

文章编号:1673-0062(2008)04-0022-05

低碳钢形变诱导铁素体相变技术

厉春元¹,唐明华^{1,2},刘志义²

(1. 湖南工学院 机械系,湖南 衡阳 421002;2. 中南大学 材料科学与工程学院,湖南 长沙 410083)

摘要:叙述了获得超细晶粒铁素体的形变诱导相变技术的定义和基本特征,从形变诱导铁素体相变实验证实、相变原理、产物性能、影响因素和相变机制等方面系统地评述了变形诱导铁素体相变以及该技术在低碳钢板材轧制工艺中的应用前景。

关键词:低碳钢;形变诱导铁素体相变;超细晶

中图分类号:TG142 **文献标识码:**A

Technology of Deformation Induced Ferrite Transformation of Low-carbon Steels

LI Chun-yuan¹, TANG Ming-hua^{1,2}, LIU Zhi-yi²

(1. Department of Mechanical Engineering, Hunan Institute Technology, Hengyang, Hunan 421002, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: This paper presented the definition and basic characteristics of technology of deformation induced transformation which leads to the ultrafine ferrite grains and systematically reviewed the research progress on deformation induced ferrite transformation (DIFT) from five aspects, such as experimental proving, phase transformation principle, product properties, factors to affect DIFT and transformation mechanism, etc, and discussed its prospect of applying DIFT technology in plate materials rolling process.

Key words: low carbon steel; deformation induced ferrite transformation; ultrafine grain

钢铁材料是社会现代化和高新技术发展的先导,高性能结构材料技术有力地支撑着包括能源、动力、环境、航天、国防及国家重大工程等领域的可持续发展,因此,采用新技术、新工艺以提高材料的性能并开发满足用户不断提高的性能需求的“新一代钢铁材料”,是钢铁材料参与市场竞争和

材料发展的必然趋势。新一代钢铁材料的基本特征是超细晶、高洁净、高均匀^[1],其中核心技术是超细晶,通过将当前工业细晶粒尺寸(一般为20 μm左右)细化一个数量级,按 Hall-Petch 的 $\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$ 关系式,钢铁材料的强度可提高一倍,同时保持良好的塑性和韧性配合,如图1所

收稿日期:2008-10-11

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(05JJ40063)

作者简介:厉春元(1958-),男,湖南衡阳人,湖南工学院机械系教授,硕士。主要研究方向:材料成形与控制。

示^[2],因此,细晶强化是提高材料的强度、硬度和韧性等综合力学性能的最有效方法.目前常用的细化晶粒方法主要有形变热处理、合金化及形变诱导相变,由于形变热处理细化的晶粒难以小于 5 μm ,合金化细化晶粒存在提高生产成本和带来环境污染等弊端,因此,形变诱导相变细化晶粒最具实际生产意义^[3].自 20 世纪 80 年代,日本的 Yada 发现了形变诱导铁素体相变(Deformation - Induced Ferrite Transformation, DIFT)及其细化晶粒的作用以后,从 90 年代开始,国内外形成了形变诱导相变的研究热潮,我国在 1998 年启动了国家重点基础研究发展计划(“973”项目),研究表明,晶粒细化的原因被认为是变形诱导相变和铁素体动态再结晶综合作用的结果^[4],尽管各国学者的研究方法不尽相同,但均强调了相变发生于变形过程中,而不是变形之后的冷却过程中;强调了可以形成超细铁素体晶粒.考虑到引起相变的本质是变形导致的自由能升高和形核地点的增多,因而除了应变之外,影响变形储存能的各个变形因素均会影响相变过程.依照目前对这一现象的认识,DIFT 技术可定义为:在变形中完成的、可获得超细晶粒的动态相变过程,从热加工工艺角度来看,DIFT 就是将低碳钢加热到奥氏体相变温度 A_{c3} 以上,保温一段时间,使其奥氏体化,然后以一定速度冷却到 A_{r3} 至 A_{e3} 之间,进行大压下量变形,从而获得超细铁素体晶粒的工艺.

