

## PH13-8Mo 时效硬化不锈钢衬套时效处理尺寸收缩分析

王萍, 杨堃, 田少鲲\*, 王明杰, 王晨旭, 肖抓, 袁运通, 张兆兴

首都航天机械有限公司 北京

**【摘要】**PH13-8Mo 时效硬化不锈钢衬套, 在 540°C 时效处理后硬度约为 HRC44.13, 抗拉强度可达 1483.0MPa, 这是在时效处理过程中, Ni<sub>3</sub>Al、NiAl 等第二相析出起到了强化作用。温度由 540°C 提升至 620°C 后, 衬套的直径发生了明显收缩, 内径收缩 0.133mm, 外径收缩 0.115mm。除了应力导致表层材料发生微量的、不可逆的局部微观塑性流变之外, 主要原因是在时效处理过程中, 马氏体组织转变为逆转奥氏体, 晶体结构发生了改变。同时, 逆转奥氏体的存在使 PH13-8Mo 时效硬化不锈钢的强度、硬度大幅下降, 而塑性明显提升, 其伸长率可达 19.88%。

**【关键词】**PH13-8Mo; 时效硬化不锈钢; 时效处理; 逆转奥氏体; 尺寸收缩

**【收稿日期】**2025 年 12 月 14 日

**【出刊日期】**2026 年 1 月 5 日

**【DOI】**10.12208/j.jer.20260012

### Analysis of dimensional shrinkage issues of PH13-8Mo age-hardening stainless steel bushings after aging treatment

Ping Wang, Kun Yang, Shaokun Tian\*, Mingjie Wang, Chenxu Wang, Zhua Xiao, Yuntong Yuan, Zhaoxing Zhang  
Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing

**【Abstract】**The hardness value of the PH13-8Mo age-hardening stainless steel bushing after aging treatment at 540°C is approximately HRC 44.13, and the tensile strength can reach 1483.0 MPa. This is due to the precipitation of the second phase such as Ni<sub>3</sub>Al and NiAl during the aging treatment process, which plays a strengthening role. After the temperature was raised from 540°C to 620°C, the diameter of the bushing shrank significantly, with the inner diameter shrinking by 0.133mm and the outer diameter shrinking by 0.115mm. Apart from the trace and irreversible local micro-plastic deformation of the surface material caused by stress, the main reason is that during the aging treatment process, the martensite structure transforms into reversed austenite, and the crystal structure changes. Meanwhile, reversing the presence of reversed austenite significantly reduces the strength and hardness of PH13-8Mo age-hardening stainless steel, while its plasticity is notably enhanced, with an elongation rate that can reach 19.88%.

**【Keywords】**PH13-8Mo; Age-hardening stainless steel; Aging treatment; Reverse austenite; Dimensional shrinkage

PH13-8Mo 是一种马氏体硬化不锈钢, 它不仅具备较高的强度和硬度, 还具有良好的断裂韧性和耐腐蚀性, 且其力学性能还可以依据热处理参数进行调整, 因此广泛应用于航空航天、核工业、石油化工等领域<sup>[1-3]</sup>。目前大家对 PH13-8Mo 时效硬化不锈钢的研究很多都停留在基础工艺和机理上, 如唐科<sup>[4]</sup>、周海冲<sup>[5]</sup>、杨凯<sup>[6]</sup>、于世凡<sup>[7]</sup>等人均对 PH13-8Mo 不锈钢时效过程中的析出相及力学性能变化规律进行了研究, 但是有关时

效过程中产品尺寸变化没有相关研究。而在生产实践中, 我们发现衬套零件尺寸发生了显著收缩, 因此我们以此入手开展研究。

#### 1 试验材料与方法

试验材料为 PH13-8Mo 时效硬化不锈钢棒材, 原材料标准为 QJ/DT01.23196-2010, 规格为 Φ70mm, 供应状态为热轧、退火态。PH13-8Mo 时效硬化不锈钢棒材化学成分要求及试验材料化学成分如表 1 所示。

表 1 PH13-8Mo 时效硬化不锈钢化学成分 (wt.%)

元素	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Mo	Al	N	Fe
标准	≤0.05	≤0.10	≤0.01	≤0.008	≤0.10	12.25-13.25	7.50-8.50	2.00-2.50	0.90-1.35	≤0.01	余量
试验材料	0.04	0.03	0.004	0.005	0.03	12.51	8.40	2.23	1.07	0.004	余量

