

15-5PH 沉淀硬化不锈钢磁粉检测磁痕分析

王树志, 葛子亮, 任学冬, 乔海燕

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 针对航空 15-5PH 马氏体沉淀硬化不锈钢在磁粉检测过程中发现的条状、片状和长直磁痕显示进行了总结。分析了不同磁痕显示的特点及微观组织情况, 最终确定了磁痕的性质。结合不同热处理状态下的磁特性分析, 确立了纯洁度磁粉检测的工艺流程以及磁痕判别方法。研究发现沉淀硬化不锈钢在磁粉检测过程中磁痕显示主要是由铁素体和组织不均匀造成的。研究结论为航空制造过程中沉淀硬化不锈钢的磁粉检测的磁痕判定以及规范的制定提供依据, 确保磁粉检测工作的顺利进行。

关键词: 沉淀硬化不锈钢; 磁粉检测; 铁素体; 微观组织; 纯洁度

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2015.1.013

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2015)01-0077-05

近年来, 随着航空事业的蓬勃发展, 不断有新的材料研制成功, 沉淀硬化不锈钢因其具有较高的强度、耐腐蚀、抗氧化和可焊性被广泛应用于飞机重要承力部件上来。15-5PH(0Cr15Ni5Cu4Nb) 钢除了马氏体组织强化外, 在时效过程中析出碳化物和金属间化合物产生沉淀硬化, 因此具有很高的强度和综合力学性能, 良好的耐蚀性和焊接性能。适用于制造飞机发动机燃烧室机匣和锥形梁安装边水平尾翼边肋环圈等重要承力部件。淬火状态下的组织为马氏体和奥氏体, 时效时析出碳化物和金属间化合物^[1-6]。

在进行 15-5PH 沉淀硬化不锈钢磁粉检测时, 发现异常磁痕显示, 磁痕形貌各异(主要呈直线状、长条状或片状)。这些磁痕显示均对磁粉检测的评判造成严重影响。目前沉淀硬化不锈钢在磁粉检测过程中主要发现裂纹、夹杂等冶金缺陷^[7,8], 尚无 15-5PH 钢异常磁痕分析及磁粉检测评价研究。本工作通过对 15-5PH 沉淀硬化不锈钢原材料进行磁粉检测试验研究, 对磁粉检测中发现磁痕形貌进行分类汇总, 并通过微观组织分析和热处理等手段分析其形成原因, 为零件生产过程中的质量控制提供依据。

1 实验材料及方法

取样方法和磁粉检测方法按照 AMS 2300 标准执行。对发现可疑磁痕显示的试样进行固溶和时效热处理后再进行磁粉检测来对比分析热处理前后的磁痕显示情况^[9], 同时利用金相试验确定组织结构形貌, 确定磁痕形成的原因。

分别对退火、固溶以及时效热处理后的 15-5PH 钢材料取样, 制作成用于测量其磁特性的环形试样, 尺寸为外径 50mm, 内径 40mm, 高度 5mm。然后使用磁滞回线测试系统测量各个状态下的磁特性参数和磁化曲线, 然后结合磁痕性质确定磁粉检测工序。

2 结果与分析

2.1 15-5PH 钢材料的磁特性测试试验

表 1 为退火、固溶和时效后 15-5PH 钢材料的磁特性参数(最大磁感应强度 B_s , 剩磁 B_r , 矫顽力 H_c , 最大磁导率 μ_m , 最大相对磁导率 μ_{rm})。可以看出, 固溶状态下的磁导率和最大磁感应强度较退火或时效状态下的磁导率和最大磁感应强度低很多, 因此在固溶状态下磁粉检测的灵敏度会显著降低。

