

# 磁处理降低钢铁材料中残余应力的研究现状及展望

Recent Development of Reduction of Residual Stress in Steel by Magnetic Treatment

林 健, 赵海燕, 蔡志鹏, 鹿安理

(清华大学机械工程系, 北京 100084)

LIN Jian, ZHAO Haiyan, CAI Zhipeng, LU Anli

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**摘要:** 磁处理是一种降低钢铁材料中残余应力的新方法, 具有高效、灵活、效果明显而又无不利组织转变等优点, 有望能得到广泛应用。综述了近年来磁处理降低残余应力方法的研究现状, 并对国内外的最新研究成果进行了简要的介绍与评述, 在此基础上, 对磁处理方法的发展进行了展望。

**关键词:** 磁处理; 残余应力; 焊接; 磁致振动

中图分类号: TG441.8 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2005)03-0055-05

**Abstract:** Magnetic treatment is a novel method to relieve residual stress in steel, which is highly effective and power saving. In addition the method would not bring unexpected material structures. Therefore this method has a potential to be used more widely. The development of the method in recent years was introduced and discussed in details, and an expectation for this method was given.

**Key words:** magnetic treatment; residual stress; welding; magneto vibration

材料加工过程中产生的残余应力对其疲劳性能、抗应力腐蚀能力、尺寸稳定性等都有着十分重要的影响<sup>[1,2]</sup>。如工件中的三向残余拉应力状态使材料的塑性变形困难, 有可能会在不发生塑性变形的情形下直接发生脆断; 残余应力在工件存放和使用过程中的释放则会导致新的变形, 从而使得工件的外形尺寸发生改变, 严重时甚至会造成工件尺寸的不合格, 导致直接报废。因此, 消除和调整工件中的残余应力有助于保证产品质量, 充分发挥材料的潜力。

控制或消除工件中的残余应力, 一方面可以在材料加工工艺设计及加工过程中采取必要的措施, 例如焊接时, 选择合理的焊接结构及焊接顺序, 或者采用预拉伸以及在适当的部位进行预热等方法<sup>[3]</sup>; 另一方面也可以采用各种方法对已经存在的残余应力进行调整, 进而使之符合使用要求<sup>[1]</sup>。目前使用较多的方法为消除应力热处理。虽然热处理可以达到充分消除残余应力的目的, 但是在对工件进行热处理时, 有时候会引起不利的组织转变, 影响其力学性能, 另外, 热处理方法在处理大型应力构件时, 具有耗能大、运行周期长等缺点, 提高了生产的成本, 因此寻找一种操作简捷、效果明显、稳定而又无不良附加影响的非热处理型消除应力方法具有重大的现实意义。

磁处理是一种通过动态磁场与钢铁材料相互作用来改善工件中残余应力分布的新方法<sup>[4]</sup>。钢铁材料在较弱的外磁场作用下, 内部会产生正的磁致伸缩效应(即沿磁场方向材料伸长), 随着外磁场的增大, 钢铁材料内部的磁致伸缩由正变负(即材料在磁化方向上缩短), 当材料被磁化至饱和时, 磁致伸缩也相应的到达负的饱和值<sup>[5]</sup>。因此, 钢铁材料在动态磁场的作用下, 内部会发生正负交替的磁致振动, 而磁致振动与材料中局部分布不均匀的残余应力共同作用, 则有可能推动该区域内的位错产生滑移, 产生塑性应变, 从而导致应力松弛<sup>[6]</sup>。由于磁处理主要通过电磁能量来消除残余应力, 在处理大型应力构件时, 磁场可采用分步耦合的形式与工件中的残余应力相互作用, 因此与热处理相比具有操作简捷、高效、节能等特点。另外, 由于处理过程中无升温及降温过程, 不会引发不利的组织转变, 在某些场合下(如刀具的消除应力处理、大型焊接结构件的消除应力等), 有望取代热处理方法而达到消除残余应力的目的。

