



锻造工艺对 Fe10Cr10Co 软磁合金组织及性能的影响

刘 杰, 王言眸, 马 静, 李 柱, 韩钟剑
(西安钢研功能材料股份有限公司, 西安 712046)

摘 要:本研究系统揭示了 Fe10Cr10Co 软磁合金在热塑性变形过程中显微组织的动态演变规律, 并深入阐明了其微观组织特征与力学性能及软磁性能之间的多尺度耦合作用机制。试验采用 3T 电液锤完成锻比分配及锻后冷却速率控制试验, 通过光学显微镜、万能拉伸机及室温直流磁性能检测仪对试样进行多尺度表征。结果表明, 当一火锻比为 4.0、二火锻比为 2.56 时, 经过砂冷处理的试样在热处理后组织均匀度最高, 平均晶粒尺寸较小为 18.19 μm , 表现出最高的屈服强度 345.0 MPa 和伸长率 44.0%。当一火锻比为 3.16、二火锻比为 3.24 时, 经过空冷处理的试样在热处理后组织均匀度最差, 平均晶粒尺寸较小为 13.66 μm , 表现出最高的抗拉强度 527.3 MPa。当一火锻比为 3.16、二火锻比为 3.24 时, 经过砂冷处理的试样组织较为均匀, 平均晶粒尺寸较大为 33.01 μm , 表现出最高的磁感应强度、磁导率 5.288 mH/m 和最低的矫顽力 107.5 A/m。综上所述, Fe10Cr10Co 软磁合金通过采用一火次大变形、二火次小变形加缓冷的锻造工艺, 在后续热处理过程中有效释放了组织中的残余应力并降低了位错密度, 从而获得了均匀性最高, 且晶粒尺寸较小的微观组织。这种微观结构的优化实现了力学性能与软磁性能的协同提升。

关键词: Fe10Cr10Co 软磁合金; 锻比; 冷却速率; 力学性能; 磁性能

DOI:10.20057/j.1003-8620.2025-00056 **中图分类号:** TG142.1

Effect of Forging Process on Microstructure and Properties of Fe10Cr10Co Soft Magnetic Alloy

Liu Jie, Wang Yanmou, Ma Jing, Li Zhu, Han Zhongjian
(Xi'an Gangyan Special Alloy Co., Ltd, Xi'an 712046, China)

Abstract: This study systematically reveals the dynamic evolution of the microstructure of Fe10Cr10Co soft magnetic alloy during thermoplastic deformation and thoroughly elucidates the multi-scale coupling mechanism between its microstructural characteristics and mechanical properties as well as soft magnetic properties. The experiments were conducted using a 3T electro-hydraulic hammer to complete the forging ratio distribution and post-forging cooling rate control tests, and the samples were characterized at multiple scales by optical microscope, universal tensile machine and room temperature DC magnetic performance detector. The results indicate that when the once heating forging ratio is 4.0 and the twice heating forging ratio is 2.56, the sample subjected to sand cooling exhibits the highest uniformity in microstructure after heat treatment, with an average grain size of 18.19 μm , and demonstrates the highest yield strength of 345.0 MPa and elongation of 44.0%. For the sample with once heating forging ratio of 3.16 and twice heating forging ratio of 3.24, the air-cooled sample shows the poorest uniformity in microstructure after heat treatment, with an average grain size of 13.66 μm , but achieves the highest tensile strength of 527.3 MPa. Under the conditions of once heating forging ratio of 3.16 and twice heating forging ratio of 3.24, the sand-cooled sample exhibits relatively uniform microstructure, with a larger average grain size of 33.01 μm , and demonstrates the highest magnetic induction, permeability of 5.288 mH/m, and the lowest coercivity of 107.5 A/m. In summary, the Fe10Cr10Co soft magnetic alloy, through the application of a forging process involving a large deformation in the first pass and a small deformation in the second pass, combined with slow cooling after forging, effectively releases residual stress and reduces dislocation density during subsequent heat treatment, resulting in a microstructure with the highest uniformity and smaller grain size. This optimization of the microstructure achieves a synergistic improvement in mechanical and soft magnetic properties.

Key Words: Fe10Cr10Co Soft Magnetic Alloy; Forging Ratio; Cooling Rate; Mechanical Properties; Magnetic Properties

软磁合金是一类在外部磁场作用下能够迅速磁化和去磁的功能材料, 具有高磁导率、低矫顽力和高饱和磁感应强度等优异的磁性能^[1-2]。因其卓

越的磁性能和机械性能, 被广泛应用于电子、通信及航空航天等领域^[3-4]。软磁合金的磁性能决定了其在电磁设备中的能量转换效率^[5], 机械性能则保

障了其在复杂工况下的可靠性^[6]。因此,如何通过工艺调控实现软磁合金磁-机性能的协同提升,成为材料科学与工程领域的重要课题。

锻造作为一种典型的热塑性变形工艺,能够有效调控合金的微观组织,促进动态再结晶和晶粒细化^[7]。此外,锻造过程还能消除铸造缺陷,提高组织的均匀性,提升软磁合金的磁性能^[8]。现有的工作已经证实锻造工艺可通过调控组织来改善合金性能,但仍对变形量分配与冷却速率的耦合机制认识不足,缺乏晶界密度与磁畴运动的关联研究^[9]。因此,如何通过优化锻造工艺参数在晶粒细化与晶界密度之间取得平衡,是实现磁-机性能协同优化的关键。

