DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.09.005

强磁场下钢中珠光体相变的研究现状及展望

冯　勇[1,2],侯廷平[1,2],张　东[1,2],郑一航[1,2],吴开明[1,2]

(1. 武汉科技大学 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室,湖北 武汉 430081; 2. 武汉科技大学 高性能钢铁材料及其应用省部共建协同创新中心,湖北 武汉 430081)

摘　要:在金属固态相变中,扩散型相变的珠光体转变涉及三相两界面的复杂过程。外加磁场将改变奥氏体向珠光体转变过程,对珠光体显微结构及宏观性能产生极大影响。本文综述了磁场对钢中珠光体相变的研究进展,阐述了磁场对扩散型相变的作用机制,主要讨论了强磁场对珠光体相变的奥氏体相区、铁素体、渗碳体的影响。最后对强磁场下珠光体相变未来研究提出了一些建议并进行了展望。

关键词:强磁场;铁基合金;珠光体;相变

中图分类号: TG142.21; TG156.97　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2022)09-0755-06

Research Status and Prospect of Pearlite Transformation in Steel under High Magnetic Field

FENG Yong[1,2], HOU Tingping[1,2], ZHANG Dong[1,2], ZHENG Yihang[1,2], WU Kaiming[1,2]

(1. State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Advanced Steels, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: In the solid phase transformation of metals, the pearlite transition of diffusive phase transformation involves the complex process of three phases and two interfaces. The external magnetic field will change the process of austenite transformed to pearlite, which has a great influence on the microstructure and macroscopic properties of pearlite. In this paper, the research progress of magnetic field on pearlite transformation in steel is reviewed, the mechanism of magnetic field on diffusion-type transformation is expounded, and the effects of high magnetic field on austenite phase region, ferrite and cementite are discussed. Finally, suggestions and prospects are also put forward for the future study of pearlite phase transition under the strong magnetic field.

Key words: high magnetic field; iron-base alloy; pearlite; phase transformation

珠光体组织是钢铁材料中重要的组织[1]。由于珠光体组织出色的强度和延展性,珠光体钢被广泛应用于交通轨道、航天设备、车辆、桥梁、国防等领域。由于其超高的抗拉强度,冷拔珠光体钢丝被广泛应用于轮胎子午线、桥梁缆索和弹簧等重要工业领域的主要结构部件[2-3]。珠光体耐热钢具有突出的高温稳定性和抗氧化性,是蒸汽锅炉的主要耗材,在发电、石油化工、钢铁、建筑等行业不可或缺,是安全技术要求高的压力材料[4-5]。GCr15 钢主要为球化珠光体组织,具有强度高、抗疲劳、耐磨损的特点,是轴承制造的主要母材[6-7]。现代科技日新月异,国民生产中许多重大工程和特殊项目应用对只能满足基本制造生产的珠光体高强钢的各项性能提出了更高的要求，如何采用新技术研究和开发新型高性能珠光体高强钢，成为国际材料工作者们亟待解决的问题和重要使命。

美国冶金大师 Bassett 于 1959 年首次提出了磁热处理技术，即外加磁场来提高不同金属材料的机械性能的方法[8],对磁热处理的发展具有里程碑意义。1994 年召开的国际电磁加工会议上,对材料电磁热处理技术给予了高度关注，提出可充分应用磁场清洁、环保、无接触的特性作用于物质原子和分子

收稿日期: 2022-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(12174296, U1532268);湖北省重点研发计划(2021BAA057);2019 年度湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队(T201903);111计划项目(D18018);武汉科技大学创新类项目二等(JCX2021094)

作者简介: 冯　勇(1996—),硕士生.研究方向:金属材料磁相变、抗辐照研究.电话:18886034335,
Email: m1784440219@qq.com

通讯作者: 侯廷平(1979—),博士,教授.研究方向:金属材料相变研究. Email: houtingping@wust.edu.cn
吴开明(1966—),博士,教授.研究方向:高性能钢铁材料相变及应用性能的研究.
Email: wukaiming@wust.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的排列、匹配和迁移，改变材料的相变和结构，进而提高其宏观性能。目前，材料电磁处理(Electromagnetic processing of materials, EPM) 所使用的磁场有直流磁场、交流磁场、特殊磁场及直流稳恒磁场等[9]。随着低温超导技术的发展，直流稳恒强磁场已投入使用，为高性能材料设计和改性研究提供了技术支撑。虽然强磁场在金属热处理、粉末冶金、凝固结晶、活化烧结、分离等方向仍处于初级探索阶段，但也取得了一定成果。