1 形变诱导铁素体相变存在性的证明

当应变超过形成形变诱导铁素体的临界应变,动态再结晶将会被阻碍,形变诱导铁素体开始形成.对于形变诱导相变轧制工艺来讲,晶粒细化的机制不外乎以下几种^[5-6]:1)奥氏体的应变累积与随后的奥氏体 \rightarrow 铁素体相变;2)奥氏体的动态再结晶;3)铁素体的动态再结晶;4)变形作用下的动态相变,也即形变诱导铁素体相变.首先,碳素钢控制轧制的研究经验表明,无论在奥氏体中引入残余应变有多高,铁素体也只能细化到 5 μm 左右,因此可以肯定,仅靠奥氏体应变累积加奥氏体 \rightarrow 铁素体相变,不可能获得直径 1 μm 左右的超细铁素体晶粒;其次,由于大多数形变诱导相变轧制工艺要求将轧件入口温度控制在 A_{r3} 附近或略高,在这个温度下,奥氏体晶粒只被拉长而未被细化,奥氏体不太可能发生动态再结晶;同时,在轧件入口温度低于 A_{r3} 温度的情况下,在奥氏体晶界上虽有先共析铁素体相析出,但实验证

明这些先共析铁素体晶粒在随后的轧制过程中不能被超细化.因此,前 3 种机制都不足以解释形变诱导超细铁素体晶粒形成,只有形变诱导相变机制,成为唯一可能的解释.扫描电子显微分析表明,超细铁素体晶粒晶界上分布着大量细小弥散的碳化物,这从另一个侧面说明这些超细铁素体组织是通过相变形成的.

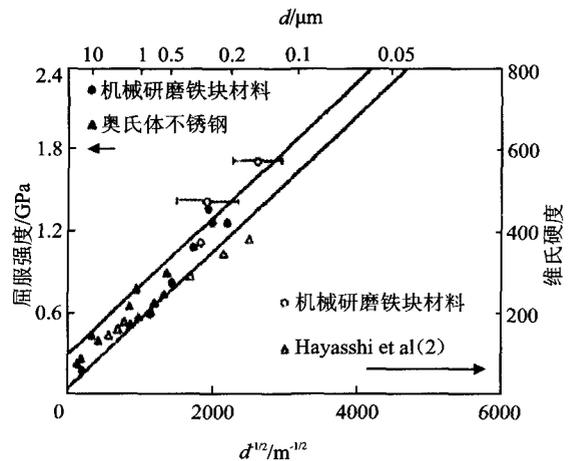


图 1 铁的屈服强度随晶粒尺寸的变化关系

Fig. 1 Variation of yielding strength with grain size of Fe material

在 DIFT 轧制实验中,人们对变形后的试样立即淬水冷却,由于高温下形成的形变诱导铁素体组织被固定下来,而剩余的奥氏体在淬水过程中形成马氏体或贝氏体,这样,结合组织观察,就可以确定 DIFT 是否发生,如图 2.这种方法既简便易行又可对形变诱导相变铁素体进行定量分析,因而应用普遍.

2 形变诱导铁素体相变的基本特征

1) 动态相变.是在有轧制力产生形变储存能后诱导相变,不是轧后冷却的相变,它属于非平衡态过程,因而在一定条件下就有逆相变及其他亚稳相变出现的可能;

2) 以形核为主的相变. DIFT 相变是由形变产生储存能提高相变驱动力的相变,是一个以形核为主导的过程, α 相形核最先在 α/γ 相界面产生,具有形核位置不饱和性特点,反复形核是导致晶粒细化及组织均匀分布的主要原因;同时,该相变过程具有形核位置的不均匀性特点,形核优先发生在晶界、孪晶界及形变带等形变能聚集的位置^[7];

