

F151 不锈钢硬度超差分析及工艺改进

王萍, 杨堃, 田少鲲, 张琰琳, 高新亮, 李永昌, 董万全, 张屹东

首都航天机械有限公司 北京

【摘要】F151 不锈钢固溶处理后硬度超出设计要求。本文以 F151 不锈钢棒材为研究对象, 通过对其化学成分及其显微组织进行模拟仿真和机理分析, 探究了固溶温度、保温时间和冷却方式对 F151 不锈钢显微组织和硬度的影响规律。F151 不锈钢棒材的固溶处理温度宜在 850°C-870°C 之间, 且无法通过改变冷却方式来调整显微组织和硬度。依据分析结果对原有 F151 不锈钢的固溶处理制度进行了优化, 通过延长固溶处理保温时间, 解决了 F151 不锈钢固溶处理后硬度偏高的问题。

【关键词】F151 不锈钢; 固溶处理; 硬度; 显微组织

【收稿日期】2025 年 12 月 15 日 **【出刊日期】**2026 年 1 月 16 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20260020

Analysis of hardness tolerance and process improvement of F151 stainless steel

Ping Wang, Kun Yang, Shaokun Tian, Yanlin Zhang, Xinliang Gao, Yongchang Li, Wanquan Dong, Yidong Zhang
Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing

【Abstract】The hardness value of F151 stainless steel after solution treatment does not meet the design requirements. This paper takes F151 stainless steel bar as the research object. Through simulation and mechanism analysis of its microstructure, the influence laws of solution temperature, holding time and cooling method on the microstructure and hardness of F151 stainless steel are explored. The solution treatment temperature for F151 stainless steel bars should be between 850°C and 870°C, and its microstructure and hardness cannot be adjusted by changing the cooling method. Based on the analysis results, the original solution treatment system for F151 stainless steel bars was optimized. By extending the holding time of the solution treatment, the problem of high hardness value of F151 stainless steel bars after solution treatment was solved.

【Keywords】F151 stainless steel; Solution treatment; Hardness; Microstructure

不锈钢是一种非常常见的合金材料, 广泛应用于航空、航天、船舶、汽车、电子制造等各行业领域^[1]。F151 不锈钢作为其中一种, 应用于火箭的箭体结构、发动机中的多个部组件中, 设计要求其硬度值一般为 HRC28-32。根据 F151 不锈钢的材料特性以及使用要求, 需要对 F151 不锈钢进行固溶处理, 以达到设计要求。而经过固溶热处理后, F151 不锈钢的硬度往往在 HRC33-35 左右, 超出了设计要求。

需要结合 F151 不锈钢的显微组织及强化机理, 优化固溶处理工艺参数, 降低 F151 不锈钢产品的硬度。

1 试验材料与方法

试验材料为 F151 不锈钢棒材, 原材料标准为辽新 2-5056-2004, 棒材供应状态为电渣、热轧、磨光状态。F151 不锈钢牌号为 00Cr10Ni10, 其主要化学成分如表 1 所示。

表 1 F151 不锈钢化学成分 (wt.%)

元素	Ni	Cr	C	Si	Mn	Al	Ti	Fe
含量	10~11	10~11	≤0.03	≤0.25	≤0.2	≤0.15	≤0.1	余量

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

以 Fe-10.5Cr-10.5Ni-0.025C-0.2Si-0.15Mn-0.1Al-0.08Ti 成分为研究对象,通过模拟仿真和机理分析,探究固溶处理温度、保温时间以及冷却方式对 F151 不锈钢棒材显微组织及硬度的影响规律。通过扫描电子显微镜,对按照不同工艺进行固溶处理后的 F151 不锈钢棒材的显微组织进行观察。

2 试验结果与分析

F151 不锈钢中的主要合金元素为 Cr 和 Ni。其中 Cr 元素是不锈钢最重要的耐腐蚀性来源, Cr 与空气中的 O 元素结合形成致密的钝化膜,组织腐蚀的进一步发生, Cr 元素是缩小奥氏体区元素; Ni 是不锈钢的重要组成元素,其可以扩大奥氏体区,提高钢的塑韧性和淬透性^[2-4]。

不锈钢铬当量和镍当量如图 1 所示^[5], 其中:

镍当量: $(Ni)_{eq} = Ni\% + 30Cr\% + 0.5Mn\%$ (in wt%)

铬当量: $(Cr)_{eq} = Cr\% + 2\%Si + 1.5Ti\% + 5.5Al\%$ (in wt%)

