

引用格式: 丁雪, 刘剑, 吴明霞, 等. 脉冲磁场处理对单质 Ni 的性能及微观组织的影响[J]. 中国材料进展, 2024, 43(6): 558-564.
DING X, LIU J, WU M X, *et al.* The Effect of Pulsed Magnetic Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of Ni[J]. Materials China, 2024, 43(6): 558-564.

脉冲磁场处理对单质 Ni 的性能及微观组织的影响

丁雪¹, 刘剑¹, 吴明霞¹, 陈朝浪¹, 余林涛²

(1. 四川大学机械工程学院, 四川 成都 610065)

(2. 睿恩光电有限责任公司, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 脉冲磁场处理(PMT)是一种便捷高效、绿色环保的后处理方法, 可利用脉冲磁场改善金属材料性能。为了研究 PMT 对纯镍(Ni)力学性能和微观组织的影响, 揭示 PMT 对铁磁性材料的潜在影响机制, 采用不同磁场强度 PMT 对纯 Ni 样品进行处理, 并对处理前后纯 Ni 样品力学性能、微观组织进行分析。实验结果表明, 经强度为 0.5~1.5 T 的 PMT 后, 样品硬度降低, 当脉冲磁场强度为 1.5 T 时, 强度较未处理样品最小下降 0.36%; 对于拉伸性能而言, 当磁脉冲强度为 1.5 T 时, 抗拉强度和延伸率同时得到最大提升, 较未处理样品提升 4.19% 和 1.65%, 而当磁脉冲强度为 0.5 和 1.0 T 时样品无明显变化。对样品微观组织进行表征, 观察到样品中的缺陷分布改变, 出现晶界处位错向晶胞内移动, 形成小位错的聚集和不完整的位错胞壁; PMT 对微观缺陷的调控改善了样品的拉伸性能。

关键词: 铁磁材料; 脉冲磁场处理; 硬度; 拉伸性能; 缺陷分布

中图分类号: TG146.1⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)06-0558-07

The Effect of Pulsed Magnetic Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of Ni

DING Xue¹, LIU Jian¹, WU Mingxia¹, CHEN Chaolang¹, YU Lintao²

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(2. Ruien OE Technology Inc., Panzhihua 617000, China)

Abstract: Pulsed magnetic treatment (PMT) is a convenient, efficient and green post-treatment method, which utilizes magnetic fields to improve the properties of metal materials. In order to study the effect of PMT on the mechanical properties and microstructure of pure nickel (Ni), and to reveal the potential influence mechanism of PMT on ferromagnetic materials, the pure Ni samples were treated with pulsed magnetic fields at different magnetic intensity, and the mechanical properties and microstructure were analyzed before and after the treatment. The experimental results show that the hardness of Ni samples was decreased by PMT of 0.5-1.5 T, with a minimum decrease of 0.36% at a magnetic intensity of 1.5 T. For tensile properties, the maximum increase in tensile strength and elongation was obtained at a magnetic pulse strength of 1.5 T, with increases of 4.19% and 1.65% compared to the untreated one, and with little change at 0.5 and 1.0 T. Changes in the distribution of defects in Ni samples were observed in the microscopic characterization. The dislocations at the grain boundaries moved into the grain cells, forming the aggregation of small dislocations and incomplete dislocation cell walls, and the change of the microscopic defects improved the tensile properties of the pure Ni samples.

Key words: ferromagnetic material; pulsed magnetic treatment; hardness; tensile property; defects distribution

收稿日期: 2023-11-20 修回日期: 2024-01-30

基金项目: 四川省重点研发计划项目(2022YFG0076-LH); 四川大学-遂宁市校市合作专项(2022CDSN-12); 四川大学-泸州市战略合作项目(2020CDLZ-2); 四川大学-达州市校市合作专项(2021CDDZ-10)

第一作者: 丁雪, 女, 2000 年生, 硕士研究生

通讯作者: 刘剑, 男, 1984 年生, 教授, 博士生导师,

Email: liujian@scu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202311019

1 前言

金属 Ni 位于第Ⅷ族, 属于铁系元素, 具有良好的铁磁性, 同时还具有较高的延展性和较好的强度, 并且在高温高浓度苛性碱条件下表现出优秀的耐腐蚀性, 在碱工业领域得到了广泛的应用^[1,2]。硬质合金具有硬度高、耐磨、强度高、韧性好等优异性能, 广泛用作刀具材料。粘