3) 新生 α 相具有超细晶的特点。DIFT 相变的临界核心尺寸比类似温度的再结晶相变或轧后冷却 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变的尺寸都小;

4) 快速相变特征。由于应变加速转变的作

用, 应变使铁素体转变是在极短的时间内(1 s)完成的^[8], 铁素体晶粒来不及明显生长, 而当铁素体转变完成后, 由于铁素体的动态再结晶导致铁素体晶粒尺寸进一步细化。

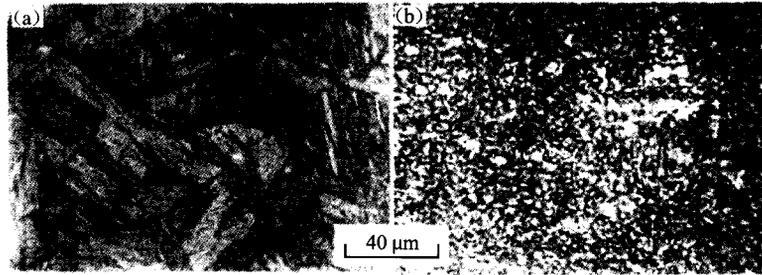


图2 形变诱导铁素体相变理论的实验证明
Fig.2 Experimental demonstration of DIFT theory

3 形变诱导铁素体相变原理

通常钢材的热轧过程都在高温奥氏体(γ)区进行(图3), 即奥氏体轧制, 为了获得低温铁素体(α)的组织, 轧后必须首先满足 $\gamma \rightarrow \alpha$ 的热力学条件, 如图4. 传统热轧时由变形引起的畸变能在轧间、轧后甚至慢速轧制时由于动态回复、再结晶等过程而释放, DIFT 不同于传统控轧控冷(TMCP)之处, 是它的相变(低碳钢中 $\gamma \rightarrow \alpha + P$) 主要发生在轧钢过程中而不是轧后冷却过程中, 热力学分析表明, 由于轧制产生的变形能不可能在轧后由热弛豫、弹塑性恢复等完全释放, 而总有部分形变能被保留在被变形的钢材中, 这部分能量(形变储存能)在适当条件下, 转变为相变自由能变化的一部分, 它增加了相变的驱动力. 按照一般相变的方向应朝体系自由能降低的方向发展, 即 $\Delta G < 0$, 非均匀晶界形核时, 自由能的总变化为^[9]:

$$\Delta G = -V(\Delta G_V - \Delta G_E) + \Delta G_S - V\Delta G_D \quad (1)$$

式中 ΔG ——体系总的自由能变化;

ΔG_V ——体积自由能变化;

ΔG_E ——弹性自由能变化;

ΔG_S ——新相形成的表面自由能变化;

ΔG_D ——形变储存能。

因此, 变形诱导铁素体相变的驱动力由两部分构成, 一是化学驱动力, 二是变形储能. 设 γ 为母相, α 为新相, 则晶界形核时系统自由能的总变化为:

$$\Delta G = -V\Delta G_V + S\sigma_{\gamma\alpha} + V\Delta G_D \quad (2)$$

式中 S ——晶界面积; $\sigma_{\gamma\alpha}$ ——母相与新相之间单位面积的晶界能; 假定形成球状的临界尺寸核胚, 则可以推导出临界核胚半径的计算公式为:

