

· XXXX ·



退火工艺对 Haynes 282 高温合金丝材组织及性能的影响

王建桥^{1,2}, 何钦生^{1,3,4}, 李方^{1,2,5}, 张十庆^{1,2,5}, 李泳涛², 王彪^{1,2}, 赵振^{1,2,5}, 唐远寿^{1,2},
黄敏², 王宏^{1,2,5}, 邹兴政^{1,2,5}, 李昊^{1,2}, 罗康序^{1,2}

(1 重庆材料研究院有限公司功能材料元件所, 重庆 400707; 2 国家仪表功能材料工程技术研究中心, 重庆 400707; 3 重庆大学机械与运载工程学院 重庆 400044; 4 中国科学院大学重庆学院材料科学与工程学院, 重庆 400714; 5 高性能耐腐蚀合金重庆市重点实验室 重庆 400707)

摘要: 高温密封用丝材的退火工艺是产品设计中极为重要的参数。针对直径 $\phi 0.9$ mm 的基线密封用 Haynes 282 合金丝材坯料, 通过光学显微镜、扫描电镜、室温拉伸、硬度测试研究了冷拉减面率和退火工艺对丝材强度、工艺性能和微观组织的影响; 对不同冷拉减面率-退火后的平均晶粒尺寸进行了拟合分析。结果表明, 不同工艺退火后, 合金的晶粒尺寸和硬度呈反比趋势, 随着退火时温度升高或时间延长, 合金晶粒尺寸增大, 硬度下降; 减面率增加导致加工硬化, 冷拉减面率-抗拉强度呈线性关系, 显微组织完全纤维化时 (冷拉减面率 69.14%), 抗拉强度高达 1 805 MPa; Haynes 282 合金丝材在低减面率区间 (10.80%~39.51%) 和减面率为 62.65% 时, 由于变形不均匀, 退火后存在晶粒异常长大, 性能下降的现象。综合实测结果和拟合分析, 最终确定最佳退火工艺参数为 1140 °C 保温 45 min, 且退火前的冷拉减面率控制在 45.60%~55.56%, 可以获得组织稳定, 强度-塑性匹配性最佳的成品丝材。

关键词: Haynes 282; 高温密封; 冷拉减面率; 退火工艺; 再结晶

DOI: 10.20057/j.1003-8620.N250587 **中图分类号:** TG156.21

Effects of Annealing Process on the Microstructure and Properties of Haynes 282 Alloy Wire

Wang Jianqiao^{1,2}, He Qinsheng^{1,3,4}, Li Fang^{1,2,5}, Zhang Shiqing^{1,2,5}, Li Yongtao², Wang Biao^{1,2},
Zhao Zhen^{1,2,5}, Tang Yuanshou^{1,2}, Huang Min², Wang Hong^{1,2,5}, Zou Xingzheng^{1,2,5},
Li Hao^{1,2}, Luo Kangxu^{1,2}

(1 Department of Functional Materials and Components, Chongqing Materials Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400707, China; 2 National Instrument Functional Material Engineering Technology Research Center, Chongqing 400707, China; 3 College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4 College of Materials Sciences and Engineering, Chongqing School, University of Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 5 Chongqing Key Laboratory of High Performance Corrosion Resistant Alloys, Chongqing 400707, China)

Abstract: The annealing process for wires used in high-temperature seals is a critical parameter in product design. This study investigated the effects of cold drawing reduction in area and annealing parameters on the strength, ductility, and microstructure of Haynes 282 alloy wire feedstock (0.9 mm diameter baseline seal wire) using optical microscopy, scanning electron microscopy, room-temperature tensile testing, and hardness measurements. A fitting analysis was conducted on the average grain size after annealing for different cold drawing reduction rates. The results indicate an inverse relationship between grain size and hardness after annealing under different parameters: as the annealing temperature increased or holding time extended, the grain size increased while hardness decreased. An increase in the reduction in area led to work hardening, demonstrating a linear relationship between the cold drawing reduction in area and tensile strength. When a fully fibrous microstructure form (at 69.14% reduction), the tensile strength reach 1 805 MPa. The Haynes 282 alloy wire exhibits abnormal grain growth and a decline in properties after annealing within low area reduction ranges (10.80%~39.51%) and at an area reduction of 62.65%, due to non-uniform deformation. Based on comprehensive experimental results and fitting analysis, the optimal annealing parameters were determined to be 1140 °C for 45 minutes. A cold drawing reduction in area between 45.60% and 55.56% prior to this annealing treatment was found to produce the final wire product with a stable microstructure and an optimal strength-ductility balance.

基金项目: 国防科技创新发展联合基金(2024-JCJQ-JJ-2023)

作者简介: 王建桥(1997-), 男, 硕士; **E-mail:** 471706479@qq.com; **收稿日期:** 2025-12-04

通信作者: 何钦生(1991-), 男, 博士, 高级工程师; **E-mail:** heqinsheng@cmri.cc

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

Key Words: Haynes 282; Cold Drawing Reduction; Annealing Process; Recrystallization

高温密封一直是航空航天、能源电力等服役条件极其严苛的尖端工程领域不可避免的难关,密封部件内置高温合金骨架结构在高温工况下常面临回弹率低和失效断裂等问题,一旦动态部位缝隙处的密封失效,高温气流会进入构件内部对不耐温结构造成破坏,进而引发灾难性的事故^[1]。随着高温工况下服役热载量的逐步提高,常用作高温弹性合金的 In 718、X 750、Waspaloy 等已无法满足使用需求。目前超高温密封工况下一般使用 Rene 41,但其成型工艺性能和塑性较差,成品率极低^[2]。Haynes 282 是 2005 年由 Haynes 国际公司开发的一种新型时效强化型镍基高温合金,其在 649~927 °C 温度范围内表现出优异的蠕变强度、热稳定性、可加工性和焊接性能^[3],是制备高温弹性密封件的理想选材。随着基线密封部件向小型化、精密化发展,对该合金在微细丝、薄板等形态下的微观组织精确控制提出了更高要求,而半成品丝材退火过程中的再结晶行为直接影响晶粒形态及成品丝材的强度和韧性,是质量控制的核心环节。在高温合金产品由盘条到微细丝材的成型过程中,冷变形与退火热处理的协同交互作用是控制成品丝材显微组织和力学性能的关键^[4]。