结合图 1 和 F151 不锈钢化学成分,在室温稳定状态下, F151 不锈钢为马氏体组织(靠近奥氏体+马氏体两相区)。固溶处理过程中——在升温阶段,会发生原始组织向奥氏体的转变,依靠系统内的浓度起伏、结构起伏和能量起伏,奥氏体晶核优先在相界面上形成。在保温阶段,随着碳元素从高浓度的奥氏体-渗碳体界面向低浓度的奥氏体-铁素体界面扩散,奥氏体的相界面同时向铁素体和渗碳体中推移,奥氏体不断长大,随着保温时间的延长,残余渗碳体完全溶解,奥氏体的成分不断趋于均匀。在冷却阶段,奥氏体会发生转变,当冷速足够快时,奥氏体不会转变为珠光体或贝氏体,而是在降温至 Ms 时,瞬时形核长大为马氏体(和少量残余奥氏

体)。马氏体的亚结构为高密度缠结的位错或细小的孪晶,因此具有很高的强度和硬度。要对热处理过程中热处理温度、热处理时间、冷却方式三个方面进行控制,以获得合适的组织,并达到所需的性能。

2.1 固溶温度对 F151 不锈钢显微组织及硬度的影响

固溶温度对 F151 不锈钢硬度影响十分重要,若热处理温度低,在加热过程中无法全部转变为奥氏体,且第二相回溶不完全,最终产品的组织性能都将受到不良影响。而热处理温度过高,则组织粗大,淬火后残余奥氏体增多,也会影响合金最终的性能与使用;甚至在热处理过程中发生过烧,导致产品直接报废。通过模拟分析, F151 不锈钢中各相随温度变化趋势如图 2-图 7 所示。

可以看出,当固溶温度达到 500℃时, F151 不锈钢当中的 α-Cr 相和 G 相已经全部发生转变或溶解。而此时基体组织刚刚向奥氏体转变, F151 不锈钢中还存在少量的 M(C, N) 型及 M23C6 型碳化物和碳氮化物。固溶温度需在此之上。

当固溶温度达到接近 650℃时,铁素体可以全部转化为奥氏体, F151 不锈钢中仍存在极少量的 M(C, N) 型及 M23C6 型碳化物和碳氮化物。M23C6 型碳化物可以通过进一步提高温度——即达到接近 700℃时溶解,但极少量的 M(C, N) 型碳氮化物将一直存在于 F151 不锈钢当中。经过模拟分析,其可以一直存在到 1200℃以上。微量细小的未溶第二相对 F151 不锈钢热处理后的硬度影响不大,因此,在热处理过程中,可以忽略极少量的未溶 M(C, N) 型碳氮化物。