结相是硬质合金的重要组成部分, Co 是硬质合金中最常见的粘结相, 与硬质相基体具有优异的润湿性, 自身也具有优异的减震抗磨性能^[3]。然而, Co 面临战略资源稀缺并且价格高昂的问题, 因此寻找 Co 粘结相的替代成为研究热点。Fe, Ni 与 Co 共处第Ⅷ族, 都对硬质相展现出一定程度的润湿性, 均可以固溶^[4]在硬质相中, 因此是替代硬质合金中粘结相 Co 的优先选择^[5, 6]。许多学者对采用 Fe, Ni 代替战略资源 Co 作为硬质合金中粘结相进行了研究。Min 等^[7]将 Ni 纳米颗粒与 WC 粉末均匀混合, 烧结制备了 WC-Ni, 证明 Ni 纳米相的加入既减小了材料孔隙率还获得了较高的硬度和冲击韧性, 同时 WC-Ni 表现出优越的耐腐蚀性能。Tarrago 等^[8]对 WC-Ni 和 WC-Co 硬质合金的疲劳性能进行了对比研究, 结果表明在平均自由程相似的情况下, WC-Ni 与 WC-Co 具有相当的硬度、横向断裂强度和断裂韧性, 同时两者的疲劳敏感性及裂纹扩展也基本相似, 证明了 Ni 可以作为粘结相对 Co 进行有效替代。但在 Uhrenius 等^[9]的理论中, 单独的 Fe 和 Ni 均不适合作为粘结相, Fe 中会有脆性 η 相形成, Ni 中会出现石墨相的沉积。为了避免 Fe 和 Ni 单独作为粘结相带来的问题, 一些学者采取了用 Fe, Ni 部分替代 Co 的方式, Yang 等^[10]采用粉末冶金法成功制备了低粘结相含量的细晶 WC-Co-Ni 硬质合金粉末。Chang 等^[11]合成了粘结相质量分数均为 15% 的纳米结构 WC-Co 和 WC-(Fe-Ni-Co), 在保证硬度不变的情况下提高了材料的断裂韧性。

脉冲磁场处理是一种利用脉冲磁场改善金属材料性能的后处理方法, 相比于传统热处理, 具有便捷高效、处理迅速以及绿色环保等优势。Shao 等^[12]发现脉冲磁场处理能够改善材料表面的残余应力分布, 提高材料疲劳寿命。Zhang 等^[13]发现脉冲磁场处理能够促进位错运动的增加, 从而改善应力集中。Babutskyi 等^[14]研究表明无论材料是否具有磁性, 磁场处理都能提升材料的抗空穴

腐蚀能力。有学者将脉冲磁场处理应用于金属加工刀具的性能提升上, 证明了此技术在改善加工刀具的宏观性能上有明显作用。Fei 等^[15]研究了脉冲磁场处理对立方氮化硼刀具切削性能的影响, 实验结果表明, 利用脉冲磁场处理后的刀具进行切削时切削力降低, 刀具磨损面积也相应减小。Yang 等^[16]从硬质合金 WC-12Co 的摩擦学性能角度研究了脉冲磁场处理的作用, 结果表明, 脉冲磁场处理可以同时减小工件的摩擦系数和磨损量。此外 Yang 等^[17]还对硬质合金 WC-12Co 铣刀受脉冲磁场处理后的铣削性能进行了研究, 结果表明, 经过脉冲磁场处理, 铣刀切向、径向、轴向的磨削力均降低, 同时加工表面质量得到提高。Li 等^[18]对脉冲磁场处理改善 WC-6Co 硬质合金刀具的加工性能进行了研究, 结果显示, 经脉冲磁场处理后的 WC-6Co 硬质合金刀具对钛合金 Ti-6Al-4V 切削力降低, 除此之外刀具的散热性能得到提高, 同时工件的加工质量也得到了提高。本文以单质 Ni 为研究对象, 探究脉冲磁场处理的最佳参数及作用机理, 完善通过脉冲磁场处理改性铁系元素的相关研究, 为通过脉冲磁场处理改性 WC-Ni 系硬质合金提供研究基础。

2 实验

将 Ni 原料板材(中诺新材北京科技有限公司)制备为 20 mm×10 mm×2 mm 的矩形样品, 采用 ICP 光谱检测其化学成分, 检测结果如表 1 所示。采用强度分别为 0.5, 1.0 和 1.5 T, 脉冲间隔为 10 s 的脉冲磁场来处理 Ni 样品, 脉冲磁场个数为 30 个。脉冲磁场处理设备结构如图 1a 所示。

表 1 实验 Ni 原料板材化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental Ni raw sheet(w / %)

