

· XXXX ·



航空紧固件用易切削奥氏体不锈钢 303Se 冷拉棒材的开发

郑晓伟, 祁战, 张剑锋, 连俊巍, 林再勇
(江阴兴澄特种钢铁有限公司棒线材研究所, 江阴 214429)

摘要:针对航空紧固件对材料的高性能需求,开展了航空用 303Se 易切削奥氏体不锈钢冷拉棒材的开发研究。基于 SAE AMS5640 标准,设计并优化了 303Se 不锈钢的化学成分,重点控制关键成分(质量分数)/%: $\leq 0.03C, 0.03 \sim 0.06N, 0.30Se, 0.13P$ 等,以实现良好的切削性能与力学性能匹配。通过热塑性试验研究,设置加热炉均热段温度 $1\ 220 \sim 1\ 260\ ^\circ C$,开轧温度 $1\ 120 \sim 1\ 200\ ^\circ C$,终轧温度 $\geq 1\ 000\ ^\circ C$ 的轧制工艺。线材吐丝后水冷至室温,冷拉变形量 $15\% \sim 25\%$,成功制备出 $\phi 13.7\ mm$ 规格的 303Se 冷拉棒材。冷拉棒材抗拉强度 $937\ MPa$ (目标区间 $897 \sim 1\ 030\ MPa$),断面收缩率 58% ;硬度 $171HBW$ (固溶态要求 $140 \sim 255HBW$);组织为单相奥氏体(XRD 检测无铁素体),晶粒度 7 级,非金属夹杂物综合 ≤ 3.0 级,产品化学成分、力学性能及金相组织均满足标准要求,具备良好的加工稳定性和使用可靠性。研究结果为航空紧固件用高性能不锈钢材料的国产化提供了技术支撑。

关键词:航空紧固件; 303Se; 易切削不锈钢; 冷拉棒材; 力学性能

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N250609 **中图分类号:**TG142. 71

Development of Cold-drawn Bars of Free-cutting Austenitic Stainless Steel 303Se for Aviation Fasteners

Zheng Xiaowei, Qi Zhan, Zhang Jianfeng, Lian Junwei, Lin Zaiyong
(Bar and Wire Institute, Jiangyin Xingcheng Special Steel Co., Ltd., Jiangyin 214429, China)

Abstract: To meet the stringent property demands of aviation fasteners, the development of aviation-grade 303Se free-cutting austenitic stainless steel cold-drawn bars was undertaken. Based on SAE AMS5640, the chemical composition was designed and refined by precisely controlling key elements to/%: $\leq 0.03C, 0.03 \sim 0.06N, 0.30Se, 0.13P$, to secure an optimum balance between machinability and mechanical strength. According to hot-ductility test results, the reheating soak temperature $1\ 220\ ^\circ C \sim 1\ 260\ ^\circ C$, the start rolling temperature $1\ 120\ ^\circ C \sim 1\ 200\ ^\circ C$, the finish rolling temperature $\geq 1\ 000\ ^\circ C$ was established to roll the wire. The wire was cooled with water to room temperature after wire rod laying, and then cold drew with deformation of $15\% \sim 25\%$, to the $\phi 13.7\ mm$ 303Se cold-drawn bars. The final product exhibits an ultimate tensile strength of $937\ MPa$ (target range $897\ MPa \sim 1\ 030\ MPa$), a reduction of area of 58% with hardness of $171\ HBW$ (solution-treated target range $140\ HBW \sim 255\ HBW$). The microstructure is composed of single-phase austenite (no ferrite detected by XRD), with the grain size of grade 7 and the overall non-metallic inclusion rating of ≤ 3.0 . All chemical, mechanical and metallographic requirements of the standard are satisfied, providing excellent processing stability and service reliability. The results offer a technical foundation for the localization of high-performance stainless steels for aviation fasteners.