2.2 15-5PH 钢磁粉检测

在 15-5PH 钢供应态(退火态)试样磁粉检测过程中, 发现了三种类型的磁痕显示, 分别为长条状、

收稿日期: 2013-11-01; 修订日期: 2014-03-07

通讯作者: 王树志(1980—), 男, 工程师, 主要从事渗透、磁粉以及巴克豪森等无损检测方面研究, (E-mail) wsz_000411@qq.com。

片状和长直的磁痕显示,对应的试样编号分别为1[#],2[#],3[#],如图1a为1[#]试样长条状显示,磁痕宽度约为0.5mm,b为2[#]试样片状显示,长度和宽度相近,均在2~3mm之间,c为3[#]试样长直显示,宽度约为0.3mm。长条状和片状的磁痕显示较为清晰且容易形成显示,而长直磁痕显示较为模糊,通以较

大电流时才会显示清晰。

对长条状1[#]试样磁痕部位取样进行微观组织观察,发现大量的铁素体存在,形貌与磁痕显示一致,如图2a所示,宽度约为10 μm 。采用电镜扫描方法对试样进行扫描如图2b所示,进一步确定了磁痕显示原因为线性铁素体以及基体为马氏体组织。

表1 不同热处理状态磁特性参数

Table 1 The magnetization parameters with different heat treatment states

| States | B_s/T | B_r/T | $H_c/(A/m)$ | $\mu_m/(mH/m)$ | μ_{rm} |
|----------|---------|---------|-------------|----------------|------------|
| Anneal | 0.856 | 0.472 | 2530 | 0.12 | 95 |
| Solution | 0.306 | 0.146 | 3690 | 0.09 | 70 |
| Aging | 1.115 | 0.621 | 2050 | 0.19 | 150 |



图1 三种类型磁痕显示 (a)长条状;(b)片状;(c)长直状

Fig.1 The three types magnetic particle indications (a) wirelike indication;(b) flaky indication;(c) straight indication

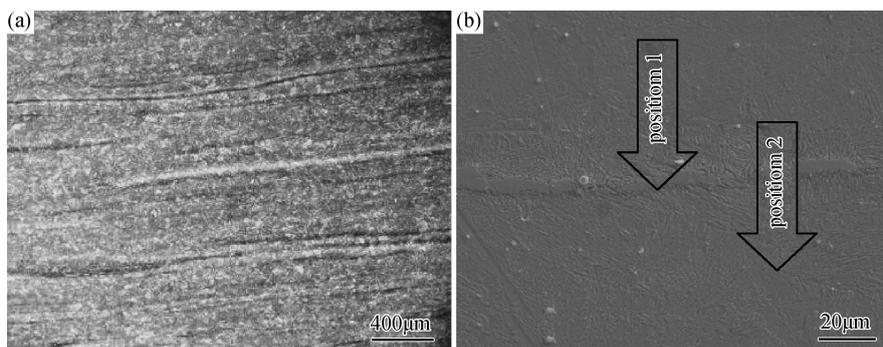


图2 长条状磁痕的金相(a)和电镜扫描图片(b)

Fig.2 The metallography and scanning electron microscope photograph to wirelike indication

(a) metallography;(b) scanning electron microscope

对片状磁痕显示部位取样进行微观分析,发现组织不均匀,形貌与磁痕显示一致,如图3a所示,可以看出经过腐蚀后主要分为白亮区域和较暗区域,较暗区域分散分布于白亮区域中间,长宽尺寸相近,约为500 μm 。采用电镜扫描方法对试样进行扫描如图3b。可以看出不同颜色区域均为马氏体组织,但形貌有所不同,如图4a,b所示。