$$r^* = 2\sigma_{\gamma\alpha} / (\Delta G_V + \Delta G_D) \quad (3)$$

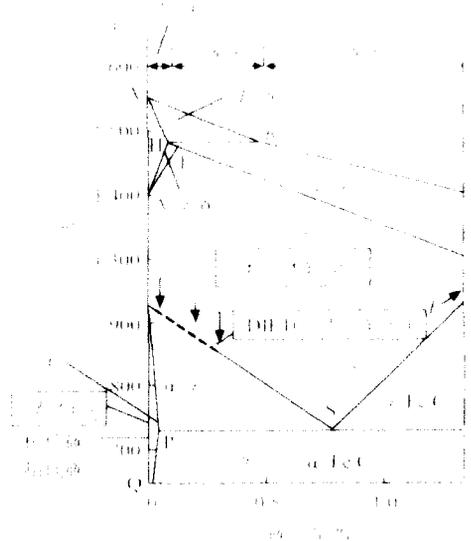


图3 热轧和相区关系图
Fig.3 Relation schema of hot rolling and phase area

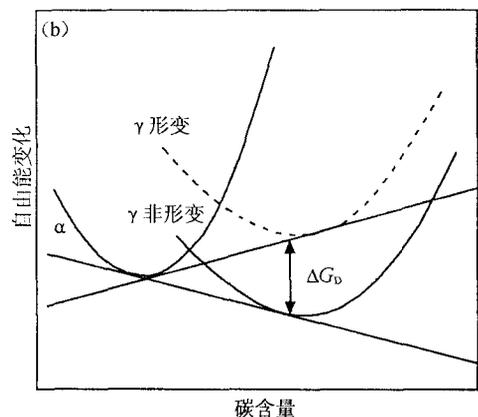


图4 形变诱导相变的热力学原理图
Fig.4 Thermodynamic prototype of DIFT

式(3)说明,形变储存能越大,则形成新相的临界核胚半径越小,即晶粒越细小.文献[10]的研究指出,随着变形温度的降低,自由能差不断增大,也就是相变的化学驱动力不断升高.温度越低,驱动力增加的幅度越大,这与过冷度越大相变越容易发生的实际情况相符.同时,由于母相点阵与新相比容积和晶体结构不同会产生应变能及界面能,虽然匀质形核的难易由于与应变能及界面能有关,形核较难,但在小角度晶界和形变带上,因为位错高度集中,在 γ -Fe 内有位错的区域形成半共格的 α -Fe 晶核所需消耗的界面能一定会降低,这些部位形核就比较容易,这也从电子层次解释了 DIFT 过程具有形核位置的不均匀性特点,形核优先发生在晶界、孪晶界及形变带等形变能聚集的位置,由于 α -Fe 形核率上升,从而使 α -Fe 细化的机制.

4 形变诱导铁素体相变产物的性能

利用 DIFT 工艺,可将碳素钢的晶粒细化到 1 μm 左右,按照 Hall-Petch 关系,如果将 DIFT 工艺应用于 300 MPa 级普碳钢板材的生产,可将板材的强度提高到 600 MPa 级以上,实现性能翻倍.利用形变诱导相变原理制备的超细晶钢与普通钢材相比,不仅具有很高的强度,延伸率也保持在较高的水平,这种力学性能的大幅度提高不用增加任何合金元素;

因为超细铁素体晶粒能够抑制疲劳的萌生,超细晶钢的显微组织也能在一定程度上改变裂纹扩展路径,所以,超细晶钢的疲劳强度很高,韧性也很好,而且韧-脆转变温度很低,可以低至 100 K 以下,这为超细晶钢在低温环境的应用创造了条件;与普通钢材相比较,超细晶钢具有屈强比太高、深冲性能差等缺点,所以,超细晶钢不适合生产诸如电器、仪表外壳、汽车覆盖件等冲压类零件.超细晶钢作为一种全新的钢铁材料,从经济和生产应用考虑,还应满足良好的性价比与符合可持续发展等条件,以保证市场竞争力.对 DIFT 理论更深入的研究,期望获得良好综合力学性能和使用性能的超细晶钢,并为这种新材料寻找合适应用场合是今后几年摆在材料科学工作者面前最重要的任务.