Key Words: Aviation Fasteners; 303Se; Free-cutting Stainless Steel; Cold-drawn Bar; Mechanical Properties

紧固件素有“工业之米”之称,是使用最广泛的基础零部件。我国紧固件产量与产值持续攀升,近两年年产量已突破 800 万吨,连续多年稳居全球首位^[1]。高端紧固件是航空、航天、航海、轨道交通、汽车及国防等战略领域的“隐形支柱”,据测算,仅中国市场规模已逾 600 亿元,空间广阔、壁垒高筑,正

成为产业链“卡脖子”环节的新赛场^[2-4]。高端紧固件长期依赖日美欧进口,地缘博弈加剧下,随时可能成为重大装备的“隐形枷锁”,唯有以国家战略提速产业结构换挡,让国产紧固件冲向高端,才能把“卡脖子”的手掰开,把安全与主动权握在自己掌心^[5-6]。

基金项目: 2023 年航空紧固件用丝棒材项目(编号:CEIEC-2023-ZM02-0070)

作者简介: 郑晓伟(1985—),男,本科,高级工程师; **E-mail:** zhengxiaowei@citicsteel.com; **收稿日期:** 2025-12-22

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

航空紧固件堪称“高端中的高端”。C919 进入批量交付,国产民机对高耐蚀、高强度且成本可控的不锈钢紧固件需求陡增,国产化刻不容缓。然而,占用量逾六成的 18-8 型铬镍奥氏体不锈钢导热率低,切削热难以散失,刀具磨损快、寿命短;303 系列因添加易切削元素,可加工性大幅提升,已成为航空不锈钢紧固件用量最大的首选材料^[7-9]。303Se (18Cr-9.0Ni-0.14P-0.28Se) 钢是在 18-8 型奥氏体不锈钢基础上添加磷、硒的易切削钢种。硒与硫同属 VIA 族,理化性质相近,可显著改善切削性能。由于硒与锰的结合力略强于硫,钢中硒优先与锰结合生成球状或纺锤状 MnSe, MnSe 与 MnS 虽然都是立方晶体结构,但其在热加工温度下的塑性变形能力不同。MnSe 在热轧温度下塑性很低,几乎不变形,以 MnSe 为核心或完全由 MnSe 组成的夹杂物,在热加工后会保持其原始的球状或纺锤状形态,取代原有长条状 MnS,使夹杂物形态圆整、分布均匀,在提高切削性能的同时提升力学性能,尤其是横向塑韧性。通过调控锰、硒比例,可进一步形成 FeSe、MnSe 等硒化物,在刀-屑界面起固态润滑作用,降低切削力与切削温度,促进断屑并减轻刀具磨损;此外,脆性夹杂物在切削过程中的微崩效应有利于降低工件表面粗糙度。

国外卡朋特(Carpenter)等企业拥有丰富的航空紧固件用 303Se 不锈钢研制、生产和应用经验,生产线和产业链完整,能够稳定批量生产和供应航空紧固件用不锈钢。反观国内,303Se 不锈钢生产尚属空白,主要面临两大技术瓶颈:其一,较高的硒含量给冶炼及连铸带来难度;其二,硒导致的热脆性恶化了材料的热加工性能。因此,303Se 易切削不锈钢线材的生产具有一定的技术难度,特别是轧制工艺环节需要加以控制。基于此,针对航空紧固件对该材料的迫切需求,开展全流程试制与工艺研究,旨在突破 303Se 不锈钢线材国产化关键技术,为航空紧固件自主可控提供材料支撑。

1 试验材料及方法

1.1 材料要求

303Se 不锈钢 $\phi 13.7$ mm 规格的冷拉棒材按照航空标准 SAE AMS5640W—2023 要求及下游加工工艺进行产品的研制,本材料主要技术指标要求如下。

1.1.1 化学成分

化学成分是决定材料性能的基础因素,对紧固

件的加工性能、力学性能和耐蚀性产生决定性作用。本项目 303Se 符合 SAE AMS5640 标准的要求,并对钢的化学成分的目标值进行设计:

1) C、N 元素:控制 C 是 303Se 易切削奥氏体不锈钢获得耐蚀性与良好可加工性的关键。 $w[C]$ 在 18-8 型不锈钢基体中的固溶极限约为 0.03%;当 $w[C]>0.03\%$ 时,在随后的热加工及冷却过程中易在晶界析出 $Cr_{23}C_6$,导致晶界贫铬。自动车床零件服役期间持续接触切削液及含氯水汽,贫铬区成为阳极通道,优先产生丝状锈蚀,显著降低紧固件密封与连接可靠性。因此,熔炼阶段须将 $w[C]$ 稳定控制在 $\leq 0.03\%$ 。氮为强烈奥氏体形成元素,其奥氏体化当量约为 $0.5\% \sim 0.8\%w[Ni] / 0.01\%w[N]$ 。303Se 钢中 $w[Ni]$ 已达标准上限 ($\approx 9.5\%$),通过额外引入 $0.03\% \sim 0.06\%w[N]$,完全抑制 δ -铁素体的生成,从而消除因铁素体导致的微磁信号与抛光花斑缺陷,满足航空紧固件对非磁性及高表面质量的严格要求。然而,当 $w[C]>10\%$ 时,奥氏体层错能显著降低,位错交滑移受阻,加工硬化速率急剧升高;切削试验表明,单位切削力上升 $12\% \sim 18\%$,刀尖平均温度升高 $30 \sim 40$ °C,刀具磨损加剧,与“易切削”设计目标相悖。

2) Cr、Mo、Ni、Si、Mn、P、Se 元素:Cr、Mo 元素为铁素体形成元素,根据耐点蚀当量 $PREN=Cr+3.3Mo+16N$ 可知 Cr、Mo 含量越高,材料的耐蚀性越好,但过高的 Cr、Mo 元素含量促使材料组织中形成较多的铁素体,铁素体/奥氏体相界面因变形抗力差异而成为微裂纹源;同时,铁素体周边易形成贫 Cr 区,反而削弱钝化膜连续性^[10-11]。Ni 是一种强奥氏体形成元素,可扩大 γ 相区并抑制 σ 相、 Cr_2N 等有害金属间相析出。在相同 Cr 含量条件下,适量提高 Ni 含量可降低钝化电流密度,改善抗均匀腐蚀与晶间腐蚀性能;此外,Ni 还能降低层错能,缓解高 Se 引起的热脆倾向^[12-13]。Mn 是扩大奥氏体相区和稳定奥氏体组织的元素,同时,还与 Se 结合生成球状 MnSe 夹杂,改善切削性能。Si 为铁素体形成元素,且促进 σ 相析出。P 为间隙型固溶元素,可显著提高钢的屈服强度与硬度,但会以固溶强化形式降低冲击韧性,此外,P 在晶界偏聚导致低温解理敏感性增加,即冷脆倾向上升;然而适量磷可促使切屑脆化、断屑顺畅,从而改善易切削性能。Se 在钢中与 Mn 结合生成 MnSe 复合夹杂物,其尺寸较 MnS 更为细小、分布均匀,且易于呈短杆状形貌。切削过程中,该

类夹杂物可充当应力集中源,促进切屑断裂,同时在刀-屑界面形成固态润滑膜,显著降低切削力与刀具磨损。然而,过量 MnSe 夹杂易在晶界或变形带处诱发微裂纹,产生缺口效应,导致热轧开裂倾向上升;此外,高体积分数的 MnSe 会破坏钝化膜连续性,降低耐点蚀性能。综合以上学者的研究成果及无铁素体含量、良好切削性能的目标,设计主要目标成分(质量分数)/%: 17.30Cr, ≤ 0.20 Mo, 9.50Ni, 1.00Mn, 0.60Si, 0.13P, 0.30Se, 具体见表 1。