目前,针对 Haynes 282 合金的研究主要集中在三个方面:第一是通过退火热处理制度优化控制晶粒尺寸,提高力学性能,叶青等^[5]构建了能有效表征 Haynes 282 合金在高温下晶粒长大的数学模型,刘强永等^[6]对 Haynes 282 进行了不同温度的固溶处理,发现在高温条件下,晶粒粗化和碳化物的进一步溶解是性能降低的原因,Ceena^[7]将热轧态的 Haynes 282 进行长时间的退火热处理后发现晶界处的碳化物连接为薄膜状,晶内的 γ' 相尺寸显著增加至 100 nm,强度和塑性均显著降低;第二是 Haynes 282 合金的工艺性能,张鑫等^[8]建立了 Haynes 282 合金的热加工图,计算得出 Haynes 282 合金热加工的安全温度范围在 1 000~1 200 °C,李秋石等^[9],杨林等^[10],尹宏飞等^[11]等则对 Haynes 282 的焊接工艺性进行了研究;第三是 Haynes 282 合金在长期服役过程中的组织性能稳定性,刁旺战等^[12]对 Haynes 282 合金焊接接头在 750 °C 服役 5 000 h 后的微观组织和力学性能演变进行了研究,符锐等^[13]对 Haynes 282 合金进行了持久试验,发现富 Mo 的 μ 相的生成

和 MC 碳化物退化是 Haynes 282 合金长期服役过程中性能下降的原因。当前研究尚未系统阐明 Haynes 282 合金丝材经冷拉变形后的再结晶行为、性能演变规律及其与制备工艺的关联性。

本研究系统探讨了不同冷拉减面率及退火工艺参数对 Haynes 282 合金丝材再结晶行为与力学性能的影响规律。通过系统调整工艺参数,明确了变形态 Haynes 282 合金获得理想显微组织与力学性能所需的适宜退火工艺与冷拉减面率范围,从而有效规避因临界变形度导致的组织异常与性能劣化,全面掌握了实现合金丝材最佳强塑性匹配的关键工艺条件。本研究为 Haynes 282 合金微细丝材工业化生产中的显微组织调控与性能优化提供了重要的理论依据与实践指导。

1 试验材料和方法

试验用 Haynes 282 合金为真空感应熔炼+电渣重熔双联工艺制备。其中,真空感应熔炼的炉容量为 50 kg,浇注锭型为 $\phi 100$ mm,重量 30 kg,随后将其进一步精炼为 $\phi 160$ mm 的电渣锭。电渣重熔后其化学成分见表 1。试验原材料为 Haynes 282 合金丝材,在 $\phi 1.5$ mm 时退火热处理后,经多道次冷拉拔至 $\phi 0.9$ mm,冷拉减面率 64%。原始微观组织如图 1 所示,晶粒呈纤维状,已完全破碎,存在多组滑移簇。

表 1 试验用 Haynes 282 合金化学成分(质量分数)

Table 1 Composition of the experimental Haynes 282 alloy											%
Cr	Co	Mo	Ti	Al	Fe	Mn	C	Si	B	Ni	
19.86	9.89	8.66	2.09	1.46	0.20	0.18	0.075	0.05	0.0079	Bal	

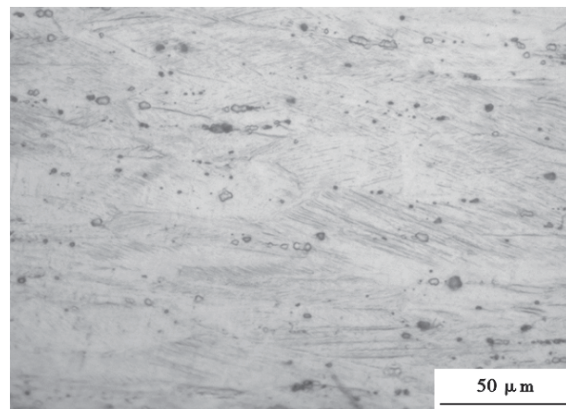


图 1 变形态 Haynes 282 合金丝材金相组织

Fig. 1 Metallography of the deformed Haynes 282 alloy wire

分组将试验用 Haynes 282 合金丝材在 1 060、1 100、1 140、1 180 °C 时装入热处理炉中,分别保温 15、30、45、60 min 后取出水淬,模拟实际工况中的退火工艺。将制备的试样通过热镶、打磨、抛光后,使用科林二号试剂侵蚀试样表面,在光学显微镜下观察变态 Haynes 282 合金退火后的微观形貌,按 GB/T 6394-2017 标准中的直线截点法对平均晶粒尺寸进行计算,并对试样进行显微硬度和室温拉伸测试,分析退火工艺对变态 Haynes 282 合金组织和硬度的影响,对退火工艺进行优选。

通过冷拉拔将 $\phi 0.9$ mm 的 Haynes 282 合金退火态丝材逐步减径至 $\phi 0.5$ mm,以获得具有不同减面率的变态丝材,随后对系列变态丝材进行优选工艺退火处理,利用金相观察和室温拉伸测试,系统分析冷拉减面率对其退火过程中再结晶行为与力学性能的影响。

