

引用格式:王慧鹏,江聪,黄艳斐,等. 脉冲磁场强化金属材料微观组织演变规律研究进展[J]. 材料工程, 2025, 53(3):20-34.
WANG Huipeng, JIANG Cong, HUANG Yanfei, et al. Research progress in microstructure evolution of metal materials strengthened by pulsed magnetic field treatment[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(3):20-34.

脉冲磁场强化金属材料微观组织 演变规律研究进展

Research progress in microstructure evolution
of metal materials strengthened by pulsed
magnetic field treatment

王慧鹏¹, 江 聪^{1,2}, 黄艳斐², 郭伟玲², 董丽虹², 邢志国^{2*}, 王海斗^{2,3}

(1 江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000; 2 陆军装甲兵学院
再制造技术国家重点实验室, 北京 100072; 3 陆军装甲兵学院
机械产品再制造国家工程研究中心, 北京 100072)

WANG Huipeng¹, JIANG Cong^{1,2}, HUANG Yanfei², GUO Weiling²,
DONG Lihong², XING Zhiguo^{2*}, WANG Haidou^{2,3}

(1 School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University
of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2 National
Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored
Forces, Beijing 100072, China; 3 National Engineering
Research Center for Remanufacturing, Army Academy
of Armored Forces, Beijing 100072, China)

摘要:脉冲磁场强化技术具有非直接接触、低能耗、绿色环保等优点,在金属材料性能提升方面具有重要的应用前景。本文总结脉冲磁场强化技术在金属材料强化机理、数值模拟和实际应用等方面的研究现状,提出脉冲磁场强化技术亟须突破的瓶颈。脉冲磁场作为一种高场强、周期性磁场,对金属材料的固态相变和液态相变过程均具有明显的强化作用:在固态相变中,脉冲磁场能够改变金属材料的织构和磁畴,促使位错增殖扩散,加快第二相析出,调控析出物析出次序;在液态相变中,脉冲磁场为形核提供能量,破碎粗大枝晶,抑制树状枝晶生长,促进溶质均匀分布,多种作用耦合下提高金属材料性能。数值模拟方法能够再现脉冲磁场强化过程中磁场分布、材料受力和内部结构等方面变化,为研究脉冲磁场强化机理提供重要依据;脉冲磁场强化效果主要取决于磁场的磁场强度、脉冲占空比和作用时间,通过数值模拟技术获得强化效果最优的脉冲磁场参数是脉冲磁场强化金属材料的研究重点之一。目前,脉冲磁场强化技术已应用于金属刀具、涂层制备和金属铸造等领域。为了实现脉冲磁场强化技术的广泛应用,未来还需要在强化机理、脉冲磁场参数设计、脉冲磁场装置小型化等方面开展进一步的研究工作。

关键词:脉冲磁场处理;金属材料;强化机理;数值模拟;固态相变;液态相变

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000662

中图分类号: TG142.1; TB31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2025)03-0020-15

Abstract: The pulsed magnetic field treatment technology has the advantages of indirect contact, low energy consumption, green environmental protection, etc., and has important application prospects in the metal material strengthening. This study summarizes the research status of pulsed magnetic field treatment technology in the strengthening mechanism, numerical simulation, and practical application of metal materials, and puts forward the bottleneck of pulsed magnetic field treatment technology that needs to be broken through. As a kind of high-field strength and periodic magnetic field, the pulsed magnetic field has an obvious strengthening effect on the solid phase transformation and liquid phase transformation of metal materials. The pulsed magnetic field can change the texture and magnetic domain of metal for the solid

phase transformation. It can impel dislocations to spread and multiply, speed up the formation of the second phase, and control the order of exudates. During the liquid phase transition, the pulsed magnetic field can provide nucleation energy, break up coarse dendrites, restraint the growth of twisted dendrites, uniform the solute distribution, and eventually enhance the properties of metal. Numerical simulation can reproduce the changes in magnetic field, force, and internal structure in the process of pulsed magnetic field treatment, which provides an important basis for exploring the mechanism of pulsed magnetic field treatment. The strengthening effect of the pulsed magnetic field treatment mainly depends on the magnetic field intensity, pulse duty cycle, and action time of the magnetic field, and one of the key parts of pulsed magnetic field treatment is parameters optimization by numerical simulation. At present, the pulsed magnetic field treatment technology has been applied to cutting tools, coating fabrication, and metal casting. To widen the application of pulsed magnetic field treatment technology, special attention should be paid to strengthening mechanisms, parameter optimization, and device miniaturization in further research of pulsed magnetic field treatment.

Key words: pulsed magnetic field treatment; metal material; strengthening mechanism; numerical simulation; solid phase transformation; liquid phase transformation

金属材料具有强度高、延展性好、性价比高等优点,在社会发展中一直占据着重要作用。随着科学技术日新月异的发展,金属材料的服役环境变得更加复杂,对金属材料的性能提出更高要求。目前,改善金属材料性能的手段主要包括精炼、合金化处理以及形变热处理等^[1]。现今工业领域向着绿色化、低碳化发展,传统改善金属性能的技术面临严峻挑战。因此,亟须开发一种新的金属材料强化技术。

为突破磁场强度的瓶颈,Kapitza^[2]提出一种利用瞬时、高能量电流实现高磁场强度的方法,该方法在不破坏线圈的情况下实现 50 T 的磁场,称该类磁场为脉冲磁场。自此以后,学者们开始对脉冲磁场进行研究。到了 1960 年,磁场开始在工业领域体现出重要作用^[3]。而脉冲磁场强化技术是一种利用脉冲磁场为金属材料微观结构运动提供能量,通过磁场的周期变化在材料内部产生振动效应,改善材料内部缺陷,进而提高金属材料性能的方法。与其他强化技术相比,脉冲磁场强化技术在改善金属冶炼铸锭的偏析、孔洞和杂质等缺陷问题的同时不污染金属熔体、提高钢铁的洁净度和组织均匀性,能耗不及电磁搅拌的一半^[4],材料加工存在内应力集中、相和组织分布不均等问题,脉冲磁场强化技术在不与材料接触、不对材料表面造成污染的情况下,有效地细化晶粒、调控组织转变、均匀化微观组织,改善材料的残余内应力的幅值与分布、减少内部应力集中等,进而提升其服役性能。目前,脉冲磁场强化技术在钢材生产^[5-6]、机械加工^[7-8]、涂层制备^[9-10]等领域得到了大量应用。本文围绕着脉冲磁场强化机理、数值模拟技术发展和金属材料性能提升等方面的研究进展和待解决的问题展开分析和讨论。

1 脉冲磁场强化机理

脉冲磁场强化金属材料分为两个方向。首先,在固态相变中施加脉冲磁场,材料微观结构、应力发生变化,从而改善金属材料的硬度、耐磨和耐腐蚀等性能。其次是在金属材料凝固过程中施加脉冲磁场,使凝固金属的组织细化和均匀化。

1.1 固态相变

脉冲磁场对金属材料固态相变的强化作用与脉冲磁场产生的洛伦兹力、感应涡流等有关。在脉冲磁场中,金属材料的晶体结构、磁畴组织、位错结构、相变转化、析出物发生变化。

1.1.1 晶体变化

因金属材料磁化率的各向异性,脉冲磁场产生使晶体变化的驱动力,增强具有最高磁化率的织构组元,减弱最低磁化率的织构组元,促进晶粒的选择性生长^[11]。

师亚洲等^[12]使用 1, 2, 3 T 脉冲磁场处理 7075 铝合金 20 次,观察不同强度下材料微观组织发现,磁场强度为 1 T 时,合金的微观应变小于原始试样,但减幅很小;当磁场强度为 2 T 和 3 T 时,合金的微观应变大于原始试样,增大磁场强度,试样的微观应变增加,通过 XRD 图谱分析,磁场强度为 2 T 和 3 T 时,合金晶体取向发生改变,最强峰由 (200) 晶面变为 (111) 晶面。董丽平等^[13]在取向硅钢脱碳退火过程中施加脉冲磁场发现,试样立方织构 {001} <100> 的强度减弱,而 Goss 织构 {110} <001> 和 γ 织构 {111} <112> 得到增强,证实脉冲磁场能改变金属材料的晶体择优取向。此外,学者们也发现脉冲磁场的参数影响着晶体结构变化。刘立华^[14]研究脉冲磁场施加方向对硅钢再结晶

织构取向的影响,实验表明,沿轧制方向施加脉冲磁场对促进 Goss $\{110\}\langle 001\rangle$ 取向的作用最强,横向磁场促进 $\{001\}\langle 120\rangle$ 取向形核生长,法向磁场显著抑制 γ 织构 $\{111\}\langle 112\rangle$ 生长。Bai等^[15]在脉冲磁场的脉占空比对 Al-Zn-Mg-Cu 合金初级相晶体取向和组织演变的研究中发现,晶格常数、晶面间距和微应变随着脉冲占空比的增大而增大,在磁晶各向异性 and 脉冲磁场的协同作用下,顺磁性 α -Al 晶体的 $\langle 111\rangle$ 取向朝着磁场方向旋转,原子堆积在 $\langle 111\rangle$ 方向,晶体沿 $\langle h00\rangle$ 方向生长速度减慢。

从上述结果来看,脉冲磁场能影响金属材料的晶体择优取向,但仅靠脉冲磁场并不足以改变晶体取向,需外部提供额外的能量,如退火过程中施加脉冲磁场。在晶体变化过程中,材料的内应力和缺陷得到改善。磁场强度、方向、脉冲占空比等磁场参数对晶体的影响作用不同,磁场强度和脉冲占空比决定着晶体转动程度,磁场方向影响着晶体变化方向。

