

15-5PH固溶温度调控显微组织优化处理措施

赵元昊^{1,2} 黄峰¹

1. 武汉科技大学材料学部, 中国·湖北 武汉 430080

2. 河南中原特钢装备制造有限公司, 中国·河南 济源 459000

摘要: 本文探究了 1000℃、1020℃、1040℃三个固溶温度下, 材料的显微组织与力学性能随之变化的规律。利用金相显微镜观察了不同温度固溶处理后 15-5PH 不锈钢的显微组织, 检测了不同温度固溶处理后 15-5PH 不锈钢的室温拉伸性能和冲击吸收能量, 使用扫描电镜观察了试样的断口形貌。结果表明, 520℃时效时, 随着固溶温度的升高, 屈服强度和抗拉强度略有上升, 其拉伸性能影响不明显, 常温和 -40℃低温冲击功基本呈现上升趋势。最终, 发现 1040℃固溶 1 小时后进行 520℃时效 2.5 小时这一工艺窗口, 材料的强度与韧性达到最佳配合, 全面满足并超越了技术协议的指标要求。

关键词: 15-5PH; 热处理; 显微组织; 力学性能

15-5PH solid solution temperature control for microstructure optimization treatment measures

Zhao Yuanhao^{1,2}, Huang Feng¹

1. Department of Materials Science, Wuhan University of Science and Technology, China Hubei Wuhan 430080

2. Henan Zhongyuan Special Steel Equipment Manufacturing Co., Ltd., China Henan Jiyuan 459000

Abstract: This paper investigates the changes in microstructure and mechanical properties of the material under three solidification temperatures of 1000℃, 1020℃, and 1040℃. The microstructure of 15-5PH stainless steel after different temperature solidification treatments was observed using a metallographic microscope. The room temperature tensile properties and impact absorption energy of 15-5PH stainless steel after different temperature solidification treatments were measured. The fracture morphology of the specimens was observed using a scanning electron microscope. The results show that when the aging temperature is fixed, as the solidification temperature increases, the yield strength and tensile strength increase slightly, and the influence on the tensile properties is not obvious. The impact energy at room temperature and at -40℃ basically shows an upward trend. Finally, it was found that after solidification at 1040℃ for 1 hour and aging at 520℃ for 2.5 hours, the strength and toughness of the material achieved the best combination, fully meeting and exceeding the technical protocol's index requirements.

Keywords: 15-5PH; Heat treatment; Microstructure; Mechanical properties

0 引言

随着现代高端装备制造业向着高性能、高可靠性的方向不断发展, 对关键结构材料的力学性能也提出了越来越高的要求。沉淀硬化型不锈钢因为具有优异的强度、良好的耐腐蚀性和很好的工艺适应性, 在航空发动机部件、核电站紧固件、火箭壳体等地方占有不可取代的地位。15-5PH 属于一种典型的马氏体沉淀硬化不锈钢, 其性能好坏很大程度上取决于精确的热处理工艺。本文以系统正交热处理实验为基础, 经过不同的固溶温度处理, 分析温度参数对晶粒度、析出相及力学性能的影响规律, 进而给出基于显微组织优化的热处理工艺调控方法, 为改善 15-5PH 不锈钢构件的服役安

全性和寿命提供科学依据。

1 15-5PH 不锈钢基本特性阐释

15-5PH 不锈钢典型的化学组分中含大约 15% 的铬、5% 的镍、3% 的铜以及一些少量的铌或者钼。铬元素主要保证材料的基本耐腐蚀性, 镍元素用来稳定奥氏体相并提高韧性。铜、铌为主要的沉淀强化元素。高温固溶阶段所有的合金元素溶解在奥氏体中, 随后的快速冷却过程中, 因为高铬含量抑制了珠光体转变, 合金化元素降低了马氏体转变开始温度, 所以材料会发生无扩散型切变, 产生过饱和的板条马氏体基体。该相变过程不会产生长程扩散, 所以合金元素会“冻结”到马氏体晶格里, 成为了一种热力学上稳定的亚稳

态,为以后时效析出储备了大量的化学势能。铜在马氏体中固溶度随着温度的降低急剧降低,是时效强化的主要贡献者^[1]。

2 热处理工艺参数设计原理

2.1 固溶处理温度、时间选择依据

固溶温度选择要保证所有的碳化物和可溶的沉淀相被完全溶解,得到成分均匀的单相奥氏体,但不能使晶粒过大。15-5PH 不锈钢的完全奥氏体化温度一般大于 980℃。因此本实验选择 1000℃、1020℃、1040℃这三个温度点进行固溶,来考察不同的奥氏体化状态对于后序组织的影响。1000℃固溶时有部分稳定碳化物没有完全溶解,而 1040℃固溶时可使稳定碳化物得到充分溶解,但是晶粒长大驱动力也随之增大。