\*通讯作者: 田少鲲 (1995-) 男, 硕士, 河北唐山人, 主要从事金属热处理研究。

首先使用空气电炉对 PH13-8Mo 时效硬化不锈钢棒材进行固溶处理, 固溶处理温度为 925℃, 保温时间为 110min, 冷却方式为油冷。然后将其加工成内径 42mm、外径 52mm、高度为 13.4mm 的环形衬套, 以及同炉批力学性能试样。最后进行时效处理, 时效处理温度分别为 540℃和 620℃, 时间为 4h, 冷却方式为空冷。使用游标卡尺分别测量时效处理前后的衬套尺寸, 记录零件变形量。使用洛氏硬度计检测不同参数时效处理后零件的硬度。使用万能试验机检测力学性能, 试样规格如图 1 所示。使用光学显微镜及扫描电子显微镜观察时效处理后零件的显微组织。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 时效处理后衬套的尺寸变化及力学性能

在 540℃和 620℃温度下时效处理 4h 后, 衬套零件的尺寸、硬度及力学性能分别如表 2 和表 3 所示。从中可以看出, 经过 540℃时效处理后, 衬套的尺寸变化较小, 内径收缩约 0.025±0.010mm, 外径收缩约 0.028±0.009mm, 高度收缩约 0.008±0.004mm。而时效温度提升至 620℃时, 衬套的尺寸发生了显著收缩, 内

径收缩约 0.133±0.008mm, 外径收缩约 0.115±0.015mm, 高度收缩约 0.018±0.008mm。相较于 540℃时效处理, 衬套在经过 620℃时效处理后, 内径收缩量增加了约 5.3 倍, 外径收缩量增加了约 3.2 倍。

经过 540℃时效处理后, PH13-8Mo 时效硬化不锈钢的硬度约为 HRC44.13±0.88, 抗拉强度约为 1483.0±8.0MPa, 屈服强度约为 1449.5±15.5MPa, 伸长率约为 11.63±0.38%, 断面收缩率约为 59.63±1.63%。时效温度提升至 620℃后, PH13-8Mo 时效硬化不锈钢的硬度约为 HRC31.25±0.75, 抗拉强度约为 997.5±8.8MPa, 屈服强度约为 669.3±17.1MPa, 伸长率约为 19.88±0.44%, 断面收缩率约为 73.50±0.75%。相较于 540℃时效处理, PH13-8Mo 时效硬化不锈钢在经过 620℃时效处理后, 硬度、抗拉强度、屈服强度分别下降了约 29.2%、32.7%、53.8%, 而伸长率和断面收缩率分别增加了 71.0%和 23.3%。

结合力学性能及显微组织变化情况, 对衬套零件时效处理后尺寸收缩的原因进行分析。主要有以下三个原因。

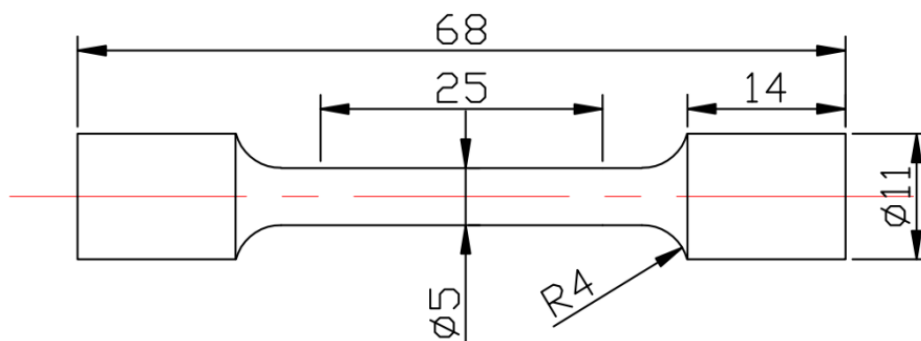


图 1 拉力试样规格

表 2 时效处理前后衬套零件尺寸变化

编号	时效温度/℃	内径/mm		外径/mm		高度/mm	
		时效前	时效后	时效前	时效后	时效前	时效后
1	540	42.02	42.00	52.05	52.04	13.41	13.40
2		42.03	42.02	52.03	51.99	13.40	13.39
3		42.02	41.99	52.06	52.03	13.41	13.41
4		42.05	42.01	52.05	52.02	13.40	13.39
5		42.04	41.92	52.05	51.95	13.43	13.40
6	620	42.06	41.92	52.07	51.95	13.41	13.40
7		42.06	41.92	52.05	51.95	13.41	13.40
8		42.06	41.93	52.06	51.92	13.42	13.40