1.1.2 磁畴运动

不同金属材料的磁学特性不同,如奥氏体为顺磁性,铁素体为铁磁性,铁磁性材料会自发磁化从而形成磁畴,而顺磁性材料不存在磁畴。在脉冲磁场中,金属材料各组分磁畴变化不相同,磁畴运动过程改善金属内应力分布。

栾晓圣等^[16]研究 45CrNiMoVA 钢在 1 T 脉冲磁场处理 20 min 后磁畴变化,实验发现,未处理 45CrNiMoVA 钢的磁畴结构型式杂乱,脉冲磁处理后磁畴克服材料内部阻碍重新排布,整个表面磁畴分布更加均匀。Wang 等^[17]使用脉冲磁场处理 20Cr2Ni4A,发现未施加脉冲磁场时,试样的磁畴层迷宫状,此时材料的应力集中高,施加脉冲磁场后,磁矩转动打破磁畴区域与晶粒间的平衡,释放晶体的内应力,磁畴由迷

宫状转变为层状。

Shao 等^[18]使用磁力显微镜对不同磁场强度的脉冲磁场处理 20CrNi4A 钢的磁畴变化进行观测,在脉冲磁处理前,明亮和黑暗区域交错分布均匀,磁畴结构主要为迷宫式磁畴,也有少量层状磁畴,随着磁场强度的增加,磁畴结构转变增加,并且层状磁畴的面积增大,在磁感应强度为 9 T 时,磁畴尺寸最大。

脉冲磁场促使磁畴运动,磁矩转动和畴壁位移过程中改善金属材料的内应力和缺陷,磁畴进行不可逆运动时性能改善效果越明显,但这种作用仅在金属材料内含有铁磁性物质的情况存在,并且磁畴的不可逆运动的宏观结果是金属材料磁化,这在某些工况下是不利的,因此脉冲磁场的磁场强度和强化时间应根据金属材料的使用工况进行调整。

1.1.3 位错运动

脉冲磁场对材料内位错运动的作用有两个方面,一是力作用于位错,促使位错迁移和扩散。

根据 Frank-Read 源位错增殖理论,位错增殖过程如图 1 所示, A, B 为位错点, A, B 之间的连线为位错线,受到外部应力,克服位错之间的弹性力、晶格阻力和摩擦力向外扩展^[19]。Wang 等^[17]提出脉冲磁场会在位错线上施加一个与伯格矢 b 方向相同的剪切应力 τ (如图 1), 当磁场强度达到临界值, 剪切应力 τ 大于位错线张力恢复力, 在 τ 的作用下, 位错线开始在滑移面上滑移, 以 a, b, c, d, a 的顺序重复无休止地产生位错环路。Li 等^[20]在脉冲磁场对淬火 8Cr4Mo4V 钢残余应力影响的研究中, 计算得出位错运动的临界阻力为 0.41 MPa, 0.8 T 的脉冲磁场施加在单位长度位错上的磁应力为 1.33 MPa, 证明脉冲磁场可以提供足够的驱动力来克服位错运动的临界阻力。

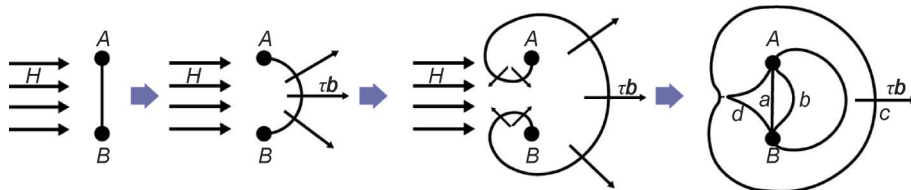


图 1 Frank-Read 源位错增殖机制^[19]

Fig. 1 Dislocation multiplication mechanism of Frank-Read source^[19]

二是脉冲磁场会影响位错核中电子对的转换,使位错能更容易的扩散。

Cheng 等^[21]研究脉冲磁场对金属材料塑性变形的影响,对磁压力、磁化力和塞曼效应三种可能驱动铝基复合材料塑性变形的作用力进行讨论,然而计算结果表明,在磁场强度为 4 T 时,磁压力 P 为 6.35 MPa,

不足以铝合金中产生大的塑性变形;磁化力 F 为 1.53×10^{-3} N 远低于铝基复合材料的屈服强度;塞曼效应提供的能量也小于位错运动所需能量,因此作者提出脉冲磁场下铝基复合材料塑性变形与量子尺度上位错自由基对的形成有关,在没有磁场的情况下,自由基对处于单线态(S)状态,此时电子对的自旋方

向相反,当样品暴露在脉冲磁场中,两个自由基之间的距离 r 变为 $r_0 \leq r \leq 2r_0$ (r_0 为电子半径),电子的自旋方向改变,从单线态转变为三线态(T)。许肇栋等^[22]提出脉冲磁场中电子对自旋状态转变与Lande因子有关,脉冲磁场引起电子对Lande因子的差异,进而改变Larmor进动频率差,最终改变电子对自旋状态。

Hu等^[23]提出在任何温度下,金属、半导体和介电材料都能观察到顺磁障碍物与位错相互作用激发自由电子形成自由基对,在S态,位错与顺磁障碍物紧密相连,电子自旋是反平行的,结合能强,位错需要大量的能量才能通过障碍物,在T态时,电子自旋平行时,结合能较弱,位错越过障碍物所需能量降低,当存在磁场时,自由基对经常在S和T状态之间跃迁,脉冲磁场促进电子对由S态转变为T态,当自由基对由S态过渡到T态,系统的能量增加,稳定性降低,位错更容易被剥离和移动。

脉冲磁场促进位错的增殖扩散,位错运动到晶界处堆积形成位错壁,在磁场和拉应力作用下,位错推动位错壁移动,材料内应力发生变化,多个位错壁拼接形成亚晶界,晶界、亚晶界间形成细晶^[24]。然而,增加磁场强度和强化时间并不总是有利的,脉冲磁场对位错核的影响作用存在临界磁场强度,超过临界值,磁场促进电子对转变能力随磁场强度增大而下降,强化时间过长,亚晶壁和位错反作用于位错运动,造成位错塞积,使得材料内应力集中增加。

1.1.4 相变过程

吴光辉等^[25]提出在高碳钢的热处理过程中,顺磁性母相转变为铁磁性子相,在磁场作用下,铁磁性相发生磁化,其磁化强度 M 发生改变,其吉布斯自由能减小,减小量为外部磁场产生的磁场能量。磁场为相变提供额外能量,提高相变开始温度,张秋红^[26]和冯路路^[27]指出铁基材料的马氏体转变、贝氏体转变及铁

素体转变过程中,母相为顺磁性,而子相为铁磁性,在磁场中铁磁性相的吉布斯自由能减小量比顺磁性相大,母相与新转变相之间的吉布斯自由能差值增大,相变临界温度升高,脉冲磁场下相变温度从 T_0 提高为 T_1 ,如图2所示。

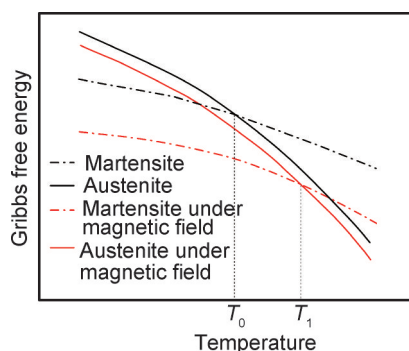


图2 脉冲磁场对相变温度的影响^[26]

Fig. 2 Effect of pulsed magnetic field on phase transition temperature^[26]

胡心彬等^[28]在Co-25Ni合金固态相变过程中施加2.5 T的脉冲磁场发现,合金的相变临界温度提高5~10 K。Ludtka等^[29]发现在30 T磁场下碳钢的转变温度升高了70~90 °C,金相显示铁素体体积分数提高了25%~30%。Hao等^[30]发现纯铁从奥氏体到铁素体的转变温度与磁场强度呈线性关系,每提高1 T磁场强度,相变转变温度提高0.8 °C,Fe-0.8C合金共析转变温度与磁场强度同样呈线性关系,磁场强度提高1 T,共析转变温度大约提高1.5 °C。此外,孙中豪等^[31]在TC4钛合金析出行为中发现,脉冲磁场在形核阶段引入磁自由能,减小强化相的临界形核功,产生的电磁能增加金属原子的振动幅度使原子更易扩散,改变强化相的生长速率和分布,脉冲磁场处理下TC4析出速度明显提高,在相同时间下析出相的体积分数增加,如图3所示。

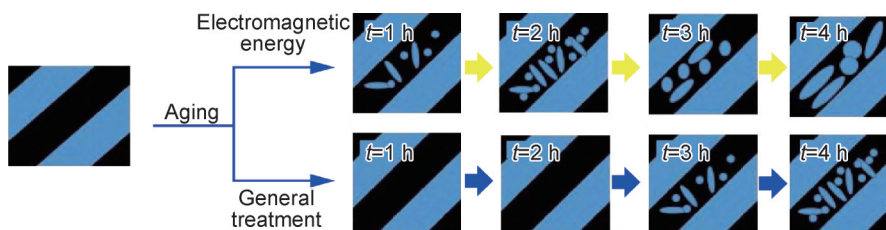


图3 脉冲磁场对析出行为的影响^[31]

Fig. 3 Effect of pulsed magnetic field on precipitation behavior^[31]