表 1 303Se 不锈钢化学成分要求(质量分数)

Table 1 Chemical composition requirements of 303Se stainless steel						
项目	C	Si	Mn	P	S	Cr
标准要求	≤ 0.15	≤ 1.00	≤ 2.00	0.12~0.17	≤ 0.04	17.00~19.00
目标值	≤ 0.03	0.60	1.00	0.13	≤ 0.02	17.30
项目	Ni	Mo	Se	Cu	N	
标准要求	8.00~10.00	≤ 1.00	0.15~0.40	≤ 1.00	-	
目标值	9.50	≤ 0.20	0.30	≤ 0.50	0.03~0.06	

1.1.2 力学性能

SAE AMS5640 规范规定, 303Se 不锈钢在固溶状态下布氏硬度须符合 140~255HBW。然而, 已有研究指出, 采用冷挤压成形制造的 303Se 紧固件在装配过程中易出现头部或螺纹根部开裂^[14]。为避免冷作缺陷, 航空紧固件普遍改用自动车削工艺成形, 通过冷拔获得最终产品较高的强度要求。据此将冷拉棒材的抗拉强度目标设定为 897~1 030 MPa, 以满足最终紧固件的力学性能要求。

1.2 工艺路线

结合中信泰富特钢集团现有装备与工艺能力, 确定 303Se 易切削不锈钢冷拉棒材工业化路线为: 50 t 电弧炉初炼→VOD/AOD→LF 精炼→保护气氛

模铸→径锻机开坯→高速线材连轧→卷到棒冷拔→力学性能与表面质量检验→成品入库。

1.3 热塑性研究

303Se 钢因 P、Se 复合添加显著降低高温塑性, 目前, 国内外尚无该钢种系统热塑性数据。本研究在工业化生产前取样, 加工成两端带螺纹的 $\phi 10 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ 标准热拉伸试样, 于 Gleeble-3800 热力模拟试验机以 $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 升至试验温度 ($850 \sim 1\ 250 \text{ }^\circ\text{C}$), 保持 2 min 后以 0.001 1/s 变形速率开展等温热拉伸试验, 以高温抗拉强度表征材料抵抗外载能力、断面收缩率表征塑性变形能力, 二者共同作为热塑性的评价指标, 结果如图 1 所示。

由图 1 可见, 303Se 钢在 $900 \sim 1\ 150 \text{ }^\circ\text{C}$ 呈现优异热塑性, 断面收缩率值均 $> 70\%$, 适合热加工; 当温度升至 $1\ 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上时, 断面收缩率值急剧降至 $< 50\%$, 热加工裂纹风险显著增加。在整个试验温区, 高温抗拉强度随温度升高呈单调下降趋势, 符合奥氏体钢高温强度变化规律。

1.4 线材加热和轧制工艺

303Se 热轧坯料中的硒化物主要以长条状沿轧制方向分布, 如图 2(a)(b) 所示。由于硒化物与奥

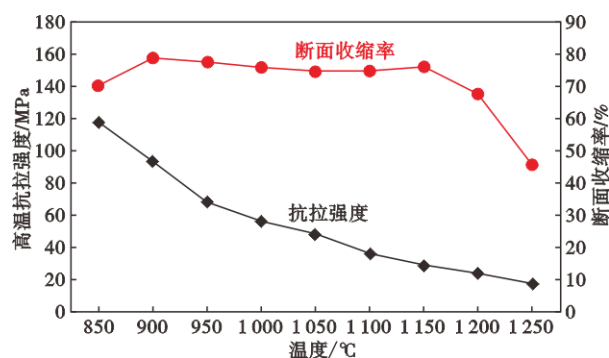


图 1 温度对 303Se 钢高温抗拉强度和断面收缩率的影响
Fig. 1 Effects of temperature on high-temperature tensile strength and cross-sectional shrinkage of 303Se steel