## 1 磁处理降低残余应力的研究现状

磁处理技术从起步到发展成熟, 乃至于工业应用,

需要解决以下三个问题:

(1) 磁处理方法的效果研究: 即要回答磁处理能否降低残余应力; 应力的降低幅度能否达到实际应用要求等问题。这是磁处理技术得以发展的基础, 也是该方法得以应用的源动力。

(2) 磁处理方法的宏观规律研究: 即要回答何种材料在怎样的应力状态下, 采用什么样磁场处理将会达到怎样的应力降低效果及磁处理的应用范围、适用工况等问题。这是磁处理技术得以应用及推广的必要条件。

(3) 磁处理方法的机理研究: 即要回答磁场和应力场的耦合过程; 驱动位错运动的动力来源等问题。这一规律的揭示将有助于加深对磁场和力场相互作用规律的了解, 认清两者相互作用的本质。

目前, 国内外已开展的研究工作主要还是围绕着磁处理的效果研究进行的, 只有少量的实验研究与磁处理的规律研究相关, 而机理研究的报道则更少, 只有一些与效果研究相关的实验现象解释。

### 1.1 磁处理降低残余应力的效果研究

磁处理降低残余应力的研究开始于 20 世纪 90 年代初, 当时, 美国明尼苏达州的 Innovex 公司研发了一种脉冲磁处理装置, 称为 FluxaTron U102 型切削工具处理系统<sup>[7]</sup>, 主要通过磁处理松弛高速钢或碳素工具钢刀具中的残余应力来达到提高工具使用寿命的目的。该装置的核心部件为一线圈, 工作时将待处理的工具置于线圈中, 由编程输出的脉冲磁处理电源对线圈加载间歇脉冲励磁电流, 每件工具的处理时间为 42 s。根据 Innovex 公司的实验数据, 在某些工况下, 工具处理后寿命提高量最高可达 175% (一般情况下, 寿命提高量为 20% ~ 50%)。进一步研究表明, 磁处理的效果与工具的失效形式密切相关: 随着高速钢钻头转速和进给量的增大, 钻头的失效形式逐渐由磨损失效向由塑性变形引起的失效转变, 此时, 磁处理的效果逐渐变差, 甚至出现了负效应, 即工具使用寿命在处理后有少量的降低<sup>[7]</sup>。

在此基础上, Omar Bataineh 等人对脉冲磁处理影响高速钢钻头的耐磨性进行了更为系统的研究<sup>[8]</sup>。实验结果表明: (1) 不同的磁处理形式、次数对钻头的耐磨性能有不同的影响; (2) 对钻头及被加工材料都进行磁处理时, 钻头的耐磨性能最好; (3) 新钻头磁处理后的磨损量下降更大。

对于磁处理影响工具使用寿命的效应, Robert F Hochman 发现磁处理可对钢铁材料的表面微观结构产生影响<sup>[9]</sup>。而 Roman Dubrovsky 博士在研究中发现, 磁处理后, 工具在服役过程中, 摩擦系数降低, 由此摩擦所产生的热量也相应减少。这些都有可能是磁处

理提高工具使用寿命的原因。而 Innovex 公司的研究人员认为更为直接的原因则有可能是工具在磁处理过程中释放了一定的内应力, 从而改善了材料的性能<sup>[7]</sup>。

Hong Chang 等采用涡流信号检测了材料在脉冲磁处理前后残余应力的变化情况。实验结果表明: 脉冲磁处理后, 材料中与残余应力状态相关的涡流信号发生了显著的变化, 残余应力有明显降低的迹象<sup>[10]</sup>。

Innovex 公司的研究使脉冲磁处理提高工具使用寿命获得了一定应用, 推动了磁处理技术的发展, 但是由于工件中残余应力的状态一般较为复杂, 测量较困难, 因此该公司的研究并未提供任何定量化的残余应力相关数据, 对磁处理产生作用的原因也只是做出了一些初步的解释, 其作用机理尚无定论。

