·XXXX·

单/双级时效对UNS R30003超薄钴基箔材组织与性能的调控

王言晔，王　祥，王　旭，刘　浩，刘　杰，马　静
（西安钢研功能材料股份有限公司，西安 712046）

摘　要：针对UNSR30003钴基弹性合金超薄箔材在经过大变形冷轧后残余应力高、塑性不足的问题，以97.4%累积变形量的0.1 mm超薄冷轧箔材为对象，研究了低温单级（450 ℃）、高温单级（500 ℃）及高低温双级（450 ℃+750 ℃）时效工艺对合金箔材微观组织、力学性能及V型弹簧弹性服役响应的调控规律。研究结果表明：冷轧态合金微观组织呈亚微米级层片状变形特征，畸变组织中贯穿多组变形晶粒的剪切带。450 ℃低温单级时效依靠细小弥散相与位错遗传使材料达到峰值强度（抗拉强度2 820 MPa，硬度549.23HV），但断后伸长率降至3.3%；500 ℃高温单级时效促使基体回复及析出相粗化，实现了强塑性的初步平衡。采用450 ℃×300 min+750 ℃×80 min双级时效工艺可有效兼顾强塑性；在保持1 600 MPa抗拉强度的同时，断后伸长率提升至6.7%（较冷轧态和低温单级时效分别提高19.64%和103.03%），且弹性模量（205 GPa）与抗弹性变形承载能力均优于冷轧态。双级时效通过分级析出与分段应力释放机制，诱导位错大幅重排并消除残余应力，实现了对合金箔材强度、塑性与弹性刚度的协同优化，为超薄精密弹性合金元件的热处理工艺制定提供依据。

关键词：UNSR30003钴基弹性合金；超薄箔材；单/双级时效；微观组织；强塑性匹配；弹性服役特性
DOI:10.20057/j.1003-8620.N260124　　**中图分类号：**TG142.1

Regulation of Microstructure and Properties of UNS R30003 Ultra-thin Cobalt-based Foil by Single-and Two-stage Aging

Wang Yanmou, Wang Xiang, Wang Xu, Liu Hao, Liu Jie, Ma Jing
(Xi′an Gangyan Special Alloy Co., Ltd., Xi′an 712046, China)

Abstract: Aiming at the problems of high residual stress and insufficient plasticity of UNSR30003 cobalt-based elastic alloy ultra-thin foils after large-deformation cold rolling, the 0.1 mm ultra-thin cold-rolled foil with an accumulative deformation of 97.4% was taken as the research object. The regulation mechanisms of microstructures, mechanical properties and V-spring elastic service response of alloy foils were investigated under three aging processes: low-temperature single-stage aging (450 ℃), high-temperature single-stage aging (500 ℃), and high-low-temperature two-stage aging (450 ℃+750 ℃). The results show that the cold-rolled alloy exhibits submicron lamellar deformed microstructures, and shear bands penetrating multiple deformed grains are observed within the distorted matrix. The low-temperature single-stage aging at 450 ℃ achieves the peak strength (ultimate tensile strength of 2 820 MPa, hardness of 549.23HV) via fine dispersed precipitates and inherited dislocations, whereas the elongation after fracture decreases to 3.3%. The high-temperature single-stage aging at 500 ℃ promotes matrix recovery and precipitate coarsening, yielding a preliminary strength-ductility balance. The two-stage aging process of 450 ℃×300 min+750 ℃×80 min can effectively balance strength and ductility; an ultimate tensile strength of 1 600 MPa is maintained while the elongation after fracture increases to 6.7%, which is 19.64% and 103.03% higher than those of the cold-rolled state and the low-temperature single-stage aged state, respectively. Moreover, its elastic modulus (205 GPa) and resistance to elastic deformation are superior to those of the cold-rolled foil. Through hierarchical precipitation and stepwise stress-release mechanisms, two-stage aging induces substantial dislocation rearrangement and relieves residual stress, realizing the synergistic optimization of strength, ductility and elastic stiffness of the alloy foil. This work provides a reference for formulating heat-treatment procedures of ultra-thin precision elastic alloy components.