本研究创新性采用两火次高低温锻造的组合工艺,有效改善了合金的微观组织。对软磁合金而言,良好的微观结构既能降低磁滞损耗^[10],还能提升磁导率和饱和磁感应强度,同时降低矫顽力。此外,本研究还发现,锻后冷速也会对软磁合金微观组织产生影响,进而影响合金机械性能和磁性能的协同提高^[11-12]。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验组原料为 $\phi 320$ mm的Fe10Cr10Co软磁合金铸锭,参照组为国外某牌号材料 $\phi 100$ mm ± 5 mm的成品锻棒,主要化学成分见表1。

表1 Fe10Cr10Co软磁合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of Fe10Cr10Co soft magnetic alloy

材料	C	Cr	Co	Mo	Al	Mn	Fe
试验组	0.03	10.5	10.6	2.5	1.5	0.19	余量
参照组	0.02	15.5	9.0	-	0.7	-	余量

1.2 试验内容

本研究试验组试样制备全流程为真空熔炼→扒皮→修磨→加热→一火锻造→加热→二火锻造→冷却(空冷/砂冷)→扒皮→取样(力学、磁性能、硬度)→热处理→性能检测。本研究将锻造变形量分配和锻后冷却方式作为关键工艺参数变量。首先,变形量分配的合理性是决定合金组织均匀度和晶粒细化程度的关键因素。过大的变形量会导致局部过度变形,降低组织均匀度;而过小的变形量则难以有效改善合金的微观结构,从而影响其性能^[13]。因此,合理分配锻造过程中各阶段的变形

量,是实现软磁合金性能优化的核心策略;其次,锻后冷却方式对合金的组织演变和性能调控同样具有重要影响。不同的冷却速率会显著影响合金的相变过程、晶粒长大行为及残余应力分布^[14]。合适的冷却速率既能控制晶粒尺寸,还能提高组织均匀度,进而提升合金的综合性能。最后,探讨关键工艺参数与合金磁-机性能的关系,为实现软磁合金性能的定向调控提供理论依据和实践指导。

1.2.1 锻造试验

表2为Fe10Cr10Co软磁合金的锻造试验方案。采用 $\phi 360$ mm Fe10Cr10Co合金锭,试验A/C研究锻比对合金组织细化、均匀化的影响;试验B/C探究冷速对晶粒生长、应力分布的作用。

锻比的计算方法主要有“面积法”和“高度法”,A组工艺为 $\phi 320$ mm铸锭→ $\phi 160$ mm锻坯→ $\phi 100$ mm锻棒;B/C组工艺为 $\phi 320$ mm→ $\phi 180$ mm→ $\phi 100$ mm。对于规则的圆柱体,面积法计算会更加直观、精确的描述合金的变形量,计算公式如式(1)。

$$\text{锻比} = \frac{A_0}{A_1} \quad (1)$$

式中, A_0 为锻造前材料的横截面积,mm²; A_1 为锻造后材料的横截面积,mm²。

表2 Fe10Cr10Co软磁合金锻造试验方案

Table 2 Forging experimental scheme of Fe10Cr10Co soft magnetic alloy

试验分组	火次	锻比	锻造加热温度/°C	冷却方式
A	1	4.00	1 150	800~900 °C回炉
	2	2.56	1 100	砂冷
B	1	3.16	1 150	800~900 °C回炉
	2	3.24	1 100	空冷
C	1	3.16	1 150	800~900 °C回炉
	2	3.24	1 100	砂冷

1.2.2 热处理工艺

将锻棒加工成标准的 $\phi 10$ mm圆形拉伸试样及如图1所示的磁性能环。采用DLT-800真空热处理炉,按照图2所示的工艺流程进行热处理。随后,依据GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验》、GB/T 4340.1—2024《金属材料 维氏硬度试验 第1部分:试验方法》和GB/T 13012—2008《软磁合金直流磁性能测量方法》对试样的力学性能和磁性能进行检测。本研究采用HV-10MPTA型维氏硬度检测仪及UTM5305SYXL型电子万能试验机,检测其力学性