磁处理除了能提高工具寿命, 降低残余应力上有效果之外, 磁处理在提高材料疲劳性能、耐腐蚀性能、改变材料硬化状态等方面也有一定的效果。

美国的 Yusef Fahmy 等研究了脉冲磁处理对碳素钢疲劳性能的影响<sup>[11]</sup>。根据实验结果, 研究者认为, 虽然实验中所使用的试样数目有限, 但是磁处理后, 试样的疲劳寿命有了明显的提高, 从概率上来看, 磁处理很有可能改善了碳钢的疲劳性能。

在国内, 西北工业大学吕宝桐等<sup>[12]</sup>进行了磁处理修复碳素钢疲劳裂纹的研究。从他们的实验数据可以看到, 在一定的磁场作用下, 碳素钢的疲劳性能得到了改善, 疲劳寿命有所提高。但是对于磁处理改善疲劳性能的机理问题, 文献[11], [12]中都未涉及。

印度学者 S. N. Prasad 等<sup>[13]</sup>研究了冷轧钢硬度在脉冲磁处理后的变化情况。实验结果表明, 冷轧钢的硬度在磁处理后发生了不同程度的下降, 其变形量越大, 脉冲磁处理对其软化的效果越明显。研究者分析认为冷轧钢的软化主要是由于脉冲磁场在试样内部所产生的磁致伸缩使弱质点钉扎的位错激活, 从而导致位错的重新分布, 材料的形变强化效果受到削弱而引起的。另外, 由于材料内部杂质原子和空位在磁场中扩散的加快, 有利于位错攀移的进行, 也会导致材料塑性变形抗力的降低<sup>[13]</sup>。

俄罗斯科学家对受空穴腐蚀的轮船用水轮机叶片进行磁处理<sup>[14]</sup>, 然后再进行试用实验, 结果表明经过磁处理叶片的使用寿命为原来的 1.5~2 倍。另外, 俄罗斯人还研制了一种用于对切割和成形工具进行磁处理硬化的设备<sup>[15]</sup>。对比实验表明, 磁处理后, 工具的耐磨能力可提高 1.8~2 倍。

以上的这些实验都是与磁处理降低残余应力相关的探索性研究, 这些实验从不同的侧面证实了磁处理对材料力学性能与力学状态的影响, 丰富了磁处理技

术的潜在应用领域。然而这些实验研究仍然处于效果验证阶段,实验数据匮乏,磁处理所产生的效果可能与残余应力的降低有关,也可能无关,都还需要进一步的量化与系统化的实验研究及理论分析。

另外,对于磁处理降低残余应力的效果,也有不同的观点。C. C. H. Lo 等对经过磁处理的试样和去应力热处理的试样进行了对比 X 射线衍射测应力实验,发现磁处理的应力松弛效果在 X 射线衍射结果上表现得并不明显<sup>[16]</sup>。这也从一个侧面反映了磁处理相对于去应力热处理的效果还有较大的差距。

由以上的实验研究可以看到,磁场处理可以在一定程度上影响材料中的残余应力状态,但是由于各个实验在磁处理过程中所采用处理参数各不相同,检验手段也相差较大,缺乏量化的残余应力测量数据,因此,磁处理的效果不好直接进行比较,有些实验还得出相反的结论,磁处理的作用规律还不明了。

## 1.2 磁处理降低残余应力的规律研究

磁处理降低残余应力效果的好坏要受到以下几个因素的影响,如式 1 所示:

$$F = f(\quad, \quad, \quad, t) \quad (1)$$

其中:  $F$  为应力下降的效果,包括应力下降的幅度及范围等; 为作用磁场的形式,包括磁场的波形、幅度、频率等; 为材料局部区域内的残余应力状态,包括应力的方向及大小等; 为材料中阻碍应力释放的特征参数;  $t$  为磁场作用的有效时间。研究磁处理降低残余应力的宏观规律即是要研究应力的降低效果  $F$  与  $\quad, \quad, \quad, t$  之间的关系,也即是函数  $f$  的具体形式。