Key Words: UNS R30003 Cobalt-based Elastic Alloy; Ultra-thin Foil; Single-and Two-stage Aging; Microstructure; Strength-ductility Matching; Elastic Service Performance

UNS R30003钴基弹性合金作为一种典型的高强、高弹性时效硬化型合金[1-2]，因具备优异的机械强度、耐蚀耐磨性及弱磁响应[3-4]，被广泛应用于航空航天惯性导航、深海勘探传感器[5-7]、医疗器械及

作者简介：王言晔（1995—），女，硕士，工程师；　**E-mail:**1210776941@qq.com；　**收稿日期：**2026-08-06
Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

高精密仪器仪表等领域[8-10]，用于制造膜片、膜盒、弹性吊丝及V型弹簧等超薄精密弹性元件。随着器件向微型化与高稳定性方向发展，对合金箔材的成型能力、服役寿命与抗应力松弛性能提出了更高要求。该类超薄箔材通常采用“固溶+超大变形量冷轧+最终时效”的复合工艺制备；其中，大变形量冷轧通过引入高密度位错、形变孪晶与剪切带大幅提升基体硬化水平，进而提高材料的宏观强度。然而，超大塑性变形（总变形量＞95%）会导致箔材基体内部积累极高的内应力，引发宏观强度及刚度波动、脆性增加的同时弹性承载稳定性下降，增加了箔材后续高精度成型的难度。

为消除冷轧引发的残余应力并促进时效析出强化效应，通常需引入时效热处理[11]。传统时效强化研究多集中于单级时效工艺，即在450~530 ℃范围内利用静态回复与细小金属间化合物的析出弥散实现位错钉扎，从而获得较高的强度与硬度[12-13]。然而，已有的研究发现[14]，单级时效常面临“强塑倒置”的局限：峰时效态下，局部晶格畸变与应力集中加剧，导致箔材塑性严重降低，增加了成型开裂的风险；而提高时效温度虽能促使应力松弛并改善塑性，但易引发析出相粗化与过时效，导致箔材强度显著下降。这种强塑性难以匹配的情况，限制了UNSR30003超薄箔材在复杂结构成型及高性能服役中的应用。

双级时效工艺已在超高强钢和铝合金领域展现出良好的强塑性调控能力[15]，但其在超薄钴基弹性合金箔材上的应用扔尚待深入。引入双级时效工艺的核心逻辑在于：在一阶段低温热处理时期，通过沉淀相弥散析出奠定强度基础；在二阶段高温热处理，利用热激活能促使位错有序重排与湮灭，从而在保留超薄钴基弹性合金箔材高强度的同时拓宽均匀塑性变形区间，优化材料的弹性服役性能。

基于此，以97.4%累积变形量轧制的0.1 mmUNSR30003超薄箔材为对象，对比研究了低温单级、高温单级及双级时效制度下的微观组织演变。结合室温单向拉伸、维氏硬度及V型弹簧分级压缩测试，分析了热处理制度对合金力学性能、滞后行为与弹性稳定性的影响，阐明了“冷轧形变组织-时效微观演变-宏观力学/弹性响应”的映射关系，为UNSR30003超薄弹性箔材的精密制造与热处理工艺优化提供参考。

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

试验原料是西安钢研功能材料公司提供的为UNSR30003厚度为δ3.8 mm钴基弹性合金热轧板，其化学成分见表1。

1.2　试验内容

1.2.1　试验所需箔材制备

1）δ0.1 mm冷轧箔材制备

选用3.8 mm厚的UNSR30003钴基弹性合金板材为初始基材。首先将3.8 mm厚的基材置于氢气保护加热炉中，在1 180~1 200 ℃温度范围内保温1 h后利用水套快速冷却进行固溶处理，以消除热轧态始组织不均匀性及残余应力。随后对固溶态母材实施多道次冷轧，每个轧程之间增加去应力退火工艺来缓解加工硬化，防止冷加工过程发生脆性锻裂。最终在97.4%的冷轧总累积变形量下，制得厚度为0.1 mm的超薄合金箔材供后续时效试验使用。