上述研究表明,在金属材料热处理过程中,脉冲磁场使相变温度提高,加快相变过程,但在相变过程中磁场强度、强化时间对相变温度、速度的量化研究

报道较少,研究脉冲磁场作用下金属材料的金属类型、磁场强度、脉冲占空比等对相变过程的影响,将有利于揭示脉冲磁场强化机理,更好地指导脉冲磁场强

化技术的实际应用。

1.1.5 析出物变化

Wu 等^[32]在 Fe-C-Cr 合金钢回火过程中施加 12 T 磁场,发现施加磁场析出物的形核壁垒降低,合金钢中析出碳化物数量增加 2.42 倍。Hou 等^[33]发现 12 T 磁场下回火 2.25Cr-Mo 钢析出碳化物的类型发生变化,在 200 °C 回火、无磁场时,析出碳化物类型为 M_2C , M_3C 和 M_7C_3 ,而在 12 T 磁场下,析出碳化物类型为 $M_{23}C_6$;在 550 °C 回火、无磁场下,为 M_2C 和 M_3C ,而在施加磁场下,碳化物类型为 M_2C , M_3C , M_7C_3 及

$M_{23}C_6$ 。Zhang 等^[34]利用第一性原理、Weiss 分子场理论和密度泛函扰动理论研究磁场诱导 M_7C_3 合金碳化物的析出,图 4 为磁场作用下碳化物变化,研究表明,Fe 和 C 组成结构影响碳化物的自磁性,其中 Fe 原子的 3d 轨道起着重要作用,碳化物磁自由能变化大小: $Fe_4Cr_3C_3 > Fe_3C > Fe_2C$ 。李自华^[35]研究了磁场中碳化物 $M_{23}C_6$ 的析出热力学机制,磁场增加短程磁矩间的交换耦合作用,总自由能变化中磁场贡献约占 50%,增加磁场强度,磁致磁熵和磁致磁焓显著增加。

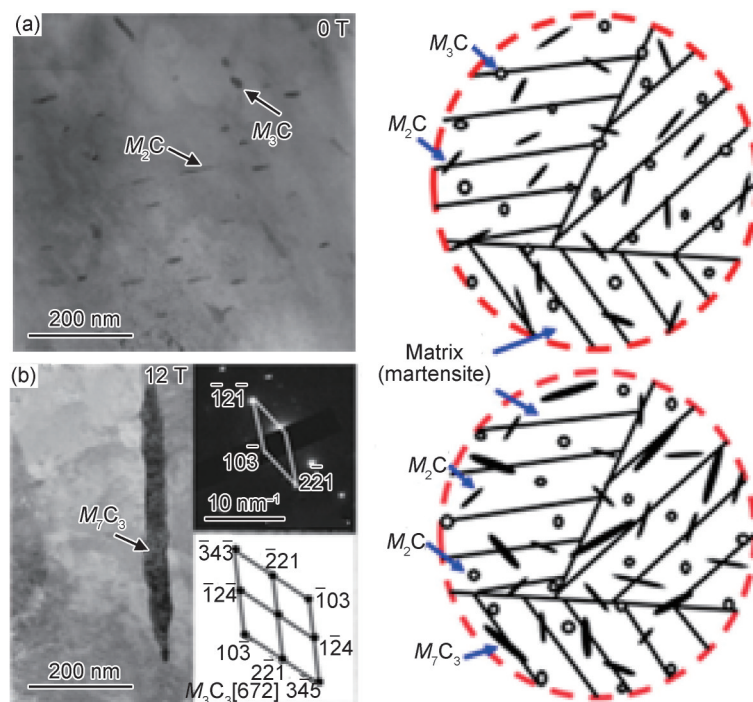


图 4 有、无磁场下析出碳化物的 TEM 图及示意图^[34]

Fig. 4 TEM images and schematics of carbides precipitated with and without magnetic field^[34]

Song 等^[36]在磁场处理 GCr15 轴承钢的研究中发现,无磁场处理时,大尺寸的碳化物颗粒占多数,在磁场处理后,因轴承钢内组织的铁磁特性差异,在磁场中受到不同方向、大小的磁作用力,碳化物颗粒和珠光体基体发生变形,当变形量超过临界值,大尺寸碳化物颗粒出现裂纹,最终被剪断细化。

磁场对金属相变中析出物的影响有两方面。一是降低碳化物的磁自由能,减小碳化物的形核壁垒,使碳化物析出的临界温度降低,加快碳化物的形核;二是磁性差异导致碳化物的析出顺序发生变化,同时磁场的作用提高了碳化物界面能,为使系统能量趋于稳定,碳化物发生球化。

综上所述,首先,晶体在脉冲磁场的作用下发生偏转,晶体择优取向改变,脉冲磁场的磁场方向、磁场

强度和脉冲占空比均会影响晶体结构;其次,铁磁性金属材料的磁畴会随着磁场的施加发生转动,磁畴运动释放晶体内应力,磁场强度越高,磁畴结构变化越明显;脉冲磁场为位错运动提供驱动力,促进单线态自由基对向三线态转变,增加位错的增殖扩散,并且晶体和磁畴运动使晶界处的位错塞积松动,进一步促使位错的增殖扩散,但当位错增殖扩散到一定数量后,位错开始在晶界处堆积阻碍晶体和磁畴的运动。不同磁性特性金属材料受到脉冲磁场的影响程度不同,顺磁性材料的磁响应较小,仅使用脉冲磁场的强化效果较弱,通常脉冲磁场强化顺磁性金属需在热处理或熔融过程,在热处理过程中,脉冲磁场提供磁自由能,提高相变转变温度,加快新相的析出;脉冲磁场降低析出碳化物的形核能垒,不同析出碳化物的磁自

由能变化量不同,改变析出顺序,并且碳化物与金属基体的磁性差异致使碳化物断裂细化,但这可能析出不利相。在研究脉冲磁场强化时应将上述现象纳入考虑范围。

1.2 液态相变

金属凝固过程中施加脉冲磁场,磁场和熔体的感应电流相互作用产生洛伦兹力,洛伦兹力的作用方向与熔体表面存在夹角,洛伦兹力分解为径向洛伦兹力和轴向洛伦兹力,其中径向洛伦兹力造成熔体振荡,轴向洛伦兹力造成熔体对流^[37-38]。电磁振荡、强迫对流及电磁热效应影响金属凝固过程的晶粒形核、枝晶生长及溶质运动,故脉冲磁场对金属液态相变的强化机理从晶粒、枝晶及溶质三个方面进行阐述。

1.2.1 提供形核能

Zhao 等^[39]研究发现在纯铝单向凝固过程施加脉冲磁场能获得细小的等轴晶粒,根据吉布斯自由能理论得出,脉冲磁场改变相变自由能,为形核提供额外驱动力。Bai 等^[40]在脉冲磁场晶粒细化机理的研究中解释到,凝固过程中成核所需能量的三分之二由固液相自由能差提供,剩余的三分之一能量由外部来源提供,例如过冷或磁能。Li 等^[41]对脉冲磁场在凝固过程不同时期的作用进行研究,发现脉冲磁场细化作用主要在成核阶段实现,在凝固初期施加低压脉冲磁场(low voltage pulsed magnetic field, LVPMF),脉冲磁场改变固液相自由能差产生额外的成核能量,降低形核的临界半径及形核能垒,加快成核速率,最终获得细小晶粒,而在液相阶段和凝固后期施加 LVPMF 凝固组织无明显影响。Zhang 等^[42]研究发现脉冲磁场的磁压力引起的磁冷却和强迫对流增加凝固区域的过冷度,加快晶核成核,促进细等轴晶粒形成。

从上述研究结果可知,脉冲磁场为形核提供能量,影响凝固区域的过冷度,降低形核能垒和临界形核半径,使凝固过程中晶核数量增加,最终细化凝固组织晶粒。脉冲占空比是决定晶粒细化的关键参数,脉冲占空比过低,磁场提供瞬间能量无法突破成核能垒,脉冲占空比过高,晶粒细化受到负面影响。

1.2.2 结晶雨

模具壁和熔融金属的电磁力分布不同造成熔体振荡,晶核从模具壁和液面上落入熔体内部,增加熔体内部的晶核数量。

翟启杰团队^[43-44]提出脉冲磁振荡(PMO)凝固技术来细化金属和合金晶粒,脉冲磁场诱导熔体内产生电磁力,电磁力作用于熔体表层产生压力波,将晶核从液面和模具壁脱落下,形成“结晶雨”,如图 5 所示^[45]。Gong 等^[46]构建晶核从模具壁上分离的准则如

式(1)所示,该准则解释“结晶雨”的形成,由准则可知,在相同功率的情况下,晶粒细化主要取决于峰值电流以及一个脉冲周期中的单个施加能量。Li 等^[47]发现高压脉冲磁场的脉冲占空比对于凝固金属的晶粒细化效果较小,强迫对流和电磁振荡的作用效果在凝固的早期阶段最大,此阶段模具壁和液面上的晶核更容易被带入熔体内部。

$$f > \frac{\left(P_0 + \rho gh + \frac{2a}{R} \sin^2 \theta\right)}{\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_l} - 1\right) R (1 - \cos \theta)^2 \left(\frac{2 + \cos \theta}{3}\right)} \quad (1)$$

式中: f 为晶核受到电磁力; P_0 为大气压强; ρ 为熔体密度; g 为重力加速度; h 为液面到晶核的距离; a 为熔体表面张力系数; θ 为晶核接触角; σ_s 和 σ_l 是固相和液相的电导率; R 为晶核的曲率半径。

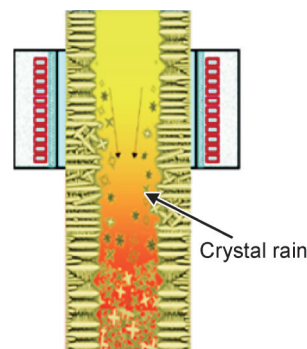


图 5 结晶雨示意图^[45]

Fig. 5 Crystal rain diagram^[45]