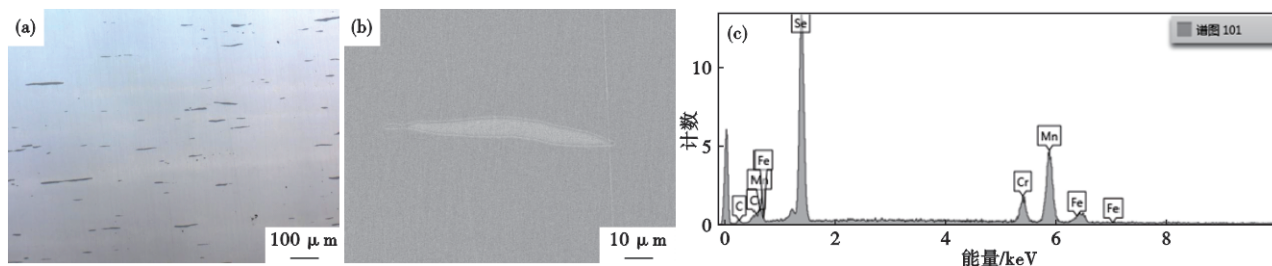


图 2 303Se 坯料夹杂物形貌: (a) 金相形貌, (b) 扫描电镜形貌, (c) 夹杂物组成

Fig. 2 Morphology of 303Se billet inclusions: (a) metallographic morphology, (b) scanning electron microscopy morphology, (c) inclusion composition

氏体基体在变形能力上存在显著差异,随轧制道次增加,横向与纵向的塑性应变梯度急剧扩大,各向异性指数明显升高。当变形温度低时,条状 MnSe 夹杂物/基体界面因热激活不足而率先形成微裂纹;在后续切向拉应力作用下,裂纹沿已被拉长的硒化物快速扩展,并在尖端产生高度应力集中^[15]。多个平行的长条硒化物裂纹相互贯通,最终表现为典型的“劈头”与边部纵裂,严重恶化热轧成材率。

研究表明,随着加热温度升高,原始坯料中的长条状硒化物逐渐断裂并球化,分布趋于均匀,为后续线材热轧提供了良好的组织前提^[15]。与此同时,较高的轧制温度可显著降低硒化物/奥氏体界面的变形失配,抑制微裂纹萌生。综合热塑性试验结果与组织演变规律,确定 303Se 不锈钢 $\phi 17$ mm 规格线材轧制加热制度见表 2。开轧温度 1 120 ~ 1 200 °C,终轧温度 $\geq 1 000$ °C;吐丝后立即水冷至室温,实现在线固溶,以最大限度保留热变形后的均匀组织并防止硒化物再度长大。

表 2 303Se 不锈钢 $\phi 17$ mm 线材加热炉温度设定

预热段温度	加热 I 段	加热 II 段	均热段温度
≤ 700	950 ~ 1 150	1 130 ~ 1 230	1 220 ~ 1 260

为避免轧制过程中坯料头部因冷却速率过快而引起温度骤降、塑性下降,当坯料头部咬入轧机时,提前关闭机架间冷却水;待坯料完全通过轧辊并进入下一道次后,立即恢复冷却水供给。该措施有效抑制了局部过冷所致的异常变形抗力升高与微裂纹萌生,实现了全线无开裂稳定轧制。

1.5 卷到棒拉拔

卷到棒拉拔是将热轧盘条通过拉拔模具进行冷变形,直接加工成定尺直条棒材的金属加工工艺,卷到棒拉拔是决定航空紧固件用 303Se 冷拉棒材最终强度的核心工序。通过室温塑性变形引入高位错密度,实现形变强化,使抗拉强度达到 897 ~ 1030 MPa 的技术要求。经系统试验,303Se 不锈钢冷加工硬化指数高,确定累计冷拉变形量控制在 15% ~ 25%,可满足冷拉棒材抗拉强度的要求。