2）时效处理箔材制备

为探究时效热处理参数对UNSR30003合金0.1 mm箔材性能的影响，以加热温度、保温时间及时效次数为主要参数，设计了多组热处理试验（分组方案详见表2）。通过对比不同时效热处理条件下的组织与性能测试结果，明确工艺参数对UNSR30003钴基弹性合金箔材强塑性及弹性承载能力的作用规律，为优选最佳热处理制度提供依据。

1.2.2　性能表征方案

针对冷轧态及各组时效态UNSR30003箔材，分别采用维氏硬度、单向拉伸、V型弹簧压缩及金相显微分析等手段，评估不同时效工艺对箔材强塑性、弹性稳定性及组织演变的影响。各测试项目的具体实施细节如下：

1）维氏硬度测试

采用HV-10MPTA型维氏硬度计对冷轧态及不

表1　UNS R30003钴基弹性合金的化学成分（质量分数）

Table 1　Chemical composition of UNS R30003 cobalt-based elastic alloy　%

C	Mn	Si	P	S	Co	Cr	Ni	Mo	Fe
≤0.15	1.5~2.5	≤1.20	≤0.015	≤0.015	39.0~41.0	19.0~21.0	14.0~16.0	6.0~8.0	Bal

表2 UNS R30003钴基弹性合金时效试验方案

Table 2 Aging experimental schedule for UNS R30003 cobalt-based elastic alloy

试验分组	时效工艺
1	冷轧态(未时效)
2	450 ℃×300 min低温单级时效
3	500 ℃×300 min高温单级时效
4	450 ℃×300 min+750 ℃×80 min双级时效

同时效态超薄箔材试样的表面硬度进行定量测试。测试前试样经打磨与抛光处理,以消除表面轧制划痕及加工残余应力的影响。各组试样均在相同条件下,依据GB/T4340.1—2024《金属材料维氏硬度试验第1部分:试验方法》对试样的硬度进行检测。

2) 拉伸力学性能测试

沿轧制方向(RD)对冷轧态及不同时效态超薄箔材进行室温拉伸力学性能进行检测,依据GB/T228.1—2021《金属材料拉伸试验》制备标准拉伸试样。室温单向拉伸试验在UTM5305SYXL型电子万能试验机上完成,试验加载速率固定为2.0 mm/min。测试过程中,利用引伸计与数据采集系统得到试样的应力-应变曲线,获取合金的抗拉强度、屈服强度、断后伸长率及弹性模量等力学性能参数。

3) V型弹簧弹性服役特性

为检测冷轧态及各时效态箔材的弹性服役特性,将冷轧态与时效态箔材试样冲压成型为V型弹簧,结构尺寸如图1所示。利用电子万能试验机对V型试样进行分级压缩加载,并通过位移传感器同步记录载荷-位移响应曲线。根据测试结果,对比分析不同时效制度下合金的压缩弹性响应、滞后行为及结构弹性稳定性。

4) 微观组织表征

依据GB/T13298—2015《金属显微组织检验方法》对试样经镶嵌、逐级砂纸打磨、机械抛光、化学腐蚀后采用ZEISS金相显微镜对UNSR30003合金冷轧态及时效态箔材试样进行微观组织观测。通过对比分析不同工艺条件下合金的晶粒形貌、组织均匀性及析出相演变特征,阐明时效工艺对宏观力学与弹性性能的微观调控机制。