上述研究表明,脉冲磁场使凝固过程中非均匀形核的晶粒从液面和模具壁下脱离,增加凝固界面处的晶核数,从而细化晶粒。在低磁场强度,脉冲磁场的磁压力不足以引起结晶雨,此时晶粒细化是因为脉冲磁场促进形核,脉冲占空比影响细化效果,而磁场强度增大,脉冲磁场的瞬间能量足以突破形核能垒,脉冲占空比对晶粒细化的影响减弱,并且磁压力能将晶核振落,此时脉冲磁场的磁场强度和作用凝固阶段对于晶粒细化效果的影响较强,在凝固初期晶核刚成核长大时,脉冲磁场的细化作用更明显。

1.2.3 枝晶破碎

Wang 等^[48]在纯镁的凝固中引入脉冲磁场,磁场处理后铸锭中形成细而均匀的等轴晶粒,研究发现脉冲磁场处理的细化作用是因为脉冲磁场的强迫对流在枝晶上形成产生剪切应力,导致柱状枝晶的尖端和分支断裂落入熔体内部成为晶核。Zhang 等^[42]指出在凝固过程中电磁振荡和熔体对流不仅破坏柱状枝晶的生长,还将高温度的熔体推向温度较低的固-液界面

处,使局部平衡温度上升,增加过冷区间和过冷区域,提高枝晶碎片存活率,减小熔体内的固-液相交界区域的温度梯度,促进细等轴晶粒的形成。Li等^[49]使用高压脉冲磁场(high voltage pulsed magnetic field, HVPMF)对Zn-Ag合金凝固过程进行处理,发现随着HVPMF的增加,HVPMF在液-固界面处引起的强制对流使得同晶Zn-2.5%Ag(质量分数)合金中的初生 η -Zn晶粒由粗枝晶转变为细球状晶粒,试样的宏观组织变得越均匀。Manuwong等^[50]使用电子显微镜和同步加速器X射线断层扫描重建三维断层模型,证明熔体内部产生的脉冲洛伦兹力足以破坏Al-Cu合金中初级Al枝晶的生长,长柱状树枝状微观结构被破坏,形成了较小且随机取向的树突。

从上述研究可知,枝晶破碎是脉冲磁场磁压力作用的结果,与结晶雨相比,枝晶破碎需要更大的磁压力,这意味着脉冲磁场的磁场强度足够大时,脉冲磁场强化凝固过程能从三个方面细化晶粒,但是目前的研究报道对于脉冲磁场细化晶粒的三个作用的临界磁场强度还未能给出相关计算公式,这是未来研究的一个重要内容。

1.2.4 溶质运动

Cui等^[51]使用高温共聚焦扫描激光显微镜在45钢凝固过程原位观察到脉冲磁场推动界面处非金属夹杂物运动。Gong等^[52]对脉冲磁场处理下Al-Mg-Si-La合金凝固的显微组织进行研究,施加脉冲磁场时,电磁力在熔体中产生并形成强烈的冲击波,电磁力的冲击波效应有效地降低溶质元素的温差和浓度差,提高溶质元素扩散,晶界处粗金属间化合物的数量明显减少,显著改善微偏析缺陷。Li等^[53]认为溶质原子在液固界面携带电荷,当携带电荷的溶质原子从固相跳入液相或从液相跳入固相时产生扩散电流,在脉

冲磁场的作用下,电磁力改变溶质原子的迁移轨迹,溶质原子从液相跳入固相迁移时间延长,固相跳入液相迁移时间缩短,溶质原子的有效分布系数降低,最终减弱负偏析元素的微偏析,增加正偏析元素的微偏析。

综上所述,在液态相变中,磁致振荡将粗大树状枝晶破碎,振落液面处的晶核,强迫对流使熔体的温度梯度降低,增加枝晶碎片成核率;在电磁热效应的作用下,枝晶尖端球化,抑制树状枝晶的生长,然而随着磁场施加时间增加,电磁热效应加剧,固-液界面处温度增大,凝固时间增长,晶粒生长时间增加,最终导致凝固组织晶粒粗大;电磁波的冲击作用提高溶质元素扩散,并且电磁力能促进正偏析元素微偏析,抑制负偏析元素的微偏析,通过合理设计能有效改善凝固组织的微偏析缺陷。表1为金属相变过程中脉冲磁场的作用,由表1可知,对于金属不同相变过程,脉冲磁场从多方面影响着金属材料,实现金属晶粒细化、材料内部缺陷改善及成分均匀化等。目前,对脉冲磁场多种强化效应中何种效应占主导作用,各效应量化关系的研究缺乏,如何设置磁场参数以及协调多种强化效应的耦合作用来最大程度改善金属材料性能,这是未来研究的重点。

2 脉冲磁场强化的数值模拟

脉冲磁场强化过程中磁场、材料的受力、内部结构等变化的检测较为困难,这限制脉冲磁场的强化机理的研究和脉冲磁场强化的实验设计。因此,采用数值模拟技术研究脉冲磁场强化金属材料过程。

脉冲磁场强化的数值模拟是磁场、流场、温度场等多种场的耦合,数值模拟将物体的物理模型与数学

表1 金属相变过程中脉冲磁场的作用

Table 1 Effect of pulsed magnetic field in the process of metal phase transition

Transition process	Influencing factor	Result
Solid phase transformation	Crystal	Crystal rotation, crystal preferred orientation change
	Magnetic domain	Magnetic domain wall movement, magnetic moment rotation
	Dislocation	Electromagnetic force promotes dislocation proliferation and diffusion
	Phase transformation	Increasing the critical temperature of phase transformation and accelerating phase precipitation
	Precipitate	The precipitation order is changed, and the precipitates are sheared
Liquid phase transformation	Number of nuclei	It provides energy for nucleation and promotes nucleation. Crystal rain and dendrite fracture increase the number of nuclei
	Dendritic	Columnar dendrite fracture, tip spheroidization, slow growth rate, and promote equiaxed dendrite transformation
	Solute	The electromagnetic wave impacts and disperses the polymer-rich atom clusters, and the electromagnetic force changes the solute atom migration trajectory

模型相结合,利用计算机的超高计算能力对实验过程进行再现和分析。脉冲磁场强化过程数值模拟模型构建分为脉冲磁体和强化物件的物理模型构建及磁场、流场和温度场的数学模型构建两部分。

2.1 物理模型构建

数值模拟首要任务是脉冲强化装置及工件几何模型的构建,在脉冲磁场强化不同金属相变过程中,脉冲磁场强化装置的磁体和工件布置形式均呈对称结构,考虑到仿真计算的工作量,通常会对脉冲磁场强化几何模型进行简化。Xu等^[54]将仿真模型简化二维轴对称模型,对脉冲磁体和被强化材料均用稠密的四边形网格,其余部分均使用三角形网格,并对磁体和试样间的空气进行网格加密。Wang等^[55]为避免因人为选取边界导致的计算误差,在原有模型的基础加入边界层并设置为无限元域。Li等^[56]指出当使用线性三角形和四边形单元时,标准有限元的计算精度低,然而这两种单元是唯一可以为复杂几何自动生成网格类型,为克服标准线性有限元的缺点,提出运用基于边缘平滑有限元法对仿真模型进行建模,问题域用三角形单元进行离散化,问题域 Ω 分为 N 个三角形,每条边的平滑域是基于梯度平滑技术通过依次连接边的两个端点和周围三角形的质心而形成的。

除了采用划分网格的策略,Hatić等^[57]选择无网格漫反射近似法进行仿真模拟,无网格法不需要生成多边形网格元素,只需要一组离散化节点,使用加权最小二乘法来确定离散数据的局部平滑和可微近似,即可计算复杂的多场耦合问题。在脉冲磁场强化金属粉末数值模拟中,Soda等^[58]和Yan等^[59]采用离散单元法对金属颗粒模型进行建模。

2.2 数学模型构建

脉冲磁场发生电路主要由脉冲电源、电源控制装置、续流回路和磁体组成,对实际电路进行简化后,应用微分方程和全局常微分进行模型构建,将磁体线圈端电压和电流作为磁场分析模型的输出和激励,结合麦克斯韦方程组构建出电磁力的分布^[60]。

固态相变和液态相变过程的数值模拟存在差异,液态相变需考虑流-固场耦合,故分为两个部分进行阐述。

2.2.1 固体相变

脉冲磁场强化固态相变的数值模拟主要关注于强化过程中的应力分布和应变过程。通过电磁变换关系得到电磁场分布,根据金属材料的不同相态构建出其电磁力方程。

固态金属材料按形态分为块状和粉状两种类型,不同形态金属材料在磁场中受到电磁力的计算公式

不同。

块状材料受到的电磁力:

$$f = J \times B \quad (2)$$

式中: f 为电磁力; J 为电流密度; B 为磁通量密度。

Sofi等^[61]在数值模拟中发现在对称模型中,工件径向方向上的磁场强度几乎为零,洛伦兹力表达式能进一步简化如式(3)。

$$f = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial B^2}{\partial r} \quad (3)$$

式中: μ 为金属材料的磁导率; r 为工件轴向方向。

电磁场造成的固态金属材料塑性变形可用Johnson-Cook(JC)模型和Cowper-Symonds(CS)模型描述^[62]。

Qiu等^[63]对金属薄壁在脉冲磁场中的高应变率效应,选择用CS本构模型近似反映。Li等^[56]考虑到脉冲磁场施加的冲击载荷,选择由CS速率相关幂律控制的具有速度应变依赖性的幂律各向同性塑性模型,引入一种稳定的二分法迭代方法解决冲击载荷下高应变率金属材料塑性模量不稳定问题。然而CS本构模型未考虑脉冲磁场对工件温度的影响,为研究温升对金属材料的影响,Liu等^[64]选择JC模型模拟脉冲磁场强化固态金属过程中的动态变形行为。Yan等^[65]在JC本构模型中引入JC损伤模型来描述脉冲磁场上固态金属的损伤活化行为。