5 影响形变诱导铁素体相变的因素

5.1 变形参数

图 4 是董瀚、孙新军等对 0.09C-0.25Si-0.51Mn-0.017Nb 钢形变诱导相变铁素体转变

量-温度-应变率之间关系的研究结果^[10].可见,变形诱导铁素体相变需要一临界应变率,它与变形条件和钢的化学成分有关,随着变形温度的降低,临界应变率减小,原因是相变驱动力的增加,在超过临界应变率后的变形中,铁素体形核位置从晶界形核逐步向晶内形核过渡,晶粒数目和铁素体转变量逐渐增加;在一定的温度范围内(高于 A_{r3}),降低变形温度将会促进变形诱导铁素体相变,同时减小铁素体晶粒尺寸,而当温度进一步降低至 A_{r3} 之下时,由于先共析铁素体的首先形成,变形诱导铁素体相变会受到一定程度的抑制;关于应变率对 DIFT 的影响,目前存在较大的分歧,一方面,提高应变率有利于推迟奥氏体的动态再结晶,提高变形储能,从而可以促进 DIFT,但应变率提高意味着一定应变率下变形时间的缩短,而相变是需要时间的,两个方面在不同的条件下对相变的影响可能不同.

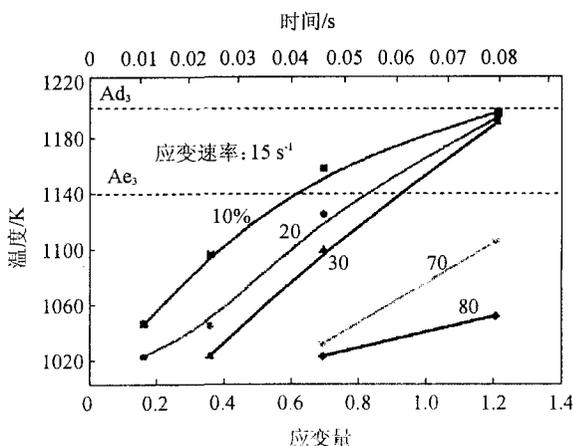


图 5 DIFT 转变量-温度-应变率关系图

Fig. 5 Transformation-temperature-strain diagram of DIFT

5.2 化学成分

一般认为^[4,11],碳、锰含量的增加均不利于 DIFT 的进行,但有利于细化晶粒;Nb 对变形诱导铁素体相变的影响与其存在形式有关,固溶 Nb 不利于变形诱导铁素体相变的进行,这是因为 Nb 在奥氏体晶界的偏聚会降低晶界能,进而大大降低铁素体的形核率,若 Nb 以析出物的形式存在,则可以促进变形诱导铁素体相变,这是因为 Nb 的析出一方面会造成固溶铌含量的减少,另一方面可以抑制奥氏体的再结晶,提高变形储能,Nb 有利于细化铁素体晶粒,钒含量在 0~0.064% 范

围内对变形诱导铁素体相变影响不大。

5.3 奥氏体晶粒尺寸

大多数的研究表明,奥氏体晶粒尺寸的减小,使相同应变下铁素体转变量增加,即有利于变形诱导铁素体相变的进行,这是因为奥氏体晶界是铁素体的优先形核地点,奥氏体晶粒尺寸越小,晶界数量就越多,对相变就越有利。