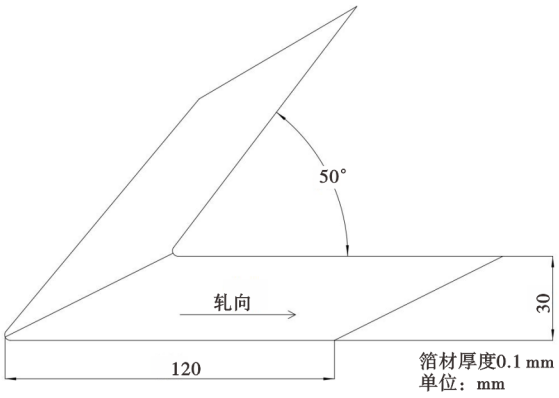


图1 V形弹簧试样制样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of V-shaped spring specimen preparation

2 试验结果和分析

2.1 不同时效热处理对UNSR30003钴基弹性合金微观组织的影响

图2所示为0.1 mmUNSR30003钴基弹性合金0.1 mm箔材在冷轧态及不同时效态的横截面(RD-TD)金相组织。通过对比冷轧态、低温单级时效、高温单级时效与双级时效态的组织演变特征,可阐明该合金箔材在热处理过程中的微观组织演化与强化机制。

如图2(a)所示,经97.4%超大变形量冷轧后,钴基弹性合金的原始奥氏体晶界已经被完全破坏,基体中形成典型的超细纤维状变形组织,晶粒沿轧制方向被极度拉长并呈现亚微米级层片状平行排布。由金相照片可观察到畸变组织中存在贯穿多组变形晶粒的剪切带,表明经过超高应变冷轧过程,钴

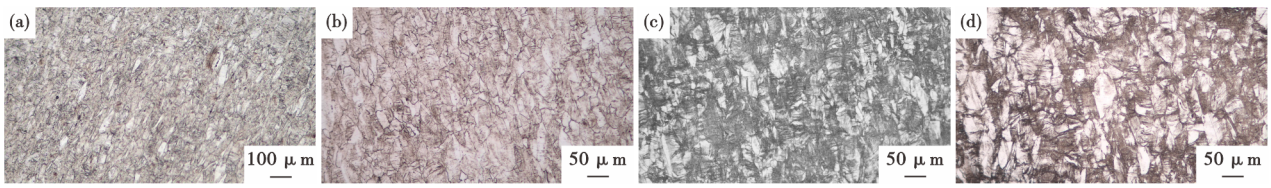


图2 UNS R30003钴基弹性合金0.1 mm箔材不同状态的金相组织照片:(a)冷轧态,(b)450 ℃×300 min低温单级时效态,(c)500 ℃×300 min高温单级时效态,(d)450 ℃×300 min+750 ℃×80 min双时效态

Fig. 2 Metallographic micrographs of 0.1 mm-thick UNS R30003 cobalt-based elastic alloy foil in different states: (a) cold-rolled state, (b) low-temperature single-stage aged state at 450 ℃ for 300 min, (c) high-temperature single-stage aged state at 500 ℃ for 300 min, (d) two-stage aged state (450 ℃×300 min+750 ℃×80 min)

基弹性合金基体内部发生非均匀塑性流变，基体内部积累了极高的形变储能与残余应力，为后续时效过程的析出行为与组织回复提供热力学条件。

如图2(b)所示，经450 ℃×300 min低温单级时效后，合金仍维持着典型的冷轧纤维状组织与定向排布特征。由于在该温度下时效，合金基体内热激活能较低，不足以诱发再结晶，因而完整的继承了冷轧态由高密度位错与形变孪晶构成的加工硬化基础。且在时效过程中，钴基弹性合金基体发生静态回复，过饱和固溶体中析出大量细小弥散的金属间化合物，这些细小弥散的析出相形成强烈钉扎位错，在促进残余应力部分释放的同时，也有效阻碍了位错的滑移与湮灭，显著增强了基体的形变抗力，宏观表现出明显的时效强化。