Element	Ni	Co
Content	99.913	0.087

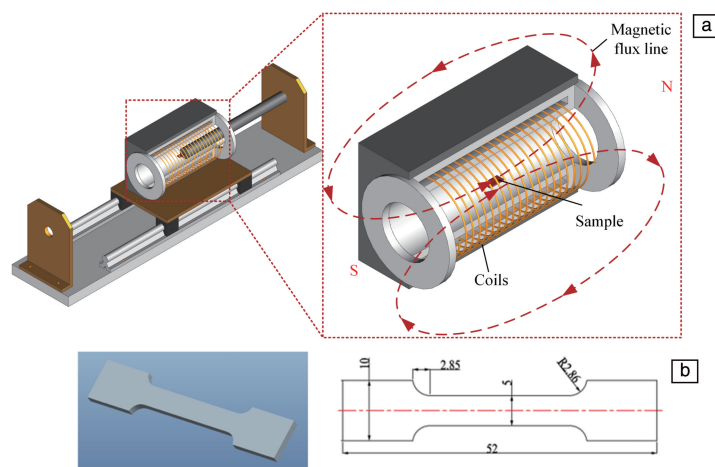


图 1 脉冲磁场处理设备结构的示意图(a), 拉伸试样及具体尺寸(b)

Fig. 1 Structure schematic diagram of pulsed magnetic treatment device (a), the tensile specimen and specific dimension (b)

脉冲磁场处理后,采用硬度测试仪(FUTURE FMARS9000,日本)对材料硬度进行测试,随机在待测样品上选取5个点位进行硬度测试,施加载荷30 kg,保持加载15 s,最后取检测结果平均值代表硬度值的最终结果。采用万能拉伸试验机进行拉伸试验,拉伸试样如图1b所示,拉伸速率为2 mm/min。对于微观组织的表征,采用扫描电子显微镜(ZEISS GeminiSEM 300,德国)对拉伸断口进行形貌观察;通过X射线衍射仪(EMPYREAN,荷兰)表征Ni样品相组成,采用Co靶K α 射线对待测样品进行扫描,扫描范围为20°~120°,扫描速率为0.06(°)/s;通过透射电子显微镜(FEI Tecnai G2 F20,德国)对Ni内部微观缺陷进行表征。

3 结果与讨论

3.1 硬度

脉冲磁场处理前后Ni样品的硬度值变化如图2所示。与未处理样品相比,经不同脉冲磁场强度处理后样品硬度均降低,脉冲磁场强度为0.5,1.0和1.5 T时,分别下降1.16%,1.28%和0.36%。

3.2 拉伸性能

图3a为Ni样品经不同脉冲磁场强度处理后的工程

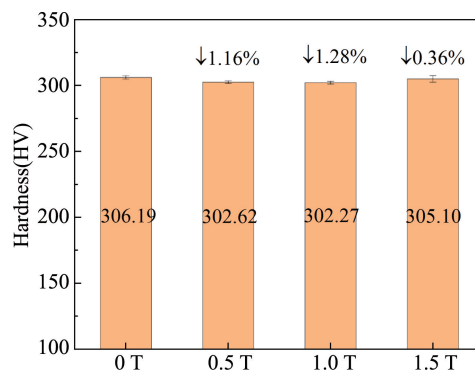


图2 经不同脉冲磁场强度处理后Ni样品硬度

Fig. 2 Hardness of Ni samples treated with different pulsed magnetic intensities

应力-应变曲线,由图可知,仅当脉冲磁场强度达到1.5 T时,样品抗拉强度和延伸率同时得到提高。图3b和3c分别对样品抗拉强度的变化和延伸率的变化进行了统计,由图可知,当脉冲磁场达到1.5 T时,抗拉强度和延伸率分别提高了4.19%和1.65%;而当脉冲磁场处理强度为1.0和0.5 T时,抗拉强度和延伸率的变化均不足1%,可以认定为误差范围内的变化,因此可认为在0.5和1.0 T的磁场处理强度下,样品的抗拉强度与延伸率几乎没有变化。