Soda等^[66]为解决传统的离散元仿真模型不能准确描述铁磁性颗粒瞬时运动问题,在计算公式中加入粒子的磁滞,如式(4)~(6)所示。

$$p_i = \min(p_{\max}, p_H) \quad (4)$$

$$f = (p_i \cdot \nabla) B_i \quad (5)$$

$$\begin{cases} p_i = \min(p_i, p_H(\theta, H_{\max}))\hat{q}, & |H_i| < H_{\max} \\ p_i = \min(p_{\text{sat}}, \chi H_i)\hat{q}, & |H_i| \geq H_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: p_i 为粒子磁矩; B_i 为第 i 个粒子磁通量密度; $p_H(\theta, H_{\max})$ 为曾暴露于在 $H_{\max}$ 下的粒子残余磁矩; p_{sat} 为饱和磁矩; χ 为材料磁化率; θ 为磁化易轴与磁场方向夹角; $\hat{q}$ 为磁化易轴方向的单位矢量; H_i 和 $H_{\max}$ 分别为当前磁场强度和最大磁场强度。

Soda等的研究为脉冲磁场中金属粒子的受力建立了新模型,然而模型未考虑颗粒的塑性变形和破碎,存在局限性。为模拟金属颗粒在脉冲磁场中的变形行为,Yan等^[59]采用离散单元法建模,通过JC本构模型动态分析粉末的应力和应变分布,但是未考虑粉末密度变化及材料塑性变形后的体积变化的响应。Li等^[62]以电磁力为边界条件,选择CS本构

模型对粉末应力-应变进行分析,利用改进 Drucker-Prager Cap 本构模型再现粉末塑性变形后的体积响应。

2.2.2 液态相变

脉冲磁场强化液态相变中更多考虑熔融金属流体流动状态和温度变化,构建流场模型描述熔体变化。

液态相变中,熔融金属受到的电磁力可分为旋转力和无旋力两部分如式(7),等式右侧的第一部分是旋转力,促使熔体强制对流,第二部分是无旋力^[67]。

$$f = \frac{1}{\mu_0} (B \nabla) B - \frac{1}{2\mu_0} \nabla B^2 \quad (7)$$

式中: μ_0 为真空磁导率。

熔体内晶体上的电磁力由式(8)可计算出^[68]

$$d\vec{f} = V_c \vec{B} (\vec{I}_s - \vec{I}_l) \quad (8)$$

式中: V_c 为晶核的体积; $\vec{I}_s$ 、 $\vec{I}_l$ 分别为晶核和熔体的感应电流密度。

Hatić等^[69]将凝固过程中的液相和固相都使用牛顿流体假设为不可压缩伪流体,固相和液相的密度恒定且相等,固、液转变区设置为各向同性多孔介质,熔体流动视为层流,流动的动态黏度为定值,采用对流扩散方程模拟凝固过程中的热传输。然而金属凝固过程中,熔体的流动并非稳定为层流,而是层流与湍流并存。为模拟凝固过程中流体的湍流,Chen等^[70]通过将磁流体动力学流动方程解耦为瞬态磁扩散方程和非定常纳维-斯托克斯(N-S)方程,结合 $k-\epsilon$ 模型来模拟湍流动能(k)以及湍流动能耗散(ϵ),将湍流阻尼加入脉冲磁场下非定常流动数值模型。N-S方程虽然能描述流体的湍流行为,但是对于高雷诺数、瞬态的湍流问题,求解N-S方程需要巨大的计算能力,Chen等^[71]选择雷诺平均纳维-斯托克斯(RANS)方程结合标准 $k-\epsilon$ 模型,构建电磁场、流体流动和凝固耦合的瞬态二维轴对称数学模型,熔体的动量守恒方程分为 r 和 z 两个方向上的守恒, r 方向上的膨胀被模具壁限制(式(9)),而 z 方向上需要考虑熔体的重力、热浮力作用(式(10)),而凝固过程中的潜热采用焓孔隙法处理。

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial r} + (\mu_0 + \mu_t) \\ \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_r}{r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) &- A_{\text{mush}} \frac{(1-g_l)^2}{g_l^3} v_r + f_r \quad (9) \\ \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + (\mu_0 + \mu_t) \\ \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) &- A_{\text{mush}} \frac{(1-g_l)^2}{g_l^3} v_z + \\ f_z + \beta_T \rho g (T - T_{\text{ref}}) + \rho g \end{aligned} \quad (10)$$

式中: μ_t 为湍流黏度; μ_0 为真空磁导率; $\beta_T \rho g (T - T_{\text{ref}})$ 为热浮力; ρg 为重力; f_r 和 f_z 为电磁力的分量; v_r 和 v_z 为熔体流速的分量; A_{mush} 为糊状区常数; g_l 为液相体积分数。

为保证求解的收敛性,Wang等^[55]和Duan等^[67]对

动量守恒方程进行优化,在式(10)中 $A_{\text{mush}} \frac{(1-g_l)^2}{g_l^3}$ 项

中加入达西项 χ ,将公式改为 $A_{\text{mush}} \frac{(1-g_l)^2}{g_l^3 + \chi}$,其中 χ 为一极小的数值。

Jia等^[72]指出潜热的处理方法有温度回升法、等效比热法和焓孔隙法,对于具有宽糊状区的凝固过程,采用等效比热法描述潜热的释放,将凝固过程中潜热的释放视为合金本身的变化,比热视为温度的连续函数,获得的解更精确。

凝固过程中的自由表面和模具冷却边界视为静态壁,速度、湍流动能和湍流耗损速率为0,使用壁面函数处理模具壁附近熔体的流动和传热^[73],而熔体与模具和次冷却区域的传热系数和热边界条件使用柯西边界条件。

综上所述,脉冲磁场强化数值模拟有多种方法,对于脉冲磁场强化块状金属,多数学者采用网格划分的有限元法,通过JC本构模型对金属应力-应变进行计算。脉冲磁场强化金属粉末过程,常用离散元法对金属粉末建模,通过JC模型或CS模型分析结合改进Drucker-Prager Cap模型表征粉末塑性变形。金属凝固过程中熔体的流动,可通过RANS方程和 $k-\epsilon$ 方程描述,除了上述方法,也有学者将脉冲磁场强化金属凝固过程凝固和流动两部分进行模拟,凝固过程的数学模型同前面,而流动部分使用大涡模拟(large eddy simulation, LES)法进行模拟。现阶段的脉冲磁场强化数值模拟并未考虑到熔体不均匀性,忽略了固-液界面处的电流效应和密度变化的影响,如何将这些因素加入到模拟中是脉冲磁场强化数值模拟的研究重点。

2.2.3 模拟结果

对上面构建的模型进行求解,得到工件在脉冲磁场中洛伦兹力、流场和温度场分布特征,结合实际实验结果,能更直观地解释脉冲磁场强化金属材料的机理,为脉冲磁场强化金属提供指导作用。

滕跃飞等^[74]模拟了脉冲磁场作用下不同宽厚比矩形截面试件熔体中电磁场和流场的分布情况,模拟结果表明,脉冲磁场在熔体中产生周期性振荡和环流形式的对流,在相同磁感应强度的脉冲磁场下,试件宽厚比越接近1,电磁力和流速越大。Chen等^[71]对熔

体中脉冲磁场的洛伦兹力和焦耳热的分布特征进行模拟,脉冲磁场在试样内产生的洛伦兹力主要分布在径向方向,集中于熔体的侧表面附近,熔体边缘处的洛伦兹力大于熔体中心的洛伦兹力,熔体受到的最大磁压力为最大磁拉力的两倍。Zhang 等^[75]对有、无固-液界面条件下熔体内洛伦兹力和温度场的分布特征进行模拟,存在固-液界面时,固-液界面附近的洛伦兹力最大,压力变化也更为剧烈,熔体边缘的磁压力驱使熔体向中心移动,固-液界面的存在,迫使熔体向上流动,最终在纵截面上形成多圆对流。Duan 等^[76]研究了脉冲参数(电流强度、频率、占空比和相位差)对瞬态洛伦兹力、熔体振荡行为、温度场和凝固特征的影响,电流强度只改变洛伦兹力的大小而不改变其分布特征,洛伦兹力随电流强度增大而增大,熔体流动的最大速度及其振荡幅度以指数形式增加;脉冲频率影响洛伦兹力的穿透深度和轴向洛伦兹力的占比,随着脉冲频率的增加,熔体波动范围减小,熔体流动的最大速度及其振荡幅度以负指数形式减小;脉冲占空比较高时,洛伦兹力减小,作用时间延长,熔体流动最大速度及其边缘的振荡幅度降低;脉冲电流相位差的增加导致洛伦兹力的持续时间延长,但最大洛伦兹力减小。Duan 等^[77]对镁合金直流锻造过程中不同类型磁场的偏析行为进行模拟,模拟结果证明,PMF 和 OPMF(异相脉冲磁场)可以将原子核移回顶表面然后均匀地分布在整个熔体中,其原子核由于其最大的流动区域而分布得更分散,此外,强制对流冲散固-液界面前方的富质层,将富质区域的破碎枝晶带到浆液区,减轻自由原子核积累引起的溶质稀薄度,使溶质元素分布更加均匀。

脉冲磁场强化的数值模拟提供了一些见解,首先,数值模拟有助于获得脉冲磁场过程中试样内的电磁场、温度场、流场的分布,脉冲磁场在熔体内产生的周期性的压-拉电磁力主要分布在径向方向,在熔体侧表面和熔体固-液界面处电磁力更大,其中磁压力占主导作用,印证脉冲磁场能对熔体作用周期性电磁力,引起熔体对流和振动,并且因为固-液界面处的电磁力差异,增大出现枝晶断裂的可能性,改变固-液界面处的温度梯度。其次,有助于探究磁场强度和磁场方向等参数对多种场的影响,这些对熔体运动的影响是实验难以观察的,通过数值模拟可知,容器宽厚比和电流强度决定熔体电磁力大小,脉冲频率和脉冲占空比影响熔体振荡幅度。