1998 年,清华大学磁处理研究小组首次对磁处理降低碳素钢残余应力的规律进行了量化研究<sup>[17]</sup>。研究者采用盲孔法对磁处理前后焊接试样中的残余应力进行了测量,比较各种磁处理形式降低残余应力的效果。实验结果表明,磁处理后,垂直焊缝截面上沿焊缝方向和垂直焊缝方向的残余应力都发生了显著的下降,下降的幅度在 50 MPa 左右<sup>[18, 19]</sup>。

研究者还研究了其它磁处理波形(如稳恒励磁电流、低频间歇波励磁电流波形、工频正弦励磁电流波形等)消除残余应力的效果。实验结果表明:(1)稳恒磁场处理对工件中的残余应力分布几乎没有影响<sup>[17]</sup>。(2)动态磁场处理可以显著的降低工件中的残余应力,其中又以低频间歇波励磁电流的处理效果最好,应力的最大下降幅度可达原始应力水平的 40%<sup>[18, 19]</sup>。(3)低频间歇波磁场的频率较低时,磁处理的效果较好<sup>[20]</sup>。实验结果表明,动态磁场的频率为 5 Hz 时,应力下降的效果最好。(4)应力曲线在磁处理作用下呈

整体下降趋势,而不仅是应力峰值的降低<sup>[21]</sup>。

研究者分析认为,残余应力的降低有可能是由于动态磁场引起材料内部的磁致振动与材料中局部分布不均匀的应力相互作用导致的微区塑性变形累积所引起的,钢铁材料中的磁致振动有可能是导致应力分布发生改变的重要因素<sup>[22, 23]</sup>。为了进一步揭示磁处理降低残余应力的微观机理,研究者对磁处理前后试样中的位错分布进行了透射电镜观察,实验结果表明:磁处理后,应力试样中的位错分布趋于均匀化,而位错的整体密度基本上保持不变<sup>[23]</sup>。因此,磁处理有可能是通过试样内部的磁致振动改变了位错的分布形态,从而降低了残余应力。

由以上的实验研究可以看到,磁处理降低残余应力的规律研究首次给出了残余应力在磁处理前后的量化结果,并初步探讨了磁脉冲波形对应力降低效果的影响,获得了磁处理降低残余应力的肯定结果及应力降低的微观证据,为磁处理的研究提供了丰富的实验数据。但是,由于受到实验手段的限制,在磁处理过程参数(如磁脉冲的幅值、频率、占空比及处理时间等)、材料中的原始应力水平、待处理材料本身的特性对处理效果的影响研究上,尚处于初步尝试阶段,而且对于应力降低的研究也还仅限在实验件上进行,若要阐明磁处理作用的规律,使得磁处理降应力技术能在实际工程构件上获得一定的应用,还需要进行大量、系统的量化研究工作。

## 1.3 磁处理降低残余应力的机理研究

磁处理降低残余应力的机理研究目前开展的很少,只有一些材料在磁场中的力学性能研究与此相关,包括磁致塑性(magneto plasticity)研究,材料在磁场中的疲劳性能研究等。

### 1.3.1 磁致塑性

1965 年, Zagoruiko 指出,脉冲磁场可以影响 NaCl 晶体中位错的活力<sup>[24]</sup>。随后, Al shifts 等研究发现,在外磁场作用下,NaCl 晶体中的位错可以脱离材料中杂质的钉扎,在材料中存在长程应力作用时,产生滑移,也即是,材料在外磁场的作用下,塑性得到了一定程度的提高<sup>[25]</sup>。随后,位错在磁场作用下脱钉的现象也在金属中被发现。在磁场作用下,金属晶体的塑性都得到了提高<sup>[24]</sup>。另外,俄罗斯学者还报道了磁场可以促进铁蠕变和拉伸变形进行的实验结果<sup>[26]</sup>。