表 3 时效处理后 PH13-8Mo 时效硬化不锈钢硬度及力学性能

编号	时效温度/°C	硬度/HRC	Rm/MPa	Rp0.2/MPa	A/%	Z/%
1	540	44.5	1486	1438	11.5	58
2		43.5	1470	1430	11.0	62.0
3		43.0	1480	1450	12.0	60.5
4		45.5	1496	1480	12.0	58
5	620	30.0	980	635	20.0	73.0
6		32.0	1003	699	20.5	73.0
7		31.0	1004	670	19.0	75.0
8		32.0	1003	673	20.0	73.0

## 2.2 热处理过程热应力对衬套尺寸的影响

冷却过程中环形零件的内部与表面形成了温度差: 冷却初始阶段, 零件表面迅速降温, 尤其是环形零件的边缘处; 芯部冷却速度比较缓慢。环形零件内部温度高、外部温度低的分布规律与实际相吻合。随着冷却时间的延长, 表面温度与芯部温度差逐渐减小。

热处理残余应力场存在三个方向的应力。三个主应力的方向分别为径向、环向和轴向。径向应力在热处理结束后表面主要呈现压应力, 内部呈现拉应力, 最大压应力分布在环形外环表面。环向应力同样呈现着内拉外压的形式, 最大拉应力分布在环形的中心, 最大压应力分布在环形的内外环表面。轴向应力的分布规律与环向应力一致, 最大拉应力分布在环形中间位置, 最大压应力分布在环形的上下端。

环向和轴向应力均是外拉内压分布, 径向应力在环形零件表面呈现压应力, 在毛坯中间应力值较小, 不仅有压应力, 还有拉应力。从残余应力的大小来看, 环向残余应力的幅值最大, 轴向残余应力的幅值次之, 径向残余应力幅值最小<sup>[8]</sup>。

时效处理保温结束后的冷却过程中, 环形零件受到的应力状态与实心零件是有很大区别的, 环形零件内、外表面的收缩产生圆周方向的切向拉应力, 导致表层材料发生微量的、不可逆的局部微观塑性流变, 会使零件周长缩短、直径收缩。

## 2.3 热处理过程组织变化对衬套尺寸及性能的影响

时效处理规程中, 存在两种组织转变: 一是第二相从基体当中弥散析出, 二是马氏体组织向逆变奥氏体组织转变。

经过固溶处理后, 合金元素会以溶质原子的形式存在于基体当中。溶质原子会使基体的晶格发生畸变,

导致基体在尺寸上会存在微量的膨胀。在时效处理过程中, 溶质原子在热驱动力下会不断的扩散偏聚, 并以第二相的形式从基体当中弥散析出(PH13-8Mo 时效硬化不锈钢中常见的析出相包括 M<sub>2</sub>C、M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、Ni<sub>3</sub>Al、NiAl 等), 且逐渐与基体失去共格关系, 从而减小晶格畸变程度, 使得基体的尺寸会产生微量的收缩。模拟仿真得到的 PH13-8Mo 时效硬化不锈钢中的第二相如图 2 所示。第二相从基体当中弥散析出是 PH13-8Mo 时效硬化不锈钢在时效处理过程中强度、硬度进一步增加的决定性因素。

通过对 PH13-8Mo 马氏体时效硬化不锈钢的相图进行模拟, 如图 3 所示。除去第二相后得到的基体相如图 4 所示。可以看出, PH13-8Mo 马氏体时效硬化不锈钢的室温下的平衡态组织为铁素体组织。温度超过 300°C 时, 基体中开始出现奥氏体组织。温度达到 450°C-500°C 时, 奥氏体含量开始增加。约 720°C 时, 基体组织全部转变为奥氏体。实际生产中, 在固溶处理后, 一定会存在少量残余奥氏体; 马氏体向奥氏体转变的起始温度、终了温度也与化学成分、成形过程、初始组织等有很大关系。