2 结果与讨论

2.1 退火工艺对组织和性能的影响规律

通过退火工艺探究试验,获得的变态 Haynes 282 合金在不同的温度和保温时间后的微观组织如

图 2 所示。由图 2 可知,在四个不同的退火温度下,变态的 Haynes 282 合金均发生了完全的再结晶,获得了晶界平直的等轴晶组织,并伴有大量的退火孪晶。且随着温度的升高和保温时间的延长,呈现出典型的晶粒长大特征。1 060 °C 退火时,显微组织为细小均匀的等轴晶。1 100 °C 退火时,显微组织为粗大晶粒和细小晶粒共存的混晶组织。1 140 °C 退火时,显微组织为粗大的等轴晶,晶界夹角趋于 120° 的稳定形态。1 180 °C 退火时,晶粒已显著粗化。

变态的 Haynes 282 合金在不同退火工艺下的晶粒尺寸和显微硬度如图 3 所示。由图 3 可知,经历不同的退火工艺后,试样的平均晶粒尺寸和显微硬度变化趋势完全相反,退火时的热处理温度越高,保温时间越长,晶粒尺寸越大,同时硬度也更低。当退火温度低于 1 100 °C 时,晶粒尺寸和硬度变化趋势并不明显,当退火温度达到 1 140 °C 以上时晶粒尺寸有较明显的增大。同时,相较于退火时间,退火温度对晶粒尺寸和显微硬度的影响更大。采用 1 140 °C 进行退火处理,可以将晶粒度控制为 6 级左右,获得晶粒均匀的退火组织。

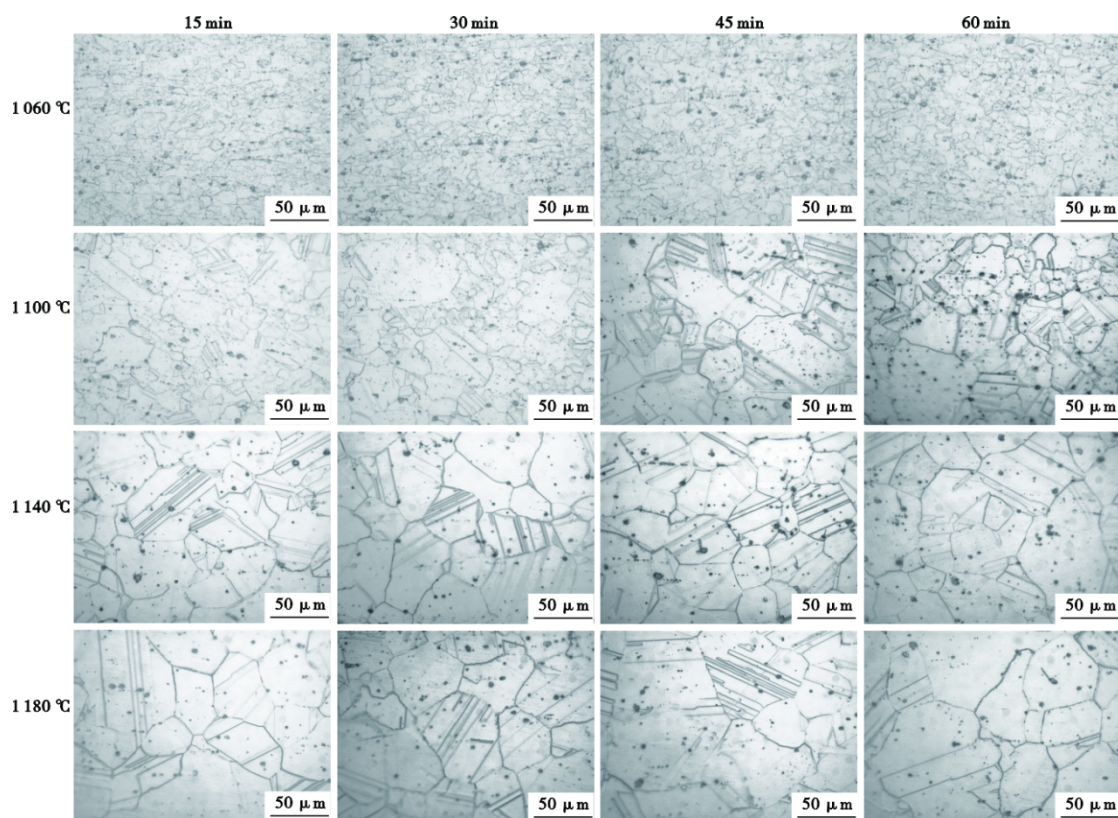


图 2 变态 Haynes 282 丝材不同退火工艺退火后的金相组织
Fig. 2 Metallography of deformed Haynes 282 wire after different annealing processes

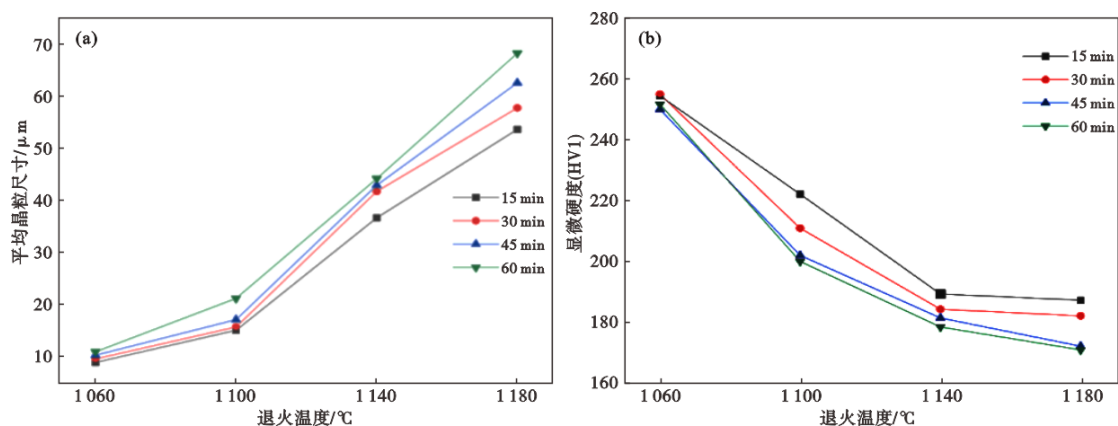


图3 变形态 Haynes 282 丝材不同退火工艺退火后的平均晶粒尺寸和显微硬度变化趋势:(a)平均晶粒尺寸,(b)显微硬度 HV1

Fig. 3 Variations in the average grain size (a) and micro-hardness (HV1) (b) of the deformed Haynes 282 wire with different annealing processes