2 产品质量分析

2.1 成分及力学性能分析

按既定工艺批量制备的 $\phi 13.7$ mm 303Se 冷拉棒

材,按照 AMS2248H—2022 检测化学成分,ASTM A370—2023 检测力学性能,均满足 SAE AMS 5640W—2023 及客户技术协议要求;具体成分与性能数据分别见表 3 与表 4。

表 3 303Se 不锈钢 $\phi 13.7$ mm 冷拉棒材的化学成分(质量分数)

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr
标准要求	≤ 0.15	≤ 1.00	≤ 2.00	0.12~0.17	≤ 0.04	17.00~19.00
实测值	0.026	0.61	0.99	0.135	0.002	17.34
项目	Ni	Mo	Se	Cu	N	
标准要求	8.00~10.00	≤ 1.00	0.15~0.40	≤ 1.00		
实测值	9.52	0.15	0.31	0.16	0.04	

表 4 303Se 不锈钢 $\phi 13.7$ mm 力学性能

Table 4 Mechanical properties of $\phi 13.7$ mm 303Se stainless steel

项目	固溶状态硬度 (HBW)	冷拉棒材抗拉强度/MPa	断面收缩率/%
标准要求	140~255	897 ~ 1 030	-
实测值 1	171	937	58
实测值 2	173	941	57

2.2 金相分析

依据 GB/T10561—2023(A 法)与 GB/T 6394—2017,随机抽取 6 支成品冷拉棒材,对其进行非金属夹杂物与奥氏体晶粒度评定,结果汇总于表 5。无 A 粗夹杂物,A 细夹杂物为 2.5~3.0 级,可同时满足材料的切削性能和纵向一致性。

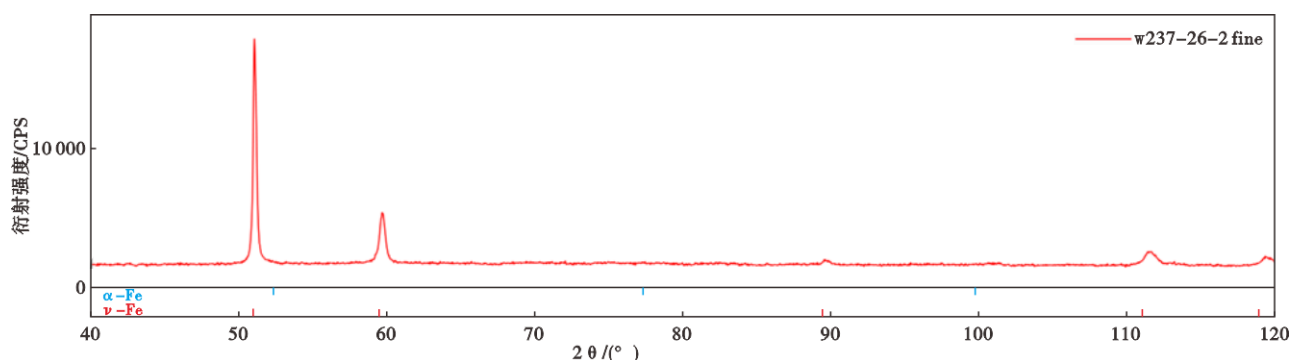
表 5 303Se 不锈钢 $\phi 13.7$ mm 金相性能

Table 5 Metallographic properties of $\phi 13.7$ mm 303Se stainless steel 级

试样	A 细	A 粗	B 细	B 粗	C 细	C 粗	D 细	D 粗	DS	晶粒度
1#	2.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0	0	7
2#	3.0	0	0.5	0	0	0	0.5	0.5	0	7
3#	2.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0	0.5	7
4#	2.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0	0	7
5#	2.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0	0.5	7
6#	2.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0.5	0	7