磁场和温度、压力一样，都是热力学中重要的参数。通常大于 2 特斯拉(T)的磁场就指强磁场(全文通指磁场)。在金属的相变过程中施加磁场，磁场能将能量无接触的传递到原子尺度[10-12]。通过对外加磁场强度、热处理温度及时间的调控，可以改变化学反应速率、活化能、熵等因素，有效促进相变和改善合金机械性能[13]。传统获得珠光体组织的热处理手段周期长，能耗高，质量稳定性和环保性差。近年来，国内外高校及科研院所采用电磁热处理对珠光体钢进行了大量的研究，对降低生产成本，提高生产效率及扩大应用范围有着重要的指导意义。

1 强磁场对钢中珠光体相变研究概述

磁场对钢中珠光体相变研究始于 20 世纪末，最初着重集中在对亚共析钢和过共析钢的探索，例如：Fe-0.36C 钢[14]、25 钢[15]等。刚开始通常是在材料的 γ/γ+α 相界(Ac_3)以上温度引入冷物理场(磁场)且作用于整个相变过程，应用的磁场强度最高已达 30 T 。周晓玲[16]研究发现 4~10 T 磁场均提高了珠光体转变温度和速度，片层间距增大且与磁场方向存在一定角度关系，珠光体团直径减小但数量增多。冯光宏等[17]研究表明，低磁场(0~1.5 T)使微合金的珠光体转变温度从 679 ℃上升至 693 ℃，渗碳体形貌由分叉趋向于平行排列。Jaramillo 等[18]研究了 30 T 强磁场作用下不同新型贝氏体钢的热力学和动力学特性的变化规律及其对微观结构的影响，并发现在发生相变过程中，珠光体组织硬度显著增加，为进一步开展珠光体相变提供了新的研究方向和技术推广的理论基础。2004 年 Zhang 等[19]的研究也获得类似观点，即当 42CrMo 钢在无磁场作用时的冷却速度为 46 ℃/min 时，贝氏体与少量铁素体是最终产物。而当磁场强度为 14 T 时，获得了铁素体和珠光体的结构，转变产物的微观尺寸均匀细小，因此加工成型性得到改善，也为后来提出的高碳钢与硬度高的合金钢快速磁场退火工艺研究及推广提供了理论支撑。吴存有等[20]对强磁场作用于球墨铸铁微观组织影响展开研究，结果表明强磁场能加速碳的扩散，并促进渗碳体溶解。

然而，关于钢中珠光体球化的报道整体还处于传统的工艺层面。例如 Li 等[21]的研究主要是在传统工艺的基础上设计新工艺，Dey 等[22]主要通过控制不同合金元素的加入量，而 Amos[23]等采用 3D 相场模拟的手段从机理着手，其目的是探索增加珠光体球化驱动力的方法，提高碳的扩散速率，得到更多的铁素体–渗碳体相界面，最终使球化效果更加明显。基于传统球化的大量研究，刘雯等[24]在 2012 年证明了磁场对球化有很大的贡献；2014 年陈健豪等[25]报道了 19.8T 磁场作用下的珠光体量高于12 T。2021 年本课题组[26]研究了合金元素与强磁场协同对高碳钢珠光体相变的影响，发现磁场对珠光体的球化起积极作用。迄今为止，虽然磁场在珠光体相变过程中许多新的组织现象被揭示出来，但对部分新实验现象的机理解释还存在一定困难。

2 强磁场对铁基合金相变的影响机制

物质的磁性来源于电子的轨道运动和自旋效应协同产生的原子磁矩[27]。一般分为抗磁性、顺磁性、铁磁性、反铁磁性和亚铁磁性材料。Fe 原子由其 3d 电子轨道自旋而具有一定原子磁矩[28]。纯铁和铁素体的居里温度相同(Tc=770 ℃)，低于居里温度以下表现为铁磁性，高于居里温度为顺磁性。就铁基合金扩散型相变而言，不同化学成分和热处理工艺将得到不同相变产物，如铁素体、渗碳体、珠光体，因此母相奥氏体与相变产物的磁化能力不同，各相表现出不同磁性。金属固态相变中，除了各相磁矩发生改变外，在晶体各向异性、形状各向异性、诱导各向异性及磁致伸缩等方面也会对固态相变过程产生影响。其主要原因为外加磁场后，新的铁磁性相极易被磁化，并增加了磁化强度(M)，导致 Gibss 自由能降低。