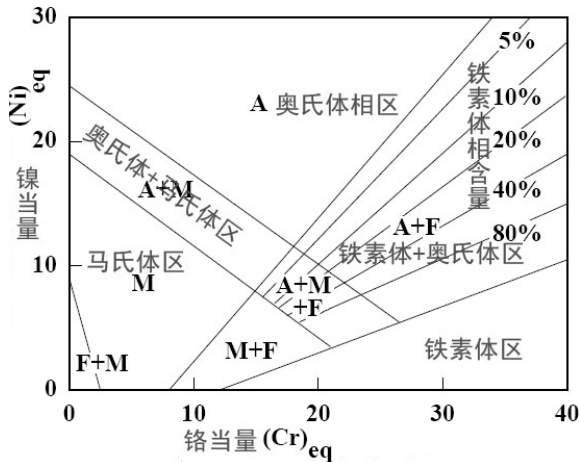


图 1 不锈钢铬当量和镍当量图

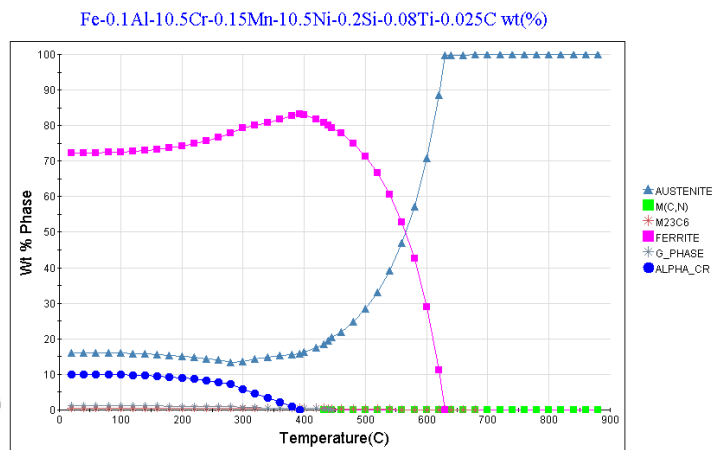


图 2 F151 不锈钢中各相含量随温度变化趋势

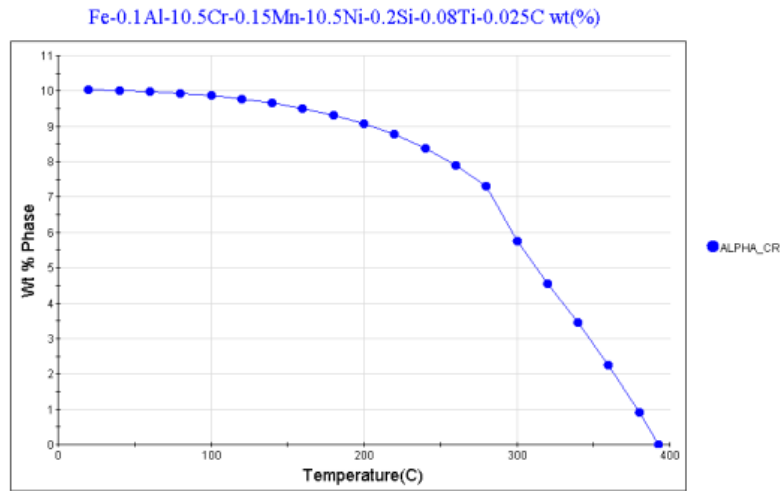


图3 α -Cr 含量随温度变化趋势

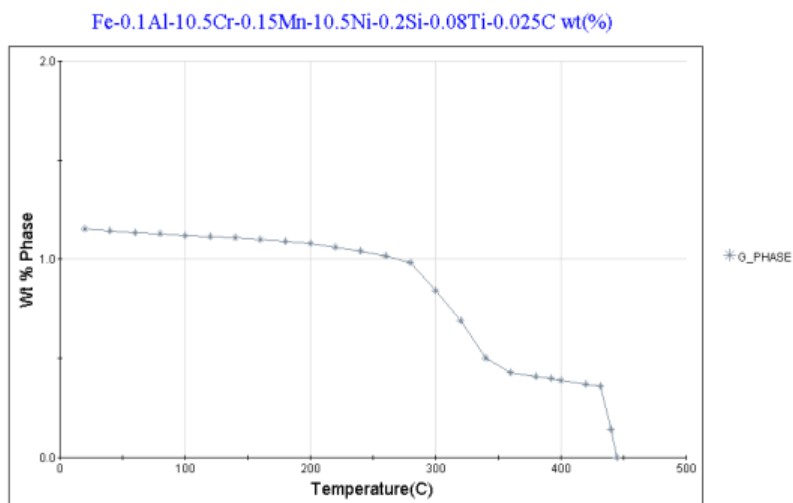


图4 G 相含量随温度变化趋势

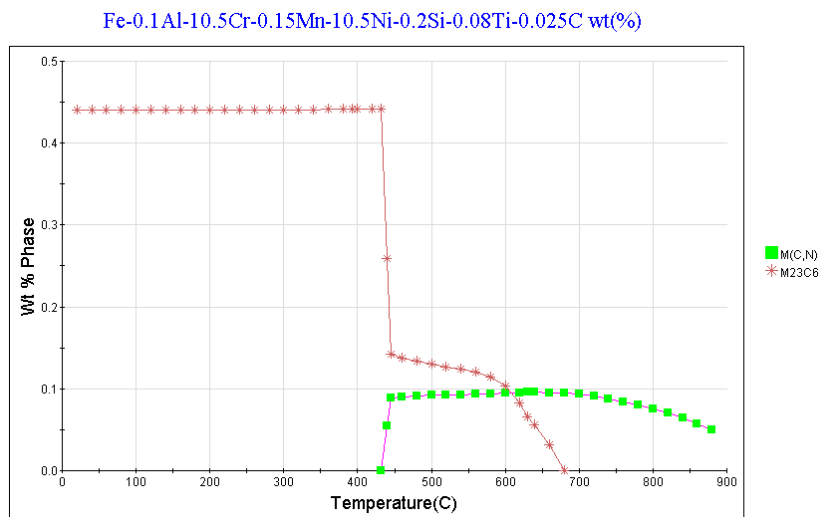


图5 碳化物/碳氮化物含量随温度变化趋势

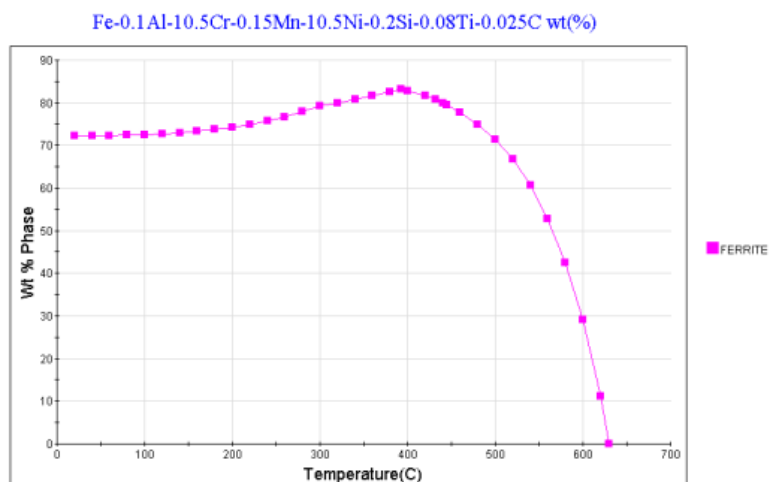


图 6 铁素体含量随温度变化趋势

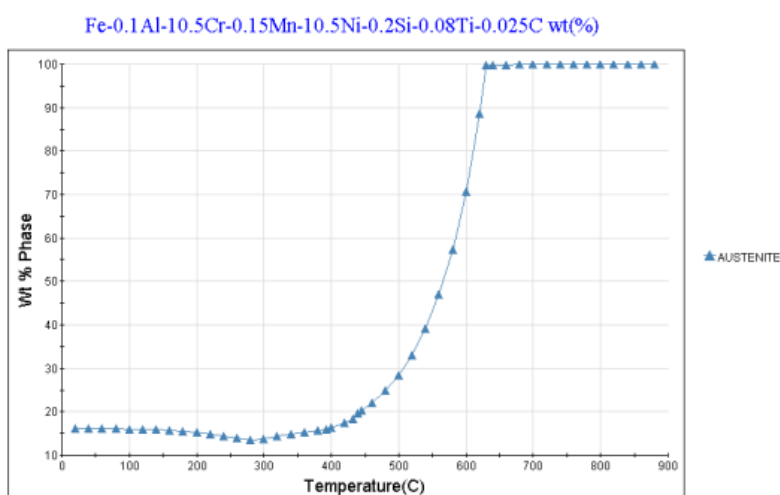


图 7 奥氏体含量随温度变化趋势

根据上述分析,将 F151 不锈钢的固溶温度定为 800℃以上较为合理,既可以使组织全部转变为奥氏体,又可以尽可能多的将第二相溶于奥氏体当中。图 8、图 9 分别为现行热处理制度的的下限温度(850℃)和上限温度(870℃)所对应的相含量。

