

· 综述 ·

软磁铁素体不锈钢性能调控与制备的研究进展



王嵘坤, 张曦月, 张鑫瑜, 李万明
(辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051)

摘要:随着自动控制技术向气-液-油混合介质、温压交变等复杂环境深度拓展,软磁铁素体不锈钢因兼具优异的软磁性能与耐蚀性成为关键功能材料。然而,其多目标性能优化存在显著矛盾,制约了高端应用。基于 430 系列不锈钢的典型特性,揭示了铬含量对磁性能与耐蚀性的拮抗效应,提出通过控制超低间隙原子($C+N \leq 100 \times 10^{-6}$)、添加稳定化元素(Ti/Nb)及优化热处理工艺等方式实现成分-组织协同调控。其次,分析凝固质量与晶界工程对疲劳强度与抗皱性能的提升机制,进一步聚焦金属注射成形(MIM)工艺,阐明其在高精度复杂零件制备中的核心优势—公差 $\pm 5 \mu\text{m}$ 、磁性能误差 $< 5\%$,并结合 Indo-MIM 后热处理技术等案例论证其规模化应用的可行性。最后指出,未来研究需构建成分-组织-性能定量模型以突破多目标性能矛盾,并通过 MIM 工艺与模拟技术的深度融合,推动软磁铁素体不锈钢在新能源汽车、微型传感器等领域的产业化突破。

关键词:软磁不锈钢; 铁素体; 性能调控; 金属注射成形

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N250538 **中图分类号:**TG142. 77

Research Progress on Performance Regulation and Preparation of Soft Magnetic Ferrite Stainless Steel

Wang Rongkun, Zhang Xiyue, Zhang Xinyu, Li Wanming
(School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China.)

Abstract: As automatic control technology deeply expands into complex environments such as gas-liquid-oil mixed media and alternating temperature-pressure conditions, soft magnetic ferritic stainless steel has become a key material due to its excellent soft magnetic properties and corrosion resistance. However, the optimization of its multi-objective performance presents significant contradictions, restricting its high-end applications. This paper, based on the typical characteristics of the 430 series stainless steel, reveals the antagonistic effect of chromium content on magnetic properties and corrosion resistance. It proposes to achieve synergistic regulation of composition and microstructure by controlling ultra-low interstitial atoms ($C+N \leq 100 \times 10^{-6}$), adding stabilizing elements (Ti/Nb), and optimizing heat treatment processes. Secondly, it analyzes the mechanisms by which solidification quality and grain boundary engineering enhance fatigue strength and anti-wrinkling property. It further focuses on the Metal Injection Molding (MIM) process, clarifying its core advantages in the preparation of high-precision complex parts—tolerance $\pm 5 \mu\text{m}$, magnetic property deviation $< 5\%$. It also demonstrates the feasibility of its large-scale application through cases such as Indo-MIM post-heat treatment technology. Finally, it points out that future research needs to construct a quantitative model of composition-microstructure-performance to break through the contradictions in multi-objective performance. Through the deep integration of MIM technology and simulation technology, it aims to promote the industrial breakthrough of soft magnetic ferritic stainless steel in new energy vehicles, micro-sensors, and other fields.

Key Words: Soft Magnetic Stainless Steel; Ferritic; Performance Regulation; Metal Injection Molding

随着智能装备向温变、腐蚀、高频电磁场耦合等复杂环境深度拓展,软磁铁素体不锈钢因兼具低磁滞损耗、高耐蚀性及成本优势,成为深海传感器、磁悬浮推进装置、工业机器人电磁阀等核心部件的首选材料。与如硅钢、坡莫合金等传统软磁材料相比,软磁铁素体不锈钢虽然在饱和磁感应强度等磁

性能方面稍逊,但其卓越的耐腐蚀性能使其在气-液-油混合介质、温压交变等复杂环境中具有不可替代的优势。软磁铁素体不锈钢通过成分优化和工艺创新,可实现软磁性与耐蚀性的平衡,突破传统材料的局限,体现材料科学的先进性。

尽管铁素体不锈钢自 20 世纪 70 年代起已得到

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(52374338); 辽宁科技大学研究生科技创新项目(LKDYC202407)

作者简介: 王嵘坤(1999—),男,硕士,研究生; **E-mail:** wrk975@126.com; **收稿日期:** 2025-09-09

通信作者: 李万明(1985—),男,博士,教授; **E-mail:** liwanming_2004@126.com

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

广泛应用,但并未被视作传统意义上的软磁材料。进入 21 世纪后,随着不锈钢冶炼技术的不断发展,可将碳、氮含量降至极低水平^[1],以及对其磁性能的深入研究和持续优化,让这种不锈钢逐渐崭露头角^[2],然而,其多目标性能优化仍面临严峻挑战^[3-5]。铬含量升高虽可提升耐蚀性,却导致矫顽力急剧增加;晶粒细化虽能改善抗皱性能,但晶界密度增加反而加剧腐蚀敏感性;连铸-热轧的传统制备工艺因组织控制均匀性差、公差控制粗放,难以满足复杂微型零件的精密化需求;加工和热处理的参数匹配性不足,造成磁导率和铁损性能波动。以上问题根源在于合金制备过程中多尺度调控机制不明确,缺乏从冶金提纯到组织调控的全流程协同优化体系。

针对以上问题,阐述铁素体不锈钢的成分及性能特点,进而提出跨学科协同优化框架。首先,基于热力学计算与机器学习,构建多元合金成分设计窗口;其次,通过金属注射成形(MIM)工艺与晶界工程协同提升材料综合性能;最终,结合国产多尺度模拟平台,实现从粉末流动到晶粒演化的全流程精准预测。研究结果将为软磁铁素体不锈钢的高端应用提供理论支撑,并推动 MIM 技术在国内精密制造领域的产业化突破。

1 软磁铁素体不锈钢的成分及性能要求

1.1 软磁铁素体不锈钢的分类

铁素体不锈钢以体心立方晶格结构和铁素体组织为主要特征,其分类见表 1^[6-7]。铬是不锈钢中的基础元素,通过固溶强化和钝化膜形成机制主导铁素体不锈钢的性能。铬极易获得,又易以废钢的形式进行循环利用。铁素体不锈钢铬含量通常介于 10.5%~30%,表 2 列出了不同铬含量划分的铁素体不锈钢典型钢种^[2-3,5]。

然而,低铬型不锈钢虽具有较低矫顽力,但其耐蚀性仅适用于温和环境,如 TSZ410 不锈钢经 128 d 的中性盐雾试验,钢板的单位面积质量损失为 287.09 g/m²,腐蚀速率为 0.082 mm/a^[6];高铬型不锈钢虽耐蚀性接近奥氏体钢^[7-8],却因 σ 相析出倾向加剧导致磁性性能恶化,严重制约了其在复杂电磁-腐蚀耦合环境中的应用。可见,铬含量的增加虽可提升合金耐蚀性,却也导致矫顽力显著升高,磁导率下降,形成典型的性能矛盾。

1.2 软磁铁素体不锈钢的性能要求

当下市场镍价高而易变,由于铁素体不锈钢对镍资源的依赖性极低以及具有出色的耐腐蚀和抗高温氧化性能,有关铁素体不锈钢的品牌研发和生产工艺研究越来越受到企业的重视。同时,铁素体不锈钢具有的软磁性已经成为新的增长点,全球主要厂商通过差异化成分设计实现性能突破,表 3 介绍了国际著名的软磁不锈钢生产公司及其标志性产品。