目前,对于磁致塑性,大多数学者认为,磁场可以改变位错与钉扎物之间的电子组态,导致位错与钉扎物之间的结合状态从稳定的低能态向不稳定的高能态过渡,从而使位错更容易脱钉,活动能力增强<sup>[24]</sup>。而当材料中存在内应力时,由于外磁场的作用,内应力与

磁致伸缩共同作用的结果有可能会使局部区域内的位错开动,产生微区塑性变形,从而使残余应力得到一定程度的松弛<sup>[21-23]</sup>。

这一研究为磁处理方法的发展提供了一定的理论基础,但是,还仅是观察到了磁致塑性的现象,缺乏定量化的研究成果,及对其规律和机理的系统阐述。

### 1.3.2 低碳钢在磁场中的疲劳性能

印度学者 M. S. C. Bose<sup>[27]</sup>研究了低碳钢在饱和磁场中的疲劳性能。实验结果表明:饱和磁场中,低碳钢 S-N 曲线的膝点向着高应力和较少循环数的方向移动,这意味着在饱和磁场中,低碳钢的疲劳极限有所提高,而且到达稳定状态所需的应力循环数减少。

Bose<sup>[5]</sup>认为:低碳钢在饱和磁场中的疲劳行为要受到两个因素的影响,一个是材料在磁场中吸震性能的降低:疲劳实验中,材料中磁畴的畴壁在外力的驱动下所产生的移动可以吸收一部分的振动能量,然而在饱和磁场中,畴壁移动已充分进行,不再能吸收那部分能量,因此那部分 额外 的能量将会用于产生疲劳裂纹或者加速疲劳裂纹的扩展,因此,吸震性能的降低将会降低材料的疲劳寿命。另一个是应变松弛(strain aging)的加速:应变松弛是一种扩散现象,磁场的存在有助于材料中扩散的进行,从而起到松弛峰值应力,减缓疲劳裂纹萌生的作用。此时磁场是有助于提高材料的疲劳寿命的<sup>[27]</sup>。

因此,原本含有残余应力的低碳钢在动态磁场的作用下,磁致伸缩可能扮演交变应力的角色,与磁场共同作用从而使得材料中的残余应力得到了一定程度的松弛。这里面有杂质原子与空穴在磁场中扩散加速的贡献。钢铁材料中,畴壁原子层中多包含杂质原子或空位,以降低整个体系的能量<sup>[5]</sup>。因此,当材料在外磁场作用下发生畴壁磁化时,畴壁发生移动,从而使得杂质原子或空位从畴壁中脱离出来而处于较高的能量状态,此时的扩散将会变得更为容易<sup>[28]</sup>。

另外,还有研究表明,碳钢在磁场中的磨损率呈下降趋势<sup>[29]</sup>,这可能与磁处理提高碳钢的耐磨损能力有关。

以上这些观点从不同的侧面反映了磁处理降低残余应力的可能机理,但是由于系统的实验数据相对比较匮乏,对于磁处理作用的机理目前还无法形成统一的认识,对于磁场与力场之间相互作用的本质还未有涉及,期待着进一步定量化的实验探索和深入的理论分析。

## 2 总结与展望

从目前的研究报道来看,磁处理降低残余应力的研究尚处于初步阶段,前期的研究工作已经取得了磁处理

降低残余应力的肯定结果,然而量化、系统化的实验数据还相对比较匮乏,磁处理降低应力的规律尚未明了,机理研究也还只是停留在对已有个别实验现象的解释上,微观位错运动与宏观应力释放之间的关系尚未澄清,对已观察到的实验现象缺乏统一的认识。另外,目前磁处理方法仍然停留在实验室研究阶段,磁处理技术在工程构件消除应力处理上的应用还未有报道。