F151 不锈钢固溶后硬度随固溶温度的变化趋势如图 10 所示。可以看出,在一定的范围内,随着固溶温度的升高,硬度会略微增加;继续升高温度,硬度会降低。随着固溶温度的提高,奥氏体稳定性略有增加,提高了淬硬性,且更多的碳氮化物溶入奥氏体中,增加了淬火后马氏体中的含碳量,故硬度略有提升。而继续升高固溶温度,奥氏体晶粒会长大粗化,冷却后得到粗大的马氏体和较多的残余奥氏体。虽然将热处理温度提高至此后可以满足设计

要求的硬度值,但是在此温度下固溶,钢中会含有较多的残余奥氏体。残余奥氏体是不稳定相,在室温下长期存放或使用会逐渐转变为马氏体,使产品体积膨胀或内应力增加,引起产品加工变形甚至开裂。由此来看,通过提高温度的方式来降低合金的硬度,会对产品的质量带来隐患,因此,F151 不锈钢固溶温度选择 850℃-870℃比较合理。

2.2 固溶时间对 F151 不锈钢显微组织及硬度的影响

在固溶处理过程中,随着保温时间的延长,奥氏体形成过程如图 11 所示。将 F151 不锈钢加热到 Ac1 以上,相界面上奥氏体优先形核。因为相界面上具备形核所需的结构起伏、能量起伏、浓度起伏,所以奥氏体晶核优先在相界面上形成。

