

超高强钢加工工艺与静载塑性变形特性研究

李海澄^{1,2}, 刘欢¹, 袁让兵¹, 陈宏科¹

¹国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖

²安徽省航空设备测控与逆向工程实验室, 安徽 芜湖

Email: hcli_25@sina.com

收稿日期: 2021年4月19日; 录用日期: 2021年5月30日; 发布日期: 2021年6月8日

摘要

研究了1Cr15Ni4Mo3N超高强钢材料静载塑性变形特性, 开展大尺寸试验件的静力载荷破坏试验, 验证了加工工艺方法的可靠性, 并推广应用于AF1410超高强钢材料加工, 形成了针对新型材料机械加工工艺研究的通用研究方法。

关键词

1Cr15Ni4Mo3N超高强钢, 静载塑性变形特性, 机械加工工艺, AF1410超高强钢

Research on Ultra-High Strength Steel Processing Technology and Static Plastic Deformation Characteristics

Haicheng Li^{1,2}, Huan Liu¹, Rangbing Yuan¹, Hongke Chen¹

¹Wuhu State-owned Machinery Factory, Wuhu Anhui

²Anhui Province Aviation Equipment Testing and Control and Reverse Engineering Laboratory, Wuhu Anhui

Email: hcli_25@sina.com

Received: Apr. 19th, 2021; accepted: May 30th, 2021; published: Jun. 8th, 2021

Abstract

The static load plastic deformation characteristics of 1Cr15Ni4Mo3N ultra-high strength steel were studied, and the static load failure test of large-size test pieces was carried out to verify the reliability of the processing technology method. Moreover, it was popularized and applied to the processing of AF1410 ultra-high strength steel, forming a general research method for the me-

Keywords

1Cr15Ni4Mo3N Ultra-High-Strength Steel, Static Plastic Deformation Characteristics, Machining Technology, AF1410 Ultra-High-Strength Steel

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

1Cr15Ni4Mo3N、AF1410 等超高强钢材料机械性能相近，是一种不仅具有高的硬度和强度，而且具有较高塑性的新型航空材料，两者之间的机械加工方法具有一定的可借鉴性。目前对 AF1410 超高强度钢的研究集中在材料性能及改进方面，如徐昌淦[1]等对二次硬化超高强度钢 AF1410 的研发历程及材料硬化机理、材料性能进行了对比研究。GARRISON [2]等在 AF1410 钢的抗疲劳裂纹扩展特性、抗腐蚀疲劳特性以及提高断裂韧性和晶粒细化等方面做了较全面的研究。然而，对于类似 1Cr15Ni4Mo3N、AF1410 具有超高强度的新型钢种，处于应变状态时要求的试样尺寸往往过大，难以在普通低吨位的试验机上通过试验手段直接进行静载荷试验，以便观察机械加工是否在此类材料零件表面产生微裂纹进而产生加工缺陷的影响程度[3] [4]。本文针对 1Cr15Ni4Mo3N 材料的大尺寸试验件，开展试验方法设计，获得该材料塑性变形情况并验证加工方法的可靠性，为承载损伤容限设计应用提供依据，并将经验证可靠的加工工艺推广应用至 AF1410 钢的生产加工中。

2. 试验件加工

2.1. 试验件设计

选取用于发动机外侧支点在飞机上固定的大尺寸重要承力件作为本次试验用试验件，直径为 $\phi 57$ mm，长度为 288 mm，检测在不同载荷下的塑性变形情况及表面微裂纹产生情况，验证工艺方法的可靠性，零件材料为 1Cr15Ni4Mo3N，试验件二维图见图 1 所示。

