于  $c$  的增大速度. 之所以产生上述差别, 主要与碳的析出方式有关. 当温度升高时, 晶格内原子的热运动加剧, 导致其点阵发生膨胀, 由于马氏体具有各向同性, 所以其晶格常数  $a, c$  均匀增大. 但同时, 随着温度的升高, 马氏体晶格中过饱和的碳原子会向外脱溶<sup>[25,26]</sup>. 碳的脱固溶会导致马氏体晶格常数  $c$  的减小和  $a$  的增大<sup>[11]</sup>. 综合温度和碳的脱固溶两个方面的影响, 随着温度的升高, 晶格常数  $a$  的增大速度要大于  $c$  的增大速度.

将图 4 和图 7(c) 的数据进行对比, 见图 8. 可以看出, 当温度小于 500 °C 时,  $a$  (ferrite)- $T$  曲线的斜率与  $a$  (martensite)- $T$  曲线的斜率基本相同, 而与  $c$  (martensite)- $T$  的明显不同, 说明铁素体晶格常数随温度的变化速率与马氏体晶格常数  $a$  的变化速率相近, 而与马氏体晶格常数  $c$  的变化速率

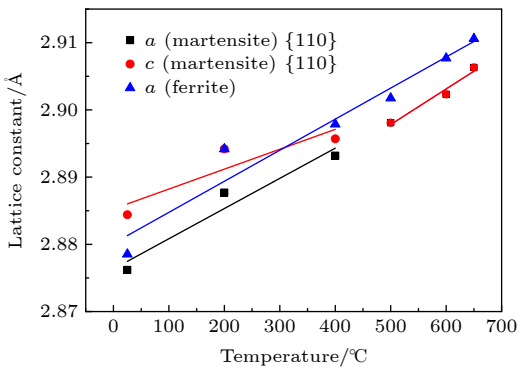


图 8 马氏体和铁素体晶格常数随温度的变化趋势  
Fig. 8. Variation of lattice parameters of martensite and ferrite with temperature.

明显不同. 这一结果表明, 温度对马氏体晶格常数的影响本质主要体现在晶格常数  $c$  的变化, 即温度影响了碳在八面体间隙 (平行于  $c$  轴分布) 中的固溶度.

#### 5 结论

本文采用同步辐射技术研究了温度对马氏体和铁素体晶格常数的影响, 结论如下:

1) 随着温度的升高, 马氏体的晶格常数  $c$  与  $a$  均逐渐增大, 但晶格常数  $a$  随温度增大的速度要大于  $c$  的增大速度.

2) 随着温度的升高, 马氏体晶格常数  $a$  的变化速率与铁素体晶格常数的变化速率相近, 而马氏体晶格常数  $c$  的变化速率明显低于铁素体晶格常数的变化速率.

3) 随温度升高, 铁素体晶格常数与马氏体晶格常数  $a$  的变化规律基本相同, 而与马氏体晶格常数  $c$  的明显不同. 温度对马氏体晶格常数的影响主要体现在晶格常数  $c$  的变化, 即温度影响了碳在八面体间隙中的固溶度.

4) 推导出马氏体晶格常数随温度变化的经验方程. 对于 {110} 晶面:

$$c_1 = 2.8853 + 2.9598 \times 10^{-5}T, \quad T \leq 400 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$a_1 = 2.8763 + 4.4911 \times 10^{-5}T, \quad T \leq 400 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$a_3 = 2.8743 + 4.7657 \times 10^{-5}T, \quad T > 400 \text{ }^\circ\text{C}.$$

对于 {200} 晶面:

$$c_2 = 2.8927 + 2.0544 \times 10^{-5}T, \quad T \leq 400 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$a_2 = 2.8799 + 3.7290 \times 10^{-5}T, \quad T \leq 400 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$a_4 = 2.8751 + 4.6171 \times 10^{-5}T, \quad T > 400 \text{ }^\circ\text{C}.$$

5) 推导出铁素体和奥氏体晶格常数随温度变化的经验方程为

$$a_F = 2.8801 + 4.6225 \times 10^{-5}T, \quad T < 700 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$a_A = 3.6275 + 5.6281 \times 10^{-5}T, \quad T \geq 600 \text{ }^\circ\text{C}.$$