6 形变诱导铁素体相变机制

关于 DIFT 的相变机制,目前存在两种观点^[12-14]。一是块状转变机制,另一种观点则认为是扩散型转变机制,它与先共析铁素体转变机制本质上并无不同。

目前,很多学者提出了形变诱导铁素体相变是没有伴随长程扩散的块状铁素体相变机制^[10],即 DIFT 是通过相界扩散的形核—长大型相变,其产物一般呈块状显微组织,与其长大的母相晶粒不具完整的位向关系,与母相不具点阵对应;块状相变不同于先共析铁素体形成,不是由碳扩散控制的,因为形变诱导铁素体相变比一般的先共析铁素体相变速度要快,并且通过实验方法证明形变诱导铁素体是过饱和的,这说明在一定工艺条件下,碳在相变过程中来不及从奥氏体向铁素体扩散,而是由界面扩散控制的相变;但也有学者研究发现,形变诱导相变铁素体与母相奥氏体之间实际存在着 K-S 关系,这与先共析铁素体相变完全一致,而块状转变中新相的取向是完全随机的,不可能存在取向关系,同时,发生 DIFT 后,剩余未转变奥氏体的淬透性增加,与未发生 DIFT 的情形比较,淬水后马氏体数量增加,而魏氏组织和贝氏体数量减少,这说明相变中发生了排碳过程,奥氏体碳含量增加,所以认为 DIFT 是与先共析铁素体形成并无本质区别的扩散型相变。目前,细晶粒钢已经在我国武钢、太钢批量生产,以替代合金钢材制造卡车大梁等汽车部件,4~5 μm 的细晶粒钢在现有的轧制设备上是可以实现的,但与工艺研究取得的重大进展相比,对 DIFT 的机理研究相对滞后,迄今仍是众说纷纭,尚未达成共识。

7 形变诱导铁素体相变的工业应用

形变诱导相变最引人注目之处在于可以大批量地制备超细晶材料,并且不需要极端的物理环境,不必借助特殊的生产设备,很容易在现有生产线上实现。由于这一点,在形变诱导相变现象发现

之初,学者们就尝试将其应用到钢材生产中,而板材是目前用途最广、生产量最大的钢材,所以,形变诱导相变在板材轧制中的应用具有特别重要的意义。

4~5 μm 的细晶粒钢在现有的轧制设备上是可以实现的,目前,细晶粒钢已经在我国武钢、太钢、鞍钢、宝钢、攀钢及本钢批量生产,以替代合金钢材制造卡车大梁等汽车部件,产品用户有一汽、二汽、柳州汽车厂、曙光汽车集团等,应用的车型有卡车、轻型车、农用车等^[4];建筑行业也是普碳钢应用最广泛的领域之一,应用超级钢代替 II 级钢筋具有良好的前景,利用细晶钢生产技术,在不添加合金元素的前提下,用 Q235 的成分生产出 400 MPa 的钢筋,将大大降低生产成本,因此,细晶钢在建筑行业具有广阔的应用前景;随着细晶钢焊接技术的不断开发,细晶钢在工程机械上的应用将很快打开局面,在其它行业的推广应用也将具有广阔的前景。

8 结语

形变诱导铁素体相变是一项很有前途的晶粒超细化新技术。人们采用各种实验方法反复证明了形变诱导铁素体相变的客观存在性,同时也证明了它在碳素钢和低(微)合金钢中的普遍性。在热力学方面,形变诱导铁素体相变区别于无变形静态相变的最大特征是在相变驱动力中引入了变形储存能,温度越低或应变速率越高,变形储存能就越高,变形储存能的引入使平衡相变点提高。在动力学方面,形变诱导铁素体相变是一个形核控制的过程,形核位置不饱和,变形储存能使铁素体形核率大幅度提高,但对晶核生长速度影响不大。变形参数、化学成分和奥氏体晶粒尺寸都会影响形变诱导铁素体相变的热力学和动力学。超细晶钢作为一种全新的钢铁材料,具有广阔的应用前景。对 DIFT 理论更深入的研究,期望获得良好综合力学性能和使用性能的超细晶钢,并为这种新材料寻找合适应用场合是今后几年摆在材料科学工作者面前最重要的任务。

参考文献:

- [1] 翁宇庆. 超细晶钢——钢的组织细化理论与控制技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2003.
- [2] 翁宇庆. 钢铁结构材料的高性能化[J]. 中国工程科学,2002,4(3):48-53.