在固溶处理的过程中通过快冷的方式得到了马氏体组织。在时效处理过程中, 马氏体组织会向奥氏体组织逆转变, 得到马氏体+逆转奥氏体的双相组织。由于逆转奥氏体的形成, 导致时效温度增加至 620°C 后, PH13-8Mo 马氏体时效硬化不锈钢的强度、硬度大幅降低, 而塑性明显提升。

我们对 540°C 和 620°C 时效处理后的 PH13-8Mo 马氏体时效硬化不锈钢组织分别利用光学显微镜 (OM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 进行了观察, 如图 5 所示。可以看出, 经过 540°C 时效处理后, 合金的基体几乎全部为回火马氏体或回火屈氏体组织, 由于马氏体的回

复与分解、碳化物的析出, 马氏体片层或板条不十分明显。而在 620℃ 时效处理后, 基体的原始晶界更加清楚, 且马氏体板条更为明显。这并非是单纯的马氏体, 而是部分马氏体已经逆转变为了奥氏体, 奥氏体以薄膜或片层状分散于马氏体板条或片层之间, 两相分界更为明显, 从而造成了类似于淬火马氏体的片层或板条的

现象。

马氏体(铁素体)的晶体结构为体心立方, 如图 6 所示, 其晶胞中的原子数为 2 个, 致密度为 0.68; 而奥氏体的晶体结构为面心立方, 其晶胞中的原子数为 4 个, 致密度为 0.74。因此奥氏体的密度大于马氏体, 发生马氏体向奥氏体的逆转变时, 体积将会收缩。