对长直磁痕显示部位取样进行微观分析,发现

铁素体存在,形貌与磁痕显示一致,如图5a,b所示,宽度在5 μm 左右。可以看出与长直状磁痕显示情况基本一致,但其铁素体的聚集程度没有图2a所示试样严重。

分别对图2b和图3b所示区域进行成分测量,结果见表2所示。可看出铁素体Cr含量达到了23%,高于含量为15%的正常值,其他各点含量均正常。

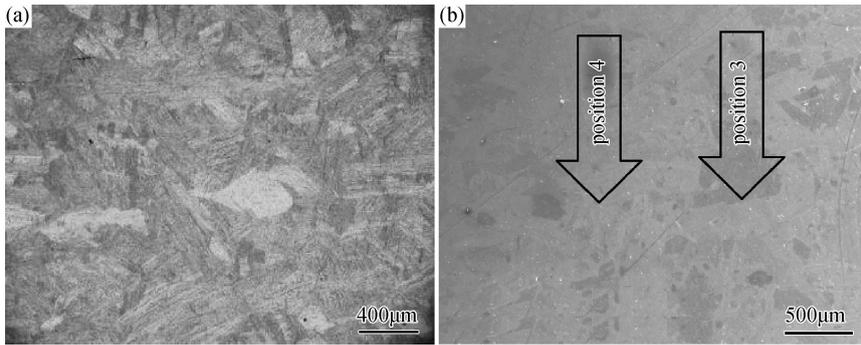


图 3 片状磁痕的金相(a)和扫描电镜图片(b)

Fig. 3 The metallography and scanning electron microscope photograph to wirelike indication (a) metallography; (b) scanning electron microscope

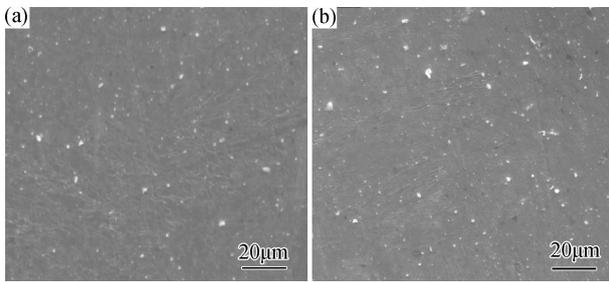


图 4 片状磁痕的扫描电镜图片

Fig. 4 The scanning electron microscope photograph of wirelike indication (a) position 3; (b) position 4

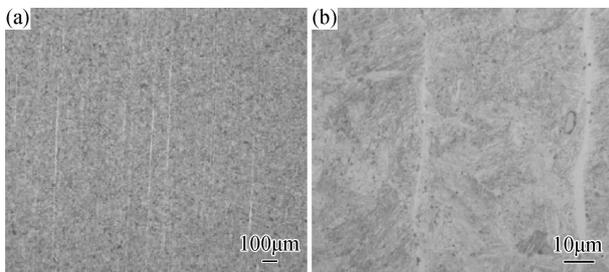


图 5 长直磁痕低倍(a)和高倍(b)金相照片

Fig. 5 Straight magnetic particle indication metallography photograph (a) macrostructure; (b) microstructure

表 2 不同位置化学成分(原子分数/%)

Table 2 The chemistry composition on different position (Atom fraction/%)

| Position | Cr | Fe | Ni | Cu |
|----------|----|----|-----|-----|
| 1 | 23 | 74 | 1.9 | 1.1 |
| 2 | 16 | 74 | 5.0 | 4.0 |
| 3 | 16 | 75 | 4.9 | 3.1 |
| 4 | 16 | 75 | 5.0 | 2.9 |

对三个试样进行固溶热处理后再进行磁粉检测,发现磁痕显示均已消失不见,如图 6a,图 6b 和

图 6c 所示。采用金相手段对 1[#]、2[#] 和 3[#] 试样取样,发现三个试样的组织结构均为马氏体组织,其中 3[#] 试样有少量铁素体存在,宽度在 1~2µm 之间,铁素体的尺寸较固溶之前大大的减小,金相试验结果如图 7a,图 7b 和图 7c 所示。

由固溶态磁特性参数可知,该状态下的磁导率较低,3[#] 试样铁素体条带宽度在 1~2µm 之间,而磁粉检测的最小理论宽度约为 1µm,可见铁素体条带宽度已接近最小可检尺寸^[0],加之该状态下磁导率较低,降低了磁粉检测的灵敏度,进而经磁粉检测后未出现磁痕显示。由此可知磁导率的降低影响了检测结果,因此需要通过调整热处理状态使其磁导率增大后再进行磁粉检测来进一步验证磁粉检测磁痕显示情况,因此对 1[#]、2[#] 和 3[#] 试样进行时效热处理后进行磁粉检测,检测结果如图 8a,b,c 所示。由图 8 可以看出,经过时效热处理后,1[#]、2[#] 和 3[#] 试样与固溶状态一样仍未发现磁痕显示,足以说明其组织是比较均匀的,而铁素体的少量聚集也不足以形成磁痕显示。