能,采用 MATS-2010 型软磁直流测试装置检测其磁性能。

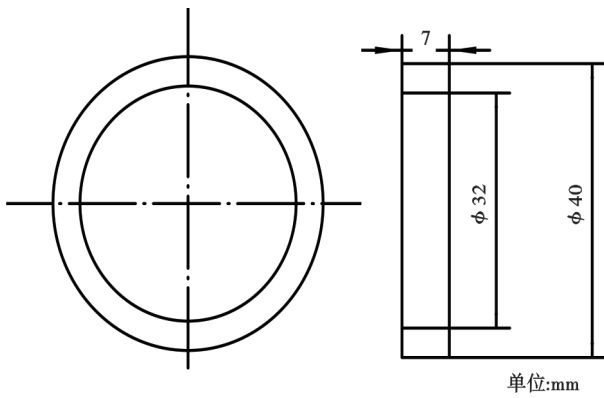


图1 磁性能试样加工示意图

Fig. 1 Schematic diagram of magnetic property specimen processing

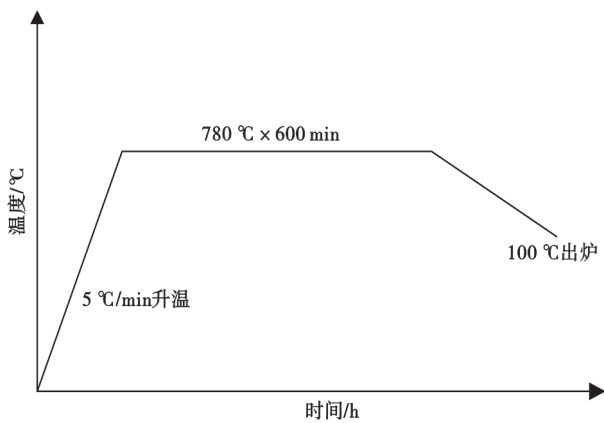


图2 Fe10Cr10Co软磁合金热处理工艺

Fig. 2 Heat treatment process for Fe10Cr10Co soft magnetic alloy

热处理作为软磁合金的关键工艺,可释放试样

内部因塑性变形等因素引起的残余应力^[15],优化晶界分布和磁畴结构^[16],改善组织均匀性,实现软磁合金性能优化。

2 试验结果和分析

2.1 锻比分配对 Fe10Cr10Co 软磁合金微观组织的影响

图3为A组和C组试验锻棒的金相组织照片,如图3所示,可以观察到,锻比分配对合金的组织影响较大。合金铸锭的铸态组织通常由粗晶、细晶、枝晶以及钢液自然冷却过程中形成的网状偏析组织组成^[11]。在一火锻造过程中,较高的锻造加热温度和较长的保温时间,可有效释放铸锭中的内应力,消除枝晶和偏析组织,提高铸锭变形能力;较大的锻比可实现晶粒组织的均匀化,消除铸锭内部的粗晶、气孔及夹杂等冶金缺陷,从而获得致密均匀的初始材料结构。二火低温小锻比,使组织进一步细化、均匀化。研究表明,锻棒成品的显微组织两次锻造过程中表现出明显的工艺继承性,即一火锻造的组织特征对二火锻造结果具有显著影响^[7]。故而要获得优良的成品组织,合理分配两火次变形量是关键因素。

图3(a)为两火次锻比分别为4.0和2.56锻后砂冷的棒材显微组织。一火阶段较大的变形量有效地消除了铸造缺陷,为再结晶提供充分的条件,但是较大变形量会在锻坯内部累积较大的位错缠结和内应力。二火阶段,低温及大量的破碎晶使得晶粒长大受限,小变形量也避免了组织过度细化。图4为A组和C组试验锻棒的晶粒尺寸分布直方图,从图4(a)中可知,A组锻棒80%晶粒分布在2.5~15 μm,组织细小均匀,平均晶粒尺寸为11.15 μm。

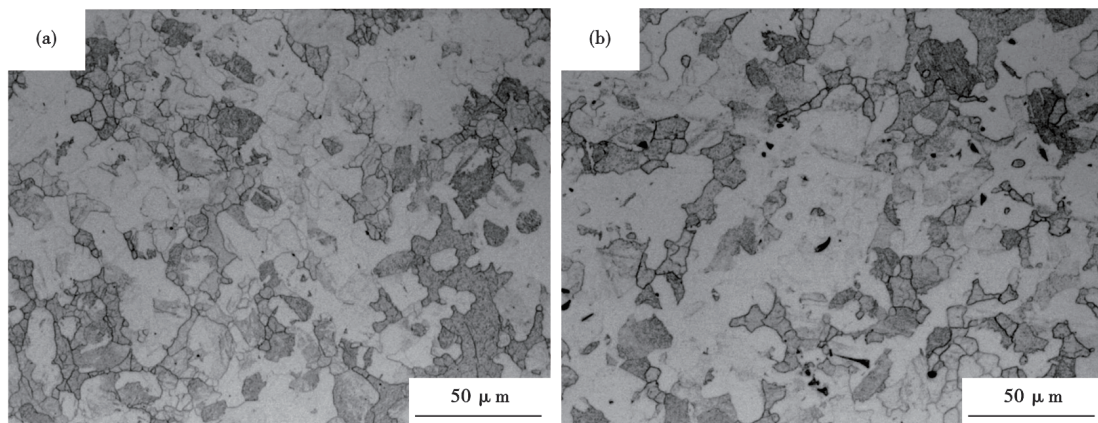


图3 Fe10Cr10Co软磁合金锻后微观组织 (a) A组试样; (b) C组试样

Fig. 3 Microstructure of Fe10Cr10Co soft magnetic alloy after forging (a) group A samples; (b) group C sample

图3(b)为两火次锻比分别为3.24和3.16锻后砂冷的棒材显微组织。一火锻造采用适中的变形量,既避免因过度变形导致铸锭开裂,又消除铸造组织缺陷,提高组织均匀性。二火锻比虽与一火相近,但因一火变形量不足导致组织破碎不充分,在二火低温锻造时不能有效抑制晶粒长大,导致组织均匀性较差。由图4(b)中可知,C组锻棒89%晶粒分布在0~30 μm ,晶粒粗大,平均晶粒尺寸为15.58 μm ,组织均匀性较低。