磁场作用于奥氏体向铁素体转变就是经典的扩散型相变之一，总的自由能 ${}^{M}\Delta G^{\gamma\to\gamma+\alpha}$ 由两部分组成[29]，分别为化学 Gibss 自由能 ΔG^{C} 和磁自由能差 ΔG^{M}。表示如下：

$$ {}^{M}\Delta G^{\gamma\to\gamma+\alpha}=\Delta G^{M}+\Delta G^{C} \tag{1}$$

而 ΔG^{M} 可由下式计算：

$$\Delta G^{M}=-\left[\int_0^{M^{\alpha}} H\mathrm{d}(\mu_0 M^{\alpha})-\int_0^{M^{\gamma}} H\mathrm{d}(\mu_0 M^{\gamma})\right]$$

$$=-H\mu_0\left(\int_0^{M^{\alpha}}\mathrm{d}M^{\alpha}-\int_0^{M^{\gamma}}\mathrm{d}M^{\gamma}\right) \tag{2}$$

式中，γ 为奥氏体；α 为铁素体；M 为磁化强度；μ_0 是真空中的磁导率；H 为自由空间的磁场强度。在相变

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

温度区铁素体的磁化能力大于奥氏体，ΔG^{M} 和 ΔG^{C} 均为负值。因此，磁场使总吉布斯自由能 ${}^{M}\Delta G^{\gamma\to\gamma+\alpha}$ 降低，使相变平衡发生移动，改变了相平衡温度。

根据 Johnson-Mehl 方程[30]，磁场对珠光体扩散相变又得到了较为完整的解释，固态相变中新相的形成比率(f)与形核率(N)，晶粒长大速率 V，以及转变发生的时间 t 有关。

$$f=1-\exp\left(-\frac{A}{4}NV^{3}t^{4}\right) \tag{3}$$

基于共析转变的特征，计算出形核率 N 和晶粒长大速率 V 的表达式[29]，代入 Johnson-Mehl 方程中，即得到奥氏体分解的动力学方程，表示如下[31]：

$$\ln t=A\ln\left(\ln\frac{1}{1-f}\right)+B\frac{Q}{RT}+C\frac{\sigma^{3}}{\Delta G_{V}^{2}}-E\ln\frac{\chi^{\gamma}-\chi}{\chi^{\gamma}-\chi^{\alpha}} \tag{4}$$

式中，A、B、C、E 为常数；t 为转变发生的时间；Q 为扩散激活能；R 为理想气体常数；T 为绝对温度；σ 为界面能；ΔG_{V} 为新相和母相的吉布斯体积自由能差；χ 为钢中的碳含量，其中 χ^{α} 表示在 T 温度时碳在铁素体中的溶解度；χ^{γ} 表示在 T 温度时碳在奥氏体中的溶解度。根据上式就可以计算出扩散相变的孕育期。当加入磁场后，(3~4)式都会受到影响而变为：

$$C\left(\frac{\sigma^{3}}{(\Delta G_{V}+\Delta G^{M})^{2}}\right) \tag{5}$$

$$E\ln\left[\frac{\chi_{M}^{\gamma}-\chi}{\chi_{M}^{\gamma}-\chi_{M}^{\alpha}}\right] \tag{6}$$

式中，M 为磁场。利用 Weiss 分子模型[32]及Sakoh 等[33]计算出的经过轨道磁化率修正的巡游电子模型，可以计算出奥氏体、铁素体的磁化率和相应的 ΔG^{M}。应用 KRC 模型[33]可以计算出 ΔG_{V} 以及式(4)中的成分参数。最终结果表明，磁场对式(4)影响极小[31]，其中 ΔG^{M} 是孕育期的主要控制因素。磁场明显缩短了奥氏体向珠光体转变的孕育时间。

3　强磁场下铁基合金中珠光体相变特征

珠光体转变是依赖于原子(离子)的扩散而发生的相变，属于一级相变[34]。其形核过程包括均匀形核和非均匀形核；珠光体的形成经历了 2 个阶段：①点阵重构；②碳的扩散。珠光体呈铁磁性，母相奥氏体呈顺磁性，两相磁性差异导致强磁场对珠光体相变产生重要影响。