美国卡彭特公司的 430 系列软磁不锈钢在全球范围内获得了广泛的认可,在涉及性能对比时,多以此系列材料作为基准,特别是 430FR 型号,其影响力不言而喻,表 4 和表 5 分别列出了该公司给出的软磁不锈钢的化学成分和性能参数^[3]。由于不同国家和组织间的法定标准不同,对铁素体不锈钢的牌号命名存在一些差异,但总体而言指代的是一种合金,各国牌号名称转换对照表见表 6^[9-10]。

全球主要厂商通过差异化成分设计实现性能突破。美国卡彭特公司的 430FR 钢通过添加 $w[\text{Si}]$ 为 1%~1.5% 优化磁畴结构,使 H_c 降低至 95 A/m;德国 ZAPP 公司对应的 1.4105 钢则在此基础上采用 $w[\text{Mo}]$ 为 0.3% 合金化,在维持磁导率($\mu_m \geq 1\ 200$)的同时,提升合金耐酸性介质腐蚀能力。相比之下,国内产品虽在磁性能方面接近国际水平,但因洁净

表 1 铁素体不锈钢分类
Table 1 Classification of Ferritic Stainless Steels

$w[\text{Cr}]/\%$	耐蚀性	$w[\text{C}+\text{N}]/10^{-6}$
低铬型 10.5~16	409, 410, 420 适用温和环境	常规铁素体不锈钢 >300
	430 系列 与水间歇接触等环境耐蚀性良好	超低碳铁素体不锈钢 ≤300
中铬型 16~25	430Ti, 439, 441 加钛、铌等元素焊接、成型性能更好	高纯铁素体不锈钢 ≤200
	434, 436, 444 加钼,耐局部腐蚀能力接近 316 钢	超纯铁素体不锈钢 ≤100
高铬型 ≥25	442, 445, 447 高铬含钼,增强耐蚀性及抗氧化性	

表 2 铁素体不锈钢典型钢种

Table 2 Typical grades of ferritic stainless steel

w[Cr]/%	典型钢种
8~13	0Cr13;00Cr13Si2;00Cr13Si3;AISI405
14~18	00Cr17Si3;00Cr17Si2S;00Cr18Mo2;0Cr18Si2Mo2;430; 430F;430FR;18-FM;MG2;MG4;1.4105IL
19~25	K-M45;1Cr25Ti;00Cr26Ni6Mo4Cu1Ti
26~30	00Cr30Mo2;00Cr30Mo2;1Cr28Ti

度控制波动及织构优化不足,最终导致加工成型合格率存在差距。

2 软磁铁素体不锈钢性能的影响因素及调控方式

2.1 熔炼与凝固过程的影响

2.1.1 纯净度的影响

铁素体不锈钢的磁性能对间隙原子及非金属夹杂物极为敏感。研究表明,C、N原子固溶于铁素体基体中会显著增加畴壁钉扎效应^[11],增大矫顽力。其机制在于,C原子通过促进马氏体相变引入高矫顽力相^[12],而N原子在晶界处偏聚形成Cr₂N析出物^[13],阻碍畴壁移动,导致磁滞损耗增加。此外,根据技术磁化理论,由于存在夹杂物、晶界或位错缠结等钉扎位点,畴壁在随时间变化的磁场下运动并不平滑,并以不连续和不可逆跳跃的形式发生^[14],而当非磁性析出物其尺寸与畴壁厚度相近时,会产生最大的钉扎效应^[15]。

为降低间隙原子危害,现代冶炼技术一般将w[C+N]稳定控制在150×10⁻⁶之内^[16]。日本大同特殊钢公司利用AOD-VCR工艺生产含铬18%的铁素体不锈钢,钢中w[C]、w[N]可分别达到(20~40)×10⁻⁶、(60~80)×10⁻⁶的极低水平^[17-18]。然而,纯净度的

提升意味着冶炼能耗和铬元素烧损增加^[19-20],且精炼过程需防引入二次氧化夹杂,将面临成本与工艺稳定性挑战。对此,有学者开发了如REDA的新型精炼装置^[21],并提出了分步冶炼策略^[22],兼顾效率与成本。

综上所述,调控铁素体不锈钢的首要目标是控制超低间隙原子和夹杂物的含量。

2.1.2 凝固质量的影响

铁素体不锈钢的凝固质量直接决定其后续加工性能与服役可靠性。对于铁素体不锈钢,特别是超纯铁素体不锈钢来说,其固-液两相的温度区间小,不利于枝晶的充分发展。传统连铸工艺因凝固前沿存在较高的温度梯度,从而妨碍等轴晶的生长,导致铁素体不锈钢柱状晶发达,甚至产生皱褶缺陷。

为提高铁素体不锈钢的等轴晶率,太钢、新日铁等企业针对430钢尝试了施加电磁搅拌、机械振动、加压浇铸、离心浇铸以及添加合金孕育剂等工艺^[23],其根本原理是加速凝固前沿的流体流动,使枝晶熔断、剥落和输送,从而增加晶粒的数量。然而目前看来,通过以上方法提高等轴晶率的效果有限,对设备及工艺的要求较高,在常规生产过程中难以稳定达标。此外,铁素体在高温下延展性好,枝晶不易断裂,因此,通过枝晶的断裂形成晶核的目的难以达到。因此,为了能够稳定高效地生产高等轴晶率的铸坯,冶金工作者仍在不断地探索细化连铸坯凝固组织的新工艺,其中利用钢中第二相作为非均质形核核心的方法引起了广泛的关注^[24-25],尤其是Ti、Nb等稳定化元素的加入^[26-28]。

表 3 国际软磁不锈钢生产公司及系列产品

Table 3 International Soft Magnetic Stainless Steel Production Companies and Their Product Lines

生产单位	系列	典型钢号
美国卡彭特(Carpenter)公司	430	430;430F;430FR
日本东北特殊钢有限公司	K-M	K-M31;K-M35FL;K-M35CS;K-M35ST;K-M41F;K-M62F;K-M45;K-M57
德国萨普公司(ZAPP)	ZAPP	1.4105;1.4016;1.4125;1.4113IM
意大利华宝钢厂(Valbruna)	MG	MG2;MG3;MG4;MG5;MGC;MGT

表 4 Carpenter公司430系列软磁不锈钢的化学成分(质量分数)

Table 4 Chemical composition of Carpenter Company's 430 series soft magnetic stainless steel

钢号	Cr	C	Si	Mn	Mo	P	Ni	S
430	≤17.50	≤0.015	≤0.90	≤0.40	≤1.75	≤0.02	≤0.20	-
430F	17.25~18.25	≤0.065	0.03~0.70	≤0.80	≤0.50	≤0.03	≤0.60	0.25~0.40
430FR	17.25~18.25	≤0.065	1.00~1.50	≤0.80	≤0.50	≤0.03	≤0.60	0.24~0.40
XM-27	25.00~27.50	≤0.01	≤0.40	≤0.40	1.00~1.50	≤0.02	≤0.50	-

表 5 Carpenter 公司 430 系列 软磁不锈钢的性能参数
Table 5 Performance parameters of Carpenter Company's 430 series soft magnetic stainless steel

钢号	状态	H_c ($A \cdot m^{-1}$)	B_f (T)	μ_m	HRB
430F	未退火	400~500	0.40~0.85	300~500	>92
	轧机退火 PG	360~480	0.30~0.85	400~700	82~91
	轧机退火 CG	240~400	0.20~0.85	500~1 100	75~82
	完全退火	120~200	0.20~0.85	1 100~2 400	72~80
430FR	未退火	400~560	0.20~0.65	300~500	>92
	轧机退火 PG	320~440	0.25~0.80	500~800	82~91
	轧机退火 CG	95~200	0.25~0.80	1 100~2 500	80~88
	完全退火	95~200	0.25~0.80	1 100~2 500	80~88