因此,磁处理降应力方法的发展,应在磁处理方法已取得肯定效果的基础上,朝着量化、系统化实验研究的方向深入发展,在丰富的实验数据基础上,获得能够稳定降应力的处理条件,并在此基础上,对磁处理的过程参数进行优化及设计适用于工程构件处理的磁化器,从而使得磁处理方法在工程结构的降低应力处理中能够获得一定的应用。不得不指出的是,由于磁处理方法具有局部处理的特点,使得该方法在操作简捷、方便的同时,在实际工程构件的降低应力处理中会遇到自身的困难,如在处理大型应力构件时,需要确定工程构件的高应力区(如焊缝金属附近的局部区域),并将强磁场有效的耦合作用在高应力区上,以达到局部处理消除残余应力的目的,然而目前关于实际构件中高应力区分布的如何确定及强磁场的如何耦合等问题在技术上都还是十分困难的,这都是磁处理方法在向应用发展时所必须要面对的问题,这也说明了磁处理技术目前还尚未成熟。另外,磁处理作用机理的研究应向着微观观察与宏观效果之间联系的方向发展,一方面要寻找新的实验手段对磁处理所引起的材料内部微观结构的变化进行观察分析,另一方面需要阐明材料内部微观结构的变化与磁处理所取得的宏观效果之间的联系,这将有助于推动磁处理方法在工程实际中的应用,深入了解磁场与力场之间的相互作用规律。

磁处理降低应力方法虽然目前还尚未成熟,其未来的发展还将面临着各种困难,但是由于其具有操作简捷、灵活、高效而又无不良附加影响等优点,该方法仍有望在实际工程构件的消除应力处理中获得一定的应用。

### 参考文献

- [1] 张定铨,何家文.材料中残余应力的X射线衍射分析和作用[M].西安:西安交通大学出版社,1999.
- [2] D 拉达伊.焊接热效应[M].熊第京,郑朝云,等译.北京:机械工业出版社,1997.
- [3] PETUSHKOV V G. Effect of some factors on the effectiveness of residual stress relieving by applying the external load[J]. Avtomaticheskaya Svarka, 1992, (6): 51.
- [4] 鹿安理,唐非,罗湘军,等.一种降低残余应力的新方法——脉冲磁处理法[J].中国机械工程,1998,9(4):40-42.
- [5] 近角聪信.铁磁性物理[M].葛世慧译.兰州:兰州大学出版社,