实际生产中,需综合考虑成品性能指标、几何尺寸以及成材率等关键因素,通过多目标优化确定最优工艺方案。A、C两组试验结果显示,一火锻比需平衡以下矛盾:较大锻比虽能促进动态再结晶,但易引发开裂;较小锻比则难以充分细化晶粒。二火锻造主要起尺寸调控和应力消除作用。优化结果表明,采用一火锻比4.0,二火锻比2.56配合锻后砂冷的方案,可实现晶粒尺寸及组织均匀度的有效控制。

2.2 锻后冷却速度对Fe10Cr10Co软磁合金微观组织的影响

图5展示了B组和C组试验锻棒的金相组织照片。从图5可知,锻比相同时,冷却速率也会影响合金组织演变。热变形过程中,合金在承受的高应力和应变足以激活晶格滑移系统,促进位错的产生、运动及缠结,进而诱发动态再结晶^[7]。而锻后冷却速率则通过静态再结晶,控制合金的内应力及微观组织。

如图5(a)所示,缓冷后得到典型的双态组织,在大等轴晶周围均匀分布着细小的等轴晶。这表明锻件在冷却过程中充分静态再结晶,畸变晶重构,残余应力缓慢而稳定地释放,最终获得低内应力、晶粒无畸变的组织^[7]。图6为B组和C组试验锻棒的晶粒尺寸分布直方图,从图6(a)可知B组锻棒的晶粒尺寸分布直方图,从图6(a)可知B组锻棒近65%的晶粒分布在0~10 μm ,组织最细小但均匀性较低,平均晶粒尺寸为9.60 μm 。

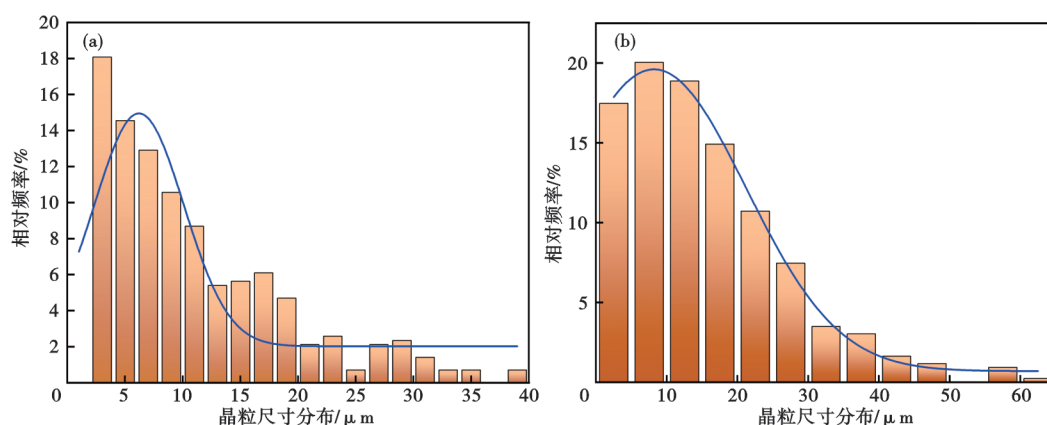


图4 Fe10Cr10Co软磁合金锻后组织晶粒尺寸分布直方图 (a) A组试样; (b) C组试样

Fig. 4 Histograms of grain size distribution in the microstructure of Fe10Cr10Co soft magnetic alloy after forging: (a) group A samples; (b) group C sample

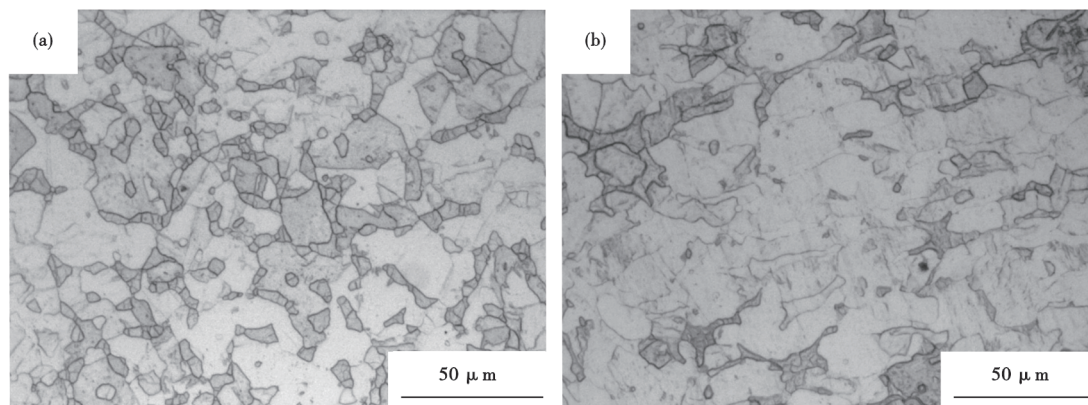


图5 Fe10Cr10Co软磁合金锻后微观组织 (a) B组试样; (b) C组试样

Fig. 5 Microstructure of Fe10Cr10Co soft magnetic alloy after forging (a) group B samples; (b) group C sample