2.2 时效处理温度、时间选择依据

时效温度对沉淀相的析出有调节作用。温度过低时,原子的扩散能力差,析出的动力学慢,强化不完全;温度过高时,析出相迅速粗化,进入过时效状态,强度损失大。有研究表明,在 500℃~560℃温度范围内时效,固定时效时间 2.5 小时,保证各个温度下的析出反应可以达到比较稳定的程度^[2]。这个范围包含 15-5PH 不锈钢典型峰值时效、过时效的全部区间。该设计可以得到强度、韧性随时间温度变化完整的曲线,从而确定出最佳的强韧性配合窗口^[3]。

3 固溶温度调控显微组织的优化处理措施及性能关联

3.1 晶粒度优化的固溶温度调控措施

固溶温度属于决定 15-5PH 不锈钢初始晶粒度的关键参数,其数值大小直接影响显微组织是否均匀、晶粒是否得到细化,从而对材料的综合力学性能起到决定性的作用。在固定的时效温度为 520℃的情况下,精确地控制固溶温度,可以实现对晶粒度的控制,当固溶温度由 1000℃提高到 1040℃的时候,晶粒度等级从 4-2.5 级变为 6-5 级,可以发现晶粒并没有长大反而变细。晶粒长大属于典型的热激活过程,遵照 Arrhenius 方程,在高温环境当中,原子的扩散能力明显加强,晶界的迁移率也随之增大,晶粒更容易合并长大;同时晶粒粗化会缩减晶界面积,削弱晶界对位错运动的阻拦效能,进而造成材料的屈服强度出现微小的波动^[4]。根据上面所述的固溶温度对于晶粒度影响的规律,并结合实验数据,给出以下晶粒度优化的固溶温度调控措施,第一种情况采用 1000℃的较低固溶温度,利用未溶碳化物粒子的晶界钉扎效应来抑制晶粒的长大,从而改善材料的韧性,适合

低温服役环境;第二种情况是需要综合考虑材料强韧性匹配的场所,将固溶温度控制在 1040℃左右,使晶粒尺寸和合金元素溶解程度之间得到良好的平衡,防止由于晶粒过度细化造成韧性不够,或者晶粒过度粗化引起强度降低^[5]。图 1、图 2 分别为 1000℃、1040℃固溶温度下 15-5PH 不锈钢的显微组织及晶粒度照片,清楚地表现出固溶温度对于晶粒尺寸的调节作用。

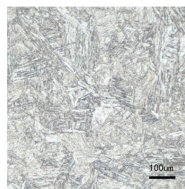


图1 1000℃固溶晶
粒度照片 100X

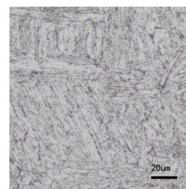


图2 1000℃固溶组
织照片 500X

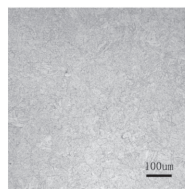


图3 1040℃固溶晶
粒度照片 100X

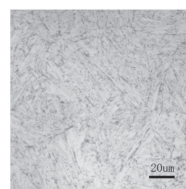


图4 1040℃固溶组
织照片 500X

3.2 沉淀相优化的固溶温度调控措施

沉淀相的析出状态是决定 15-5PH 不锈钢强化效果的重要因素,固溶温度通过改变合金元素的溶解程度来影响时效阶段沉淀相的形核和长大过程。因此,通过合理控制固溶温度来改善沉淀相的尺寸和分布情况,是提高材料强度的主要方法。按照沉淀强化理论,材料的屈服强度同沉淀相的平均尺寸、间距有着密切联系,细小、均匀分散并且共格于基体的富铜相,对位错的阻碍作用最大,因而能得到最好的强化效果^[6]。从实验结果可以看出,固溶温度在 1000℃以上时可以有效地溶解绝大部分的合金元素,其中 1040℃固溶时合金元素溶解得最充分,为时效阶段富铜相的均匀形核提供了充足的物质基础;根据不同的强度要求,采用固溶温度和时效工艺相结合的方式,例如 1040℃固溶、500℃时效,使合金元素充分溶解形成大量的细小共格沉淀相,此时材料的屈服强度可以达到 1172MPa^[7]。

3.3 低温冲击韧性优化的固溶温度调控措施

低温冲击韧性是 15-5PH 不锈钢在寒冷环境里抵御脆断的能力,固溶温度经由调节显微组织(晶粒大小、沉淀相情况)来操控,它对于材料的低温韧性有着明显调节效果,而且这种影响要远远大于对常温韧性产生的影响,必须对固溶温度进行有针对性的调控措施。根据实验数据可知固溶温

度对于低温冲击韧性调节规律以及优化措施有如下结论：以 1040℃固溶工艺为例，时效温度由 500℃升到 520℃时，常温冲击功提高约 117%，低温冲击功提高 533%，说明低温环境里，固溶温度调控显微组织变化对韧性影响更大^[8]。低温时位错滑移困难，材料容易产生解理断裂，如果固溶温度过低（例如 1000℃）的话，未溶碳化物颗粒会钉扎晶界，同时时效阶段会产生大量的细小共格沉淀相，进而加剧位错的钉扎作用，造成局部应力的积累，使低温韧性变差；如果能够适当提高固溶温度（例如 1040℃），则可以使合金元素充分溶解，促使晶粒均匀，增大低温冲击功。在固溶温度较低的时候，断口中解理面比较多，脆性比较明显；在固溶温度提高到 1040℃以后，断口上出现了大量的韧窝，韧性明显增强，和低温冲击功数据的规律相符合，再次证明了固溶温度对低温韧性有影响^[9]。