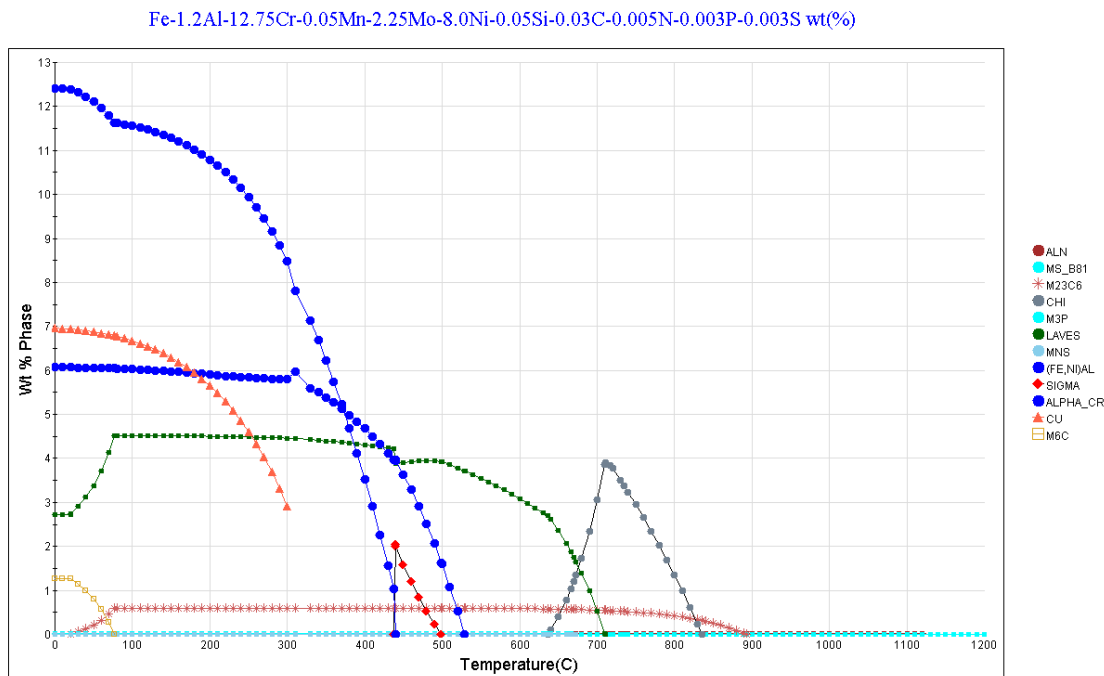


图 2 PH13-8Mo 时效硬化不锈钢中的第二相模拟结果

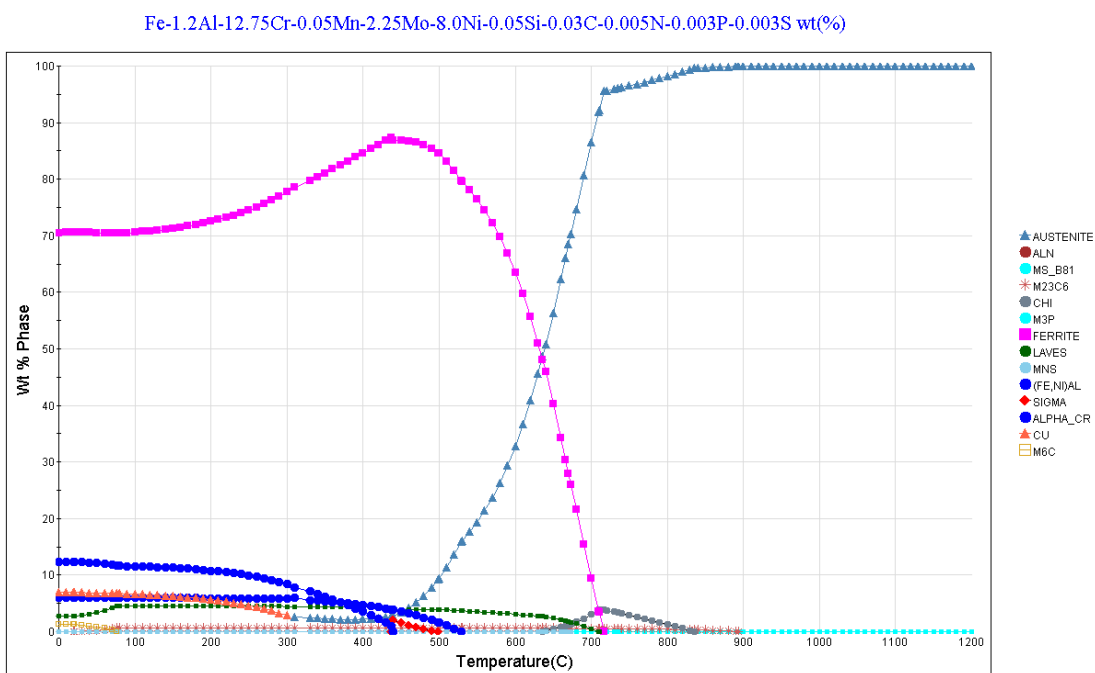


图 3 PH13-8Mo 合金相图

Fe-1.2Al-12.75Cr-0.05Mn-2.25Mo-8.0Ni-0.05Si-0.03C-0.005N-0.003P-0.003S wt(%)