优选 1 140 °C 作为退火温度后,不同退火时间试样的力学性能见表 2。由表 2 可知,退火态的试样强度在 15 min 后出现一定的下降趋势,随后基本不随退火时间的增加发生较大变化,但伸长率随退火时间的增加呈现出先上升后下降的趋势。采用 45 min 作为退火时间,析出相已基本完全溶解,析出强化作用得到削弱,可以获得塑性最好的退火试样,便于生产过程中的后续加工。

表 2 1 140 °C 退火不同时间变形态 Haynes 282 合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of the deformed Haynes 282 alloy after annealing at 1 140 °C for different times

退火时间/min	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
15	1 092	447	45.5
30	1 012	420	47
45	1 018	418	50
60	1 034	409	41.5

2.2 基于 Hall-Petch 关系的优选工艺机理与稳定性分析

变形态的 Haynes 282 合金经过退火后,加工硬化引起的位错、畸变的晶粒和残余应力消失,显微硬度的贡献机制一般考虑为固溶强化,晶界强化和少量未溶解的析出强化共同作用。由于屈服强度和硬度之间的线性关系^[14],使用如式(1)所示的 Hall-Petch 公式对显微硬度和平均晶粒尺寸进行拟合,拟合结果见表 3。

$$\sigma_y = \sigma_0 + k \times d^{1/2} \quad (1)$$

式中, σ_y 为试样的屈服强度,MPa; σ_0 为晶格摩擦阻

力(固溶强化、析出强化等),MPa; k 为强化系数(晶界强化),MPa $\cdot\mu\text{m}^{1/2}$; d 为平均晶粒尺寸, μm 。

表 3 不同退火温度显微硬度和平均晶粒尺寸 Hall-Petch 关系拟合结果

Table 3 Fitting of the Hall-Petch relationship between micro-hardness and average grain size at different annealing temperatures

保温温度/°C	σ_0 拟合值	k 拟合值	R ²
1 060	214.55	0.12	0.545 3
1 100	95.69	0.47	0.686 7
1 140	76.36	0.69	0.930 9
1 180	30.47	1.14	0.925 5

由表 3 可知,低温退火时,由于还有大量的析出相未完全溶解^[15],析出强化对硬度仍有较大贡献,拟合度 R² 较低,在更高的温度条件下,R² 均大于 0.9,表明 Hall-Petch 公式在这两个温度下能很好地描述硬度与晶粒尺寸的关系。退火温度从 1 140 °C 升高至 1 180 °C 时, σ_0 拟合值的大幅下降和 k 值的大幅升高,表明随着 M₂₃C₆ 型析出相的完全溶解,晶界强化机制的显著增强。在此条件下,晶界迁移剧烈,晶粒尺寸对保温时间极为敏感。随着保温时间从 15 min 延长至 60 min,平均晶粒尺寸由 53.57 μm 急剧增大至 68.18 μm,增幅达 27%;相应地,显微硬度由 187.2HV1 下降至 170.75HV1,降幅为 8.8%。这表明该工艺窗口过窄,生产中微小的波动即可能导致晶粒组织显著粗化,性能失控。相比之下,在 1 140 °C 下退火时,同等保温时间下晶粒尺寸仅从 36.59 μm 增长至 44.12 μm,增幅为 20%;显微硬度从 189.25HV1 降至 178.33HV1,降幅为 5.8%。该温

度下的组织与性能变化更为平缓,进一步表明 1 140 °C 作为实现组织和性能精确控制适宜退火温度的合理性。

2.3 冷拉减面率对显微组织和室温力学性能的影响

图 4 为优选工艺退火后不同冷拉减面率的 Haynes 282 合金丝材的显微组织。由图 4 可知,随着减面率的增加,显微组织逐渐由奥氏体等轴晶转变为纤维状,冷拉拔硬化过程中出现明显的位错增殖特征。在减面率低于 20.99% 时,显微组织仍表现为等轴奥氏体晶粒,同时,可以观察到孪晶。在减面率 30.56% 时,可以在晶粒内观察到少量的滑移线,当减面率接近 39.51% 时,晶粒被显著拉长为梭形,同时,内部出现大量的滑移簇。当减面率为 55.56% 时,晶界已变得模糊。当减面率为 62.65% 时,晶粒内部完全被滑移簇占据。当减面率接近 69.14% 时,显微组织已完全纤维化。

图 5 为优选工艺退火后不同冷拉减面率的 Haynes 282 合金丝材的室温拉伸力学性能变化趋势。由图 5 可知,随着冷拉减面率的增加,丝材的强度呈线性升高在冷拉减面率接近 70%,组织已完全纤维化后,丝材的抗拉强度达到 1 805 MPa;当冷拉减面率达到 30% 时,丝材的塑性显著降低,丝材拉伸试样均在钳口断裂,通过位移法测算伸长率约为 1%。