如图2(c)所示，500 ℃×300 min高温单级时效的试样微观组织展现出明显的回复与析出相粗化特征。高温时效时箔材基体内部热激活能提升，过饱和固溶体中的溶质会优先在高位错密度区域、形变孪晶界等储能高的位置析出并聚集粗化。此时基体虽还保留着冷轧纤维状组织基体，但由于高储能促进位错攀移与交滑移的启动，回复程度明显高于低温时效试样。并且高温过程促进了冷轧残余应力的有效释放，提升了相组织的稳定性；同时，由于残余形变组织与析出相的协同作用，使合金在回复状态下仍保持了较高的形变抗力。

如图2(d)所示，经450 ℃×300 min+750 ℃×80 min双级时效处理后，箔材基体仍保持着大变形量冷轧形成的纤维状组织，但相比单级时效试样，双级时效试样的组织界面形貌更为清晰平整。双级高温时效显著促进了基体的回复，诱导位错大量重排与湮灭，使基体位错密度大幅降低。同时，二阶段高温时效给箔材基体提供了更多的能量，此时热激活效应足够削弱析出相对晶界及位错的钉扎效应，使基体内部残余应力可以充分释放，相稳定性增强；但是位错强化与析出钉扎效能的减弱，也会导致材料的宏观形变抗力有所下降。

试验结果可知，时效工艺会明显影响UNSR30003超薄箔材的微观组织演变。基体回复程度、位错密度变化以及析出相行为的组合变化，形成了箔材力学与弹性性能差异化的组织基础。低温单级时效依靠“高遗传位错密度与弥散析出相钉扎”的协同作用，最大限度保留了冷轧加工硬化效果，是诱导合金产生峰值强度的主要机制；高温单级时效则伴随着析出相粗化与基体回复，在维持基础强度的同时促进了组织均匀化；双级时效通过诱导充分回复与残余应力彻底释放，显著提升了组织稳定性，但位错密度的降低与析出相钉扎效能的弱化，也会导致强度与硬度的下降。上述组织演变规律，从微观层面阐明了不同时效制度下宏观力学与弹性响应差异的本质。

2.2　不同时效热处理对UNSR30003钴基弹性合金力学性能的影响

采用室温单向拉伸、维氏硬度及V型弹簧压缩弹性测试，对0.1 mm厚UNSR30003超薄箔材在冷轧态及三种时效态的力学与弹性响应进行了对比分析。测试所得拉伸数据、硬度指标、压缩载荷及应力-应变曲线分别汇总于表3-5与图3。测试结果表明，时效工艺对材料的强塑性、弹性模量及抗变形能力存在明显影响，单级与双级时效表现出明显的的强化与应力释放区别。

作为对照组，冷轧硬态试样通过大塑性变形诱导高密度位错与形变孪晶，实现了明显的加工硬化。其抗拉强度与屈服强度分别为1 610、1 420 MPa，断后伸长率为5.6%，平均维氏硬度为444.86HV。该状态下材料弹性模量为200 GPa，在20%、30%及40%压缩形变下的载荷分别为243、326、361N，均为各试验组最低值。虽然冷轧组织赋予了基材一定的基础强度，但大量残留的畸变能导致材料弹性模量与刚度偏低，承载稳定性不足，限制了精密弹性元件的应用范围。

经450 ℃×300 min低温单级峰时效处理后，试样表现出全试验组中最高的强度与硬度。其抗拉强度和屈服强度分别达到2 820、2 450 MPa，弹性模

表3　UNS R30003钴基弹性合金不同状态拉伸力学性能统计表

Table 3　Statistical table of tensile mechanical properties of UNS R30003 cobalt-based elastic alloy in different states

时效工艺	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	弹性模量/GPa
冷轧态	1 610	1 420	5.6	200
450 ℃×300 min	2 820	2 450	3.3	225
500 ℃×300 min	2 280	1 850	4.4	215
450 ℃×300 min+750 ℃×80 min	1 600	1 380	6.7	205