高保真模型和快速仿真方法以及其他数学方法的集成是数值模拟的发展趋势,现阶段的模型和仿真过程的准确性已经非常接近现实,但仍然存在一些差异。

3 脉冲磁场处理对金属性能的影响

脉冲磁场强化技术已广泛使用于刀具加工、涂层制备、钢铁冶炼等行业,下面列举了几个金属固态相变和液态相变中脉冲磁场强化的应用。

3.1 金属刀具的切削性能

金属刀具在制造业中起着重要作用,常用提升刀具切削性能的方法存在耗时长、成本高的问题^[78],而脉冲磁场强化金属刀具耗时短,无污染,强化过的刀具加工工件表面质量提高。

马利平等^[79]用脉冲磁场强化 M42 高速钢刀具,经过脉冲磁场处理后,高速钢的晶格发生畸变,基体析出大量弥散碳化物,微观组织细密、晶粒细化、洛氏硬度最大增加 2.9HRC。魏灿等^[80]采用脉冲电磁场处理工艺能强化 YG6 硬质合金刀具的铣削性能,降低并稳定加工过程的切削力,刀具后刀面磨损降低约 35%,硬质合金硬度提高约 2%,抗弯强度提高约 12%。廖承志等^[81]发现 0.5~3 T 的脉冲磁场对 YG6 硬质合金的维氏硬度影响较弱,断裂韧性下降 5%~8%,试样的横向断裂强度随磁场强度的增加先升高后降低,磁场强度为 1.5 T 时断裂强度最大,相比未处理试样提高约 8%。Zhong 等^[82]研究了脉冲磁场强化 P10 硬质合金刀具,强化后的刀具切削的工件平均表面粗糙度降低 39.2%,刀具寿命提高 1.92 倍,摩擦因数降低 11.4%,位错密度提高 38%,刀具后刀面残余应力降低 51.4%。Yang 等^[83]发现脉冲磁场处理对铣削力分量的减少量不同(f_x 降低 15.90%, f_y 降低 13.29%, f_z 降低 47.6%),脉冲磁场提高刀具性能,一方面是减少黏着磨损,吸引细小磨损碎屑,另一方面增加刀具硬度,改善切削过程中的散热。

综上所述,脉冲磁场强化耗时短,强化后金属刀具硬度和强度得到提升,提高刀具使用寿命,并且强化刀具切削的工件的表面质量也得到提高,这实现了效应和质量的双提升,在金属刀具制造和材料加工领域具有重要的应用前景。

3.2 金属涂层综合性能

沉积均匀、可靠和耐磨的高质量涂层是防止机械零件表面损坏的重要手段,喷涂过程中施加脉冲磁场能有效提高涂层的硬度,黏合强度,残余压应力和致密性^[84]。

Qian 等^[85]研究了脉冲磁场强化热喷涂 WC-10Co4Cr 涂层的机理,施加脉冲磁场后涂层的断裂韧性提高 17.7%,微观结构表征表明,非晶 Co 相发生结构弛豫,涂层孔洞的湮灭促进力学性能的增强。Wang 等^[86-87]基于脉冲磁场的特性,结合超音速等离子喷涂

技术的优点,在5 T强磁场下,通过脉冲磁场辅助超音速等离子喷涂制备不同Fe含量的Ni基涂层,该方法制备的涂层结合强度、显微硬度和残余压应力均优于无磁场下制备的涂层,磁畴为片状结构,呈正弦分布,非晶/纳米晶数量多,晶粒取向增强,具有良好的摩擦学性能,涂层内的Fe相易受磁场影响,在涂层内产生混合效应,降低涂层孔隙率,使涂层强化相更加均匀,并且由于基体提供许多成核位点,进一步促进非晶/纳米晶相的产生。Zhou等^[88]使用5 T脉冲磁场辅助超音速等离子喷涂NiCrBSi-WC/Co复合涂层,脉冲磁场的应用促进熔体的流动,破坏枝晶生长,最终细化晶粒,制备的涂层完整性、力学性能和耐磨性均优于传统等离子喷涂涂层。

上述研究表明,金属涂层喷涂过程中施加脉冲磁场,改变熔融粒子的飞行状态,有效地改善飞行粒子的铺展状态,提高金属涂层的综合性能。目前脉冲磁场强化金属涂层大多集中于热喷涂涂层,对于强化其他形式制备的涂层的研究报道较少,脉冲磁场的热影响小,能作用固、液态金属,因此脉冲磁场有潜力运用在温度敏感涂层制备和非熔化式涂层制备过程,这是脉冲磁场强化金属涂层的一个重要研究方向。

3.3 金属凝固组织性能

金属凝固过程中存在宏观偏析和缩松缩孔等质量问题,常用解决技术易造成熔体污染,熔体剧烈波动^[45]。而脉冲磁场强化过程不与熔体接触,钢水波动小、能耗低,在改善中心偏析、缩孔等问题的同时提高钢铁的洁净度和组织均匀性。

Sun等^[89]在65Mn钢铸造过程中施加脉冲磁场,使得钢锭的平均抗拉强度从643.4 MPa增加到762.9 MPa。Li等^[90]在中碳钢铸造过程中施加脉冲磁场,发现脉冲磁场将钢水中的尖晶石非金属夹杂物和Mn-S夹杂物从钢锭侧壁推向中心,被排出的夹杂物在中心聚集上升到铸锭顶部,最终形成的钢锭中夹杂物含量下降。Zhang等^[91]在碳纤维增强铝基复合材料中应用脉冲磁场,脉冲磁场的施加,使得熔融基质对纤维产生周期性的挤压和冲击效应,提高熔体对纤维的润湿能力,所得复合材料的弯曲强度从112 MPa提高到203 MPa。

综上所述,金属刀具经过脉冲磁场处理后,刀具硬度提高,加工工件的表面质量改善,刀具使用寿命得到极大的提升。使用脉冲磁场辅助喷涂技术,降低涂层的孔隙率,使涂层内强化相分布更为均匀,涂层的各项性能指标得到提高。在金属凝固过程里,脉冲磁场能改善凝固组织的内部缺陷,将其内部杂质排出,提高金属凝固组织的洁净度和组织均匀性。脉冲

磁场强化是一种绿色、低能耗、安全可靠的金属强化技术,应用于金属铸造到金属产品生产的全过程,影响整个金属材料行业,是实现高质量制造和绿色制造的重要手段。

4 总结与展望

脉冲磁场强化技术作为材料性能提高的重要技术之一,拥有其他强化技术所不能达到的性能强化能力,可对材料不同相变过程进行强化,脉冲磁场的强化作用总结为:(1)调控晶粒取向,影响金属织构;(2)改变材料磁畴,释放材料内残余应力;(3)促使位错增殖,电子自由基对转变,位错从晶界扩散到晶内;(4)提高相变温度,加快第二相析出速度;(5)减小碳化物形核能垒,影响析出碳化顺序,细化碳化物;(6)振荡效应改善晶核分布,提供形核能,增加晶核数;(7)抑制树状枝晶生长,促进等轴晶的形成;(8)影响溶质运动,改善溶质分布。数值仿真再现脉冲磁场的强化过程,直观地展示金属材料的内部变化,对脉冲磁场强化机理的研究起着关键作用,为实际工业应用提供指导。脉冲磁场强化技术赋予金属材料各种优异的性能,在材料加工、涂层制备和金属铸造等领域中具有极其重要的地位。

尽管脉冲磁场强化技术已经进行大量的研究,但尚需进一步研究:(1)脉冲磁场提高材料性能是多种机制共同作用的结果,然而对脉冲磁场强化技术的多种机制间相互作用关系的基础性研究较少,需继续深入探究脉冲磁场强化机理。(2)为理解脉冲磁场强化过程,研究人员进行大量的数值模拟,然而脉冲磁场固态相变的数值模拟暂无模型能描述出材料组织成分变化。液态相变的数值模拟研究虽多,但绝大多数的研究将熔体视为不可压缩液体,忽略熔体密度变化及其导致的电流变化,脉冲磁场强化的数值模拟模型需进一步优化,从而更为准确地理解脉冲磁场强化过程。(3)脉冲磁场装置是实现强化的平台,脉冲磁场装置的研究主要集中于电源的供能能力和磁体的强度,虽然脉冲磁场的强度已经突破100 T,但受脉冲磁场装置电源体积和磁体造价的影响,高脉冲磁场强化并不能投入到实际生产中,有待学者去实现高脉冲磁场强化产业化。随着对脉冲磁场强化技术研究的深入,未来势必成为低耗、高效、清洁的强化方式,发挥出更重要的作用。