2.2 热加工工艺的影响

热处理工艺是铁素体不锈钢综合性能优化的核心环节。通过减少或消除 σ 相脆性、475 °C 脆性及高温脆性等问题引起的不良影响,同时,降低加工过程中产生的应力和应变^[29-31]。

徐临超等^[32]研究了不同热处理下 430F 铁素体不锈钢的力学性能,变化曲线如图 1 所示,经高温退火处理的 Y2 试样抗拉强度明显下降,硬度却没明显降低,伸长率仅提高 14%。分析是由于较多的 σ 相存在影响了材料的拉伸性能。 σ 相属于脆性相,发生塑性变形时 σ 相优先在晶界处析出并产生塞积,对晶粒间的位错运动产生阻碍,位错滑移的距离变短,产生强化作用^[33]。

当铁磁材料受到外界温度作用时,磁畴结构会从各向异性逐渐趋于易磁化平行于磁场取向^[34]。图 2 为 00Cr12MoS 钢在不同温度下的 B-H 曲线及磁畴分布图^[35]。由图 2 可知,随着加热温度的升高,B-H 曲线初期磁导率增大,材料磁化变得更加灵敏。当材料未受到外加磁场作用时,磁畴属于无序状态,不同晶粒间磁畴取向不同,材料未表现出明显磁性,随着外加磁场的增大,磁畴逐渐由无序转换

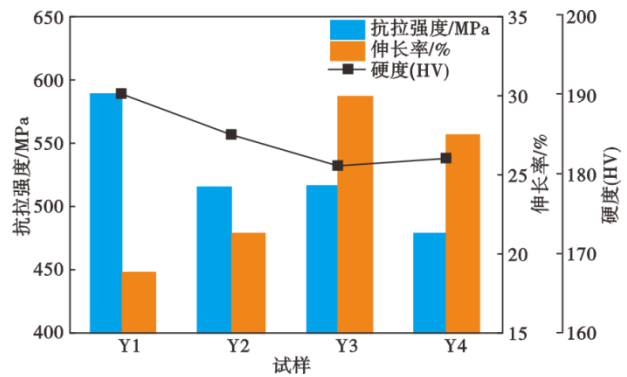


图 1 不同热处理工艺下 430F 不锈钢的拉伸性能变化曲线
Fig. 1 Variation curve of tensile properties of 430F stainless steel under different heat treatment processes

为有序状态,最终磁畴方向平行于磁场强度方向,达到饱和磁化状态。

铁素体不锈钢磁性能的优劣主要取决于其微观结构,由于在金属形变时伴随着组织结构的改

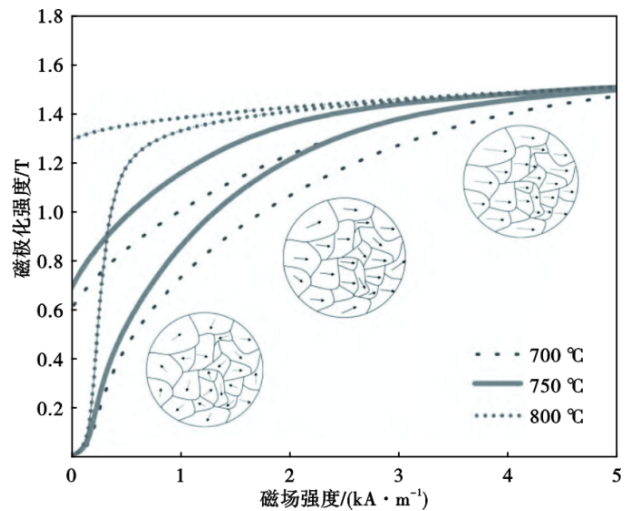


图 2 00Cr12MoS 钢在不同温度下的 B-H 曲线及磁畴分布
Fig. 2 B-H curves and magnetic domain distribution of 00Cr12MoS steel at different temperatures

表 6 各国铁素体不锈钢的牌号对照

Table 6 Comparison of ferritic stainless steel grades across countries

中国(GB/T)	美国(ASM)	日本(JIS)	欧标(EN)	国际标准(ISO)
06Cr13Al	405	SUS405	1.4002	X6CrAl13
022Cr11Ti	409	SUH409	1.4512	X6CrTi12
022Cr12	-	SUS410 L	-	-
10Cr17	430	SUS430	1.4016	X6Cr17
Y10Cr17	430F	SUS430F	1.4105	X6CrS17
10Cr17Mo	434	SUS434	1.4113	X6CrMo17-1
10Cr17MoNb	436	-	1.4526	X6CrMoNb17-1
022Cr18Ti	439	SUS430 LX	1.4510	X3CrTi17
019Cr19Mo2NbTi	444	SUS444	1.4521	X6CrMoTi18-2

变,因此,绝大多数金属材料要进一步进行退火处理,在回复与再结晶的过程中实现对材料组织和性能的优化。

2.3 性能调控方式与工艺

2.3.1 软磁性能调控

铬是不锈钢中最基本的合金元素,在钢中的作用多元且重要,对不锈钢的软磁性能同样有着多重影响。在对比不同 Cr 含量钢样的磁性能差异后,Hamataka 和 Yohei 等^[36-37]发现,随着铬元素含量的逐渐增加,钢样的磁滞回线呈现出一种逐渐变宽且缩短的趋势,如图 3 所示,这一变化意味着 μ 和 B_s 的降低以及 H_c 的增高,对钢的磁性能产生一定损害;Yohei 等^[37]在其报告中补充表明,区别于直流磁场,施加高频交流磁场时,由于涡流效应的存在,仅依靠降低 Cr 含量对磁性能的改善效果并不明显。胡耕辅等^[38]指出,由于 Cr 偏析促进了 σ 相的析出,是显著降低 FeCr16 合金磁性能的关键原因,可以认为,通过提高电渣重熔过程的冷却速率,适当提高固溶温度和时间,使成分均匀化,能避免 σ 相的析出。

马圆圆等^[39]阐述了热处理对 0Cr13 钢磁性能的影响,指出钢中铁素体量多则软磁特性好,马氏体量多则强度高,磁性能和强度存在一定的矛盾关系;陈德利等^[35]研究了热处理工艺对 00Cr12MoS 软磁不锈钢磁性能的变化规律,说明均匀的组织能增强不锈钢的磁属性;姜方等^[40-42]分别论证了合理的热处理温度对促进 0Cr17Mo2S、Y0Cr17SiS 和 10Cr17 不锈钢组织均匀的显著效果。

综上所述,铁素体不锈钢的软磁性能首先是基于合金的化学成分;其次 C、N 等间隙原子和非金属夹杂物会对其产生极大恶化影响;而不锈钢的软磁性最终是由热处理工艺赋予的。

2.3.2 耐腐蚀性调控

铁素体不锈钢与室温下的纯铁具有相同的体心立方(BCC)晶体结构,具有铁磁性。虽然其软磁性能稍逊于常见的软磁材料(如电工钢),但在面对腐蚀性环境时,就显现出独特且不可替代的功能性。

不锈钢的磁性受原子结构影响,而耐蚀性主要与化学成分有关,即有特定的铬含量。铬元素能促进铁素体结构形成,这种体心立方结构使原子排列紧密,不易发生晶间腐蚀或应力腐蚀等现象;此外,铬元素的存在能够降低铁元素的化学电位,在合金