2.4 冷拉减面率对退火组织和力学性能的影响

图 6 为不同冷拉减面率 Haynes 282 合金丝材经优化工艺退火后的显微组织。图 7(a)(b)则分别对

应其平均晶粒尺寸与室温力学性能的变化规律。由图 6 可知,所有退火试样均已完成再结晶,组织中存在大量退火孪晶。随着冷拉减面率增加,显微组织演变呈现两种典型模式:在较低减面率区间 [10.80%~39.51%,图 6(a)~(d)],组织由粗大晶粒与异常长大晶粒组成,平均晶粒尺寸如图 7(a)所示,下降幅度较为显著;而在较高减面率区间 [47.84%~69.14%,图 6(e)~(h)],组织主要由细小均匀的等轴晶构成,平均晶粒尺寸下降趋势趋于平缓。值得注意的是,在减面率为 62.65% 时,组织中仍存在局部异常长大晶粒,导致该点平均晶粒尺寸有所回升。整体上,平均晶粒尺寸在最低减面率 (10.80%) 时达到最大值 52.47 μm ,在最高减面率 (69.14%) 时降至最小值 30.87 μm 。从室温力学性能如图 7(b)所示,抗拉强度与伸长率在不同减面率区间呈现不同变化趋势。在低减面率区间 (10.80%~39.51%),两者变化趋势基本同步,均呈现先下降后回升的特征;而在高减面率区间 (47.84%~69.14%),二者变化趋势则完全相反。尤其在减面率为 62.65% 时,伸长率虽略有上升,但抗拉强度出现显著下降,这与该条件下组织中出现的异常晶粒长大行为相一致。

图 8 为初始退火态试样和冷拉减面率 62.65% 和 69.14% 的变形态试样的析出相形貌和退火态析出相的能谱曲线。由图 8(a)退火态的显微形貌、图 8(d)~(e)退火态的析出相能谱曲线可知,退火后冷变形的痕迹完全消失,从粗糙、方向性强的纤维状结构转变为均匀、规则的多边形等轴晶结构,晶界上析出的大颗粒析出相为富 Cr 的 M_{23}C_6 型析出相;晶粒内细小,球状的颗粒析出相则为富 Ti、Mo 的 MC

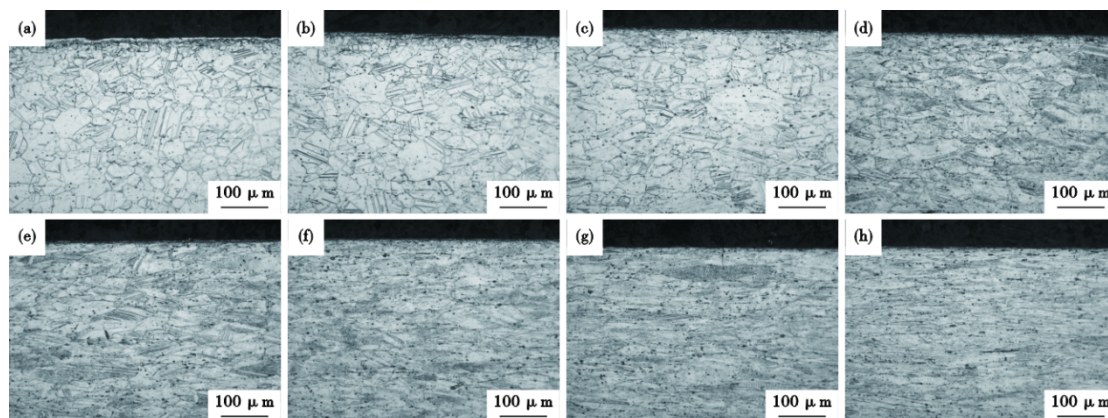


图 4 不同冷拉减面率的 Haynes 282 合金丝材金相组织: (a) 10.80%, (b) 20.99%, (c) 30.56%, (d) 39.51%, (e) 47.84%, (f) 55.56%, (g) 62.65%, (h) 69.14%

Fig. 4 Metallography of Haynes 282 alloy wire with different cold drawing reductions : (a) 10.80%, (b) 20.99%, (c) 30.56%, (d) 39.51%, (e) 47.84%, (f) 55.56%, (g) 62.65%, (h) 69.14%

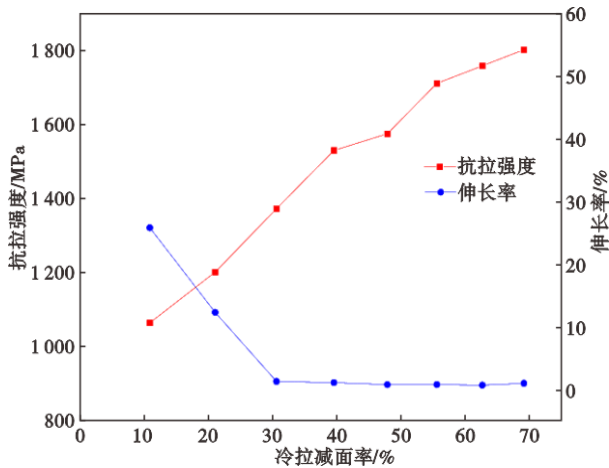


图5 不同冷拉减面率的Haynes 282合金室温力学性能
Fig. 5 Room-temperature mechanical properties of Haynes 282 alloy with different cold drawing reductions in area

形貌可知,剧烈塑性变形已让等轴晶粒开始破碎,初步呈现出沿拉拔方向的纤维化特征,平行的滑移线构成的滑移簇遍布于基体中,在减面率进一步增加后,析出相粒子出现的位置由滑移簇的末尾改变到滑移簇中间,同时晶界处的大颗粒 $M_{23}C_6$ 型析出相开始脱落。

2.5 冷拉减面率与退火态组织性能演变的关系

在变态态的合金退火过程中,通常经过回复,再结晶和晶粒长大三个阶段,晶粒长大是一种热激活过程,也被称作为二次再结晶。在再结晶过程中,驱动力来自冷变形过程中累计的储存能,当变形量达到临界变形度时(2%~15%),储存能刚刚足够驱动再结晶形核,但由于变形不均匀,只有变形量最大的局部区域(如晶界、孪晶界附近)才有足