参考文献

- [1] 潘栋. 电-热-力复合场对42CrMo/T250钢微观组织及力学性能

- 的影响[D]. 长春:吉林大学,2020.
- PAN D. Effects of coupled electric-thermal-strain fields on microstructure and mechanical properties of 42CrMo/T250 steels [D]. Changchun :Jilin University, 2020.
- [2] KAPITZA P. A method of producing strong magnetic fields [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1924, 105(734): 691-710.
- [3] FURTH H P. High magnetic field research [J]. Science, 1960, 132(3424):387-393.
- [4] EDRY I, SHOIHET A, HAYUN S. On the effects of electric current intensity and pulse frequency on the solidified structure of pure aluminum subjected to pulse magneto-oscillation treatment [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116844.
- [5] QIAN C, LI K, RUI S S, et al. Magnetic induced re-dissolution and microstructure modifications on mechanical properties of Cr4Mo4V steel subjected to pulsed magnetic treatment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 881: 160471.
- [6] 李磊,朱庆丰,左玉波,等. 磁场下半连续铸造锭坯微观组织和晶体学特征研究[J]. 材料工程, 2013(12):13-18.
- LI L, ZHU Q F, ZUO Y B, et al. Research on microstructure and crystallographic characteristics of semi-continuous casting billets under magnetic field [J]. Journal of Materials Engineering, 2013(12): 13-18.
- [7] 王龙,胡德安,邹鹏远,等. 交流磁场辅助铜-钢 TIG 填丝焊接头组织和力学性能[J]. 材料工程, 2021, 49(8):104-110.
- WANG L, HU D A, ZOU P Y, et al. Microstructure and mechanical properties of copper-steel TIG fillet welds assisted by alternating magnetic field [J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(8): 104-110.
- [8] FEI H, WU H, YANG X, et al. Pulsed magnetic field treatment of cBN tools for improved cutting performances [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 69: 21-32.
- [9] WANG Z, HUANG Y, GUO W, et al. Effect of high intensity pulsed magnetic field (30 T) on microstructure and tribological properties of Ni-based coatings[J]. Materials Letters, 2023, 347: 134639.
- [10] SONG J, HE D, GUO W, et al. Effect of magnetic field type on the flight state of supersonic plasma spray particles and coating properties [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2023(6): 32.
- [11] 王宏明,李沛思,郑瑞,等. 强脉冲磁场冲击处理对铝基复合材料塑性的影响机制[J]. 物理学报, 2015, 64(8): 295-302.
- WANG H M, LI P S, ZHENG R, et al. Mechanism of high pulsed magnetic field treatment of the plasticity of aluminum matrix composites[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(8): 295-302.
- [12] 师亚洲,逯广平,高翌,等. 脉冲磁场处理对 7075 铝合金性能及组织的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(9): 159-164.
- SHI Y Z, LU G P, GAO Y, et al. Effect of pulsed magnetic field treatment on properties and microstructure of 7075 aluminum alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(9): 159-164.
- [13] 董丽丽,麻永林,宿鹏吉,等. 脉冲磁场热处理对 CGO 取向硅钢脱碳退火过程中组织和织构的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(2): 31-34.
- DONG L L, MA Y L, SU P J, et al. Effect of pulsed magnetic field heat treatment on microstructure and texture of CGO oriented silicon steel during decarburization annealing [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(2): 31-34.
- [14] 刘立华. 脉冲磁场对取向硅钢初次再结晶组织织构的影响[D]. 上海:上海大学, 2013.
- LIU L H. Effect of pulsed magnetic field on microstructure and texture of grain-oriented silicon steel during primary recrystallization process[D]. Shanghai:Shanghai University, 2013.
- [15] BAI Q, WANG J, XING S, et al. Crystal orientation and crystal structure of paramagnetic α -Al under a pulsed electromagnetic field[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-13.
- [16] 栾晓圣,梁志强,赵文祥,等. 45CrNiMoVA 钢脉冲磁处理的强化机理[J]. 金属学报, 2021, 57(10): 1272-1280.
- LUAN X S, LIANG Z Q, ZHAO W X, et al. 45CrNiMoVA steel, pulsed magnetic field, magnetic domain motion, strengthening mechanism [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(10): 1272-1280.
- [17] WANG Y, XING Z, HUANG Y, et al. Effect of pulse magnetic field treatment on the hardness of 20Cr2Ni4A steel [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 538: 168248.
- [18] SHAO Q, WANG G, WANG H, et al. Improvement in uniformity of alloy steel by pulsed magnetic field treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 799: 140143.
- [19] XU S, XIONG L, CHEN Y, et al. An analysis of key characteristics of the Frank-Read source process in FCC metals[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2016, 96: 460-476.
- [20] LI Z, LI K, QIAN C, et al. Effect of pulsed magnetic field on retained austenite of quenched 8Cr4Mo4V steel under cryogenic condition [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 5004-5015.
- [21] CHENG J, LI G, WANG H, et al. Influence of high pulsed magnetic field on the dislocations and mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ composites [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(3): 1083-1092.
- [22] 许肇栋,李克俭,蔡志鹏,等. 脉冲磁场对 TC4 钛合金微观结构的影响及其机理探究[J]. 金属学报, 2019, 55(4): 489-495.
- XU Q D, LI K J, CAI Z P, et al. Effect of pulsed magnetic field in the microstructure of TC4 titanium alloy and its mechanism [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(4): 489-495.
- [23] HU Y, ZHAO H, LI J, et al. Effect of pulsed magnetic field on the microstructure of QAl9-4 [J]. Materials, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022, 15(23): 8336.
- [24] HU Y, ZHAO H, YU X, et al. Research progress of magnetic field regulated mechanical property of solid metal materials[J]. Metals, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022, 12(11): 1988.
- [25] 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.
- WU G H, HUO T P, LI Z H, et al. Research prospects and effect of high magnetic field on martensite transformation of steel

- [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(5): 236-42.
- [26] 张秋红. 磁场作用下温度诱发马氏体相变行为研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.
- ZHANG Q H. Temperature induced martensitic transformation behavior under magnetic field[D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.
- [27] 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.
- FENG L L. Effect of alloying elements and high magnetic field on pearlite transformation and micro-structure of high carbon steel [J]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021.
- [28] 胡心彬, 杨贤镛, 钟毅, 等. 脉冲磁场对 Co-25Ni 合金马氏体相变温度的影响[J]. 湖北工学院学报, 2002(1): 23-24.
- HU X B, YANG X Y, ZHONG Y, et al. Effect of the magnetic pulse on the temperature of martensitic transformation of Co-25Ni alloys[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2002(1): 23-24.
- [29] LUDTKA G M, JARAMILLO R A, KISNER R A, et al. *In situ* evidence of enhanced transformation kinetics in a medium carbon steel due to a high magnetic field [J]. Scripta Materialia, 2004, 51(2): 171-174.
- [30] HAO X J, OHTSUKA H. Effect of high magnetic field on phase transformation temperature in Fe-C alloys[J]. Materials Transactions, 2004, 45(8): 2622-2625.
- [31] 孙中豪, 邢淑清, 程桥, 等. 脉冲磁场对 TC4 钛合金析出行为及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(9): 3336-3344.
- SUN Z H, XING S Q, CHENG Q, et al. Effect of pulsed magnetic field on precipitation behavior and mechanical properties of TC4 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(9): 3336-3344.
- [32] WU G H, HOU T P, WU K M, et al. Influence of high magnetic field on carbides and the dislocation density during tempering of high chromium-containing steel [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 479: 43-49.
- [33] HOU T P, WU K M. Alloy carbide precipitation in tempered 2.25 Cr-Mo steel under high magnetic field [J]. Acta Materialia, 2013, 61(6): 2016-2024.
- [34] ZHANG D, HOU T, LIANG X, et al. Insights into the assessment of the magnetic-field-induced precipitation behavior of alloy carbides M_7C_3 in steels [J]. Materials & Design, 2022, 221: 111023.
- [35] 李自华. 强磁场下钢中碳化物析出的热力学机制研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020.
- LI Z H. Thermodynamic analysis for the magnetic-field-induced precipitation behaviors in steels[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020.
- [36] SONG Y L, YU C, MIAO X, et al. Tribological performance improvement of bearing steel GCr15 by an alternating magnetic treatment [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2017, 30(10): 957-964.
- [37] YIN Z X, GONG Y Y, LI B, et al. Refining of pure aluminum cast structure by surface pulsed magneto-oscillation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(12): 2629-2634.
- [38] MA X, YANG Y, WANG B. Effect of pulsed magnetic field on superalloy melt [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(23): 5285-5292.
- [39] ZHAO Z, LIU Y, LIU L. Grain refinement induced by a pulsed magnetic field and synchronous solidification [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2011, 26(9): 1202-1206.
- [40] BAI Q, MA Y, XING S, et al. Nucleation and grain refinement of 7A04 aluminum alloy under a low-power electromagnetic pulse [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(2): 857-863.
- [41] LI Y J, TAO W Z, YANG Y S. Grain refinement of Al-Cu alloy in low voltage pulsed magnetic field [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(4): 903-909.
- [42] ZHANG K, LI Y, YANG Y. Influence of the low voltage pulsed magnetic field on the columnar-to-equiaxed transition during directional solidification of superalloy K4169 [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 48: 9-17.
- [43] 徐燕祎, 翟启杰. 脉冲电磁场在金属熔体中的电磁效应及其应用 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2020, 26(1): 1-20.
- XU Y Y, ZHAI Q J. Electromagnetic effect of pulsed electromagnetic field in molten metals and its application [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2020, 26(1): 1-20.
- [44] 龚永勇, 程书敏, 钟玉义, 等. 脉冲磁致振荡凝固技术 [J]. 金属学报, 2018, 54(5): 757-765.
- GONG Y Y, CHENG S M, ZHONG Y Y, et al. The solidification technology of pulsed magneto oscillation [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(5): 757-765.
- [45] 李莉娟, 王郢, 翟启杰. 脉冲磁致振荡 (PMO) 凝固均质化技术在特殊钢中的应用 [J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(10): 1018-1030.
- LI L J, WANG Y, ZHAI Q J. Application of solidification homogenizing technology of pulse magneto oscillation (PMO) in special steels [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(10): 1018-1030.
- [46] GONG Y, CHENG S, ZHONG Y, et al. Influence of electromagnetic parameters on solidification structure of pure Al in the case of identical power [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25(8): 854-861.
- [47] LI L, LIANG W, YANG L, et al. Structure refinement and homogenization of Zn-Cu alloys induced by a high-voltage pulsed magnetic field during the solidification process [J]. International Journal of Metalcasting, 2023, 17(1): 399-413.
- [48] WANG B, YANG Y S, ZHOU J, et al. Structure refinement of pure Mg under pulsed magnetic field [J]. Materials Science and Technology, 2011, 27(1): 176-179.
- [49] LI L, LIANG W, BAN C, et al. Effects of a high-voltage pulsed magnetic field on the solidification structures of biodegradable Zn-Ag alloys [J]. Materials Characterization, 2020, 163: 110274.