2.3 XRD 分析

采用 X 射线衍射(XRD)对 $\phi 13.7$ mm 303Se 冷拉棒材进行相组成分析(选 Fe 靶,扫描范围 2θ 为

图3 ϕ 13.7 mm 303Se 冷拉棒材的 XRD 图谱Fig. 3 XRD spectra of ϕ 13.7 mm 303Se cold-drawn bars

59.7°), 结果如图 3 所示。衍射谱中仅出现 γ -Fe (奥氏体) 特征峰, 未检测到 α -Fe (铁素体) 或其他第二相衍射信号, 表明 303Se 冷拉棒材为单一奥氏体组织, 体积分数 100%。

3 结论

1) 通过合理的成分设计 (质量分数) /% : \leq 0.03C、0.03 ~ 0.06N、0.30Se、0.13P 等与工艺控制, 成功开发出满足 SAE AMS5640 标准要求的航空紧固件用 303Se 易切削不锈钢冷拉棒材, 产品综合性

能优异, 具备批量生产条件。

2) 热塑性研究表明, 303Se 钢在 900 ~ 1 150 °C 温度范围内具有良好的热加工性能, 断面收缩率超过 70%, 为后续轧制工艺提供了理论依据。通过优化加热与轧制工艺, 解决了因硒化物分布不均导致的轧制开裂问题, 实现了稳定生产。

3) 生产的 303Se 冷拉棒材, 产品化学成分、力学性能及金相组织均满足标准要求, 组织为单一奥氏体相, 无铁素体析出, 无磁性, 完全满足航空紧固件对材料强度与加工性能的双重要求。

参考文献

- [1] 张明, 张剑锋, 林再勇. 低合金高强度紧固件钢研发现状与发展[J]. 特殊钢, 2025, 46(2): 29-37.
- [2] 朱行欣, 胡晓培. 国内航空航天用高温合金紧固件发展现状[J]. 金属制品, 2023, 49(3): 1-3.
- [3] 惠卫军, 翁宇庆, 董瀚. 高强度紧固件用钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [4] 王占忠, 张越, 李旭, 等. 12.9 级高强度风电紧固件用 42CrMoM 钢生产工艺实践[J]. 特殊钢, 2025, 46(2): 38-42.
- [5] 李东, 冯韶伟, 石玉红, 等. 航天高端紧固件技术发展现状及展望[J]. 宇航总体技术, 2024, 8(5): 1-8.
- [6] 苗生沛, 张辉. 航空发动机用紧固件现状分析[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(9): 95-98.
- [7] 袁武华, 王峰. 国内外易切削钢的研究现状和前景[J]. 钢铁研究, 2008, 36(5): 56-62.
- [8] 赵文斌. 易切削奥氏体不锈钢 303F 和 316F 的机加工性能[J]. 特殊钢, 1994, 15(5): 17-21.
- [9] 涂玉国, 张国付, 叶刚, 等. 303F 易切削不锈钢 Φ 9.0 mm 盘条的工艺开发与生产实践[J]. 特殊钢, 2020, 41(6): 20-23.
- [10] 刘光明. 金属腐蚀学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2024: 202402: 273.
- [11] 谭庆丰, 贾红帅, 王宇, 等. 核电站堆内构件用奥氏体不锈钢冷拉棒材的研制[J]. 特殊钢, 2024, 45(3): 5-9.
- [12] 张占川. 增氮降镍 316 L 奥氏体不锈钢抗腐蚀性能研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- [13] 桂艳, 高岩. 不锈钢表面钝化膜特性的研究进展[J]. 特殊钢, 2011, 32(3): 20-24.
- [14] 高靖靖, 李旭健, 马勇, 等. 303Se 不锈钢高锁螺母开裂原因[J]. 理化检验(物理分册), 2022, 58(8): 61-64.
- [15] 夏晓玲. 1Cr18Ni9Se 钢产生轧制劈裂的原因与对策[J]. 上海金属, 1998(1): 56-58.