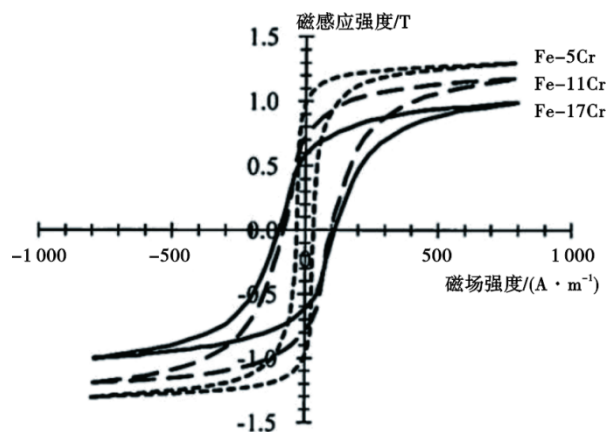


图 3 不同 Cr 含量软磁不锈钢的磁滞回线

Fig. 3 Hysteresis loops of soft magnetic stainless steels with different Cr contents

表面形成一层致密的氧化物膜,有效地防止钢的进一步腐蚀。张艳等^[43]研究了铬含量对铬锰钢耐腐蚀性的影响,随着铬含量的增加,铬锰钢在酸性溶液中的腐蚀速率降低;但当铬质量分数为 14% 和 15% 时,腐蚀速率无显著差异。Ma 等^[44]的研究表明,随着 Cr 的加入,再结晶温度升高,促进了 σ 相的沉淀,超级铁素体不锈钢的耐点蚀性有所提高。总体而言,铬的加入能提高其耐腐蚀性,但影响逐渐减弱。

一般而言,晶粒越大意味着不锈钢的晶界面积越大,这在一定程度上增加了腐蚀电池形成的可能性,另外大晶粒通常包含更多的夹杂物和析出物,从而加速腐蚀过程。张向军等^[45]的研究表明,铁素体不锈钢的点蚀电位值(E_{pit})随晶粒尺寸(d)增大而大幅提高,如图 4 所示;王明军^[46]的研究说明 Ce 能细化晶粒,Ce 的加入能降低 434 不锈钢的敏化程度,晶间腐蚀明显得到抑制;刘华强等^[47]的研究表明,随着 Cu 含量的增加,由于其在铁素体晶界的富集而造成的晶界能降低,有利于铁素体晶粒的细化;饶新军等^[48]总结了稀土在铁素体不锈钢中的作用,说明稀土能降低钢中晶粒尺寸,净化其晶界,对钢的金相组织起到明显的细化作用。

姚云霞等^[49]研究了合金元素(Cr、Mn、Cu、Si、Al、Ni、Ce)对铁素体不锈钢耐蚀性能的影响,结果表明,Cr、Mn、Cu、Si 含量的增加改善了抗腐蚀性能,其中以 Cu 对提高腐蚀电阻率最有效。该研究的结论存在两方面局限:其一,实验采用打磨抛光后的样品及非氧化性腐蚀溶液,此条件会抑制不锈钢氧化膜的形成或将其完全溶解,导致结果无法有效反映

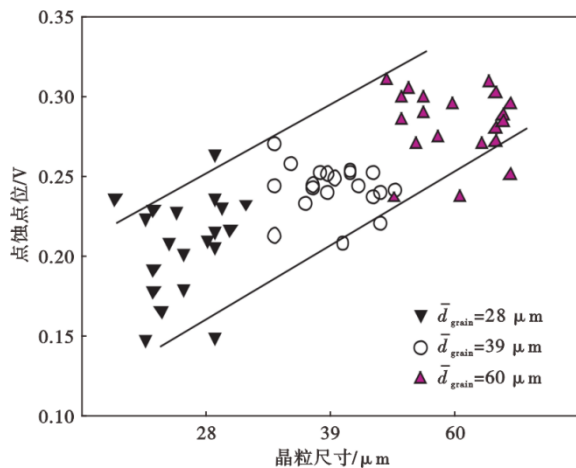


图4 实验钢晶粒尺寸与点蚀电位的关系

Fig. 4 Relationship between grain-size and pitting potential of tested steel

其在实际应用中的耐蚀性能;其二,仅依据腐蚀电位与腐蚀电流,不足以全面、准确地评估不锈钢的耐蚀性。

作者认为,在评价不锈钢等钝性材料的耐蚀性能时,由于在工程应用中一般会将这些材料做钝化处理后再使用,则应当以评价不锈钢钝化区的性能为基准。而实验方法可先采用盐雾试验结合失重测试进行表征,再利用动电位扫描法测绘极化曲线,通过参考击穿电位和维钝电流两个参数表征不锈钢耐蚀性能,而不是单纯去比较腐蚀电位和腐蚀电流。

2.3.3 耐疲劳性调控

软磁铁素体不锈钢耐疲劳性的意义在于其能够在重复应力或应变的作用下,长期保持良好的性能和稳定性。

Men等^[50]的研究表明,439不锈钢的疲劳强度与抗裂性成反比,碳化物析出和溶质原子扩散导致

铁素体不锈钢疲劳强度线性下降,铁素体晶界弱化是高温下疲劳强度降低的关键因素;Yang等^[51]定量揭示了晶界特性对430钢晶界疲劳裂纹形成的影响,并阐明晶界的几何排列与黏附滑移带和应力轴之间的关系;在之后的研究中,Yang等^[52]还探讨了晶界显微组织对SUS430钢疲劳裂纹扩展过程的影响,裂纹周围质量显微图、反极图和晶界显微图说明疲劳裂纹路径中晶界的比例较高;Kobayashi等^[53]的研究表明,对430不锈钢的晶粒细化和引入高比例的小角度晶界(LAGB)可以获得更高的疲劳强度和更长的疲劳寿命。

通过采用先进的热处理工艺,可有效控制相变过程进而增强合金的疲劳强度。刘燕等^[54]阐明00Cr22Mo2Ti钢热轧黑卷内圈产生脆性断裂是由于内圈卷曲后在475℃脆性温度区间暴露时间过长生成富Cr的α'相导致475℃脆性;刘俊建等^[55]研究了12Cr12Mo钢经不同热处理工艺后的耐疲劳性能,建立了寿命预测模型;郑世豪等^[56]研究了退火工艺对29Cr-4Mo超级铁素体不锈钢微观组织的影响,如图5所示,说明σ相析出倾向随着退火温度的升高和保温时间的延长而降低,并建立了晶粒长大模型,可预测20Cr4Mo钢在900~1050℃退火后的平均晶粒尺寸。这些研究为优化热处理工艺提供了理论依据,使得软磁铁素体不锈钢在保持优良耐蚀性能的同时,耐疲劳性能也得到了显著提升。此外,如喷丸强化^[57]和激光冲击^[58-60]等表面处理技术也被证明能够有效改善铁素体不锈钢的残余应力,从而提高其耐疲劳性能。

综上所述,通过微观结构的调控、加工工艺的改进以及采用先进的表面处理技术,可以显著提高软磁铁素体不锈钢的耐疲劳性能。这些研究不仅为合金的性能优化提供了理论依据,也为实际应用