3.1　强磁场下珠光体相变的热力学特征

磁场作为热力学参数影响各相的自由能，必然对相变的各相结构、性能产生作用。因此，磁场对相变热力学的影响成为了研究重点。相的平衡和稳定性是影响热力学的重要因素。外加磁场必然导致两相的吉布斯自由能发生变化，从而引起平衡温度的变化，这即为磁场的热力学影响。

磁场的作用机理有别于常规的能量场(温度场和压力场)，它是由物质中的电子移动状态引起各相间的内能变化，从而对相位的平衡产生一定影响。在磁场中，物质中电子受到磁场的作用自旋发生变化而改变相的能量，其能量的降低源于各相的磁化率不同。越容易磁化的相其 Gibbs 自由能就越低且越稳定。根据热力学原理，由外磁场引起的磁相的自由能[35]可表示为：

$$G_{m}^{ex}=-\int_{0}^{B}M\mathrm{d}B \tag{7}$$

如图 1 所示，自发磁场强度和磁致磁化强度均随温度升高而迅速下降，自发磁化强度到达 T_{c} 温度时降为零。

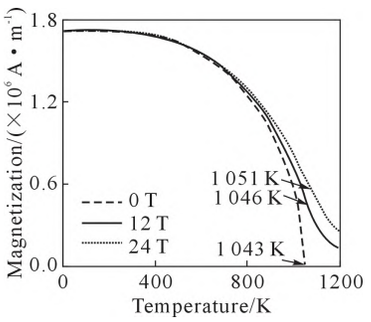


图 1　不同磁场强度下纯铁的相对磁化强度随温度变化曲线
Fig.1　Variation of relative magnetization with temperature in pure iron under external magnetic fields

3.2　强磁场下珠光体相变的动力学特征

由于相变是一个热激活过程，因此磁场作为物理驱动力广泛应用于固态相变中。相变驱动力来源于新旧两相的吉布斯自由能差的大小，差值越大，驱动力越大，转化速度就越快，转化时间就越短，这就是磁场对相变动力学的作用。

奥氏体向珠光体转变过程中，顺磁性的奥氏体与铁磁性珠光体存在较大差异，产生了附加磁驱动力 ΔG_{M}^{H}，即母相奥氏体向铁素体转变的总驱动力为：

$$\Delta G_{m}^{H}=\Delta G_{M}^{H}+\Delta G_{ch}^{H} \tag{8}$$

而附加能近似为[36]：

$$\Delta G_{M}^{H}=\frac{1}{2}\chi_{m}^{r}(T)\cdot H^{2} \tag{9}$$

式中，$\chi_{m}^{r}(T)$为奥氏体磁化磁化率；H 为磁场强度。可知磁场对珠光体相变的驱动力正比于磁场强度。

过冷奥氏体向珠光体等温转变时领先相铁素体的形核势垒 ΔG_{M}^{*} 可表示为：

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\Delta G_{\mathrm{M}}^{*}=\frac{8}{3}\pi V_{\alpha}^{2}\frac{\delta^{3}}{\left(\Delta G_{\mathrm{ch}}^{\mathrm{H}}+\Delta G_{\mathrm{M}}^{\mathrm{H}}\right)^{2}} \tag{10}$$

式中，δ 为界面能；$\Delta G_{\mathrm{M}}^{\mathrm{H}}$ 为磁场能；$\Delta G_{\mathrm{ch}}^{\mathrm{H}}$ 为摩尔自由能变化值；V_{α} 为铁素体摩尔体积。由式(10)可知，引入强磁场使奥氏体有大量晶胚与新相铁素体成分结构极其相似，致使母相磁化能力增强而外磁场附加能增大，$\Delta G_{\mathrm{M}}^{\mathrm{H}}$ 增大，也伴随着奥氏体向铁素体转变驱动力增大，导致相变形核势垒 $\Delta G_{\mathrm{M}}^{*}$ 降低，且外加磁场强度越大作用时间越长，形核势垒下降的幅度显著，珠光体更易形核、长大。

3.3 强磁场对奥氏体相区的影响

Fe-C 相图是钢铁材料的“地图”。在研究强磁场对钢中珠光体相变影响时，首先需要探讨的就是强磁场对铁基合金固态相平衡的影响。如图 2 所示[37]，强磁场对铁碳合金相图实验结果表明，随磁场效应的增强，共析点向高温区和高碳量区移动，α 和 α+γ 区域增大，γ+Fe_3C 区域减小。其主要原因是在珠光体相变过程中磁场提前了转变开始温度，增大了相变驱动力，相变提前开始，过冷度明显增加，能量、结构、成分起伏显著，珠光体晶粒得到更完整生长，珠光体片层间距减小，同时缩短了珠光体相变的孕育期，加速了珠光体形核与长大[38-43]。