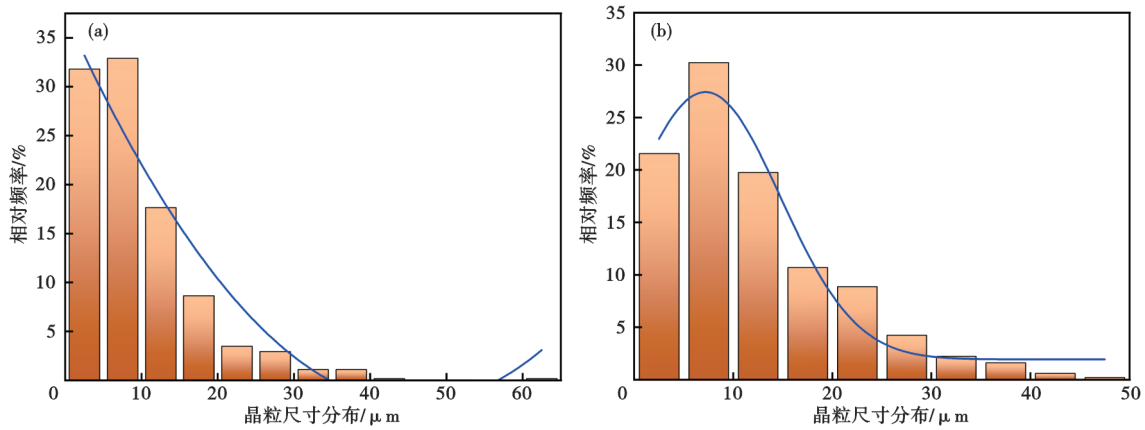


图6 Fe10Cr10Co软磁合金锻后组织晶粒尺寸分布直方图 (a) B组试样; (b) C组试样

Fig. 6 Histograms of grain size distribution in the microstructure of Fe10Cr10Co soft magnetic alloy after forging: (a) group B samples; (b) group C sample

如图5(b)所示,空冷后的显微组织呈现出明显的方向性,畸变晶沿变形方向延伸,在其周围分布着少量细小等轴晶。快冷限制了静态再结晶的进行,组织中保留了大量锻后畸变组织。从图6(b)中可知,C组锻棒79%的晶粒分布在0~20 μm,组织均匀性较差,平均晶粒尺寸为13.94 μm。

B、C两组试验结果表明,砂冷后的组织均匀性显著优于空冷处理,这是由于缓冷为合金提供了充分的热激活条件,促进了静态再结晶,有效释放残余应力。而快冷抑制静态再结晶,导致其组织均匀性较低。优化结果表明,锻后缓冷能粗化晶粒、提高合金组织的均匀度。

3 锻造工艺对Fe10Cr10Co软磁合金性能的影响

设计三组不同参数的锻造试验,制备出组织差异明显的Fe10Cr10Co软磁合金锻件。基于热处理后的试样,首先,对三组试样的微观组织特征进行表征、分析;其次,检测各组试样的力学性能和磁性

能;最终,阐明锻造工艺参数-微观组织-性能(力学/磁学)的关系,为Fe10Cr10Co合金的工艺优化提供理论指导。

3.1 热处理后锻造试样微观形貌

图7为三组试验试样经过780 °C×10 h真空热处理后的显微组织形貌。图8为A、B、C三组试验锻棒真空热处理后的晶粒尺寸分布直方图,从图8(a)中可知,A组试样平均晶粒尺寸约为18.19 μm,较大尺寸晶粒的相对频率较低,组织细小且均匀;从图8(b)中可知,B组锻棒平均晶粒尺寸约为13.66 μm,较大尺寸晶粒相对频率较高,组织细小但均匀性较差;从图8(c)中可知,C组锻棒平均晶粒尺寸约为33.01 μm,组织粗大且均匀,表现出明显的晶粒粗化现象。

3.2 Fe10Cr10Co软磁合金力学性能

图9为三组试验试样在相同退火工艺处理后的应力-应变曲线。表3为不同锻造工艺试样在相同退火工艺处理后的室温拉伸性能,试验组性能均优

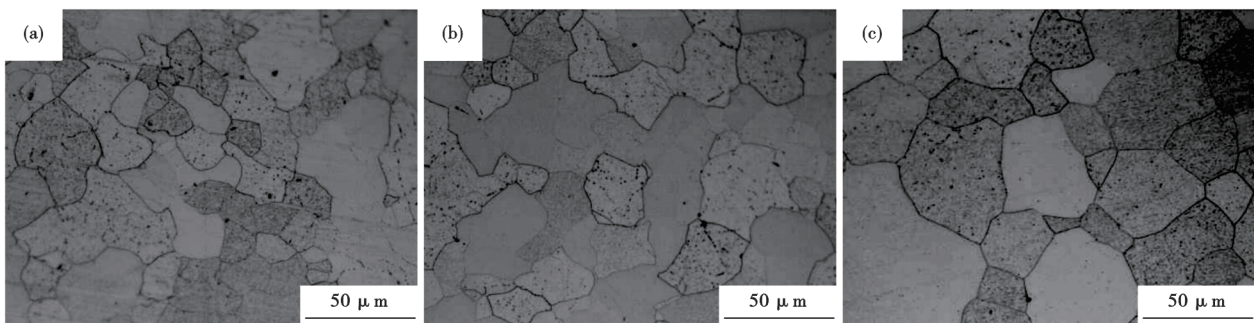


图7 Fe10Cr10Co软磁合金三组试样热处理后微观组织 (a) A组试样; (b) B组试样; (c) C组试样

Fig. 7 Microstructure of three groups of Fe10Cr10Co soft magnetic alloy specimens after heat treatment (a) group A samples; (b) group B samples; (c) group C sample