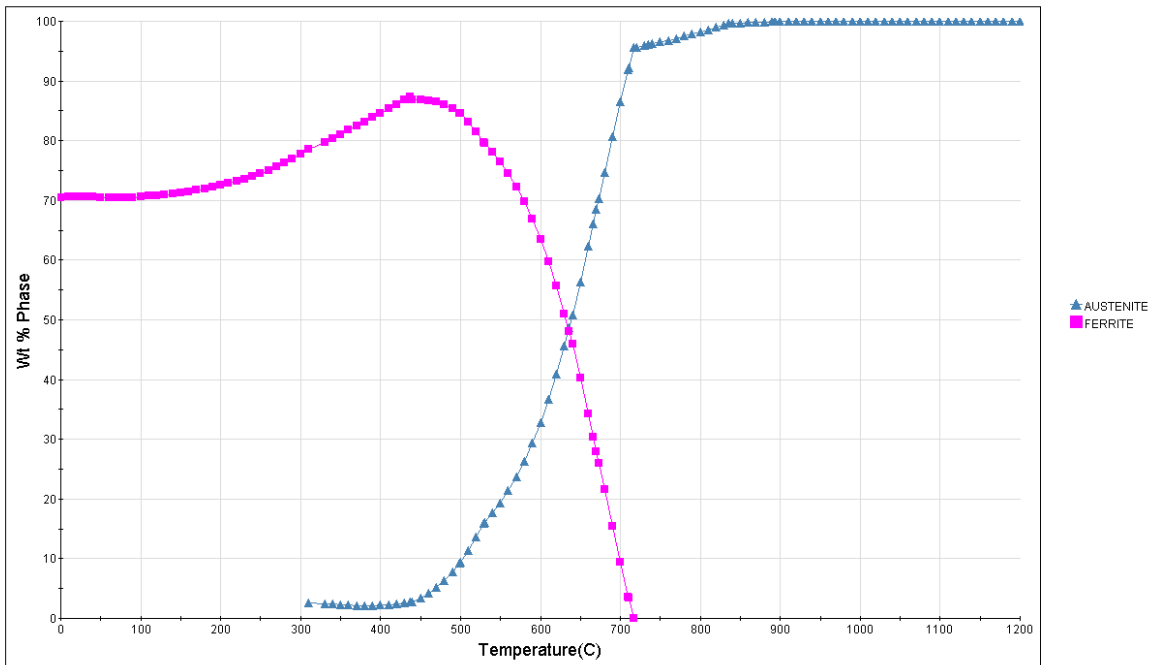
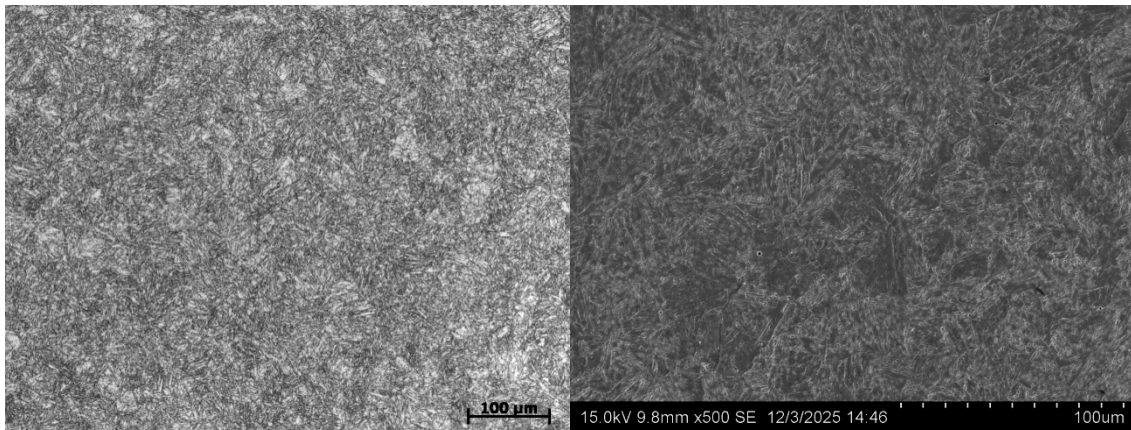
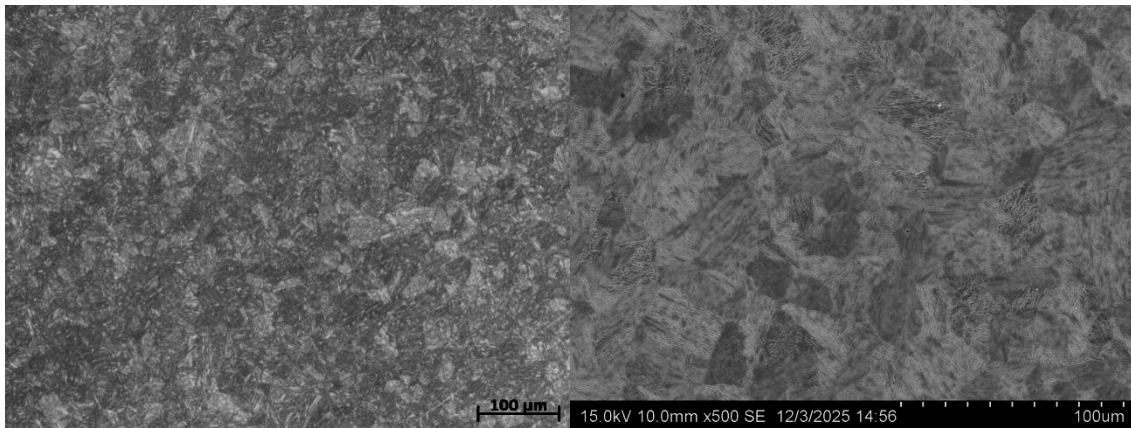