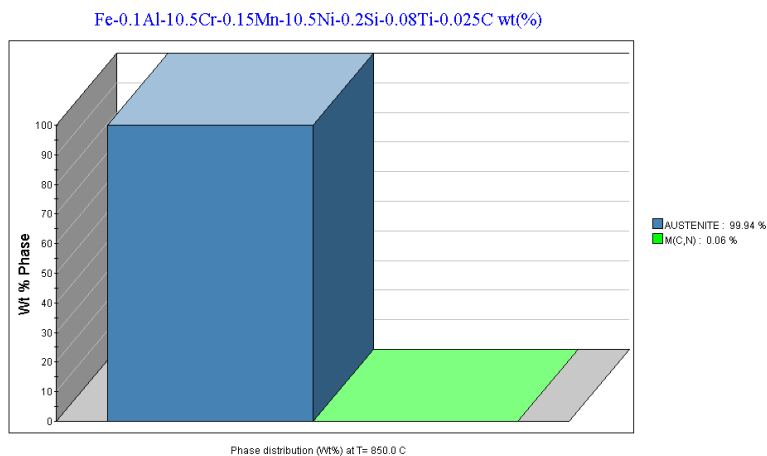


图 8 850°C时 F151 不锈钢的相组成及百分比

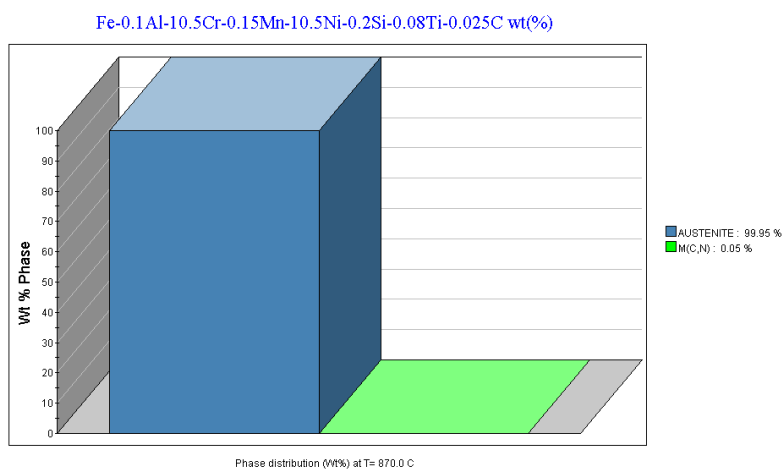


图 9 870°C时 F151 不锈钢的相组成及百分比

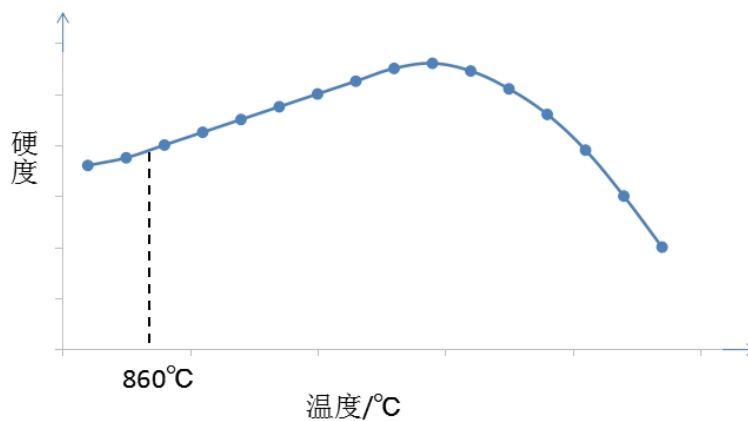


图 10 F151 不锈钢固溶后硬度随温度的变化趋势

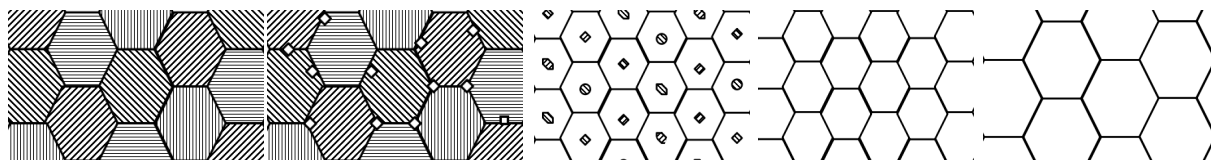


图 11 奥氏体形成过程示意图

当奥氏体在相界上形核后, 如图 12 所示, 建立起界面浓度平衡, 从而在奥氏体和铁素体内部出现浓度差, 碳原子由高浓度向低浓度扩散, 使 C₂、C₄ 浓度降低, 而 C₁、C₃ 升高, 从而破坏浓度平衡。必须通过渗碳体逐渐溶解, 以提高 C₂、C₄, 同时产生 α→γ 转变, 以降低 C₁、C₃, 维持界面浓度平衡, 如此所进行的碳原子扩散, 渗碳体溶解, α→γ 点阵重构的反复, 奥氏体逐渐长大。

F151 不锈钢的抗拉强度、屈服强度、硬度随晶粒度大小变化趋势如图 13 所示。前面已经分析了,

随着热处理时间的增加, 晶粒的大小不断长大。随着晶粒不断长大, 合金的抗拉强度、屈服强度、硬度不断降低^[6,7]。因此, 延长合金的热处理时间是降低合金硬度的可行措施。

2.3 冷却方式对 F151 不锈钢显微组织及硬度的影响

热处理后常用的冷却方式有水冷、油冷、分级淬火、等温淬火、空冷、炉冷等, 具体采用什么样的冷却方式, 要根据材料特性及设计要求来判定, 过冷奥氏体的等温转变示意图如图 14 所示。