型碳化物^[16-17]。由图8(b)-(c)高减面率区间的显微

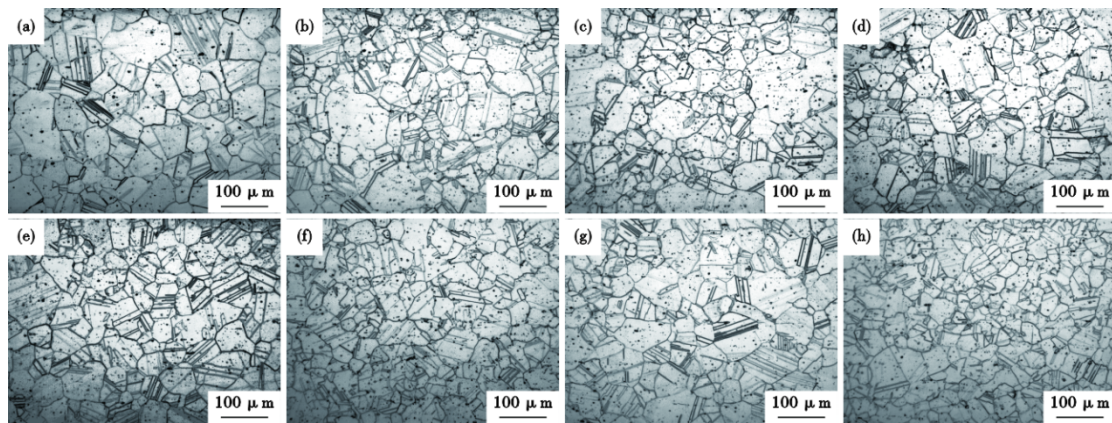


图6 不同冷拉减面率的Haynes 282合金丝材退火后的金相组织:(a)10.80%,(b)20.99%,(c)30.56%,(d)39.51%,(e)47.84%,(f)55.56%,(g)62.65%,(h)69.14%

Fig. 6 Metallography of Haynes 282 alloy wire after cold drawing with different area reductions and annealing : (a)10.80%, (b)20.99%, (c)30.56%, (d)39.51%, (e)47.84%, (f)55.56%, (g)62.65%, (h)69.14%

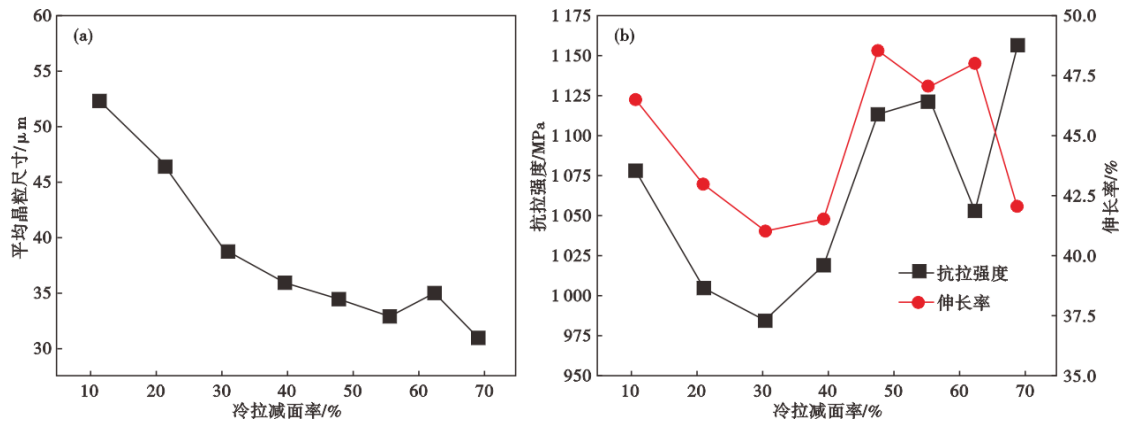


图7 不同冷拉减面率的Haynes 282合金丝材退火后的组织性能变化趋势:(a)平均晶粒尺寸,(b)室温力学性能
Fig. 7 The variation trends of average grain size (a) and room-temperature mechanical properties (b) of Haynes 282 alloy wire after cold drawing with different area reductions and annealing

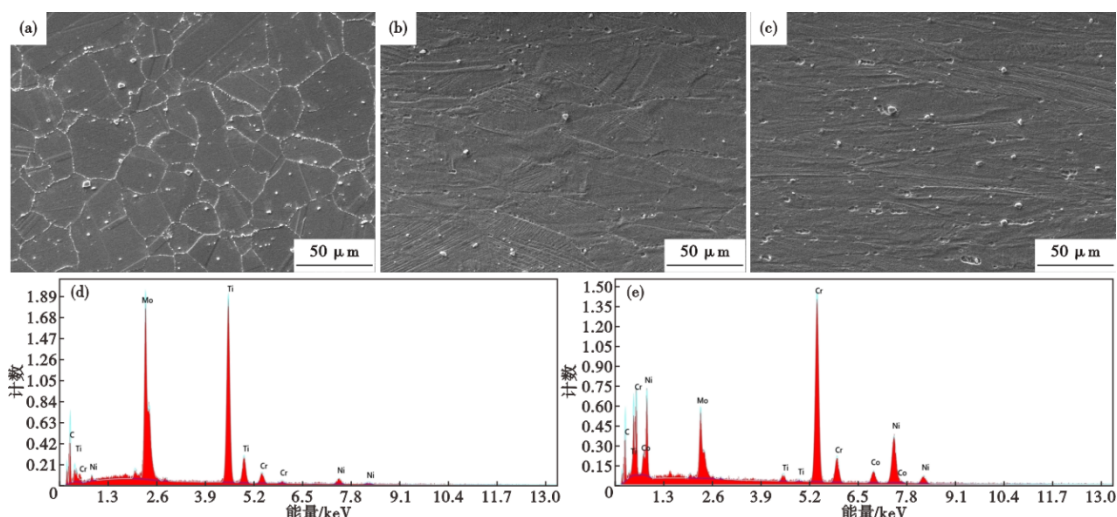


图8 Haynes 282合金丝材退火态和变形态的SEM析出相形貌:(a)退火态,(b) 62.65%,(c) 69.14%,(d)退火态晶内析出相能谱,(e)退火态晶界析出相能谱