图4 PH13-8Mo 合金基体相图



540°C时效 OM 图

540°C时效 SEM 图



620°C时效 OM 图

620°C时效 SEM 图

图5 不同温度时效处理后 PH13-8Mo 马氏体时效硬化不锈钢的 OM 图及 SEM 图

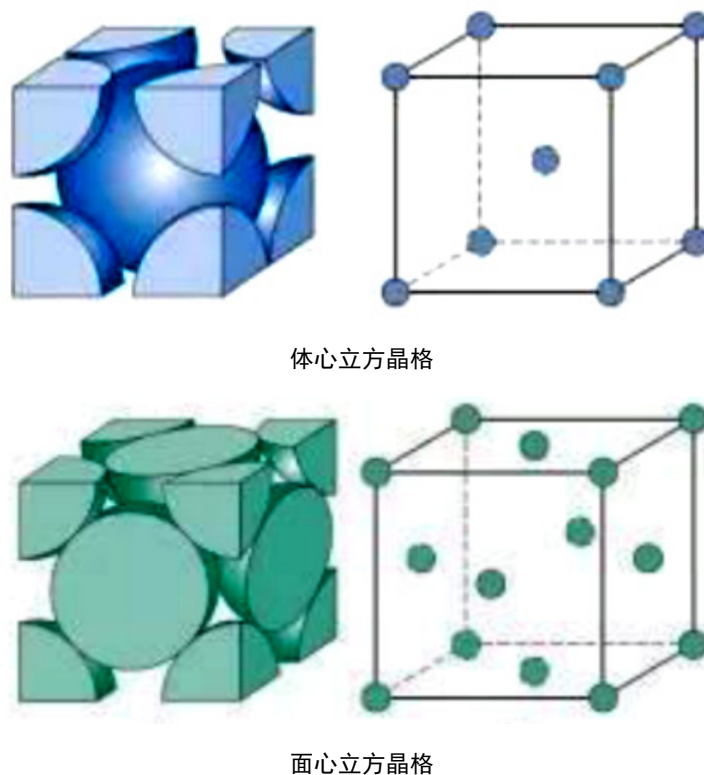


图6 体心立方与面心立方晶格示意图

### 3 结论

(1) 时效温度由 540℃ 提升至 620℃ 后, 衬套的直径发生了明显收缩, 内径收缩量由 0.025mm 增长至 0.133mm, 外径收缩量由 0.028mm 增长至 0.115mm。

(2) PH13-8Mo 时效硬化不锈钢在 540℃ 时效处理后, 硬度约为 HRC44.13, 抗拉强度和屈服强度约为 1483.0MPa、1449.5MPa, 这是在时效处理过程中, Ni<sub>3</sub>Al、NiAl 以及碳化物的析出起到了析出强化作用。

(3) 环形零件在时效处理后冷却过程中内、外表面的收缩产生圆周方向的切向拉应力, 导致表层材料发生微量的、不可逆的局部微观塑性流变, 会使零件在一定程度上发生周长缩短、直径收缩的现象。

(4) 时效温度由 540℃ 提升至 620℃ 后, 大量马氏体组织转变为了逆转奥氏体组织, 晶体结构由体心立方转变为面心立方, 致密度增加, 导致衬套尺寸发生收缩; 同时, 逆转奥氏体使得 PH13-8Mo 时效硬化不锈钢的强度、硬度降低, 而塑性提升。

### 参考文献

- [1] 赵紫杨. 冷变形和时效处理对 PH13-8Mo 不锈钢组织和力学性能的影响[D]. 昆明:昆明理工大学,2024.
- [2] 张良,雍岐龙,梁剑雄,等. PH13-8Mo 高强不锈钢在不同温度时效后的析出相及其对力学性能的影响[J]. 机械工程材料,2017,41(3):19-13,28.
- [3] 罗超. PH13-8Mo 不锈钢显微组织与力学性能研究[D]. 太原:太原科技大学,2022.
- [4] 唐科,李岩,胡振兴,等. PH13-8Mo 沉淀硬化不锈钢在航天火工装置中的应用[J]. 火工品,2022,(3):10-13.
- [5] 周海冲. PH13-8Mo 马氏体沉淀硬化不锈钢组织及性能调控研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2022.
- [6] 杨凯,朱宏伟,于利民,等. 时效时间对 PH13-8Mo 不锈钢组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理,2023,48(3):100-103.
- [7] 于世凡. PH13-8Mo 钢成分-工艺-性能数据模型构建及优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
- [8] 周文超. 环形薄壁件加工变形分析及控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