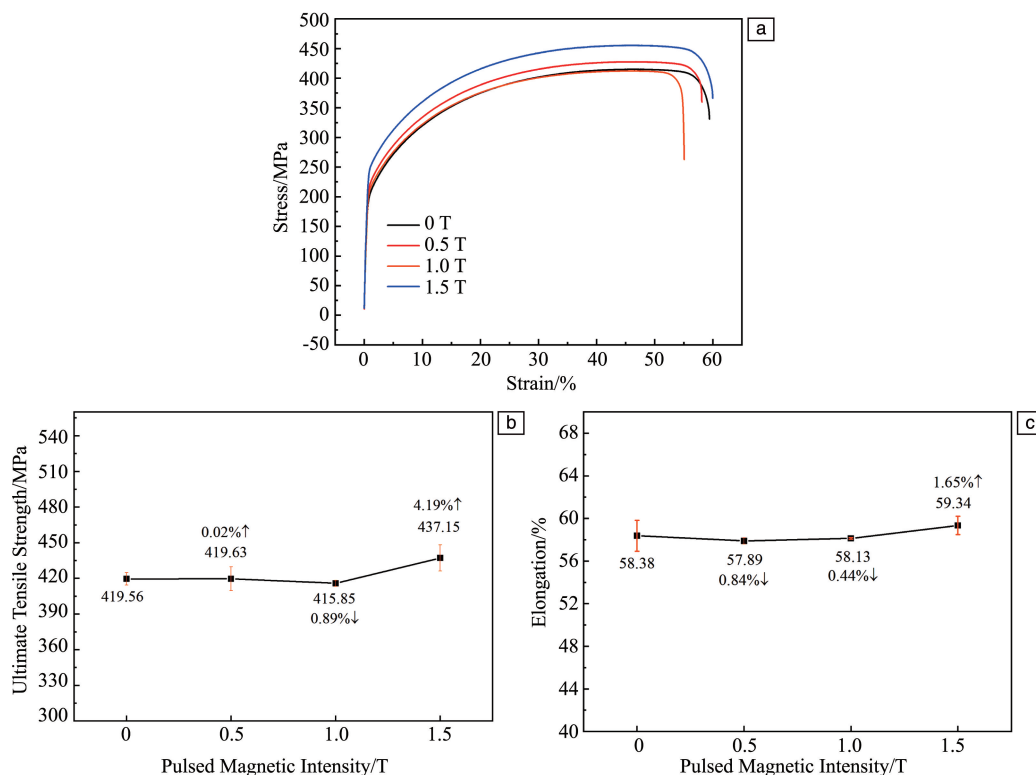


图3 经不同脉冲磁场强度处理前后Ni样品的应力-应变曲线(a),抗拉强度(b)和延伸率(c)

Fig. 3 Engineering stress-strain curves (a), ultimate tensile strength (b) and elongation (c) of Ni samples before and after treatment with different pulsed magnetic intensities

3.3 拉伸断口

图4为未处理及脉冲磁场处理 Ni 样品拉伸断裂后上下断口在 SEM 二次电子模式下成像的断口形貌。由图可看出, 在脉冲磁场处理前后, Ni 样品的断面都有塑性断裂的特征, 出现了大量韧窝结构。从图 4a1 和 4a3 可以看出, 未处理的 Ni 样品上下断裂面的韧窝形貌都不明显, 同时其撕裂棱衬度较低; 从局部放大后的图 4a2 和 4a4 可以看出韧窝较浅, 同时韧窝底部的纹路清晰可见。从图 4b1~4d4 可以看出, 脉冲磁场处理后 Ni 样品断口大部分韧窝深度较浅, 但是视野范围内局部出现深度较大、

撕裂棱清晰的韧窝, 表明在脉冲磁场作用下材料局部出现塑性增强的现象, 这可能是由脉冲磁场处理后 Ni 样品中的缺陷局部区域重新分布导致的。

对抗拉强度和延伸率的统计结果(图3)表明, 不同强度的脉冲磁场处理对材料性能的改善程度不同, 当脉冲磁场强度为 1.5 T 时, 结合应力-应变曲线和硬度测量结果, 脉冲磁场强度为 1.5 T 时, 材料的延伸率和抗拉强度同时得到提升, 且硬度受影响下降最小, 可以认为 1.5 T 脉冲磁场强度是处理 Ni 样品的最佳参数。