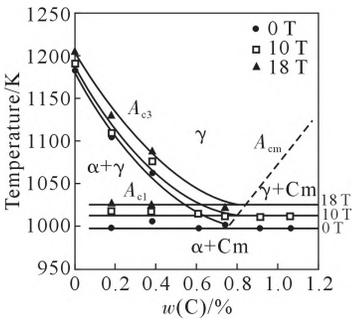


图 2 强磁场对 Fe-C 平衡相图的影响[37]
Fig.2 Effect of high magnetic field on Fe-C equilibrium phase diagram[37]

3.4 强磁场对铁素体组织的影响

强磁场对 Fe-0.12%C(质量分数)合金铁素体和珠光体形貌影响[44]，如图 3 所示[45]。结果表明，磁场提高铁素体的转化量，增加了体积分数，铁素体形貌沿磁场方向伸长。其根本原因为铁素体的磁化率比奥氏体高和磁偶极子受磁场作用[46]。据报道[47]，外加 12 T 强磁场加速了铁素体转变，使其转变温度升高了约 30 ℃，主要因为强磁场降低了其自由能。

根据 Weiss 分子场理论[32]，铁磁性的铁素体在居里点以下极易达到磁饱和，而顺磁性的奥氏体磁化强度相对较小，可忽略不计，每形成 1 mol 铁素体时，体系的自由能减少值大约计算为：

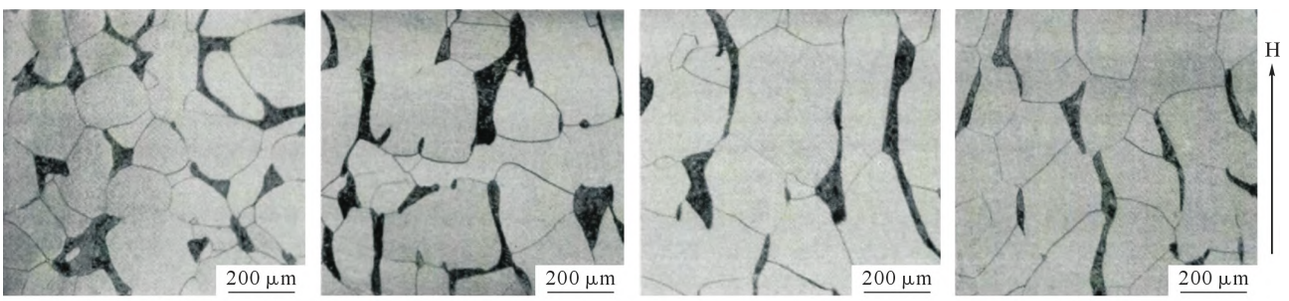
$$\Delta G^{\mathrm{M}}=M_{\mathrm{mol}}=-N_{\mathrm{A}}\mu_{\mathrm{Fe}}H \tag{11}$$

式中，M_{mol} 为摩尔磁化强度；N_{A} 为阿伏加德罗常数 $6.022\ 136\ 7\times10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}}$；$\mu_{\mathrm{Fe}}$ 为铁原子的原子磁矩 $2.219\ \mu_{\mathrm{B}}$；μ_{B} 为玻尔磁子，9.273×10^{-24} ($\mathrm{A\cdot m^2}$ 或 $\mathrm{J\cdot T^{-1}}$)，辛蕊等[48]计算发现 12 T 磁场下，铁素体的磁自由能为 -148.8 $\mathrm{J\cdot mol^{-1}}$，而顺磁性的奥氏体磁自由能可以忽略，奥氏体和铁素体的磁自由能均降低。根据热力学第二定律可知，对比顺磁性的奥氏体来说，铁素体由于附加了磁自由能而变得更加稳定，使过冷奥氏体的分解提前发生，分解温度提高，提高了铁素体的形核率与长大速率，转变产物增多且快速与渗碳体结合，进而促进了珠光体相变。