通过对 15-5PH 沉淀硬化不锈钢磁粉检测和金相组织分析发现,1[#] 和 3[#] 试样中存在条状铁素体,沿轧制方向。铁素体中 Cr 元素较高,Ni 较低,合金在冶炼时由于成分的差异会形成铁素体,且将一致保留下来。2[#] 试样组织成分较为均匀,均为马氏体组织,但低倍腐蚀后形貌类似于铸造晶粒形态,固溶或时效热处理之后就会消失。因此微观组织结构不同造成了不同磁导率的差异,进而形成了磁痕显示。

在原材料状态下由于铁素体的聚集容易造成磁痕显示,严重影响原材料纯洁度的磁粉检测判定,而固溶或时效热处理后铁素体的聚集程度降低不足以形成磁痕显示。因此为避免铁素体磁痕

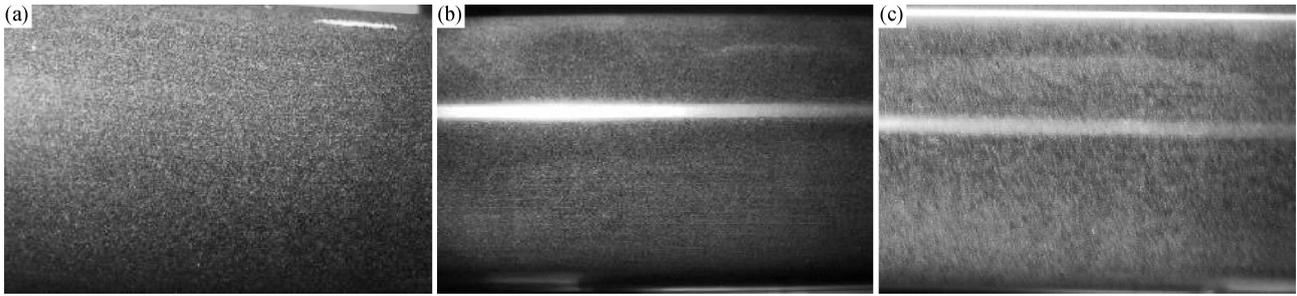


图6 固溶热处理后1[#](a)、2[#](b)和3[#](c)试样磁痕显示

Fig. 6 The magnetic particle indication on 1[#](a), 2[#](b), 3[#](c) samples with solution heat treatment state



图7 固溶热处理后1[#](a)、2[#](b)和3[#](c)试样的金相照片

Fig. 7 Metallography photograph on 1[#](a), 2[#](b), 3[#](c) samples with solution heat treatment state



图8 时效热处理后1[#](a)、2[#](b)和3[#](c)试样磁粉检测结果

Fig. 8 The magnetic particle testing result on 1[#](a), 2[#](b), 3[#](c) samples with aging heat treatment state

的对检测判定的干扰,应该将纯洁度工序安排在固溶或时效热处理后进行。但由于固溶状态下的磁导率较低,检测灵敏度大大降低,严重影响磁粉检测结果。因此在对15-5PH沉淀硬化不锈钢纯洁度进行检测时,如果发现可疑磁痕显示应该将试样进行固溶+时效热处理之后再行磁粉检测。

3 结论

(1)15-5PH沉淀硬化不锈钢组织中条状铁素体聚集是在磁粉探伤工序检查时出现类似金属轧制流线长条或长直线性显示的原因。

(2)15-5PH沉淀硬化不锈钢原材料检测时出现

的成片的磁痕显示均为组织结构不均匀造成的。

(3)在对15-5PH钢原材料进行纯洁度磁粉检测时,如果发现可疑磁痕可通过对试样进行固溶和时效热处理来判定磁痕显示的性质。

参考文献:

[1] 刘振宝,梁剑雄,杨志勇,等.碳含量对15-5PH沉淀硬化不锈钢板材的组织与性能的影响[J].航空材料学报,2011,31(1):7-11.