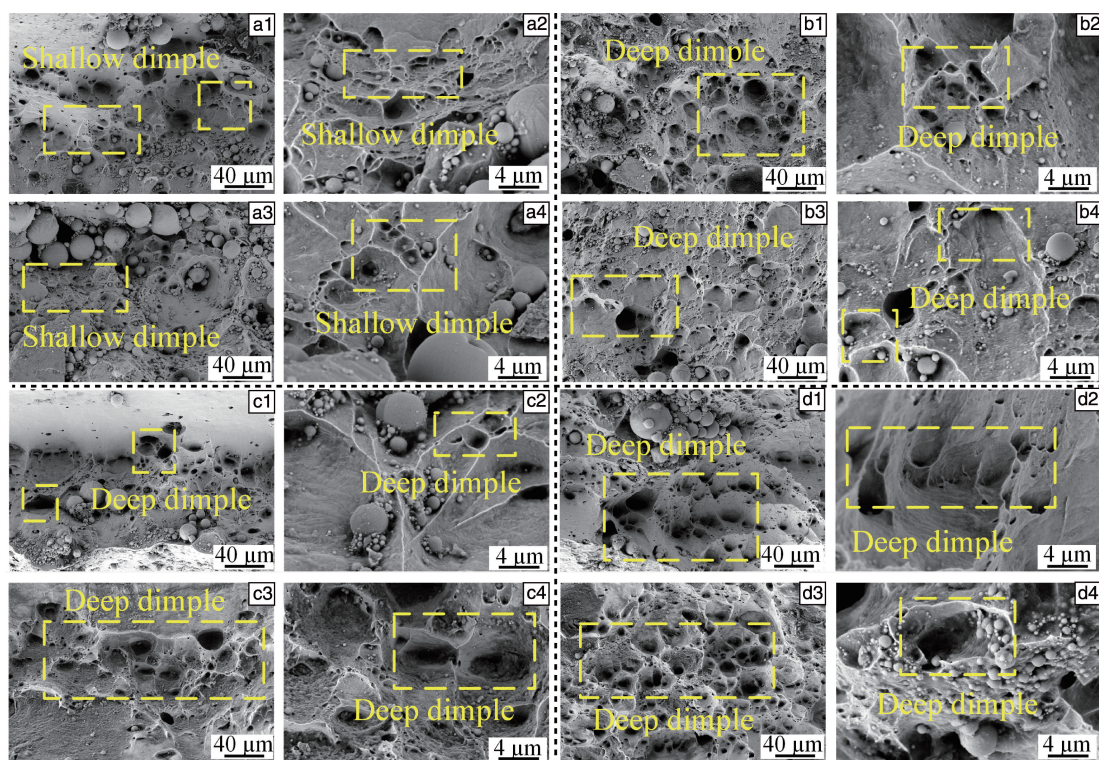


图4 脉冲磁场处理前后 Ni 样品拉伸断口形貌: (a1~a4)0 T, (b1~b4)0.5 T, (c1~c4)1.0 T, (d1~d4)1.5 T

Fig. 4 Tensile fracture morphology of Ni samples before and after treatment with different pulsed magnetic intensity: (a1~a4) 0 T, (b1~b4) 0.5 T, (c1~c4) 1.0 T, (d1~d4) 1.5 T

3.4 物相及微观应变

将在最佳参数 1.5 T 脉冲磁场强度下处理后与未处理的 Ni 样品进行 X 射线衍射, 表征脉冲磁场处理对 Ni 物相的影响。图 5a 为 X 射线衍射图谱, 从图中可以看出, Ni 样品中出现了 NiO 的衍射峰, 证明纯金属 Ni 在空气中极易氧化; 脉冲磁场处理前后的 X 射衍射峰位置基本重合, Ni 均为 fcc 结构, 表明脉冲磁场处理对 Ni 样品拉伸性能的改善不是通过改变相结构。使用 Jade 软件对 Ni 样品的微观应变和晶格常数进行计算, 结果如图 5b 和 5c, 脉冲磁场处理后 Ni 样品内部的微观应变相比未处理样品提高了 8.51%, 晶格常数提高了 0.051%, 可以推测, 脉冲磁场作用于 Ni 样品周围时, Ni 样品内部

的原子间作用力以及晶粒间的平衡状态被改变, 进而产生了微观应变和晶格常数的变化, 而材料中的微观应变和晶格畸变还与缺陷的位置及分布改变有关, 表明脉冲磁场处理可能会影响材料中缺陷的分布。

3.5 脉冲磁场对微观缺陷影响及机制

将在最佳参数 1.5 T 脉冲磁场强度下处理后与未处理的 Ni 样品进行 TEM 表征, 以揭示脉冲磁场处理对纯 Ni 微观缺陷的影响。图 6a1 和 6a2 为未处理样品, 在图 6a1 中可以看到纯 Ni 样品中有明显的由致密位错墙构成的晶界, 在该致密位错墙周围还有一些网状位错胞, 这些位错胞的边界由晶胞内的位错缠结构成, 位错胞壁整体呈现出较为松散无序的形态。对局部区域进行放大,