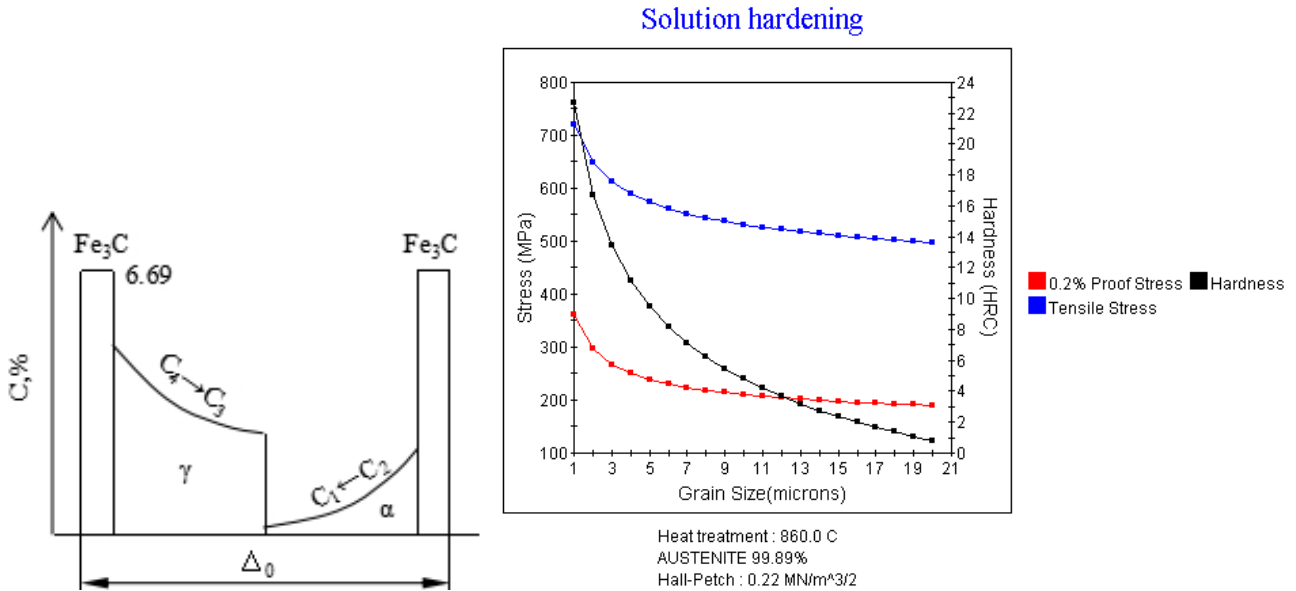


图 12 奥氏体长大机理示意图

图 13 F151 不锈钢的抗拉强度、屈服强度、硬度随晶粒度大小变化趋势

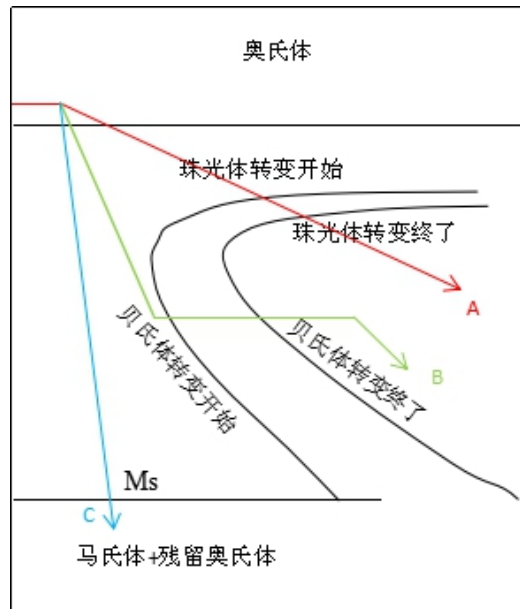


图 14 过冷奥氏体的等温转变示意图

可以看出, 不同的冷却方式可以得到不同的显微组织。当冷却速度很慢时, 如图 14 曲线 A 所示, 则得到珠光体组织。当采用曲线 B 或冷速稍快时, 可以得到贝氏体组织或珠光体+贝氏体组织, 当冷速很快如曲线 C 时, 可以得到马氏体组织。

F151 不锈钢中主要含有 Cr、Ni、Si、Mn 等主要元素。Cr 元素可以降低 Ms 点, 同时对推迟贝氏体转变有较大的作用; Ni 元素能够降低 Ms 点, 同时对珠光体转变的作用十分强烈; Si 和 Mn 元素也