Fig. 8 SEM morphology of precipitated phases in Haynes 282 alloy wire in the annealed and deformed conditions : (a) Annealed state, (b) 62.65%, (c) 69.14%, (d) EDS of intragranular precipitates in the annealed state, (e) EDS of grain boundary precipitates in the annealed state

足够的能量形成再结晶晶核, 新晶粒(无畸变)与周围高度畸变的晶粒之间存在着巨大的能量差, 引起晶粒的异常长大^[18]。在再结晶完成后, 晶粒长大的驱动力则来自总界面能降低的趋势。由图4和图6可知, 在低减面率的情况下, 由于冷拉拔过程中组织变化并不均匀, 少数具备取向优势的晶粒迅速吞并周围变形基体, 变成异常粗大的晶粒; 而当减面率较高的情况下, 丝材的芯部同样参与了塑性变形, 带来了更高的储存能, 同时晶粒形核的点位分布变得均匀, 晶粒尺寸逐步降低。而当减面率达到62.65%时, 尽管组织还未完全纤维化, 强烈的织构组织^[19], 让大量晶粒拥有相同的取向, 而少数取向不同的晶粒迁移率极高, 引起晶粒异常长大; 由图8可知, 当减面率进一步升高至69.14%时, 位错塞积在析出相粒子前引起巨大的应力集中, 将大量析出相粒子从基体界面剥离, 位移簇占满了整个界面, 再结晶形核位点再次变得均匀, 抑制了晶粒异常长大的趋势^[20]。同时, 晶粒尺寸随减面率的升高逐渐减小, 且减小速度变缓, 具备明显的幂函数特征。使用幂律函数和修正因子建立退火前的冷拉减面率和退火后的平均晶粒尺寸的关系模型, 如式(2)所示。

$$D = A \cdot \varepsilon_e^{-B} \cdot \left[1 + \alpha \cdot \exp \left(- \frac{(\varepsilon - \varepsilon_c)^2}{2\beta^2} \right) \right] \quad (2)$$

式中, D 为退火后的平均晶粒尺寸, μm ; A 为幂律系

数, 反映本征晶粒尺寸, 值为 $31.28 \mu\text{m}$; B 为幂律指数, 值为 0.2416 , 反映晶粒尺寸对等效应变的敏感性; α 为异常长大修正幅度常数, 值为 0.114 ; ε 为减面率; ε_c 为临界减面率, 值为 0.6265 ; β 为修正宽度系数, 值为 0.02 。

表4为通过拟合建立的幂律模型对不同冷拉减面率丝材退火后平均晶粒尺寸 D 的预测值和实测值的比较。由表4可知, 拟合方程的预测值准确性极高 ($R^2=0.998$), 平均晶粒尺寸的预测误差小于5%。可以对冷拉减面率在10.80%~69.14%的冷拉丝材退火后的平均晶粒尺寸进行精准预测。

如图6-7所示, 经优选工艺退火后, 不同冷拉减面率的 Haynes 282 合金丝材其组织与性能存在显著差异。在出现晶粒异常长大的减面率区间(10.80%~39.51%, 62.65%), 丝材的强度与伸长率均较差, 且二者变化趋势一致。而在无异常晶粒长大的减面率区间(47.84%~55.56%, 69.14%), 强度与伸长率的变化趋势相反。即强度升高伴随伸长率下降, 这与一般规律相符。图9展示了退火后丝材的强塑性随减面率的变化。强塑性可直观表征材料断裂前吸收能量的能力, 即强韧性, 在汽车制造等领域应用广泛^[21-23]。结果表明, 在高减面率区间, 强塑性随减面率增加而单调下降。当减面率处于47.84%~55.56%时, 抗拉强度为1113~1123 MPa, 伸长率为47%~48.5%, 强塑性均高于52 GPa·%, 表现出最佳的强塑性匹配。当减面率为10.80%时, 尽

表4 不同减面率 Haynes 282 合金丝材退火后平均晶粒尺寸拟合模型预测值与实测值的比较

Table 4 Comparison between predicted values from the fitting model and measured values of average grain size for Haynes 282 alloy wires with different area reduction ratios after annealing

减面率 $\varepsilon/\%$	丝材尺寸 d/mm	实测退火后平均晶粒尺寸 $D/\mu\text{m}$	预测退火后平均晶粒尺寸 $D/\mu\text{m}$	实测与预测误差 $1/\%$
10.80	0.85	52.47	52.84	0.70
20.99	0.80	46.64	44.36	4.90
30.56	0.75	38.87	38.50	1.00
39.51	0.70	35.87	35.63	0.70
47.84	0.65	34.41	34.21	0.60
55.56	0.60	32.80	32.89	0.30
62.65	0.55	34.98	34.98	0.00
69.14	0.50	30.87	30.08	2.60

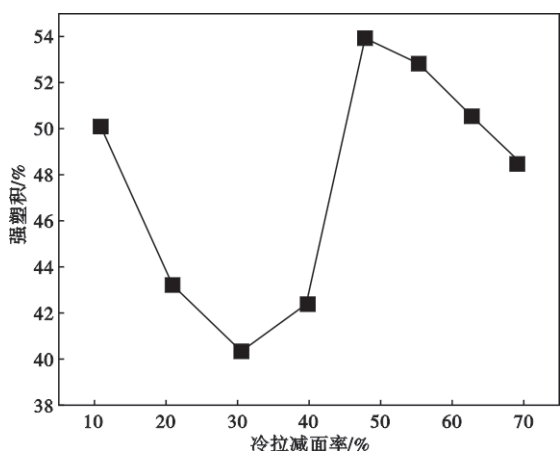


图9 不同冷拉减面率的 Haynes 282 合金丝材退火后的强塑积

Fig. 9 Strength-ductility product of Haynes 282 alloy wire after cold drawing with different area reductions and annealing