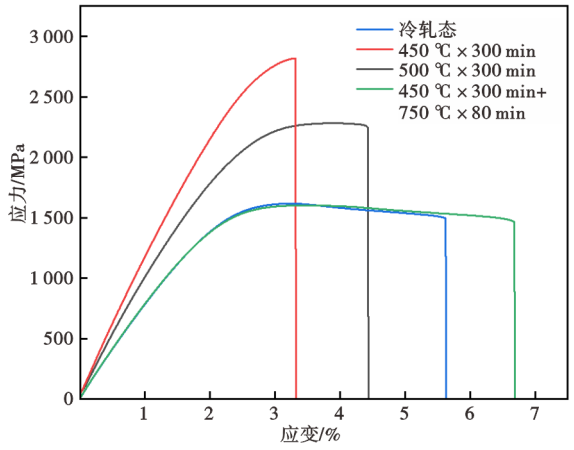


图3 UNS R30003钴基弹性合金状态应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of UNS R30003 cobalt-based elastic alloy in different states

量升至225 GPa,平均维氏硬度为549.23HV(较冷轧态提高23.46%);在20%、30%及40%压缩量下,载荷分别达到284、398、431 N,呈现出较强的抗应变能力。由强化结果分析可知,钴基弹性箔材在时效过程中会产生大量弥散析出相对位错及孪晶界产生了强烈的钉扎效应,并与大变形量的冷轧残余加工硬化结合,进一步提升箔材的强度。由于该制度未能有效释放冷轧残余应力,基体内部应力高度集中,导致箔材的塑性显著下降,断后伸长率降至3.3%(较冷轧态下降41.07%),呈现出典型的脆性断裂倾向。

经500 ℃×300 min高温单级时效处理后,相较450 ℃低温峰值时效呈现轻度过时效特征。受析出相适度粗化及位错钉扎效应减弱的影响,材料的强度与硬度较峰值时效组有所回落,其抗拉强度、屈服强度和平均硬度分别为2 280、1 850 MPa及501.58HV;弹性模量为215 GPa,在20%、30%及40%压缩量下,载荷依次为268、380、423 N。温热激活效应促使基体充分回复并释放了更多的冷轧残余应力,缓解了箔材的局部应力集中。因此,试样断后伸长率回升至4.4%,较低温单级时效组提升33.33%,在维持高强度的同时恢复了部分塑性。

经450 ℃×300 min+750 ℃×80 min双级时效处理后,试样展现出良好的强塑性匹配。材料在维持高强度的同时(抗拉强度1 600 MPa、屈服强度1 380 MPa,较冷轧硬态仅微降10、40 MPa),弹性模量达到205 GPa,在20%、30%及40%压缩量下,载荷分别为255、366、407 N,刚度与承载能力均优于冷轧基材。同时,材料塑性改善显著,断后伸长率提升至6.7%(四组最高),较冷轧态与低温单级时效分别提高19.64%和103.03%。时效过程中,第一阶段的低温时效预先完成弥散相析出强化,第二阶段的高温时效则启动位错重排与湮灭,显著降低箔材基体位错密度并释放均匀化残余应力,由此克服了单级时效"高强低塑"的局限,实现了强度、塑性与刚度的良好匹配。

试验结果可知,单级低温时效可使合金获得最高的强度、硬度和抗变形刚度,但成型性受限,宜用于高承载且形变要求较低的弹性构件。升高单级时效温度虽能促使残余应力松弛并改善塑性,但是会牺牲部分强度。相比之下,双级时效通过调控相析出与应力状态,在维持冷轧基材固有强度的同时实现了塑性与弹性的同步优化,解决了强度与塑性

表4 UNS R30003钴基弹性合金不同状态维氏硬度统计表

Table 4 Vickers hardness of UNS R30003 cobalt-based elastic alloy in various states **HV**

时效工艺	实测值					平均值
冷轧态	437.60	447.50	449.50	440.80	448.90	444.86
450 ℃×300 min	551.10	548.30	548.30	549.10	549.35	549.23
500 ℃×300 min	507.10	492.90	504.70	501.20	502.00	501.58
450 ℃×300 min+750 ℃×80 min	483.70	495.20	492.90	489.10	492.10	490.60