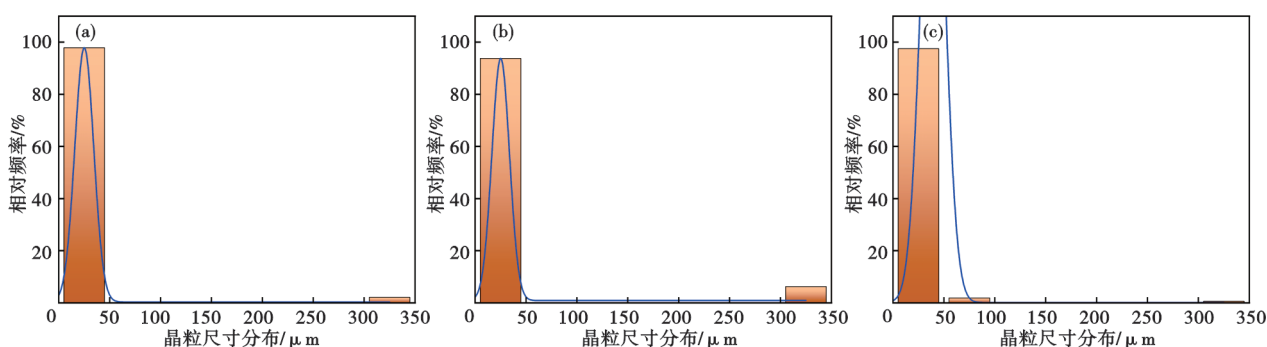


图 8 Fe10Cr10Co 软磁合金三组试样热处理后晶粒尺寸分布直方图 (a) A 组试样; (b) B 组试样; (c) C 组试样

Fig. 8 Histograms of grain size distribution for the three groups of Fe10Cr10Co soft magnetic alloy specimens after heat treatment (a) group A samples; (b) group B samples; (c) group C sample

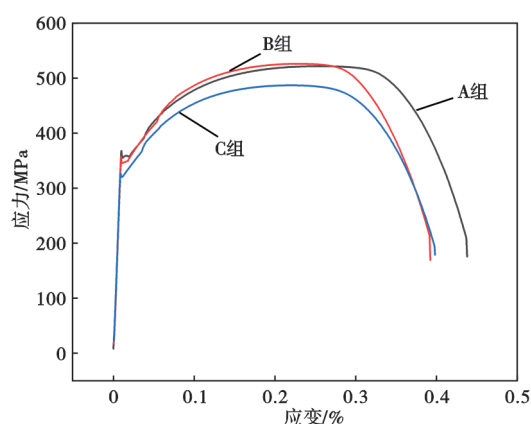


图 9 Fe10Cr10Co 软磁合金三组试样热处理后应力应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of the three groups of Fe10Cr10Co soft magnetic alloy samples after heat treatment

于参照组。表 4 为不同锻造工艺试样在相同退火工艺处理后的维氏硬度, 试验组性能均优于参照组, 为确保测试结果的可靠性, 所有硬度数据均在热处理试样上不同位置打点五次, 取其平均值作为最终测试结果。由表 3 可知, 从抗拉强度分析, B 组 527.3 MPa > A 组 522.0 MPa > C 组 488.2 MPa, 这表明 B 组在拉伸过程中表现出更强的抗变形能力。从屈服强度分析, A 组 345.0 MPa > B 组 340.0 MPa > C 组 319.0 MPa, 这表明 A 组材料在承受外力时能够维持更长的弹性变形阶段, 从而减少塑性变形的发生。从伸长率分析, A 组 44.0% > C 组 39.9% > B 组 39.3%, 这表明, A 组具有最好的塑韧性, 能够承受较大的形变而不发生断裂。由表 4 可知, B 组 166.4 HV > C 组 165.0 HV > A 组 162.2 HV, 这表明, B 组具有更强的抗变形能力。

综合以上力学性能指标, A 组综合性能最优; B 组试样则具有较高的硬度和抗拉强度; C 组的综合

力学性能较差, 其适用性受到限制。

将表 3、表 4 的力学性能测试数据与图 8 中的热处理后显微组织进行对比分析, 可知, B 组试样的组织细小但均匀性较差, 强度较高, 但塑韧性较差。这是由于 B 组试样通过晶界强化提高了合金强度。但是由于组织均匀性较差, 局部较大的晶粒在塑性变形过程中难以协调变形, 从而导致塑韧性降低。C 组试样中粗大晶粒削弱了晶界强化效应, 导致强度降低。但均匀在组织使其在塑性变形过程中能够提供更好的变形协调能力, 从而提高合金伸长率^[13]。相比之下, 晶粒细小且均匀的 A 组表现出更好的综合性能。