- 2002.
- [6] 罗湘军. 用磁场消除焊接结构中残余应力的研究[D]. 北京: 清华大学机械工程系, 1995.
- [7] MILLER P C. Look at magnetic treatment of tools and wear surface[J]. Tooling & Production, 1990, 55(12): 100– 103.
- [8] BATAINEH O, KLAMECKI B, KOEPKE B G. Effect of pulsed magnetic treatment on drill wear[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 134(2): 190– 196.
- [9] HOCHMAN R F, TSELESIN N, DRITS V. Magnetic fields: fertile ground for materials processing[J]. Advance Materials & Processes, 1988, (8): 36– 41.
- [10] CHANG H, SCHOENIG F C, SOULES A J. Eddy current offers a powerful tool for investigating residual stress and other metallurgical properties[J]. Materials Evaluation, 1999, 57(12): 1257– 1260.
- [11] FAHMY Y, HARE T, TOOKE R, et al. Effects of a pulsed magnetic treatment on the fatigue of low carbon steel[J]. Scripta Materialia, 1998, 38(9): 1355– 1358.
- [12] LU B T, QIAO S R, SUN X Y. Exploration on repairing fatigue damage of steel specimens with magnetic treatment[J]. Scripta Materialia, 1999, 40(7): 767– 771.
- [13] PRASAD S N, SINGH P N, SINGH V. Influence of pulsating magnetic field on softening behavior of cold rolled AISI4340 steel at room temperature[J]. Scripta Materialia, 1996, 34(12): 1857– 1860.
- [14] SNEGOVSKIJ F D, UVAROV V A. The influence of magnetic treatment of screw propeller on the cavitation wear[J]. Trenie I Iznos, 1991, 3: 535– 539.
- [15] NIKIFOROV Y P, KRASICHKOV A A, LOBACHKOV E A. Unit for magnetic hardening of cutting and forming tools[J]. Soviet Engineering Research, 1989, 9(9): 116– 117.
- [16] LO C C H, JILES D C, MINA M, et al. Evaluation of the effects of pulsed magnetic field treatment as a nondestructive treatment for magnetic materials[J]. Materials Evaluation, 2002, 60(8): 971– 975.
- [17] 唐非. 脉冲磁处理降低钢材内部残余应力的研究[D]. 北京: 清华大学机械工程系, 1999.
- [18] LU A L, TANG F, LUO X J, et al. Research on residual stress reduction by strong pulse magnetic treatment[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 74: 259– 262.
- [19] TANG F, LU A L, MEI J F, et al. Research on residual stress reduction by a low frequency alternating magnetic field[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 74: 255– 258.
- [20] 鹿安理, 唐非, 梅俊峰, 等. 不同频率的交变磁场处理降低焊接残余应力的研究[J]. 航空工艺技术, 1998, (4): 26– 27.
- [21] 吴更生, 赵海燕, 鹿安理, 等. 低频交变磁处理降低钢材内应力的微观机理[J]. 焊接学报, 2002, 23(1): 9– 11.
- [22] 唐非, 鹿安理, 方慧珍, 等. 脉冲磁场处理降低钢中拘束应力的物理机制研究[J]. 航空工艺技术, 1998, (5): 9– 11.
- [23] 吴更生, 赵海燕, 鹿安理, 等. 磁处理降低钢中残余应力的微观机理模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(2): 147– 150.
- [24] MOLOTSKII M I. Theoretical basis for electro- and magnetoplasticity[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 287: 248– 258.
- [25] AL SHITS V I, DARINSKAYA E V, PERECALINA T M, et al. Investigation of the shock deformations kinetics and dislocation dynamics upon pulse loading of CsI, NaCl and LiF crystals[J]. Physica Status Solidi (A) Applied Research, 1985, 91(2): 533– 542.
- [26] MOLOTSKII M, KRIS R E, FLEUROV V. Internal friction of dislocations a magnetic field[J]. Physical Review B, 1995, 51(18): 12531– 12536.
- [27] BOSE M S C. Effect of saturated magnetic field on fatigue life of carbon steel. Phys[J]. Stat Sol (a), 1984, 86: 649– 654.
- [28] HOCHMAN R F. Surface modification[J]. Advanced Materials & Processes, 1995, 1: 29– 30.
- [28] PAULM IER D. Steel surface modifications in magnetized sliding contact[J]. Surface and Coating Technology, 1995, 76– 77: 583– 588.

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3042010)

收稿日期: 2004-06-09; 修订日期: 2004-08-27

作者简介: 林健(1979–), 男, 在读博士, 助教, 现从事脉冲磁处理改善材料力学性能的研究, 联系地址: 北京清华大学机械工程系(100084)。

(上接第 21 页)

## 参考文献

- [1] KUO JER-HAUR, HSU FENG-LIN, HWANG WENG-SING. Development of an interactive simulation system for the determination of the pressure-time relationship during the filling in a low pressure casting process[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2001, 2, 131– 145.
- [2] 薛寒松, 李华基, 王勇勤. 薄壁件差压铸造的充型特点及影响因素[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(10): 20– 22.
- [3] NIYAMA EISUKE, ANZAI KOICHI, FUNAKUBO TATSUYA, et al. Some basic research for thin-wall casting technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63: 779– 783.
- [4] 曾建民, 周尧和. 薄壁铸件及其反重力成型技术[J]. 航空精密制造技术, 1999, 37(3): 23– 24.
- [5] 张永谋. 大型薄壁舱体铸件的顺序结晶铸造[J]. 航空精密制造技术, 1995, 31(6): 33– 35.
- [6] 王文清, 李魁盛. 铸造工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- 收稿日期: 2004-07-09; 修订日期: 2004-09-02
- 作者简介: 王宏伟(1968–), 男, 博士, 主要从事铝合金低压铸造、钛基复合材料研究, 联系地址: 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院(150001)。