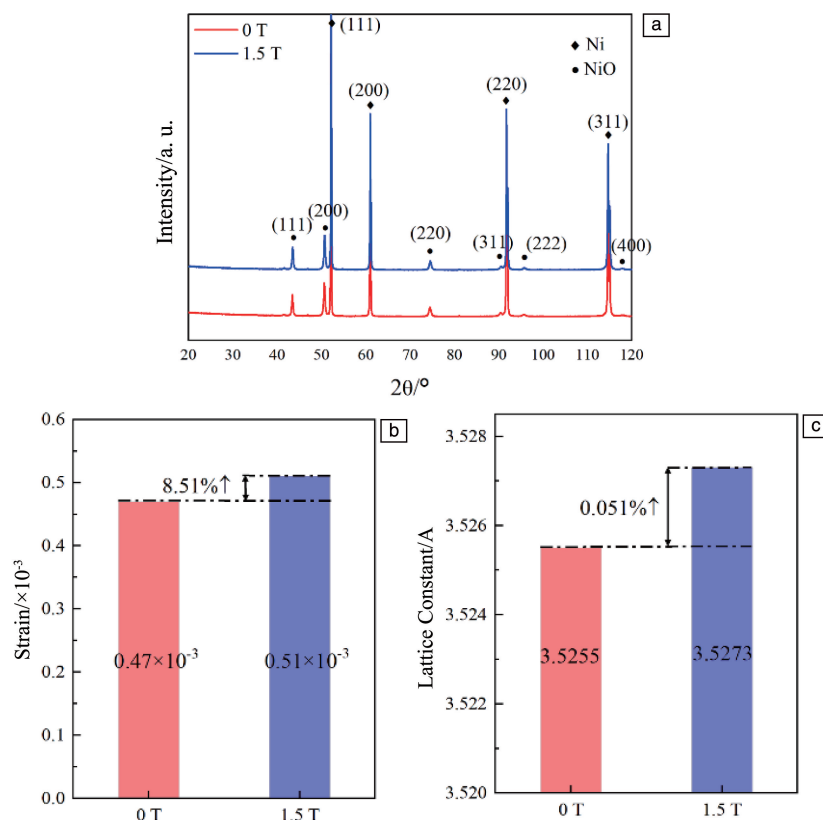


图 5 在最佳参数 1.5 T 脉冲磁场强度下处理后与未处理的 Ni 样品的 XRD 图谱(a), 微观应变(b)和晶格常数(c)

Fig. 5 XRD patterns (a), microscopic strain (b) and lattice constant (c) of Ni samples treated at the optimal parameter of 1.5 T pulsed magnetic intensity and untreated

如图 6a2 所示, 可以观察到由少量单独位错按顺序缠结在一起构成的松散位错墙。

图 6b1 和 6b2 为在最优参数 1.5 T 脉冲磁场强度下处理后 Ni 样品的 TEM 照片, 在图 6b1 中可以看到, 经脉冲磁场处理后的晶粒内部出现了 2 种形貌的位错聚集, 第一种是绿色圈中的分散的小位错, 第二种是红色虚线标出的衬度明显的缠结位错线, 这 2 种位错共同的特点是基本都靠近致密位错墙, 可能是由类似图 6a1 中尺寸长达几微米的条状致密位错墙向晶粒内部分裂形成的, 从而减小了材料整体的能量^[19]。同时从图 6b1 中还可以观察到, 相较于图 6a1 中的松散位错胞, 处理后样品晶粒内部位错胞的胞壁变得更加明显, 表明有部分位错运动到此处时进行缠结堆积, 但是位错胞开始出现了明显不封闭的形态。一般来说位错胞的增多会使得位错在滑移时被位错胞壁阻碍而影响材料的塑性, 这些不完整的位错胞打破了网状结构, 给位错的滑移提供了一部分空间, 使得滑移到附近的位错可以继续运动而不被完整的位错胞壁阻止, 进而在宏观层面提高了 Ni 样品的延伸率。从局部区域放大图(图 6b2)可以观察到晶粒内部出现了以

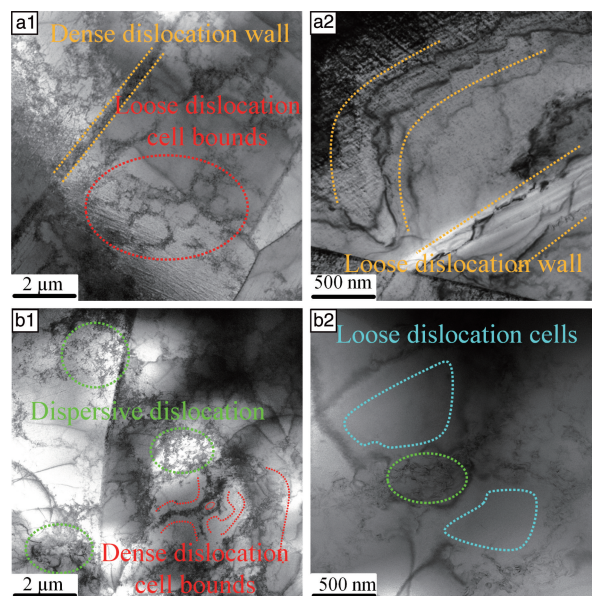


图 6 在最佳参数 1.5 T 脉冲磁场强度下处理后 (a1, a2) 与未处理 (b1, b2) 的 Ni 样品位错形态

Fig. 6 Dislocation pattern of Ni samples treated at the optimal parameter of 1.5 T pulsed magnetic intensity (a1, a2) and untreated (b1, b2)