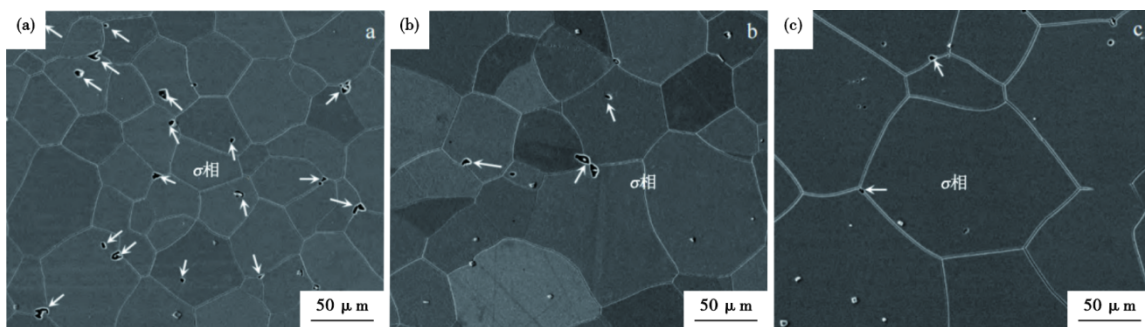


图5 29Cr-4Mo试样在不同退火温度下保温50 min时显微组织:(a) 900 °C, (b) 920 °C, and (c) 950 °C

Fig. 5 SEM microstructures of 29Cr-4Mo samples annealed at different temperatures for 50 min : (a) 900 °C, (b) 920 °C, and (c) 950 °C

提供了技术支持。

2.3.4 抗皱性能调控

以 SUS430 为代表的铁素体不锈钢虽已在市场获得广泛的认可和应用,但其冷成形性能往往不尽如人意,特别是以传统工艺生产的产品难以达到理想水平。

为了解释表面起皱产生的机制,人们从织构^[61-62]、晶粒尺寸^[63-64]、化学成分^[65]以及碳化物尺寸和分布等^[66]进行了探索,随着钢铁冶炼和加工水平提高,如今普遍认为织构是影响表面起皱的关键因素。马晓光等^[67]对比 430 和 430 LR 不锈钢拉伸变形过程中织构诱导起皱行为,说明微观结构的细化和晶体织构的优化使 430 LR 具有更好的抗皱性能。陈安忠等^[68]进一步研究了二轧流程冷轧工艺对 443 钢抗皱性能的影响,表明一轧流程工艺芯部组织存在沿轧向分布的条带状非等轴晶粒,晶粒尺寸偏大,形成明显的晶粒簇,表层与芯部 γ 再结晶织构强度低,且遗留很强的 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 织构;而二轧流程工艺可弱化 α 纤维变形织构,微观晶粒取向分布更加均匀,抗起皱性能更好。Kodukula 等^[69]的研究表明热轧工艺条件在改善铁素体不锈钢微观织构方面的重要性。起皱缺陷往往与材料加工过程中的温度、压力、冷却速度等工艺参数有关^[70],通过优化生产工艺,可以减少或消除起皱现象,进而提高产品质量。

软磁材料的表面质量直接影响磁场分布,尤其是表面缺陷会阻碍磁畴转向和产生局部涡流,从而降低材料磁性能。除此之外,如果不锈钢表面质量差,耐腐蚀性也无法保证。然而,目前对铁素体不锈钢起皱缺陷的研究仅聚焦于钢材的表面质量问题本身,包括用作面板领域时会增加修磨成本。因此,在软磁铁素体不锈钢的成分设计及性能调控的过程中,需要建立体现抗皱性能调控的成分-组织性能定量构效关系,以及一套完整的评估软磁铁素体不锈钢表面质量的检测体系。

2.3.5 易切削性调控

在油、水等弱腐蚀性条件下, $w[\text{Cr}] \geq 8\%$ 不锈钢的腐蚀性已较好, $w[\text{Cr}] \geq 11.5\%$ 时将赋予合金良好的耐蚀性,但含铬量过高则对磁性和加工性不利^[3]。

改善不锈钢易切削性最常见是向钢中加入 S、Pb 和 Te,如 430F 和 410 L 不锈钢就采取了对易切削元素的最佳控制。Sakaizawa 等^[71]研究表明,430F 钢的可加工性不仅随着硫化物量的增加而提高,也受

硫化物的分布和形态的影响,而硫化物的形态可通过调整 Cr 和 Mn 浓度来改变;S 含量过高会降低合金塑性和韧性,形成如 MnS、MoS 等硫化物,这些夹杂物虽能改善易切削性,减少工具磨损,但尺寸普遍偏大且在轧制中形成长条状,影响材料性能和寿命^[32];因此,进一步的热处理工艺是必要的^[72],退火和回火是铁素体不锈钢的主要热处理方式,退火能消除加工内应力,促进再结晶,回火则能增强合金韧性;Sugawara 等^[73]研制了一种以 $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ 代替 MnS 夹杂的易切削软磁不锈钢(K-M38CS),一般钢材中由于 MnS 夹杂物阳极溶解,会在含氯溶液中作为点蚀的起始点,而在 $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ 夹杂物表面形成的 TiO_2 抑制了阳极溶解。通过优化软磁不锈钢的化学成分和热处理工艺,能够显著提升其易切削性。在这一过程中,必须综合考虑易切削性与热加工性之间的相互关系。

3 制备工艺现状分析

近年来,随着精炼技术的发展,由电弧炉(EAF)+转炉式脱碳炉(AOD、K-OBM、MRP)+真空精炼炉(VOD、SS-VOD、VOD-PB、RH-OB、RH-KTB)形成的三步法治炼技术在铁素体不锈钢生产中的应用规模不断扩大^[74-76],实现了对超低碳、氮含量的精确控制。

除此之外,金属注射成形(MIM)工艺开始被应用于软磁铁素体不锈钢的制备^[36-37]。参考 Micro MIM Japan 公司的公开资料,MIM 法相较于传统粉末压制法(PM)优势明显,产品区别见表 7。

表 7 PM 工艺与 MIM 工艺制备产品区别
Table 7 Differences between products prepared by PM process and MIM process

工艺区别	粉末压制法 (PM)	金属注射成形 (MIM)
粉末颗粒尺寸/ μm	75~150	0.5~50
粉末外形/表面质量	不规则且粗糙	接近球状且光滑
烧结后制品密度(相对值)/%	78~85	>98
最小限制产品重量/g	>1	>0.01
最薄厚度/mm	0.5	0.1
最小外径/mm	$\phi 2$	$\phi 0.1$
环境控制	粉尘多	无粉尘
碳含量控制	不易	良好
磁性能(软磁)	精度低、误差大	精度高、误差小

MIM 工艺可以选择多种合金来实现磁性功能的应用,对于 MIM 从业人员最熟悉的莫过于 17-4PH 与 316 L 不锈钢,这两牌号不锈钢普遍出自 MIM 工

艺,表 8 列出其制备有关软磁合金的磁性能供读者参考^[77-82]。

表 8 MIM 工艺合金磁性能表

Table 8 Magnetic Properties of MIM Processed Alloys

合金类别	矫顽力 $H_c / (A \cdot m^{-1})$	最大磁导率 $\mu_m / 10^3$	磁感应强度 B_s / T
SUS 316 L	2.11	<1.05	<0.25
SUS 410 L	160	2.0	1.29
SUS 430 L	140	1.5	1.58
MIM 2200	120	2.0	2.00
Fe-3Si	20~130	4.5~18.0	1.50~2.12
Fe-50Ni	7.5	41.3	1.50
Fe-50Co	80	9.5	2.2

通过 MIM 工艺制备软磁不锈钢最突出的特点是这种方法实现了无磁干扰的生产,有效消除薄壁或轴的变形风险。由于影响软磁不锈钢性能的因素多元且复杂,这就导致所制得的产品性能良莠不齐,而 MIM 工艺对产品磁感值的精确控制,可使得软磁元件的用量可减少且降低电路板重量和发热量,这一点尤为重要。