分别有着推迟贝氏体转变的作用。因此, 在合金元素的作用下, F151 不锈钢在固溶处理后空冷及缓冷就能够直接得到马氏体组织。F151 不锈钢等温转变图如图 15 所示^[8]。因此, 无法通过改变冷却速度改变淬火后 F151 不锈钢的组织及硬度。F151 不锈钢在不同的冷速下得到的组织如图 16 所示。可以看出, 不管是水冷、空冷还是坑冷, F151 不锈钢固溶处理后均得到了单一的马氏体组织, 这与模拟和机理分析结果一致。

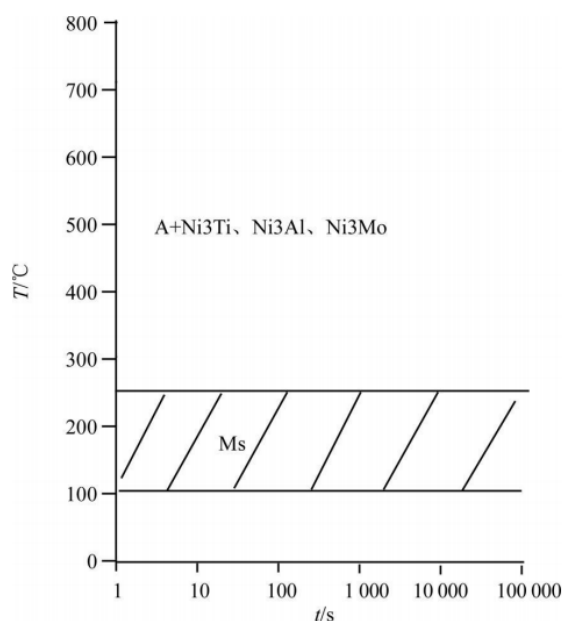
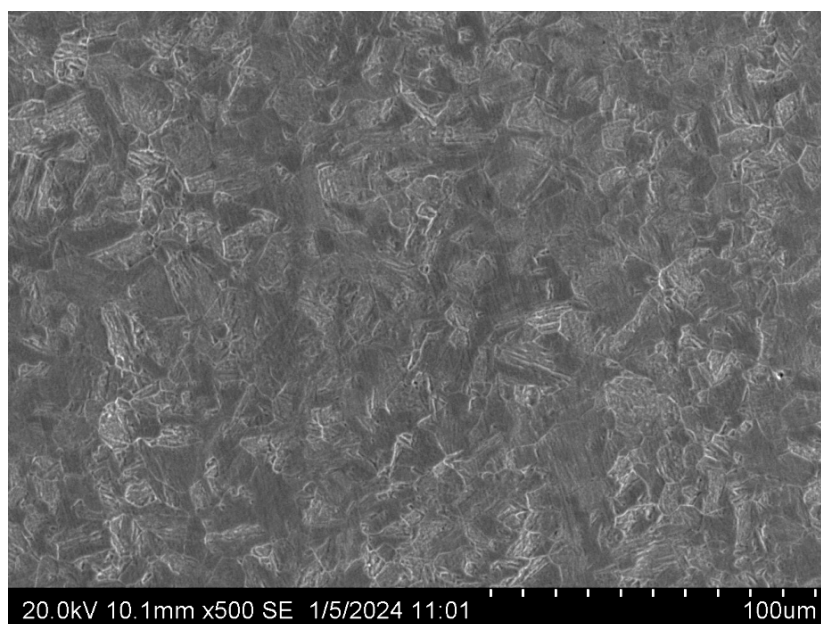
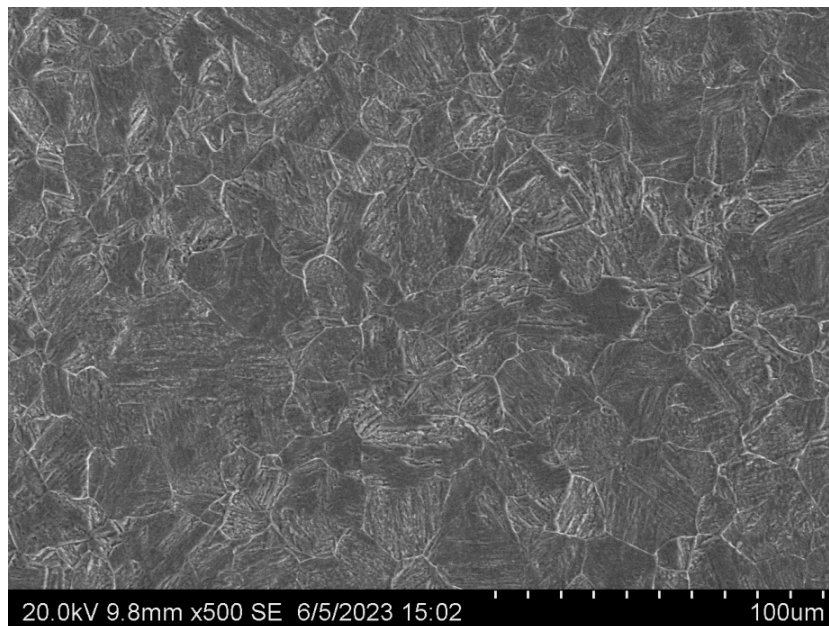