表5 UNS R30003钴基弹性合金不同状态在不同压缩量时载荷统计表

Table 5 Load statistics of UNS R30003 cobalt-based elastic alloy in different states with various compression amounts

时效工艺	V形弹簧在不同压缩量时的载荷/N		
	20%	30%	40%
冷轧态	243	326	361
450 ℃×300 min	284	398	431
500 ℃×300 min	268	380	423
450 ℃×300 min+750 ℃×80 min	255	366	407

不能兼顾的问题。双级工艺兼顾强/塑/刚匹配，可作为长寿命、高精度复杂弹性元件的优选热处理制度，并为UNSR30003超薄箔材的工程化量产提供依据。

3　结论

通过对0.1 mmUNSR30003钴基弹性合金超薄箔在超大变形冷轧及不同单/双级时效热处理下的微观组织演变、室温拉伸力学性能、维氏硬度及V型弹簧弹性特性的系统研究，得出主要结论：

1）450 ℃×300 min低温单级时效，适用于高刚度、低塑性成形要求的简易弹性件。500 ℃×300 min高温单级时效为强塑性过渡工艺。

2）450 ℃×300 min+750 ℃×80 min双级时效适用复杂精密超薄弹性元件的精密热处理。

参考文献

[1] 何开元. 精密合金材料学[M]. 北京：冶金工业出版社，1991.

[2] 叶清松. 钴铬钼合金电化学机械抛光工艺研究[D]. 长春：长春工业大学. 2025.

[3] Wesson Ashford J, Coburn K L, Fuster J M. The elgiloy microelectrode: Fabrication techniques and characteristics [J]. Journal of Neuroscience Methods, 1985, 14(4): 247-252.

[4] Ho J C, Shellock F G. Magnetic properties of Ni-co-Cr-base elgiloy [J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 1999, 10(9): 555-560.

[5] 郭　灵. 航空制造工程手册-热处理[M]. 2版. 北京：航空工业出版社, 2010: 437-442.

[6] 潘　肃，李成功. 金属功能材料在航天航空工业方面的应用[J]. 金属功能材料, 1995, 2(1): 1-4.

[7] Balat-Pichelin M, Sans J L, Escape C, et al. Emissivity of Elgiloy and pure niobium at high temperature for the Solar Orbiter mission [J]. Vacuum, 2017, 142: 87-95.

[8] 郑小平，毕若杰. 骨折金属内固定材料的研究进展[J]. 中国矫形外科杂志, 2012, 20(2): 149-151.

[9] YamanakaK, MoriM, KartikaI, et al. Effect of multipass thermo-mechanical processing on the corrosion behaviour of biomedical Co - Cr - Moalloys[J]. Corrosion Science, 2019,148:178-187.

[10] RainaDB, MatuszewskiLM, VaterC, etal. A facile one-stage treatment of critical bone defects using a calciumsul fate/hydroxy a patite biomaterial providings patiotemporal delivery of bone morpho genic protein-2 and zoledronic acid[J]. ScienceAdvances, 2020, 6(48):1-12.

[11] 庞芳仙. 弹性合金的热处理[J]. 金属热处理, 1996, 21(6): 42-43.

[12] Philip S M, Darvell B W. Effect of heat treatment on the tensile strength of 'Elgiloy' orthodontic wire[J]. Dental Materials, 2016, 32(8): 1036-1041.

[13] 金晓鸥，王正君，金晓男，等. 室温大气环境下450 ℃时效态3 J21合金拉伸性能[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(4):27-30.

[14] Assefpour-Dezfuly M, Bonfield W. Strengthening mechanisms in elgiloy [J]. Journal of Materials Science, 1984, 19(9): 2815-2836.

[15] 李振团，黄　烁，王　冲，等. 双级时效时间对GH4706合金组织性能的影响[J]. 特殊钢, 2025,46(4):157-162.