图 6 为 MIM 与其他工艺的对比,MIM 制品密度虽较 PM 工艺有极大提升,但粘结剂中聚合物的存在依然导致合金无法实现全密度^[82],而相对密度是影响饱和磁感的一个关键特性^[83],对此 Shin 等^[84-86]报道了加入磷可提高该工艺下软磁不锈钢产品的相对密度,进而改善磁性能。成型和烧结过程是 MIM 制品产生缺陷的主要阶段,由于金属粉末和粘结剂之间的比重差异很大,导致金属粉末在模具中移动。这种现象使金属粉末的分布不均匀,进而引发烧结部件产生缺陷和质量差。因此,粉末流动性成为非常值得深入探讨和验证的问题,而最小化此类问题只能依赖生产经验和深入的模拟^[87-88]。尽管目前国内正在努力发展 MIM 计算机模拟的研究,但技术尚不成熟。相比之下,国外的 MIM 计算机模拟技术已较为先进,但由于其技术垄断,相关软件或服务价格十分昂贵。因此,我国迫切需要开发出属于自己的 MIM 模拟软件。

在国际市场中,例如 Micro MIM Japan 公司同时在独创粘合剂系统、开发更细金属粉末、设计超精密模具以及采用先进的脱脂和烧结技术方面做出了大量工作,以此具备了较强的竞争优势;Indo-MIM 公司作为世界最齐全的 MIM 技术方案提供商,其部分产品实现了后 MIM 工艺,即具有进行热等静压(HIP)等后热处理的选项,可进一步满足产品在

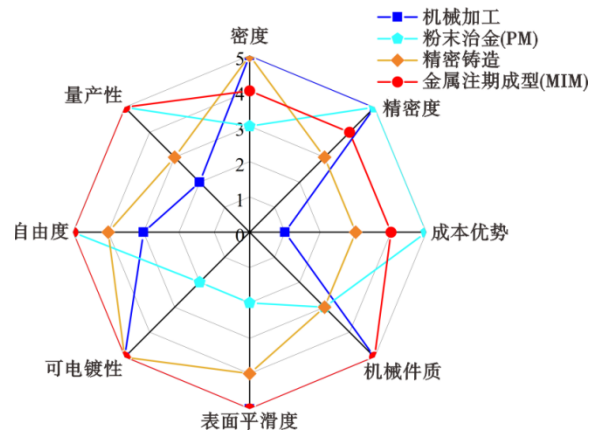


图 6 MIM 与其他工艺的综合性能对比

Fig. 6 Comprehensive performance comparison between MIM and other processes

极苛刻应用场景的性能;Dou Yee Technologies 公司实现了微注射成型(μ -MIM)工艺,与常规的注塑成型方法相比,成本更低,产量更大,精度更高,公差可达 $\pm 5 \mu m$,并且该公司目前正在进行高密度粉末冶金开发,这种尖端技术的实现将对需要最小孔隙率以提高综合性能的软磁铁素体不锈钢部件至关重要,也将把粉末冶金的界限推向新的高度。

在国内,随着折叠屏铰链形态进一步迭代,零部件复杂度与加工精度将持续提升,MIM 技术的综合优势进一步凸显,国内企业也将持续拓展国内外客户,MIM 有望成为铰链的主流加工方案。中国已经拥有超过 200 家粉末注射成形企业,包括常州精研、上海富驰、深圳艾利门特、北京创卓、广州昶盛、东莞博研等一大批优质公司,其中,珠三角地区的粉末注射成形工厂密度更是世界之最^[89]。为配合不锈钢制品的开发和推广,MIM 粉末材料的重要性不可忽视^[90],不锈钢粉末生产企业将通过扩大生产能力产生规模效应以期大幅度降低成本,并向下游饲料产业链延伸,低成本球形粉末也将成为竞争的热点。即使近年来各大企业的原材料国产化程度逐年提升,但尚未完全摆脱对进口粉末的依赖。

综上所述,尽管 MIM 工艺对软磁不锈钢的制备尚未臻于成熟,但以其独特的制造能力,如快速成型制造、高精度、高材料利用率等,使得复杂三维零件的制造成为可能,有望成为大批量且形状复杂的零件降低生产成本的理想选择。

4 结论与展望

1)合金纯净度、凝固质量和热处理工艺是决定软磁铁素体不锈钢综合性能的基础。控制超低间

隙原子 $w[C+N] \leq 100 \times 10^{-6}$ 和夹杂物的含量、添加 Ti/Nb 等稳定化元素促进非均质形核以及优化退火工艺制度是实现调控合金综合性能的关键。

2) 铬含量对磁性能与耐蚀性的拮抗效应是核心矛盾。高铬提升耐蚀性但导致矫顽力升高,而晶粒细化改善抗皱性能却可能加剧晶界腐蚀。需建立成分-组织-性能的定量构效关系,结合热力学计算与机器学习,构建多元合金设计窗口,实现性能平衡。

3) 抗皱性能直接影响软磁元件的磁场分布与耐蚀性。织构优化(如二轧程工艺弱化 $\{112\} <110>$ 织构)和晶界工程(引入小角度晶界)可显著提升抗皱性。未来需建立涵盖表面缺陷检测、织构分析及磁-

蚀耦合效应的完整评价体系,为高端应用提供保障。

4) 金属注射成形(MIM)工艺凭借其高精度(公差 $\pm 5 \mu\text{m}$)、高材料利用率等优势,成为解决传统工艺制备微型复杂零件瓶颈的关键技术。其核心优势在于能够实现磁性能误差 $< 5\%$ 的精确控制,并通过后热处理技术(热等静压等)进一步提升产品致密度与性能。

5) MIM 工艺需与多尺度模拟技术深度融合,实现从粉末流动到晶粒演化的全流程预测。同时,推动国产化高纯度粉末材料研发,降低对进口原料的依赖,结合政策支持智能制造与新材料产业,加速软磁铁素体不锈钢在新能源汽车、微型传感器等领域的规模化应用。