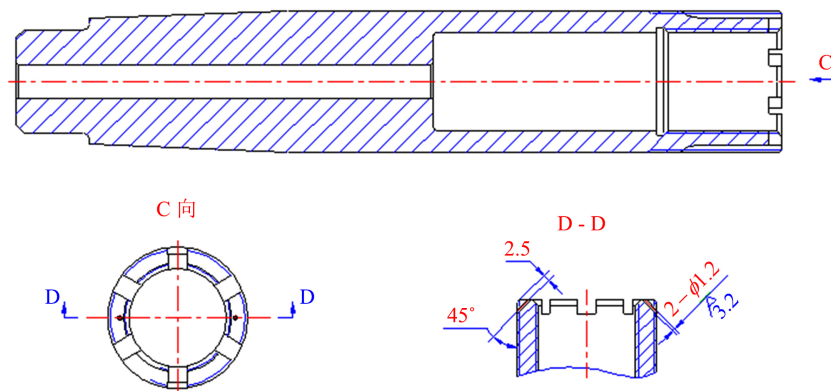


Figure 1. Two-dimensional drawing of test piece

图 1. 试验件二维图

2.2. 工艺设计

试验件主要基于超高强钢的实际加工生产经验确定相关工艺工序，其流程为：粗加工 - 热处理 - 防锈处理 - 精加工 - 防锈处理 - 去应力回火 - 酸浸蚀检查 - 防锈处理 - 表面处理 - 防锈处理 - 表面强化 - 防锈处理。加工合格后的实物图见图 2 所示，对试验件进行检测，记录两件试验件同轴度分别为 0.004 mm、0.002 mm。



Figure 2. Test item
图 2. 试验件实物

3. 试验方案与试验过程

3.1. 试验加载设计

根据实际工作状态，设计试验件的限制载荷 F_w 为： $F_x = 121,716\text{N}$ ； $F_y = 7595\text{N}$ ； $F_z = 29,665\text{N}$ ，加载作用点位于距离靠近端面应变测量截面 21.5 mm 处，每个试验件测量 2 个端面的应力分布，每个端面粘贴 4 个应变片，每组试验件共 16 个应变片，端面分别距离端头 40 mm 和 114.5 mm，加载夹具与试验件接触长度沿轴向为 26 mm，粘贴位置和加载要求见图 3。

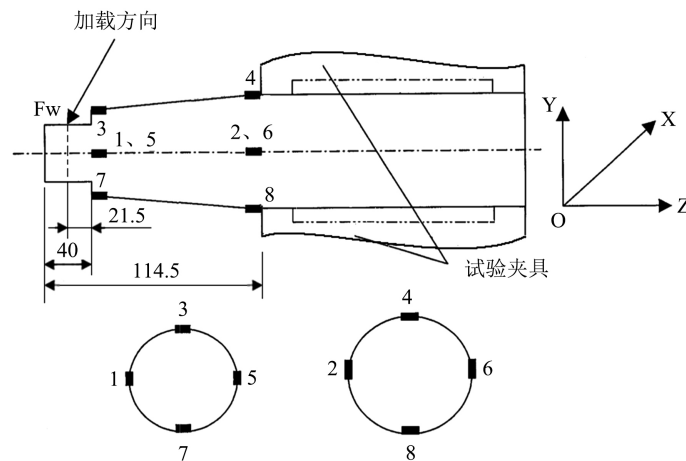


Figure 3. Diagram of test piece loading and laminating
图 3. 试验件加载和贴片示意图

3.2. 试验加载要求

试验加载要求如下：

- 1) 对试验件进行静力试验，试验加载误差小于 1%；
- 2) 先进行 60% 限制载荷预试，检查整个试验系统是否处于良好状态；
- 3) 进行 100% 限制载荷静力试验，每项试验以 5% 限制载荷为一级，逐级加载至 100% 限制载荷后保

载 30s, 然后逐级卸载至 0;

4) 进行 200%限制载荷静力试验, 先按 2) 要求逐级加载至 100%限制载荷后不保载, 如果试验采集数据重复性良好, 继续加载。100%~160%限制载荷之间, 以 5%限制载荷为一级, 逐级加载至 160%限制载荷, 160%~190%限制载荷之间, 以 2%限制载荷为一级, 逐级加载至 190%限制载荷, 190%限制载荷以后, 以 1%限制载荷为一级, 逐级加载至 200%限制载荷, 保载 30 秒, 然后逐级退载到 0;