## 参考文献

- [1] Osmond M F 1895 *Bull. Soc. Encour. Ind. Nat.* **10** 465
- [2] Yuan S Q, Shen Z X, Zhou C H, Liu F T, Wang F, Yang H, Chen J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 030702 (in Chinese) [袁书强, 沈正祥, 周春华, 刘峰涛, 王芳, 杨晖, 陈炯 2014 *物理学报* **63** 030702]
- [3] Oleg D S, Jeffrey W, Donald R L, Chol K S 2008 *Mater. Trans.* **49** 2016
- [4] José R C G, Paulo R R 2018 *J. Mater. Res. Technol.* **7** 499
- [5] Xu Z Y 1980 *Martensitic Transformation and Martensite* (Beijing: Science Press) p88 (in Chinese) [徐祖耀 1980 马氏体相变与马氏体 (北京: 科学出版社) 第88页]
- [6] Zhang R L, Yu R H 1984 *Acta Metall. Sin.* **20** 279 (in Chinese) [张瑞林, 余瑞璜 1984 *金属学报* **20** 279]
- [7] Lu Y, Yu H X, Richard D S J 2017 *Mater. Sci. Eng. A* **700** 592
- [8] Tanaka T, Maruyama N, Nakamura N, Wilkinson A J 2020 *Acta Mater.* **195** 728
- [9] Kurdjumov G, Kaminsky E 1928 *Nature* **122** 475
- [10] Kurdjumov G 1976 *Metall. Trans. A* **7** 999
- [11] Cheng L, Böttger A, Keijsers T 1990 *Scripta Mater.* **24** 509
- [12] Liu X, Kang M K 2000 *Transactions of Metal Heat Treatment* **21** 68 (in Chinese) [刘晓, 康沫狂 2000 *金属热处理学报* **21** 68]
- [13] Becquart C S, Raulot J M, Bencteux G, Domain C, Perez M, Garruchet S, Nguyen H 2007 *Comp. Mater. Sci.* **40** 119
- [14] Chentouf S, Cazottes S, Danoix F, Goume M, Zapolsky H, Maugis P 2017 *Intermetallics* **89** 92
- [15] Chen P C, Winchell P G 1980 *Metall. Trans. A* **11** 1333
- [16] Rammo N N, Abdulah O G 2006 *J. Alloy Compd.* **420** 117
- [17] Wang Y X, Tomota Y, Ohmura T, Morooka S, Gong W 2020 *Acta Mater.* **184** 30
- [18] Arman M M, Imam N G, Portales R L, El-Dek S I 2020 *J. Magn. Magn. Mater.* **513** 167097
- [19] Mo K, Miao Y B, Xu R Q, Yao T K, Lian J, Jamison L M, Yacout A M 2020 *J. Nucl. Mater.* **529** 151943
- [20] Jacobsen S D, Hinrichs R, Baumvol I J R, Castellano G, Vasconcellos M A Z 2015 *Surf. Coat Tech.* **270** 266
- [21] Ballot C, Lamesle P, Delagnes D 2013 *Acta. Metall. Sin.* **26** 553
- [22] Luo Q S 2016 *J. Mater. Eng. Perform.* **25** 2170
- [23] Chen Y L, Liu Q, Xiao W L, Ping D H, Wang Y Z, Zhao X Q 2018 *Mater. Lett.* **227** 213
- [24] Bharambe S S, Trimukhe A, Bhatia P 2020 *Mater. Today: Proceedings* **23** 373
- [25] Speich G R, Leslie W C 1972 *Metall. Trans.* **3** 1043
- [26] Maruyama N, Tabata S 2021 *Mater. Trans. A* **52** 2576



# Influence of temperature on lattice constants of martensite and ferrite\*

Qi Hai-Dong<sup>1)</sup> Wang Jing<sup>1)3)</sup> Chen Zhong-Jun<sup>2)</sup>  
Wu Zhong-Hua<sup>2)</sup> Song Xi-Ping<sup>1)†</sup>

1) (*State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*)

2) (*Beijing Synchrotron Radiation Facility, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China*)

( Received 20 October 2021; revised manuscript received 21 January 2022 )

## Abstract

The effect of temperature on the lattice constants of martensite and ferrite are studied by the synchrotron radiation technique. The results show that the lattice constants of martensite and ferrite increase gradually with the increase of temperature, but diffraction peaks of martensite show a peak splitting phenomenon, while the diffraction peaks of ferrite do not. From the fitting of the {110} and {200} diffraction peaks of martensite, it is found that the lattice constants  $a$  and  $c$  of martensite gradually increase with the temperature rising, but the increasing rate of lattice constant  $a$  is faster than that of  $c$ , that is, the squareness of martensite gradually decreases. When the temperature increases to 500 °C, the squareness ( $c/a$ ) of martensite is equal to 1. The variation of lattice constant of ferrite with temperature is basically the same as that of lattice constant  $a$  of martensite, but different from that of lattice constant  $c$  of martensite, showing the nature influence of temperature on the lattice constants of martensite. Besides, based on the analysis of synchrotron radiation data, the quantitative equations of lattice constants of martensite and ferrite varying with temperature are established.

**Keywords:** temperature, martensite, ferrite, lattice constant

**PACS:** 83.10.Tv, 61.66.Dk, 61.05.-a, 33.20.Rm

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211954

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 21171018, 51271021) and the Foundation of State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, China (Grant Nos. 2019-ZD06, 2021Z-18).

† Corresponding author. E-mail: [xpsong@skl.ustb.edu.cn](mailto:xpsong@skl.ustb.edu.cn)