参考文献

- [1] 张婷婷, 王文先, 闫志峰, 等. 热输入对 445 J2 超纯铁素体不锈钢焊接接头显微组织和力学性能的影响[J]. 太原理工大学学报, 2014, 45(2): 210-214+225.
- [2] 刘亚丕, 牛振标, 周峰, 等. 现代不锈钢材料: 结构、性能、特点和应用[J]. 磁性材料及器件, 2016, 47(4): 73-77.
- [3] 刘亚丕, 石康. 软磁铁素体不锈钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019: 144.
- [4] 罗永赞. 铁素体不锈钢的进展[J]. 材料开发与应用, 1996, 11(2): 41-48.
- [5] 刘亚丕, 王子生, 王志华, 等. 软磁不锈钢环样和棒样磁性能测量结果差异及其机理分析[J]. 磁性材料及器件, 2024, 55(5): 16-24.
- [6] 林和, 吴群雄, 朱宇勋, 等. TSZ410 不锈钢焊接接头在盐雾试验中的腐蚀行为[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(9): 701-706.
- [7] 林仁敢, 徐惠松. 高铬铁素体不锈钢 446 盘条组织和性能[J]. 钢铁, 2018, 53(10): 85-89.
- [8] 欧阳明辉, 刘焕安, 叶际宣. 高铬铁素体不锈钢 447 在浓 H₂SO₄ 溶液中的腐蚀电化学行为[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(6): 449-455.
- [9] 姜明坤. 含 Al 铁素体耐热不锈钢的组织与性能研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2022.
- [10] 张鑫. 含 Al 超纯铁素体不锈钢再结晶行为、成形性和高温抗氧化性能研究[D]. 上海: 上海大学, 2016.
- [11] 杨静洁, 赵金良, 许磊, 等. 间隙原子 H, B, C 对 LaFe₁₁Si₁₄ 化合物磁性和磁热效应的影响[J]. 物理学报, 2018, 67(7): 267-274.
- [12] Tavares S S M, Fruchart D, Miraglia S, et al. Magnetic properties of an AISI 420 martensitic stainless steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 312(1-2): 307-314.
- [13] Gordon W, Bennekou V A. Review of stabilisation of ferritic stainless steels[J]. Materials Science and Technology, 2013, 12(2): 126-131.
- [14] Neslušan M, Pitoňák M, Minářík P, et al. Influence of domain walls thickness, density and alignment on Barkhausen noise emission in low alloyed steels[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 5687.
- [15] Ebata T, Takiguchi T. Development of a high hardness soft-magnetic stainless steel K-M57[J]. Denki-Seiko [Electric Furnace Steel], 2004, 75(4): 289-295.
- [16] Zhouhua J, Xiangmi Y, Huabing L, et al. Ultra Purity Ferritic Stainless Steels—Grades, Refining Operations, and Applications [C]// The Second Baosteel Biennial Academic Conference (III). Shanghai, 2006: 241-247.
- [17] 李实, 池和冰, 江来珠. 超纯铁素体不锈钢精炼技术的进步与发展[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(9): 1-4+63.
- [18] 游香米, 姜周华, 李花兵. 超纯铁素体不锈钢品种和精炼技术的进展[J]. 特殊钢, 2006, 27(5): 40-42.
- [19] 翟俊, 李建民. AOD 用转炉脱磷铁水冶炼 430 不锈钢脱碳保铬工艺优化[J]. 炼钢, 2017, 33(4): 58-62.
- [20] Wei J H, Zhu D P. Mathematical modeling of the argon-oxygen decarburization refining process of stainless steel: Part I. Mathematical model of the process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2002, 33(1): 111-119.
- [21] 成国光, 芮其宣, 秦哲, 等. 单嘴精炼炉技术的开发与应用[J]. 中国冶金, 2013, 23(3): 1-10.
- [22] 刘卫东. 三步法和二步法不锈钢冶炼工艺的分析 and 生产实践[J]. 特殊钢, 2013, 34(5): 34-37.
- [23] 侯雨阳. 钛、铌对超纯铁素体不锈钢凝固过程第二相析出及对凝固组织的影响[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [24] 赵雅, 刘燕, 陈安忠, 等. 稳定化元素对 443 铁素体不锈钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2024, 53(21): 158-161+165.
- [25] Asante J T, Siyasiya C W, Annan K A. Effect of Al addition on the solidification structure of 441 dual stabilised ferritic stainless steel[J]. MATEC Web of Conferences, 2022, 370: 03003.
- [26] Fu J W, Cui K, Li F, et al. Texture and anisotropic mechanical properties of ferritic stainless steel stabilized with Ti and Nb[J]. Materials Characterization, 2020, 159: 110027.

- [27] Han J, Zhu Z, Wei G, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Nb- and Nb + Ti-Stabilised 18Cr-2Mo Ferritic Stainless Steels [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33(5): 716-730.
- [28] Gordon W, Bennekou V A. Review of stabilisation of ferritic stainless steels [J]. *Materials Science and Technology*, 2013, 12(2): 126-131.
- [29] Lu H H, Guo H K, Liang W. The dissolution behavior of σ -phase and the plasticity recovery of precipitation-embrittlement super-ferritic stainless steel [J]. *Materials Characterization*, 2022, 190: 112050.
- [30] 葛杰, 刘晓, 刘浏. 超纯铁素体不锈钢脆性及形成特点对性能的影响[J]. *中国冶金*, 2022, 32(4): 9-20.
- [31] Yasunaka T, Kanao M S. Fracture characteristics of 475 °C embrittled 30%Cr ferritic stainless steels [J]. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1979, 19(2): 69-75.
- [32] 徐临超, 叶赛男, 王文权, 等. 热处理工艺对锻造 430F 铁素体不锈钢组织和性能的影响[J]. *特殊钢*, 2024, 45(6): 83-87.
- [33] 袁美怡, 赵天天, 龙际银, 等. 热处理对含铌 Cr17 不锈钢组织与性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2022, 42(1): 68-72.
- [34] 牛志旗, 王东玲, 张敬霖, 等. 热处理温度对 Fe-Co-2V-0.05Nb 软磁合金组织和性能的影响[J]. *金属功能材料*, 2022, 29(2): 34-39.
- [35] 陈德利, 贾红帅, 谭庆丰, 等. 热处理工艺对 00Cr12MoS 软磁不锈钢磁性影响规律[J]. *金属功能材料*, 2022, 29(4): 78-83.
- [36] Hamataka Y, Hatakeyama M, Osada T, et al. Corrosion properties of the Fe-Cr-based soft magnetic alloys fabricated by metal injection molding [J]. *Materials Transactions*, 2016, 57(12): 2110-2115.
- [37] Sano Y, Osada T, Kudo K, et al. Effect of Cr content on the magnetic properties of Fe-Cr soft magnetic material by MIM process [J]. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 2015, 62(8): 431-436.
- [38] 胡耕辅, 田玉新, 朱银存, 等. 耐蚀软磁合金 FeCr16 中 σ 相的析出行为[J]. *金属热处理*, 2022, 47(8): 83-88.
- [39] 马圆圆, 包汉生, 龚志华, 等. 热处理对 0Cr13 钢力学性能和磁性能的影响[J]. *金属热处理*, 2021, 46(12): 87-93.
- [40] 姜方, 张孟昀, 王刚, 等. 热处理温度对含钼铁素体不锈钢 0Cr17Mo2S 组织及性能的影响[J]. *特殊钢*, 2019, 40(4): 48-50.
- [41] 严道聪, 王贞应, 马振宇, 等. 退火温度对铁素体不锈钢 Y0Cr17SiS 组织和性能的影响[J]. *特殊钢*, 2021, 42(4): 78-80.
- [42] 刘洪涛, 吴春京, 毛卫民. 退火温度对 10Cr17 铁素体不锈钢组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2015, 40(11): 99-103.
- [43] 张艳, 张浩宇, 杨诗雨. 铬含量变化对铬锰钢耐腐蚀性能的影响[J]. *腐蚀与防护*, 2021, 42(5): 34-37.
- [44] Ma L, Hu S S, Shen J Q, et al. Effects of Cr content on the microstructure and properties of 26Cr-3.5Mo-2Ni and 29Cr-3.5Mo-2Ni super ferritic stainless steels [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, 32(6): 552-560.
- [45] 张向军, 沈鑫珺, 张淑敏, 等. 晶粒尺寸对含铜锡中铬铁素体不锈钢耐腐蚀性的影响[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(8): 1124-1127.
- [46] 王明军. Ce 含量对 434 铁素体不锈钢微观组织和腐蚀行为的影响[J]. *石化技术*, 2024, 31(9): 32-34.
- [47] 刘华强, 唐获, 赵爱民, 等. 铜含量对 Cr21 铁素体不锈钢组织和性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2017, 38(11): 46-52.
- [48] 饶新军, 刘晓, 刘浏. 稀土在铁素体不锈钢中的研究现状及发展前景[J]. *钢铁研究学报*, 2023, 35(1): 11-23.
- [49] Yao Y X, Wei Y Y, Li H J, et al. Effect of alloy elements on corrosion resistance and soft magnetic property of the designed ferritic stainless steel [J]. *Applied Physics A*, 2023, 129(9): 612.
- [50] Men F, Zhang M X. Fatigue properties and fatigue strength prediction of 439 ferritic stainless steel [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 145: 107054.
- [51] Yang W T, Kobayashi S, Saito S. Effect of grain boundary character on nucleation of intergranular fatigue cracks in SUS430 ferritic stainless steel [J]. *Transactions of the JSME (in Japanese)*, 2017, 83(847): 16-460-16-00460.
- [52] Yang W T, Kobayashi S, Saito S. Effect of grain boundary microstructure on fatigue crack propagation in ferritic stainless steel [J]. *Transactions of the JSME (in Japanese)*, 2018, 84(857): 17-353-17-00353.
- [53] Kobayashi S, Yang W T, Tomobe Y, et al. Low-angle boundary engineering for improving high-cycle fatigue property of 430 ferritic stainless steel [J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(22): 9273-9285.
- [54] 刘燕, 陈安忠, 高仁强, 等. 00Cr22Mo2Ti 铁素体不锈钢脆性断裂机制的研究[J/OL]. *热加工工艺*, 2023, 1-4.
- [55] 刘俊建, 袁周亮, 王万里, 等. 淬火温度对 12Cr12Mo 钢的组织、力学性能及低周疲劳性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2024, 45(10): 134-143.
- [56] 郑世豪, 解志文, 宁礼奎, 等. 退火工艺对 29Cr-4Mo 超级铁素体不锈钢微观组织的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(8): 2935-2942.
- [57] Chen M, Jiang C H, Xu Z, et al. Experimental study on macro- and microstress state, microstructural evolution of austenitic and ferritic steel processed by shot peening [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 359: 511-519.
- [58] Zhang Y, Lian Q L, Wang X. Enhancement of rolling contact fatigue performance of ferrite-pearlite steel with laser shock peening [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(5): 1687814019850945.
- [59] Spadaro L, Gomez-Rosas G, Rubio-González C, et al. Fatigue behavior of superferritic stainless steel laser shock treated without protective coating [J]. *Optics and Laser Technology*, 2017, 93: 208-215.
- [60] Hereñú S, Strubbia R, Rubio-González C, et al. High cycle fatigue life improvement of superferritic stainless steel by laser shock peening without coating [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152: 108083.