短小分散的位错聚集为中心, 向两边发散的位错胞, 对位错胞形成原因进行推测, 可能是图 6a2 所示的松散位错墙分解形成了多个短小分散的位错聚集, 而周围的部分位错运动到此处时以该位错聚集为中心堆积形成了位错胞壁。如图 7 所示, 在经脉冲磁场处理后的纯 Ni 样品中还发现了位错环这种空位簇缺陷特征, 由于位错环会阻碍位错的运动, 钉扎位错^[20], 而成为位错缠结与聚集的中心, 材料中存在少量位错环可以一定程度提高其强度^[21], 因此受脉冲磁场轰击后, 纯 Ni 样品的强度都得到了提高。但过量的位错环会导致材料塑性下降, 甚至引起晶间脆化^[22]。

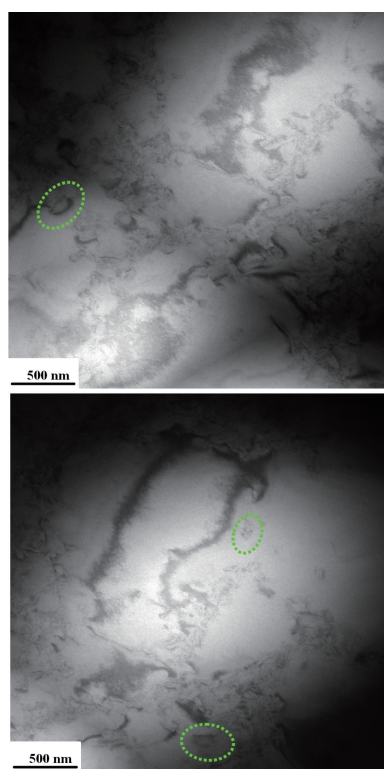


图 7 脉冲磁场处理后样品中位错环形貌

Fig. 7 Morphology of dislocation loop after pulsed magnetic treatment

从以上结果可以看出, 对于纯 Ni 样品, 由于位错的滑移是拉伸变形时主要的运动机制^[23, 24], 脉冲磁场处理主要通过促进 Ni 晶粒晶界处的位错向内运动形成位错聚集、位错环以及不完整位错胞, 提高纯 Ni 样品的强度与延伸率。为了讨论磁处理对增强位错运动的改善机理, 引入 Freak-Read 位错源增殖机制和磁畴运动来讨论。如图 8 所示, 在进行脉冲磁场处理前, 纯 Ni 样品中预先存在位错, 位错线的两端被位错网节点钉扎, 不能运动, 脉冲磁场处理后, 由于磁致塑性效应, 磁场产生力与位错相互作用驱动位错运动^[25, 26], 由于位错线两端被固定, 位错线只能发生弯曲向后凸出, 渐渐地, 形成一个

位错环并向外扩展, 而原来的位错线弯曲后又回到原来的阶段, 图 7 中观察到的位错环可以支撑这一理论。此外, Ni 为铁磁性材料, 具有自发磁化和畴结构, 当施加磁场时, 可能会发生磁畴的转动和磁壁的位移, 如图 9 所示, 并且可能会对位错产生额外的驱动力^[27]。

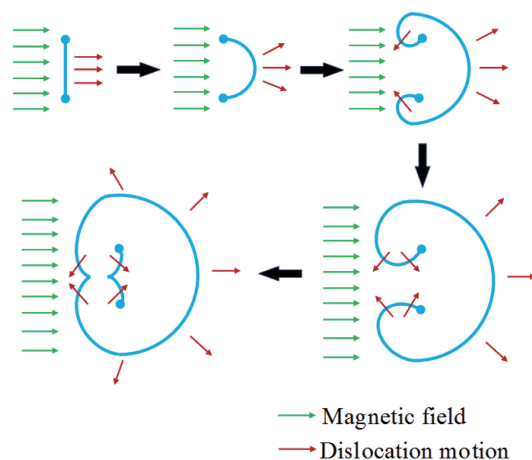


图 8 纯 Ni 在脉冲磁场下的 Freak-Read 位错强化示意图

Fig. 8 Schematic diagram of Freak-Read dislocation strengthening of pure Ni under pulsed magnetic treatment

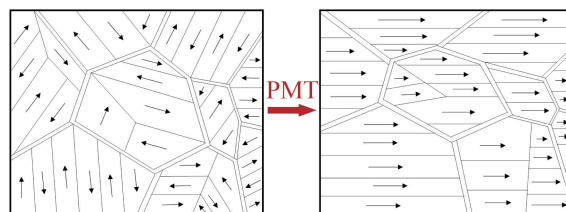


图 9 脉冲磁场处理对磁畴结构影响示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the effect of pulsed magnetic treatment on the structure of magnetic domains

4 结 论

在本研究中, 通过脉冲磁场处理单质 Ni 样品, 对其宏观力学性能和拉伸断面形貌特征进行了研究, 并从处理前后的样品的微观缺陷变化角度探索了脉冲磁场对 Ni 样品的改性机理。