3.5 强磁场对 Fe–C 元素的影响

3.5.1 强磁场对元素扩散的影响

在 *T*c 附近，强磁场影响溶质原子在纯铁和合金中的扩散行为。2011 年，Fujii 等[49]发现，碳在 α-Fe 中的扩散行为受到磁场退火的抑制。飯島嘉明[50]丰富了Fe、Nb、Cu、Co、Mo 等多种重要合金元素在 α-Fe 中的扩散系数与温度的关系，发现这些元素的扩散系数的阿累尼乌斯(Arrhenius)曲线在居里温度以上降低缓慢，而在居里温度以下降低较快。任晓[51]对不同磁场强度下镍在 Ni-Cu 和 Ni-Al 合金中的扩散行为研究发现，磁场对镍的互扩散起抑制作用。极化中



(a) 0 T (b) 4 T (c) 8 T (d) 12 T

图 3 磁场对铁素体形貌的影响[44]
Fig.3 Effect of magnetic field on ferrite morphology[44]

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

子衍射实验证明[52]，顺磁性相区仍存在磁矩，原子之间交换相互作用来源于费米能级附近 e_g 轨道的态密度劈裂。更多的 e_g 和 t_{2g} 电子分裂产生局域磁矩，进而产生短程磁有序。

3.5.2　强磁场对渗碳体影响

强磁场对合金元素扩散影响[49-52]的理论研究为强磁场对渗碳体的影响提供了理论参考。例如，强磁场促进了碳及部分合金元素的扩散，导致过冷奥氏体内存在富碳区或贫碳区，当满足了形核条件时，铁素体在贫碳区建立核胚并长大，相反渗碳体在富碳区形核且长大。由图 4 可知，施加磁场增大了铁素体/渗碳体界面能，促进渗碳体与铁素体快速形核长大，加快了珠光体相变。磁场使渗碳体变厚，扭曲变形，断裂的现象，通过磁致伸缩应变能也得到了解释[53-54]。

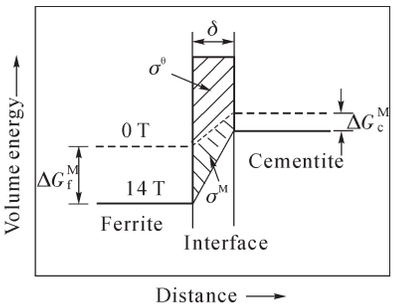


图 4　有无磁场的渗碳体/铁氧体界面能示意图[53]

Fig.4　The interfacial energy of cementite/ferrite with and without a magnetic field[53]

4　结语与展望

迄今为止，科学家们以磁场强度、温度及时间为变量对扩散型相变进行了大量研究，并对其机制进行了深入分析和讨论，从而丰富了相变过程：①磁场缩短了珠光体相变的孕育期，能够促进钢中珠光体转变及转变量明显增加；②当磁感应强度增加时，洛伦兹效应会加强试样中的电子分布及金属离子在磁场中的扩散等。尽管磁场在珠光体相变研究方面取得了一定成果，并且在一定程度上得到了应用。但从目前的研究情况来看，有关磁场对珠光体相变的问题有待解决：

(1)磁场对珠光体相变的影响研究还集中在对基本现象和改善热处理工艺的探究阶段，而磁场对珠光体相变机理尚不清楚，该领域的研究有待进一步深入。例如磁场对珠光体位向关系影响，关于磁场在不同相中磁性或非磁性溶质原子的分配和溶解度影响，以及磁场对相变主导相的选取和沉淀次序，珠光体球化机理尚不明确，加强磁场对珠光体球化机理的研究，对以后更全面深入地研究磁场对珠光体球化提供理论参考。

(2)更高强度的磁场与其他能量场协同作用于珠光体相变的实验与研究还很少，期待多复合场的相变理论早日成熟。

参考文献：

[1] 冯路路，吴开明，乔文玮，等. 轴承钢珠光体球化的研究现状及发展趋势[J]. 中国冶金，2020, 30(9): 110-118.

[2] 胡亚楠. 低温回火下冷拔珠光体钢丝组织和性能的研究[J]. 钢铁钒钛，2020, 41(4): 157-161.

[3] 何岳，向嵩，石维，等. 冷拔珠光体钢的组织演变对其点蚀行为的影响[J]. 金属学报，2016, 52(12): 1536-1544.

[4] 石秋红，黄孙民，张琳. 珠光体耐热钢分汽缸的焊接工艺[J]. 电焊机，2013, 43(5): 156-158.

[5] 李毅. 采用印度焊接材料焊接国产珠光体耐热钢 12Cr1MoVG [J]. 焊管，2012, 35(4): 37-40.