- [50] MANUWONG T, ZHANG W, KAZINCZI P L, et al. Solidification of Al alloys under electromagnetic pulses and characterization of the 3D microstructures using synchrotron X-ray tomography[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, 46(7): 2908-2915.
- [51] CUI Z, YAN C, LI Y, et al. Control of the non-metallic inclusions near solidification front by pulsed magnetic field[J]. *Metals*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022, 12(12): 2008.
- [52] GONG M, LIU K, HU W, et al. Microstructure of Al-Mg-Si-La alloy under pulsed magnetic field treatment during solidification[J]. *Materials Science and Technology*, Taylor & Francis, 2023, 39(12): 1452-1462.
- [53] LI Y, TENG Y, FENG X, et al. Effects of pulsed magnetic field on microsegregation of solute elements in a Ni-based single crystal superalloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, 33(1): 105-110.
- [54] XU Y Y, ZHAO J, YE C Y, et al. Distributions of electromagnetic fields and forced flow and their relevance to the grain refinement in Al-Si alloy under the application of pulsed magneto-oscillation[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2022, 35(2): 254-274.
- [55] WANG H, JIA Y, LE Q, et al. Transient numerical simulation of solidification characteristic under differential phase pulsed magnetic field[J]. *Computational Materials Science*, 2020, 172: 109261.
- [56] LI S, CUI X, LI G. Multi-physics analysis of electromagnetic forming process using an edge-based smoothed finite element method[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 134: 244-252.
- [57] HATIĆ V, MAVRIĆ B, ŠARLER B. Simulation of macrosegregation in direct-chill casting—a model based on meshless diffuse approximate method[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2020, 113: 191-203.
- [58] SODA R, TAKAGI K, OZAKI K. Numerical simulation of magnetic-aligned compaction with pulsed high magnetic field[J]. *Scripta Materialia*, 2016, 120: 41-44.
- [59] YAN S, LEI Y, HUANG S, et al. Dynamic analysis of electromagnetic compaction of Ag-Cu-Sn multivariate mixed metal powders for brazing[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2019, 60(3): 457-476.
- [60] 王岩. 脉冲磁场处理对 20Cr2Ni4A 钢组织结构和力学性能的影响机理研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- WANG Y. Effect and mechanism of pulsed magnetic field treatment on the microstructure and mechanical properties of 20Cr2Ni4steel[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.
- [61] SOFI K, HAMZAOU M, EL IDRISSI H, et al. Electromagnetic pulse generator: an analytical and numerical study of the Lorentz force in tube crimping processes[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2020, 31: 108-118.
- [62] LI F, LI H, GE X, et al. Numerical simulation of magnetic pulse radial compaction of W-Cu20 powder with a field shaper[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114(1): 219-230.
- [63] QIU L, LI Y, ABU-SIADA A, et al. Research on electromagnetic force distribution and deformation uniformity of tube electromagnetic bulging based on concave magnetic field shaper[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 63550-63558.
- [64] LIU D, LI B, GUO Z, et al. Finite element analysis on electromagnetic forming of DP780 high-strength steel sheets[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112(5): 1617-1629.
- [65] YAN Z, XIAO A, CUI X, et al. Fracture behavior of 7075-T6 aluminum alloy under electromagnetic forming and traditional stamping[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2021, 21(3): 134.
- [66] SODA R, TANAKA K, TAKAGI K, et al. Simulation-aided development of magnetic-aligned compaction process with pulsed magnetic field[J]. *Powder Technology*, 2018, 329: 364-370.
- [67] DUAN W, BAO J, LIU W, et al. Simulation on DC casting of magnesium alloy under out-of-phase pulsed magnetic field with different coil connection strategies[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 162: 120353.
- [68] SHABUROVA N, KRYMSKY V, MOGHADDAM A O. Theory and practice of using pulsed electromagnetic processing of metal melts[J]. *Materials*, 2022, 15(3): 1235.
- [69] HATIĆ V, MAVRIĆ B, KOŠNIK N, et al. Simulation of direct chill casting under the influence of a low-frequency electromagnetic field[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 54: 170-188.
- [70] CHEN G J, ZHANG Y J, YANG Y S. Modelling the unsteady melt flow under a pulsed magnetic field[J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(12): 124703.
- [71] CHEN Q, SHEN H. Numerical study on solidification characteristics under pulsed magnetic field[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 120: 997-1008.
- [72] JIA Y, CHEN X, LE Q, et al. Macro-physical field of large diameter magnesium alloy billet electromagnetic direct-chill casting: a comparative study[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8(3): 716-730.
- [73] JIA Y, WANG H, LE Q. Transient coupling simulation of multi-physical field during pulse electromagnetic direct-chill casting of AZ80 magnesium alloy[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 143: 118524.
- [74] 滕跃飞, 李应举, 冯小辉, 等. 脉冲磁场作用下矩形截面宽厚比对 K4169 高温合金晶粒细化的影响[J]. *金属学报*, 2015, 51(7): 844-852.
- TENG Y F, LI Y J, FENG X H, et al. Effect of rectangle aspect on grain refinement of superalloy K4169 under pulsed magnetic field[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(7): 844-852.
- [75] ZHANG K L, LI Y, YANG Y. Simulation of the influence of pulsed magnetic field on the superalloy melt with the solid-liquid interface in directional solidification[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33(10): 1442-1454.
- [76] DUAN W, SU W, BAO J, et al. Numerical study on transient

- melt oscillation and solidification characteristic during magnesium alloy direct chill casting under out-of-phase pulsed magnetic field [J]. *Materials Today Communications*, 2022, 31: 103441.
- [77] DUAN W, YANG Y, LIU W, et al. Modelling the fluid flow, solidification and segregation behavior in electromagnetic DC casting of magnesium alloy [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2022, 115: 102460.
- [78] QU H, ZHANG L, CHEN Z, et al. Pulsed magnetic field treatment of TiAlSiN-coated milling tools for improved cutting performances [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(9): 6723-6734.
- [79] 马利平, 梁志强, 王西彬, 等. 脉冲磁化处理对M42高速钢刀具组织和力学性能的影响[J]. *金属学报*, 2015, 51(3): 307-314.
MA L P, LIANG Z Q, WANG X B, et al. Influence of pulsed magnetic treatment on microstructures and mechanical properties of M42 high speed steel tool [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(3): 307-314.
- [80] 魏灿, 杨刚, 刘剑, 等. 脉冲电磁场处理工艺对YG6硬质合金铣削性能的强化作用[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(22): 27-30.
WEI C, YANG G, LIU J, et al. Strengthening effect of pulse electromagnetic field treatment process in milling machinability of YG6 cemented carbide [J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(22): 27-30.
- [81] 廖承志, 杨屹, 杨刚, 等. 脉冲磁场对YG6硬质合金力学性能及耐磨性的影响[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(12): 57-61.
LIAO C Z, YANG Y, YANG G, et al. Effects of pulsed magnetic field on mechanical properties and wear resistance of YG6 cemented carbides [J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(12): 57-61.
- [82] ZHONG F, WANG J, ZHANG Q, et al. Residual stress reductions of carbide cutting tools through applying pulsed magnetic field and coupled electromagnetic field mechanism analysis and comparison study [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(7): 4757-4775.
- [83] YANG Y, YANG Y, LI Q, et al. An eco-friendly pulsed magnetic field treatment on cemented carbide (WC-12Co) for enhanced milling performance [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 340: 130748.
- [84] WANG Z, HUANG Y, ZHANG L, et al. Effects of pulsed magnetic field on the flight and impact of supersonic plasma spraying particles and the properties of coatings [J]. *Materials & Design*, 2022, 223: 111127.
- [85] QIAN C, LIU Q, XIONG X, et al. Mechanism for magnetic field induced structural relaxation and accompanying fracture toughness improvement of the thermal spraying coating [J]. *Materials & Design*, 2022, 223: 111113.
- [86] WANG Z, HUANG Y, ZHANG L, et al. Effect of a pulsed magnetic field on the tribological properties of amorphous/nano-crystalline composite coatings by supersonic plasma spraying [J]. *Applied Surface Science*, 2022, 606: 154853.
- [87] WANG Z, HUANG Y, ZHOU J, et al. Effect of Fe content on the tribological properties of Ni60 coatings applied by pulsed magnetic field assisted supersonic plasma spraying [J]. *Materials Characterization*, 2022, 185: 111771.
- [88] ZHOU J, GUO W, HE D, et al. Study on preparation and wear resistance of NiCrBSi-WC/Co composite coatings by pulsed magnetic field assisted supersonic plasma spraying [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 448: 128897.
- [89] SUN J, SHENG C, WANG D, et al. Influence of pulsed magneto-oscillation on microstructure and mechanical property of rectangular 65Mn steel ingot [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2018, 25(8): 862-866.
- [90] LI H, LIU Z, LI R, et al. Distribution of nonmetallic inclusions in molten steel under hot-top pulsed magneto-oscillation treatment [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2018, 25(8): 867-876.
- [91] ZHANG J, JIE J, LU Y, et al. Fabrication of carbon fibers reinforced Al-matrix composites in pulsed magnetic field [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 11: 197-210.
-
- 基金项目:**国家自然科学基金项目(52275227);装备预研教育部联合基金青年项目(809B032101)
- 收稿日期:**2023-10-08;**修订日期:**2024-12-10
- 通讯作者:**邢志国(1979—),男,助理研究员,博士,研究方向为材料科学与工程,联系地址:北京市丰台区杜家坎21号(100072),E-mail: xingzg2011@163.com
- (本文责编:张宝玲)