(1) 经强度为 0.5~1.5 T 的 PMT 后, 样品硬度降低, 当脉冲磁场强度为 1.5 T 时, 强度较未处理样品最小下降 0.36%; 对于拉伸性能而言, 当磁脉冲强度为 1.5 T 时, 抗拉强度和延伸率同时得到最大提升, 较未处理样品提升 4.19% 和 1.65%, 而当磁脉冲强度为 0.5 和 1.0 T 时样品无明显变化。

(2) 通过对样品微观结构表征观察到 Ni 样品中的缺陷分布改变, 晶粒晶界处的位错向内运动形成位错聚集、位错环以及不完整位错胞, 提高了纯 Ni 样品的强

度与延伸率。

(3) 脉冲磁场处理通过磁场力驱动位错运动, 此外, 铁磁性材料在磁场中磁畴的位移也为位错运动提供了额外的驱动力。

参考文献 References

- [1] GAO Z X, JIA Z, JI J J, *et al.* Physics and Engineering of Metallic Materials[C]// Proceedings of Chinese Material Conference 2018 19th. Xiamen: Chinese Materials Research Society, 2019: 201–210.
- [2] THELLAPUTTA G R, CHANDRA P S, RAO C S P. Materials Today: Proceedings[J], 2017, 4(2): 3712–3721.
- [3] MUTHUSWAMY P, DINAKARAN D. Materials Today: Proceedings[J], 2021, 43: 3463–3469.
- [4] PANO V S, GOLDBERG M A. Powder Metallurgy and Metal Ceramics[J], 2009, 48(7/8): 445–448.
- [5] GAO L X, ZHOU T, ZHANG D Q, *et al.* Corrosion Engineering Science and Technology[J], 2014, 49(3): 204–208.
- [6] ANDREWS N, GIOURNTAS L, GALLOWAY A M, *et al.* International Journal of Refractory Metals and Hard Materials[J], 2015, 48: 229–237.
- [7] MIN F L, YU S B, WANG S, *et al.* Transactions of Nonferrous Metals Society of China[J], 2022, 32(6): 1935–1947.
- [8] TARRAGO J M, FERRARI C, REIG B, *et al.* International Journal of Fatigue[J], 2015, 70: 252–257.
- [9] UHRENIUS B, PASTOR H, PAUTY E. International Journal of Refractory Metal and Hard Materials[J], 1997, 15(1–3): 139–149.
- [10] YANG X H, WANG K F, CHOU K C, *et al.* Materials Today Communications[J], 2022, 30: 103081.
- [11] CHANG S H, CHANG M H, HUANG K T. Journal of Alloys and Compounds[J], 2015, 649: 89–95.
- [12] SHAO Q, KANG J J, XING Z G, *et al.* Journal of Magnetism and Magnetic Materials[J], 2019, 476: 218–224.
- [13] ZHANG Y F, FANG C Y, HUANG Y F, *et al.* Journal of Magnetism and Magnetic Materials[J], 2021, 540: 168327.
- [14] BABUTSKYI A, AKRAM S, BEVILACQUA M, *et al.* Materials and Design[J], 2023, 226: 11630.
- [15] FEI H L, WU H Y, YANG X D, *et al.* Journal of Manufacturing Processes[J], 2021, 69: 21–32.
- [16] YANG Y F, YANG Y, LIAO C Z, *et al.* Tribology International[J], 2021, 161: 107086.
- [17] YANG Y F, YANG Y, LI Q Q, *et al.* Journal of Cleaner Production[J], 2022, 340: 130748.
- [18] LI Q Q, YANG Y, YANG Y F, *et al.* Journal of Manufacturing Processes[J], 2022, 80: 898–908.
- [19] LIU Q, JENSEN D J, HANSEN N. Acta Materialia[J], 1998, 46(16): 5819–5838.
- [20] XIAO X Z. Metals[J], 2019, 9(10): 1132.
- [21] ODETTE G R, YAMAMOTO T, RATHBUN H J, *et al.* Journal of Nuclear Materials[J], 2003, 323(2/3): 313–340.
- [22] MAZIASZ P J. Journal of Nuclear Materials[J], 1989, 169: 95–115.
- [23] MISHRA A, KAD B K, GREGORI F, *et al.* Acta Materialia[J], 2007, 55(1): 13–28.
- [24] LIAO X Z, HUANG J Y, ZHU Y T, *et al.* Philosophical Magazine[J], 2003, 83(26): 3065–3075.
- [25] CAI Z P, ZHAO H Y, LIN J, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2007, 458(1): 262–267.
- [26] LIU J, WEI C, YANG G, *et al.* Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2018, 49(10): 4798–4808.
- [27] HUANG Z, STOLICHNOV I, BERNAD M A, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2013, 103(22): 222902.

(编辑 费蒙飞)