3.4 固溶温度调控优化工艺综合验证

根据上述固溶温度对晶粒度、沉淀相、力学性能和低温冲击韧性的影响规律，最后得到最优的固溶温度调节工艺为 1040℃/1h 固溶加 520℃/2.5h 时效。满足协议要求 15-5PH 不锈钢屈服强度 $\geq 1050\text{MPa}$ 、抗拉强度 $\geq 1080\text{MPa}$ 、断后伸长率 $\geq 16\%$ 、断面收缩率 $\geq 53\%$ 、常温冲击功 $\geq 60\text{J}$ 。通过对比不同固溶温度（1000℃、1020℃、1040℃）和对应的时效工艺，以固溶温度调节为主，加上优化时效参数来达到显微组织和力学性能的双重优化^[10]。该优化工艺具体的调控要点和验证结果如下，一是固溶温度调节为 1040℃，保温时间为 1h，保证合金元素充分溶解，得到均匀的过饱和固溶体，并且控制晶粒粗化在合理的范围内（晶粒度为 6-5 级），为沉淀相均匀析出打下基础；二是配合 520℃时效，使沉淀相尺寸、分布处于最优区间，避免峰值时效（500℃）的脆化倾向，防止过度时效（540℃及以上）造成强度降低；三是在该工艺下各项力学性能均满足协议要求，屈服强度 1084MPa、抗拉强度 1235MPa、断后伸长率 17%、断面收缩率 62%、常温冲击功 155J、-40℃冲击功 76J，实现了高强度和高韧性的结合。

4 结语

结果表明，（1）在相同时效处理（520℃X2.5h）条件下，固溶温度由 1000℃提高到 1040℃，初始奥氏体晶粒级别由从 4-2.5 级变为 6-5 级，晶粒细化趋势明显。（2）在时效处理相同（520℃X2.5h）条件下，随着固溶温度的升高，材料的冲击吸收能量明显提高，强度、塑性和韧性均

呈现上升趋势。固溶温度从 1000℃提高到 1040℃，15-5PH 不锈钢的室温冲击功从 116J 提升至 158J，-40℃低温冲击功从 68J 提升至 76J。对拉伸性能影响相对较小。其屈服强度和屈抗拉强度分别在 1082~1084 MPa、1235 MPa 范围波动。（3）综合分析得到 1040℃固溶 1 小时、520℃时效 2.5 小时的热处理工艺为最佳工艺，此工艺下材料屈服强度 1084MPa、抗拉强度 1235MPa、常温冲击功 155J、-40℃冲击功 76J，达到强度和韧性的最佳匹配。

参考文献：

- [1] 姜波，金成哲，宋善奇等. 15-5PH 沉淀硬化不锈钢插铣切削力研究[J]. 工具技术，2026, 60(03): 82-89.
 - [2] 王志强，武辉，赵汉卿. WC 含量对激光熔覆 WC/15-5PH 不锈钢复合涂层组织和性能的影响[J]. 机械工程材料，2026, 50(02): 27-35.
 - [3] 闫春雨，田帅，褚韦涵等. 热轧变形量对不同镍含量的 15-5PH 不锈钢组织及性能的影响[J]. 钢铁，2026, 61(04): 107-118.
 - [4] 徐锋，孙强，孟吉炜等. 固溶温度对超低碳 15-5PH 沉淀硬化不锈钢组织 和性能的影响[J]. 热加工工艺，2025, 54(24): 115-120.
 - [5] 仇振安，王海涛，李继良等. 热处理工艺 15-5PH 不锈钢组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理，2014, 39(5): 77-81.
 - [6] 王陆阳，李珂誉，黄红武. 固溶时效对 SLM 成形 15-5PH 不锈钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理，2025, 50(09): 233-238.
 - [7] 张秀丽，陈明昕，刘振宝等. 热处理工艺对 15-5PH 沉淀硬化不锈钢的力学性能与耐蚀性的影响[J]. 钢铁，2014, 49(8): 70-75.
 - [8] 赵金龙，尹彦平，任卫斌等. 时效工艺对 15-5PH 钢低温力学性能的影响[J]. 金属热处理，2024, 49(10): 96-99.
 - [9] 冯万喜，王子荣，田明旭等. 15-5PH 沉淀硬化不锈钢三通管等温热成形工艺[J]. 锻压技术，2024, 49(09): 50-56.
 - [10] 徐锋，孙强，贾云浩. 时效处理对 15-5PH 不锈钢室温和低温力学性能的影响[J]. 金属热处理，2024, 49(09): 191-197.
- 作者简介：赵元昊（1994-），男，汉族，中国河南济源人，硕士，工程师，研究方向：从事沉淀硬化不锈钢相关研究。