(LIU Z B, LIANG J X, YANG Z Y, *et al.* Effect of carbon content on microstructure and mechanical properties of type 15-5PH precipitation hardened stainless steel [J]. Journal

- of Aeronautical Materials, 2011, 31(1): 7 - 11.)
- [2] 钟平, 夏明赞, 王俊丽, 等. 时效对 0Cr15Ni5Cu2NTi 钢微观组织与力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2003, 23(4): 21 - 25.
(ZHONG P, XIA M Y, WANG J L, *et al.* Effect of aging on microstructure and mechanical properties of 0Cr15Ni5Cu2Ti steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(4): 21 - 25.)
- [3] KAMILA A C, CELSO Y, LUIS R, *et al.* Fractal behavior throughout stretch zone of 15-5PH steel under elastic-plastic loading conditions[J]. Materials Science and Engineering, 2009, 525(1-2): 37 - 41.
- [4] 戴秀梅, 何枫. 高强度沉淀硬化不锈钢在飞上应用[J]. 航空材料学报, 2003, 23(z1): 280 - 284.
(DAI X M, HE F. Application of high-strength precipitation-hardening stainless steel in aircraft[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(z1): 280 - 284.)
- [5] ABDELSHEHID M, MAHMODIEH K, MORI K, *et al.* On the correlation between fracture toughness and precipitation hardening heat treatments in 15-5PH Stainless Steel[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14: 626 - 631.
- [6] SUN Z, MORICONI C, BENOIT G, *et al.* Fatigue crack growth under high pressure of gaseous hydrogen in a 15-5PH martensitic stainless steel influence of pressure and loading frequency[J]. Physical Metallurgy and Material, 2012, 44(3): 1320 - 1330.
- [7] 胡春燕, 刘新灵, 陶春虎, 等. 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢制螺钉断裂原因分析[J], 材料工程, 2012, 12: 21 - 28.
(HU C Y, LIU X L, TAO C H, *et al.* Failure analysis on 0Cr17Ni4Cu4Nb screw[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, (12): 21 - 28.)
- [8] 程健云. 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢中的细小硫化物夹杂及其对策[J]. 理化检验-物理分册, 2007, 43(10): 487 - 493.
(CHENG J Y. Fine strip inclusion in 0Cr17Ni4Cu4Nb steel and its countermeasures [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A (Physical Testing), 2007, 43(10): 487 - 493.)
- [9] 裴海祥, 王西涛, 王立新, 等. 时效处理对 15-5PH 沉淀硬化马氏体不锈钢组织和力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2012, 33(5): 47 - 48.
(PEI H X, WANG X T, WANG L X, *et al.* Effect of ageing treatment on structure and mechanical properties of precipitation-hardening martensite stainless 15-5PH [J]. Special Steel, 2012, 33(5): 47 - 48.)
- [10] 李家伟. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

Analysis of Magnetic Particle Indication about 15-5PH Precipitation-hardening Stainless Steel

WANG Shu-zhi, GE Zi-liang, REN Xue-dong, QIAO Hai-yan

(Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The strip, flaky and straight indication were detected when 15-5PH aeronautical precipitation-hardening martensitic stainless steel was tested by the magnetic particle testing method. The cause of different indication was discovered by their characteristics and microstructure. The technological process and the indication estimating method were established by analyzing magnetic parameters under different heat treatment condition in the cleanliness magnetic particle testing. The study finds that the indication is mainly caused by ferrite and asymmetric microstructure. The result has laid the foundation for the evaluation of magnetic particle indication and the formulation of the criteria in the magnetic particle testing process of precipitation-hardening martensitic stainless steel used in aviation manufacture engineering, and ensured the work of magnetic particle testing proceeds successfully.

Key words: precipitation-hardening stainless steel; magnetic particle testing; ferrite; microstructure; cleanliness