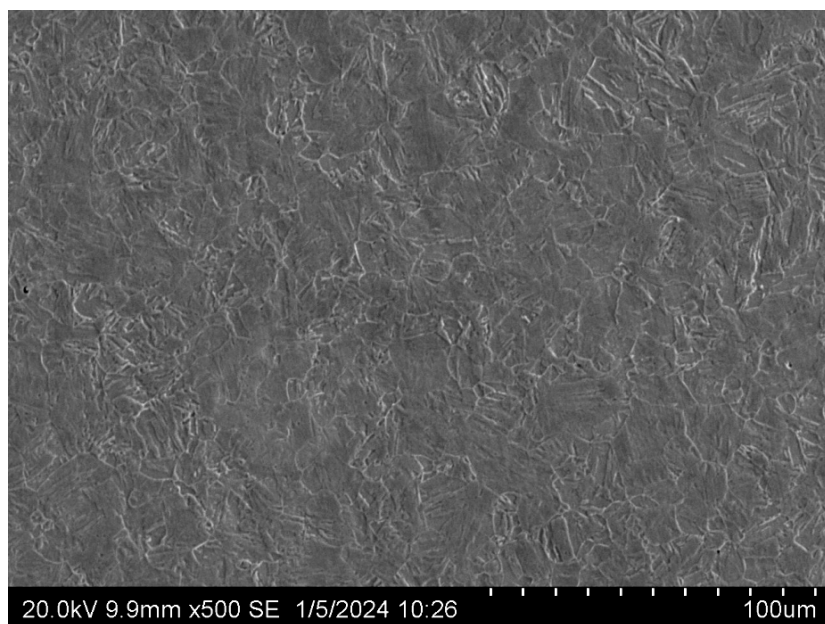
图 15 F151 不锈钢的奥氏体冷却等温转变图



坑冷



空冷



水冷

图 16 不同冷却方式下 F151 不锈钢固溶处理后显微组织

3 结论

(1) F151 不锈钢固溶处理后基体组织为马氏体。加热温度到 700℃, F151 不锈钢当中的 α -Cr 相、G 相和 M23C6 型碳化物可以回溶于基体中; 而 M (C, N) 型碳氮化物可以一直存在至 1200℃ 以上。F151 不锈钢固溶处理温度宜在 850℃-870℃。

(2) F151 不锈钢棒材可以通过延长固溶处理

保温时间, 通过奥氏体晶粒长大, 使固溶处理后的棒材的硬度由 HRC33-35 降低至 HRC28-32。

(3) F151 不锈钢棒材中的 Cr、Ni、Si、Mn 等合金元素, 极大地推迟了珠光体转变和贝氏体转变, 使得棒材在坑冷、空冷、水冷等冷却方式下均得到均匀的马氏体组织, 因此无法通过改变固溶冷却方式来改变棒材的硬度。

参考文献

- [1] 吴雷. 冷变形和逆相变工艺对奥氏体不锈钢强塑性及耐腐蚀性能的影响[D]. 武汉:武汉科技大学,2022.
- [2] 姚鑫. 17-4PH 不锈钢组织性能调控及变形工艺优化[D]. 镇江:江苏科技大学,2024.
- [3] 王玺洋. 热处理工艺对 Fe-Cr-Ni-Ti-Mo 马氏体时效不锈钢组织与性能的影响[D]. 镇江:江苏科技大学,2024.
- [4] 赵朝邓. 热处理及激光表面改性对含铌 310S 不锈钢耐磨性能的影响研究[D]. 成都:成都大学,2025.
- [5] 李延莉. 热处理对奥氏体不锈钢组织和性能的影响[D]. 大庆:大庆石油学院,2008.
- [6] 赵杰,万响亮,柯睿,等. 晶粒细化对奥氏体不锈钢高温力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2023,35(1):88-97.
- [7] 陈园. 纳米晶 304 不锈钢板材力学性能及其变形机理[D]. 合肥:中国科学技术大学,2024.
- [8] 姚长贵,孙利军. 马氏体型不锈钢热加工后软化处理工艺研究[J]. 江苏冶金,2005,33(2):5-8.

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/>



OPEN ACCESS