表 3 Fe10Cr10Co 软磁合金三组试样热处理后室温拉伸性能统计表

Table 3 Statistical data of room-temperature tensile properties for the three groups of Fe10Cr10Co soft magnetic alloy specimens after heat treatment

试验分组	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
A	522.0	345.0	44.0
B	527.3	340.0	39.3
C	488.2	319.0	39.9
参照组	450.0	280.0	20.0

3.3 Fe10Cr10Co 软磁合金磁性能

表 5 为不同锻造工艺试样经热处理后的室温磁性能数据。为确保测试结果的可靠性, 所有磁性能数据均通过多次测量并取平均值的方法进行处理, 试验组磁性能均优于参照组。由表 5 可知, 从磁感应强度来分析, C 组略优于 A 组和 B 组, 这表明, C 组具有更强的磁化能力; 从最大磁导率来分析, C 组 5.288 mH/m > A 组 4.162 mH/m > B 组 3.283 mH/m, 表明 C 组的磁导性能较强, 能够更高效地导通磁场;

表 4 Fe10Cr10Co 软磁合金三组试样热处理后维氏硬度统计表

试验分组	实测值					平均值
A	163.0	161.0	162.0	166.0	159.0	162.2
B	165.0	164.0	168.0	167.0	168.0	166.4
C	166.0	164.0	164.0	167.0	164.0	165.0
参照组	-	-	-	-	-	150.0

表 5 Fe10Cr10Co 软磁合金三组试样热处理后室温磁性能
Table 5 Room-temperature magnetic properties of the three groups of Fe10Cr10Co soft magnetic alloy samples after heat treatment

试验分组	磁感应强度 Bm/T			最大磁导率/ (mH·m ⁻¹)	矫顽力/ (A·m ⁻¹)
	8 000	10 000	15 000		
A	1.57	1.62	1.77	4.162	116.5
B	1.64	1.68	1.77	3.283	130.4
C	1.65	1.69	1.78	5.288	107.5
参照组	-	-	1.70	2.800	160.0

从矫顽力来分析, C 组最低, 仅为 107.5 A/m, 这表明, C 组在退磁过程中所需的磁场强度较小, 磁性能更为优异, 适用于对低矫顽力要求较高的应用场景。

将试样宏观性能与热处理后的微观组织进行对比分析, 发现材料的软磁性能矫顽力与晶粒尺寸呈负相关关系, 磁导率与晶粒尺寸呈正相关关系^[10], 粗大且均匀的显微组织特征有利于磁畴的连续排列和稳定分布, 合金的可获得优异的磁性能。

结合三组试样的制备过程进行分析可发现, 合金的锻造过程, 也是动态再结晶的过程。一火高温、大锻比在合金内部形成大量细小的新晶粒, 增加了晶界密度。而微米尺度晶粒的晶界能够增强磁畴壁的钉扎效应。此外, 再结晶过程中形成的低能晶界(如小角度晶界)对磁畴壁的钉扎作用较弱, 而高能晶界(如大角度晶界)则会显著阻碍磁畴壁的运动^[17], 从而对合金的软磁性能产生不利影响。然而, 二次低温小变形量锻造, 在加热过程中完成静态再结晶, 使晶粒有限度的长大, 降低晶界密度; 在变形过程中也能够有效破碎粗大晶粒, 进一步优化组织的均匀性。且锻后冷速对微观组织的最终状态具有重要影响。快冷组织中保留了大量锻后畸变晶、残余应力和位错密度, 增强了磁畴钉扎效应。而缓冷则有助于应力释放、静态再结晶和晶粒长大, 得到细小均匀的组织, 从而降低磁畴钉扎效

应。如 A 组试样, 锻后缓冷组织及热处理后的组织均匀度都较高, 减少了磁畴壁的钉扎效应, 提升了磁感应强度^[18]; 均匀的组织还降低了磁畸变, 提高了最大磁导率^[19]; 一致的磁畴结构使得材料在外加磁场作用下更易于磁化和退磁, 降低了矫顽力^[20]。相比之下, B 组试样平均晶粒尺寸最小, 磁畴在外场作用下发生的偏转会受到晶界阻碍, 增加了磁畴壁运动所需的能量消耗, 使得材料软磁性能矫顽力提高, 磁导率降低^[21]。

Fe10Cr10Co 软磁合金力学性能、磁性能与锻造工艺关系较为紧密。一火锻比为 4.0、二火锻比为 2.56 时, 砂冷处理的试样在热处理后组织均匀度最高, 平均晶粒尺寸较小 18.19 μm, 表现出最高的屈服强度 345.0 MPa 和伸长率 44.0%。在一火锻比为 3.16、二火锻比为 3.24 的试样, 空冷处理的试样在热处理后组织均匀度最差, 平均晶粒尺寸较小 13.66 μm, 表现出最高的抗拉强度 527.3 MPa。在一火锻比为 3.16、二火锻比为 3.24 的条件下, 砂冷处理的试样组织较为均匀, 平均晶粒尺寸较大 33.01 μm, 表现出最高的磁感应强度、磁导率 5.288 mH/m 和最低的矫顽力 107.5 A/m。