[6] 杨洪波，马宝国，朱伏先，等. 周期球化退火对 GCr15 轴承钢组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理，2009, 34(1): 33-36.

[7] 周宋泽，汪小锋，陈剑斌. 低温回火时间对 GCr15 钢组织演变与力学性能的影响[J]. 材料热处理学报，2021, 42(5): 64-71.

[8] 王世颖. 强磁场对高纯 Fe-C 合金微观组织的影响[D]. 沈阳：东北大学，2010.

[9] 吴光辉. 强磁场下铁基材料回火过程中微观组织与合金碳化物演变的热力学机制[D]. 武汉：武汉科技大学，2020.

[10] 张东，侯廷平，冯勇，等. 强磁场下钢中析出相演变规律研究进展[J]. 铸造技术，2022, 43(8): 615-624.

[11] 侯廷平. 强磁场条件下耐热钢中合金碳化物的析出行为[D]. 武汉：武汉科技大学，2012.

[12] LI P W, CHEN W M, LIU W, et al. Thermodynamic phase formation of morphology and size controlled ni nanochains by temperature and magnetic field[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2010, 114(17): 7721-7726.

[13] 董宝奇. 低温贝氏体钢的力学性能及其强磁场下的相变 [D]. 武汉：武汉科技大学，2019.

[14] ZHANG X X, WANG S J, ZHANG Y D, et al. Carbon-content dependent effect of magnetic field on austenitic decomposition of steels[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, 324 (7): 1385-1390.

[15] WANG K, WANG Q, WANG C J, et al. Formation of aligned two-phase microstructure in Fe-0.25mass%C alloy under gradient high magnetic fields[J]. Materials Letters, 2008, 62(10-11): 1466-1468.

[16] 周晓玲. 磁场下中碳硅锰钢的扩散型相变研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2009.

[17] 冯光宏，谢建新，朱衍勇. 微合金钢磁场处理后的珠光体形貌[J]. 钢铁研究学报，2003, 15(5): 28-31.

[18] JARAMILLO R A, BABU S S, LUDTKA G M, et al. Effect of 30T magnetic field on transformations in a novel steel[J]. Scripta Materialia, 2005, 52(6): 461-466.

[19] ZHANG Y D, HE C S, ZHAO X Y, et al. A new approach for rapid annealing of medium carbon steels[J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(5): 310-313.

[20] 吴存有，李廷举，温斌，等. 强磁场对球墨铸铁退火处理的影响[J]. 大连理工大学学报，2004(4): 514-517.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[21] LI Z X, TONG B Q, ZHANG Q L, et al. Influence of initial microstructure on the microstructure evolution and mechanical properties of 1.0C-1.5Cr steel in the laser surface quenching[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 788: 139490.

[22] DEY I, CHANDRA S, SAHA R, et al. Effect of Nb micro-alloying on microstructure and properties of thermo-mechanically processed high carbon pearlitic steel [J]. Materials Characterization, 2018, 140: 45-54.

[23] AMOS K P G, BHATTACHARYA A, NESTLER B, et al. Mechanisms of pearlite spheroidization: Insights from 3D phase-field simulations[J]. Acta Materialia, 2018, 161: 400-411.

[24] 刘雯,周晓玲,张希俊,等. 强磁场对硅锰铸钢等温珠光体粒化的影响[J]. 材料热处理学报,2012, 33(4): 50-54.

[25] 陈健豪,周晓玲,孟兰,等. 强磁场下 Fe-0.47C-2.3Si-3.2Mn 钢的高温等温相变动力学 [J]. 材料热处理学报,2014, 35(5): 119-122.

[26] 冯路路. 合金元素及强磁场对高碳钢珠光体相变及微观结构的影响[D]. 武汉:武汉科技大学,2021.

[27] 郭笑林,段海明. 3d 过渡金属掺杂对 $Cd_{12}O_{12}$ 纳米线电子和磁性能的影响[J]. 原子与分子物理学报, 2021, 38(2): 73-79.

[28] 吴光辉,侯廷平,李自华,等. 强磁场对钢中马氏体相变的影响及其研究展望[J]. 金属热处理,2020, 45(5): 236-242.

[29] 张晓雪. 强磁场下高纯 Fe-C 合金扩散型固态相变的显微组织形貌和晶体学取向特征的研究[D]. 沈阳:东北大学,2013.