管此工艺下存在少量异常长大晶粒,但其在系列变态丝材中拥有最佳的塑性,且退火后的强塑积为 50.13 GPa·%,仍可适用于某些需要使用硬态丝材进行绕簧,钩针等成型加工,再对成品元件进行退火处理的特定场景。

参考文献

- [1] 王永红,袁国海,房焯欣,等. 高温高压弹簧蓄能密封结构设计及密封性能分析[J]. 液压气动与密封, 2024, 44(10): 29-36.
- [2] 张献光,裴逸武,周扬,等. 热轧GH4141高温合金热变形行为及动态再结晶规律[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(2): 505-516.
- [3] Damodhar Naidu G, Nageswara Rao G V S, Chaube R K. Effect of long-term exposure on microstructure and hardness of aged Haynes 282 alloy [J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2023, 12(6): 965-985.
- [4] 李阳,张威,袁刚. 冷变形及退火工艺对低温用奥氏体不锈钢组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(2): 219-223.
- [5] 叶青,谌颖,陈博,等. Haynes 282新型高温合金晶粒长大行为及数学模型研究[J]. 宇航材料工艺, 2022, 52(5): 35-42.
- [6] 刘强永,刘正东,甘国友,等. 固溶处理对Haynes282耐热合金组织与硬度的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(1): 52-57.
- [7] Joseph C, Persson C, Hörnqvist Colliander M. Influence of heat treatment on the microstructure and tensile properties of Ni-base su-

3 结论

本研究系统阐述了通过对退火工艺的全方位控制,可以获得组织稳定,性能优异的 Haynes 282 微细合金丝材,主要结论如下:

1) 变态的 Haynes 282 微细合金丝材最佳退火工艺参数为 1 140 °C 保温 45 min,在该工艺下可以实现 $M_{23}C_6$ 型析出相的充分溶解,获得晶粒度 6 级左右,工艺性能最佳的成品丝材。

2) 随着冷拉减面率的逐渐升高, Haynes 282 合金丝材的强度呈线性提高,显微组织的变化则存在减面率 $\leq 40\%$ 和 70% 两个节点。在减面率低于 40% 时,可称作低减面率区间,在此区间晶界仍清晰可见,仅仅是形态转变为梭形;当减面率提升至 70% 时,显微组织完全纤维化。

3) 对退火前减面率-退火后平均晶粒尺寸进行了幂律拟合,拟合方程的预测误差 $< 5\%$ 。结合对 Haynes 282 微细合金丝材力学和工艺性能的综合考量,将退火前的丝材冷拔减面率控制在 47.84%~55.56%,可以获得组织稳定,强度-塑性匹配最佳的成品丝材。

- peralloy Haynes 282 [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 679: 520-530.
- [8] 张鑫, 白亚冠, 聂义宏. Haynes 282 合金高温塑性变形的热加工图[J]. *材料热处理学报*, 2022, 43(8): 78-85.
- [9] 李秋石, 刁旺战, 王萍, 等. Inconel740H 镍基合金与 Haynes282 镍基合金的焊接接头组织和力学性能[J]. *机械制造文摘(焊接分册)*, 2019(6): 13-19.
- [10] 杨林, 熊建坤, 聂甫恒, 等. 高参数汽轮机转子用 HAYNES 282 焊接性分析及应用[J]. *东方汽轮机*, 2021(1): 39-43.
- [11] 尹宏飞, 袁勇, 严靖博, 等. Haynes 282 焊丝的焊接冶金分析及性能研究[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(21): 23-26+30.
- [12] 刁旺战, 徐祥久, 王萍, 等. Haynes 282 焊接接头长时热暴露后的力学性能和组织稳定性[J]. *材料导报*, 2025, 39(14): 135-141.
- [13] 符锐, 赵双群. Haynes282 合金在长期时效和持久过程中的组织稳定性[J]. *动力工程学报*, 2017, 37(6): 501-507.
- [14] Tian Y Z, Li L L, Li J J, et al. Correlating strength and hardness of high-entropy alloys [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(8): 2001514.
- [15] 王静霖, 姚志浩, 董建新, 等. Haynes282 合金中不同元素含量对析出相析出行为的影响[J]. *机械工程材料*, 2019, 43(10): 59-65.
- [16] Pizano L F L, Sridar S, De Vecchis R R, et al. Recrystallization behavior and mechanical properties of Haynes 282 fabricated by wire-arc additive manufacturing with post-heat treatment[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 119: 781-789.
- [17] Li S Q, Zhang Z, Liu R, et al. Microstructure-based computational fatigue life prediction of Haynes 282 alloy [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, 32(11): 5150-5166.
- [18] 张富伟, 朱海, 李晓晨, 等. 冷变形及再结晶热处理对高锰奥氏体低温钢硬度的影响[J]. *金属热处理*, 2024, 49(1): 223-227.
- [19] 何安平, 王资兴, 王安东. GH4141 合金冷拉拔过程中的组织演变与性能变化[J]. *塑性工程学报*, 2025, 32(7): 244-252.
- [20] 陈乐利. 压水堆 O 形密封环用高温合金 GH4169 的组织调控及热剪切-压缩变形行为研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2024.
- [21] 万志远, 董瑞峰, 李锋, 等. 新能源汽车用 1000 MPa 级先进高强度汽车钢弯曲回弹研究[J]. *塑性工程学报*, 2025, 32(4): 33-42.
- [22] 张丽凤, 王社则, 田博彤. 高强塑积汽车钢板的显微组织与力学性能[J]. *塑性工程学报*, 2021, 28(11): 181-188.
- [23] Xia L, Su H J, Hu Q D, et al. Effects of post-heat treatment and carbide precipitates on strength-ductility balance of GH3536 superalloy prepared by selective laser melting [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2024, 37(10): 1667-1679.