4 结论

综上所述, 一火高温大锻比、二火低温小锻比, 锻后缓冷的工艺组合, 在合理细化晶粒的同时, 也提高了合金组织均匀度, 实现软磁合金的力学性能及磁性能的协同优化。

1) 一火锻比为 4.0, 二火锻比为 2.56 的试样经过砂冷处理的试样在热处理组织均匀度最高, 平均晶粒尺寸较小 18.19 μm, 表现出优异的综合性能, 抗拉强度 522.0 MPa, 屈服强度 345.0 MPa, 伸长率 44.0%, 最大磁导率 4.162 mH/m, 矫顽力 116.5 A/m。这种工艺组合在保证较高力学性能的同时, 显著提升了磁性能, 适用于对综合性能要求较高的应用场景。

2) 一火锻比为 3.16, 二火锻比为 3.24 的试样经

过空冷处理的试样在热处理后组织均匀度最差,平均晶粒尺寸较小 13.66 μm 。抗拉强度 527.3 MPa,屈服强度 340.0 MPa,伸长率为 39.3%,最大磁导率 3.283 mH/m,矫顽力 130.4 A/m。该组试样力学性能较高,但磁性能最低。

3)一火锻比为 3.16,二火锻比为 3.24 的试样经过砂冷处理的试样组织较为均匀,平均晶粒尺寸较大 33.01 μm ,抗拉强度 488.2 MPa,屈服强度 319.0 MPa,伸长率 39.9%,最大磁导率 5.288 mH/m,矫顽力 107.5 A/m。该组试样力学性能较低,磁性能最好。

参考文献

- [1] 田民波. 磁性材料[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [2] 刘佑华. 精密合金专集第一部分:软磁合金[J]. 金属材料研究,1994,20(4):1-49.
- [3] Silveyra J M, Ferrara E, Huber D L, et al. Soft magnetic materials for a sustainable and electrified world[J]. Science, 2018, 362(6413): eaao0195.
- [4] Li F C, Liu T, Zhang J Y, et al. Amorphous-nanocrystalline alloys: Fabrication, properties, and applications[J]. Materials Today Advances, 2019, 4: 100027.
- [5] 朱银存,宋长江,田玉新. FeCr16耐蚀软磁合金中 σ 相析出的影响因素[J]. 特殊钢,2025,46(2):62-66.
- [6] 孙玉魁. 金属软磁材料及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1986.
- [7] 万胜狄. 金属塑性成形原理[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [8] 陈 涛. FeCoNi系多主元合金基复合材料的组织、力学与磁性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2023.
- [9] 王永飞. 磁场和应力场热处理对纳米晶FeSiBCuNb合金微观结构与软磁性能的影响[D]. 广州:华南理工大学,2022.
- [10] Talaat A, Suraj M V, Byerly K, et al. Review on soft magnetic metal and inorganic oxide nanocomposites for power applications [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 870: 159500.
- [11] 宋维锡. 金属学[M]. 2版. 北京:冶金工业出版社,1989.
- [12] 严 密,彭晓领. 磁学基础与磁性材料[M]. 2版. 杭州:浙江大学出版社,2019.
- [13] Xu J, Liu X, Wang Y F, et al. Ultrafine-grained microstructure and controllable magnetic domains in Fe-based nanocrystalline alloys with excellent magnetic properties induced by hot isostatic pressing [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 902: 163887.
- [14] Herzer G. Modern soft magnets: Amorphous and nanocrystalline materials [J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 718-734.
- [15] Ozturk S, Icin K, Gencturk M, et al. Effect of heat treatment process on the structural and softmagnetic properties of Fe38Co38Mo8B15Cu ribbons [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2020, 527: 119745.
- [16] Bruno N M, Adoo N A, Meakins E, et al. The effect of stress-annealing on the mechanical and magnetic properties of several Fe-based metal-amorphous nano-composite soft magnetic alloys [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2023, 600: 122037.
- [17] Mahdavi A, Mashreghi A R, Hasani S, et al. Reobservations of recrystallization and its effect on mechanical and magnetic properties in a severely cold-rolled Ni-based soft magnetic alloy [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2022, 67(2): 703-717.
- [18] Li H, Wang A D, Liu T, et al. Design of Fe-based nanocrystalline alloys with superior magnetization and manufacturability [J]. Materials Today, 2021, 42: 49-56.
- [19] Luo Q, Li D, Cai M, et al. Excellent magnetic softness-magnetization synergy and suppressed defectactivation in soft magnetic amorphous alloys by magnetic field annealing [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 116: 72-82.
- [20] Wan F P, He A N, Zhang J H, et al. Development of FeSiBNbCu nanocrystalline soft magnetic alloys with high bs and good manufacturability [J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 45(10): 4913-4918.
- [21] Mao Yuchen, Zhu Zhenghou, Zhao Hui. Microstructures and soft magnetic properties of Fe73.5Cu1Nb3-xSi13.5B9Yx (x=0-1.5) alloys [J]. J. Rare. Earths., 2021, 39: 1402-1408.