[30] TOMELLINI M, FANFONI M. Connection between phantom and spatial correlation in the Kolmogorov-Johnson-Mehl-Avrami-model: A brief review[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2022, 590: 126748.

[31] ZHANG Y D, HE C S, ZHAO X, et al. Thermodynamic and kinetic characteristics of the austenite-to-ferrite transformation under high magnetic field [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 294(3): 267-272.

[32] FRIDKIN V, KUEHN M, KLIEM H, et al. The Weiss model and the Landau-Khalatnikov model for the switching of ferroelectrics [J]. Physica B: Condensed Matter, 2012, 407(12): 2211-2214.

[33] SAKOH M,SHIMIZU M. Temperature variations of magnetic susceptibility and electronic specific heat for fcc-iron[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1974, 37(2): 565.

[34] 苏雪,王厚昕,朱敏,等. 原位观察铌对高碳钢珠光体相变的影响[J]. 钢铁,2022, 57(4): 88-96.

[35] 曾银平,杜勇,周诗怀,等. 外加磁场对热力学性质的影响[C]//中国化学热力学和热分析学术会议论文摘要集. 北京: 中国化学会,2018. 122.

[36] JOO H D, KIM S U, SHIN N S, et al. An effect of high magnetic field on phase transformation in Fe-C system[J]. Materials Letters, 2000, 43(5-6): 225-229.

[37] MITSUI Y, IKEHARA Y, TAKAHASHI K, et al. Fe-Fe_3C binary phase diagram in high magnetic fields[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 632: 251-255.

[38] 宫明龙. 强磁场对 Fe-C 相图及高碳钢显微组织的影响[D]. 沈阳:东北大学,2008.

[39] 宋建宇. 强磁场下铁碳相图的计算和高纯低碳钢微观组织的演变机理[D]. 沈阳:东北大学,2009.

[40] 宋建宇,赵骧,宫明龙,等. 强磁场下奥氏体化保温时间对 Fe-0.12%C合金珠光体的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2009, 30(4): 551-554.

[41] CHOI J Y, FUKUDA T, KAKESHITA T. Effect of magnetic field on isothermal martensitic transformation in a sensitized SUS304 austenitic stainless steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 577(1): 0925-8388.

[42] OHTSUKA H. Effects of strong magnetic fields on bainitic transformation [J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2004, 8(3-4): 279-284.

[43] ZENG Y P, MITTNACHT T, WERNER W, et al. Gibbs energy and phase-field modeling of ferromagnetic ferrite (α)→paramagnetic austenite (γ) transformation in Fe-C alloys under an external magnetic field[J]. Acta Materialia, 2022, 225: 117595.

[44] 宋建宇,赵骧,王守晶,等. 强磁场下奥氏体化温度对 Fe-0.12%C 合金中铁素体与珠光体形貌的影响[J]. 金属学报,2008, 44(11): 1305-1309.

[45] OHTSUKA H. Effects of a high magnetic field on bainitic and martensitic transformations in steels[J]. Materials Transactions, 2007, 48(11): 2851-2854.

[46] OHTSUKA H. Effects of a high magnetic field on bainitic transformation in Fe-based alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 25(438-440): 136-139.

[47] 辛蕊. 强磁场及合金元素对高碳钢连续缓慢冷却转变及组织的影响[D]. 武汉:武汉科技大学,2017.

[48] 宋建宇,娄长胜,张伟强,等. 强磁场作用下材料扩散型固态相变的微观机理[J]. 材料科学与工艺,2018, 26(3): 84-88.

[49] FUJII H,TSUREKAWA S. Diffusion of carbon in iron under magnetic fields[J]. Physical Review B, 2011, 83: 054412.

[50] 飯島嘉明. 鉄の拡散と磁気的効果[J]. 金属,2004, 74: 877-881.

[51] 任晓. 强磁场作用下镍系合金元素扩散行为研究[D]. 大连:大连理工大学,2010.

[52] HOU T P, LI Y, ZHANG J J, et al. Effect of magnetic field on the carbide precipitation during tempering of a molybdenum-containing steel [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, 324(5): 857-861.

[53] ZHANG Y D, GEY N, HE C S, et al. High temperature tempering behaviors in a steel under high magnetic field[J]. Acta Materialia, 2004, 52(12): 3467-3474.

[54] XIA Z X, ZHANG C, LAN H, et al. Effect of magnetic field on interfacial energy and precipitation behavior of carbides in reduced activation steels[J]. Materials Letters, 2011, 65(6): 937-939.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net