对于受到上部载荷与侧压力的作用,在回采结束时,再构人工顶板产生了大量的二维和三维的裂缝,考虑水平向的配筋作用,可以弱化水平向的裂缝作用,因此通过沿铅垂方向进行锚注^[8],防止顶板的压溃;同时,在回采结束后,及时进行充填采空区处理,改善再构人工结构的受力状态,形成二维力学形态向三维力学形态的转变,延缓再构人工顶板的加速变形行为,强化再构人工顶板的安全稳定性。

4 结论

对设计的再构人工构筑物的稳定性有限元分析表明,在相应的回采参数条件下,再构结构空间稳定,能够满足矿山回采对结构的安全需要,保证采矿作业的安全稳定性需求;进行工程处置措施后的人工顶板从结构上更加有利于顶板安全要求和改善受力状态,并通过及时的空区充填延缓再构人工顶板的加速变形行为,强化了再构空间的稳定性。

参考文献:

- [1] 周科平,高峰,古德生. 采矿环境再造与矿业发展新思路[J]. 中国矿业,2007,16(4):34-36.
 - [2] 胡建华,周科平,董国庆. 采矿环境再造结构及监测技术研究[J]. 矿业研究与开发,2006(金属矿采矿科学技术前沿论坛论文集):75-78.
 - [3] 古德生,李夕兵. 现代金属矿床开采科学技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
 - [4] 唐有德,姚香. 类框架结构支撑采空区的力学稳定性分析[J]. 有色金属(矿山部分),2004,56(2):21-23.
 - [5] 陈友东,唐有德,姚香. 类框架结构采空区处理新技术的研究与实践[J]. 有色金属(矿山部分),2002,54(6):5-7.
 - [6] 车平,黄宏伟. 相似理论在溶洞顶板稳定性数值分析中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(4):617-622.
 - [7] 郝文化. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
 - [8] 黄雷,刘东燕. 锚固后岩体稳定性分析的能量法初探[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(5):726-710.
-
- (上接第26页)
- [3] 范建文,张维旭,代晓莉,等. 普碳钢中板表层组织超细化的变形机理[J]. 材料热处理学报,2005,26(6):69-73.
 - [4] 董瀚. 先进钢铁材料——高性能结构材料技术丛书[M]. 北京:科学出版社,2008.
 - [5] 扬平,傅云义,崔凤娥,等. Q235 碳素钢应变强化相变的基本特点及影响因素[J]. 金属学报,2001,37(6):592-600.
 - [6] Weng Y Q, Sun X J, Dong H, Overview on the theory of deformation induced ferrite transformation [C]//Symp Ultrafine Grain Struct(ISUG2005), Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005:9-15.
 - [7] 杨忠民,赵燕,王瑞珍,等. 形变诱导铁素体的形成机制[J]. 金属学报,2000,36(8):818-826.
 - [8] Ong - Kyo CHOI, Dong - Han SEO, Jae - Sang LEE, et al. Formation of Ultrafine Ferrite by Strain - induced Dynamic Transformation in Plain Low Carbon Steel[J]. ISIJ International, 2003, 43(5):746-754.
 - [9] 胡赓祥,蔡珣,戎咏华,等. 材料科学基础[M]. 上海:上海交通大学出版社,2006.
 - [10] 董瀚,孙新军,刘清友,等. 形变诱导铁素体相变——现象与理论[J]. 钢铁,2003,38(10):56-67.
 - [11] Lee S, Kuon D, Lee Y K, et al. Transformation strengthening by thermomechanical treatment in C - Mn - Nb steels[J]. Metall Mater Trans A, 1995, 26A: 1095 - 1100.
 - [12] 刘朝霞,李殿中,乔桂文. 低碳钢在 A_3 温度之上的形变诱导铁素体(一种马氏体)的相变研究[J]. 金属学报,2005,41(11):1127-1135.
 - [13] Seung Chan HONG, Sung Hwan LIM, Kyung Jong LEE, et al. Effect of Undercooling of Austenite on Strain Induced Ferrite Transformation Behavior[J]. ISIJ International, 2003, 43(3):394-399.
 - [14] 杨玉珩,胡安民,齐俊杰,等. 低碳钢形变强化相变的组织细化[J]. 金属学报,2001,15(2):171-178.