- [61] Koga N, Noguchi M, Watanabe C. Low-temperature tensile properties, deformation and fracture behaviors in the ferrite and austenite duplex stainless steel with various grain sizes[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 880: 145354.
- [62] Bai Y, He T, Guo D, et al. Texture evolution, formability and ridging resistance of a Sn-bearing ferritic stainless steel under different hot band annealing temperatures[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2019, 32(11): 1362-1372.
- [63] 贺英, 金红明, 褚于良, 等. 铁素体不锈钢再结晶结构与表面起皱比较研究[J]. *材料热处理学报*, 2017, 38(2): 83-90.
- [64] Mola J, Jung I, Park J, et al. Ridging control in transformable ferritic stainless steels[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, 43(1): 228-244.
- [65] Zhao Y, Liu H L, Wei L L, et al. An overview on the novel heat-resistant ferritic stainless steels[J]. *Tungsten*, 2023, 5(4): 467-480.
- [66] 杜伟, 周存龙, 赵敬伟. 铌钛对铁素体不锈钢组织和成形性的影响[J]. *山东冶金*, 2022, 44(3): 22-26.
- [67] Ma X G, Zhao J W, Du W, et al. Quantification of texture-induced ridging in ferritic stainless steels 430 and 430 LR during tensile deformation[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(2): 2041-2051.
- [68] 陈安忠, 王长波, 王珂, 等. 冷轧工艺对 443 铁素体不锈钢抗皱性能影响[J]. *中国冶金*, 2021, 31(2): 84-89.
- [69] Kodukula S, Kokkomäki H, Puukko E, et al. Influence of hot rolling finishing temperature on texture and ridging resistance in stabilized ferritic stainless steels[J]. *Steel Research International*, 2021, 92(7): 2000695.
- [70] Ma X G, Zhao J W, Du W, et al. Effects of rolling processes on ridging generation of ferritic stainless steel[J]. *Materials Characterization*, 2018, 137: 201-211.
- [71] Sakaizawa Y, Kaneko S, Ehara Y, et al. Effect of manganese and oxygen contents on monotectic sulfide formation in SUS430F stainless steel[J]. *Tetsu-to-Hagane*, 2022, 108(8): 552-559.
- [72] 马薇, 张立军. 退火工艺对汽车用 430 铁素体不锈钢组织与力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2024, 53(6): 57-61.
- [73] Sugawara Y, Naruse T, Ebata T, et al. Corrosion resistance of a free-cutting soft-magnetic stainless steel in pure water[J]. *Materials Transactions*, 2015, 56(11): 1814-1820.
- [74] 李实, 池和冰, 江来珠. 超纯铁素体不锈钢精炼技术的进步与发展[J]. *钢铁研究学报*, 2011, 23(9): 1-4+63.
- [75] 徐迎铁, 陈兆平, 李实. VOD 冶炼超纯铁素体不锈钢脱碳脱氮[J]. *北京科技大学学报*, 2014, 36(S1): 36-40.
- [76] 赵鑫森. K-OBM-S 冶炼超纯铁素体不锈钢控氮工艺研究[J]. *山西冶金*, 2022, 45(1): 22-24.
- [77] David Whittaker. MIM soft magnetic materials: Processing, properties and applications[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2016, 34(4): 310-318.
- [78] Suprihanto A. Evaluation the effect of HTGN treatments on the corrosion resistance and magnetic properties of austenitic stainless steel 316 L and 316 LVM[J]. *Journal of Energy, Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering*, 2017, 2(1): 17-22.
- [79] Suprihanto A. Magnetic properties of austenitic stainless steel 316l and 316lvm after high temperature gas nitriding treatment[J]. *Rotasi*, 2017, 19(2): 72.
- [80] Shang F, Qiao B, He Y Q. Development of soft magnetic materials prepared by metal injection molding[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 662: 524-527.
- [81] Miura H, Kang H. Application of metal injection moulding to soft magnetic materials[J]. *Powder Metallurgy*, 2013, 56(1): 38-45.
- [82] Oh J W, Gal C W, Shin D, et al. Powder injection molding process in industrial fields[J]. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 2018, 65(9): 539-547.
- [83] Tian L S, Qin M L, Ma J D, et al. High magnetic performance of metal injection-molded pure iron using δ phase sintering[J]. *Materials Letters*, 2014, 121: 145-148.
- [84] Shin D S, Jung I D, Kim H J, et al. Development of powder injection molding process for sintered soft magnet with the addition of Fe-17at. % P powder[J]. *Metal Powder Report*, 2018, 73(1): 38-45.
- [85] Chaurasia S K, Prakash U, Misra P S, et al. Development of P/M Fe-P soft magnetic materials[J]. *Bulletin of Materials Science*, 2012, 35(2): 191-196.
- [86] Ma J D, Qin M L, Tian L S, et al. Effect of Fe3P addition on magnetic properties and microstructure of injection molded iron[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, 397: 240-246.
- [87] 王浩然, 宋涛, 张永翠, 等. 金属粉末注射成型工艺及研究进展[J]. *山东冶金*, 2023, 45(5): 43-47.
- [88] 侯成龙, 郭俊卿, 陈拂晓, 等. 金属粉末注射成形技术及其数值模拟[J]. *粉末冶金技术*, 2022, 40(1): 72-79.
- [89] 尤力, 刘艳军, 潘宇, 等. 粉末注射成形钛合金粘结剂体系的研究进展[J]. *粉末冶金技术*, 2021, 39(6): 563-572.
- [90] 2020 年金属注射成形行业统计报告[J]. *粉末冶金工业*, 2021, 31(4): 28+93.