5) 试验件 1 静力试验继续加载至破坏, 200%限制载荷以后, 以 5%限制载荷为一级进行加载, 如试验载荷超过 400%限制载荷仍未破坏可以停止试验。

3.3. 检查要求

试验完成后检查试验件是否有永久性变形及裂纹等损伤。

3.4. 试验设备

试验使用的设备见下表(表 1)。

Table 1. Test equipment

表 1. 试验设备

设备名称	设备型号	精度	用途
微机控制电液伺服万能试验机	E65.206BF-1	0.5 级	试验加载
静态应变测量系统	东华测试 DH3820	0.5 级	应变采集

3.4.1. 微机控制电液伺服万能试验机

试验件静力试验使用微机控制电液伺服万能试验机, 试验机最大静态载荷为 ± 2000 kN, 静态载荷示值精度均达到标准要求精度, 且在检定周期范围内, 如图 4 所示。



Figure 4. Servo universal testing machine

图 4. 伺服万能试验机

3.4.2. 静态应变测量系统

本试验使用东华测试的 DH3820 静态数据采集仪进行应变采集。测量通道：128 个，采样频率 0~100 HZ，测量范围： $\pm 50,000 \mu\epsilon$ ，误差 $\pm 0.5\%$ ，且在检定周期范围内。

本试验使用中航电测有限公司的 BE120-3AA 单向应变片进行应变测量。电阻值： $119.8 \pm 0.1\Omega$ ，灵敏系数： $2.22\% \pm 1\%$ 。

3.5. 试验过程

试验件静力试验按照如下步骤进行加载：

- 1) 进行 60%限制载荷预试：按照 5%限制载荷为一级，逐级加载至 60%限制载荷，保载 30 s 后，卸载至零；
- 2) 检查试验设备和应变数据采集设备是否处于良好状态；
- 3) 进行 100%限制载荷试验：以 5%限制载荷为一级，逐级加载至 100%限制载荷后保载 30 s，然后逐级卸载至 0；
- 4) 进行试验件检查，确定试验件表面是否有裂纹产生；
- 5) 进行 200%限制载荷试验：按照步骤 3) 逐级加载至 100%限制载荷后不保载，如果试验采集数据重复性良好，继续加载。100%~160%限制载荷之间，以 5%限制载荷为一级，逐级加载至 160%限制载荷，160%~190%限制载荷之间，以 2%限制载荷为一级，逐级加载至 190%限制载荷，190%限制载荷以后，以 1%限制载荷为一级，逐级加载至 200%限制载荷，保证 30 s，然后逐级卸载至 0；
- 6) 试验结束，检查试验件的表面是否有裂纹产生；
- 7) 拆下试验件 2，进行同轴度检查，保存试验数据；
- 8) 对试验件 1 继续加载至破坏。200%限制载荷之后，以 5%限制载荷为一级进行加载，至试验件破坏。如果试验载荷超过 400%限制载荷仍未破坏，可以停止试验；
- 9) 拆下试验件 1，检查试验件表面是否有裂纹产生，或试验件产生永久变形；
- 10) 保存试验数据。

4. 试验结果

试验件试验安装照片见图 5。

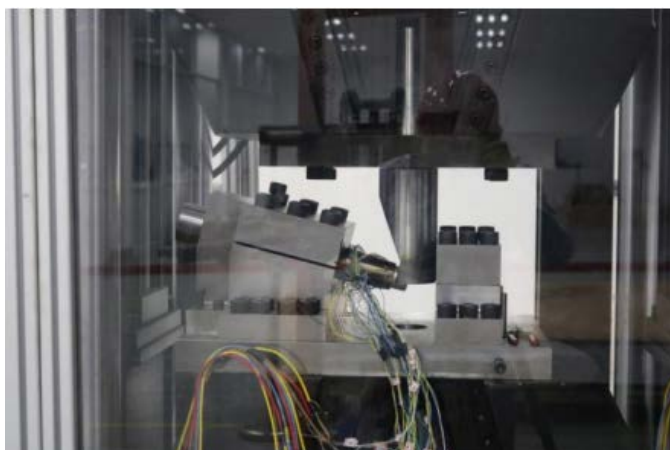


Figure 5. Photo of the test piece after installation
图 5. 试验件试验安装后照片

试验件试验加载曲线见图 6，其试验数据见表 2 所示。

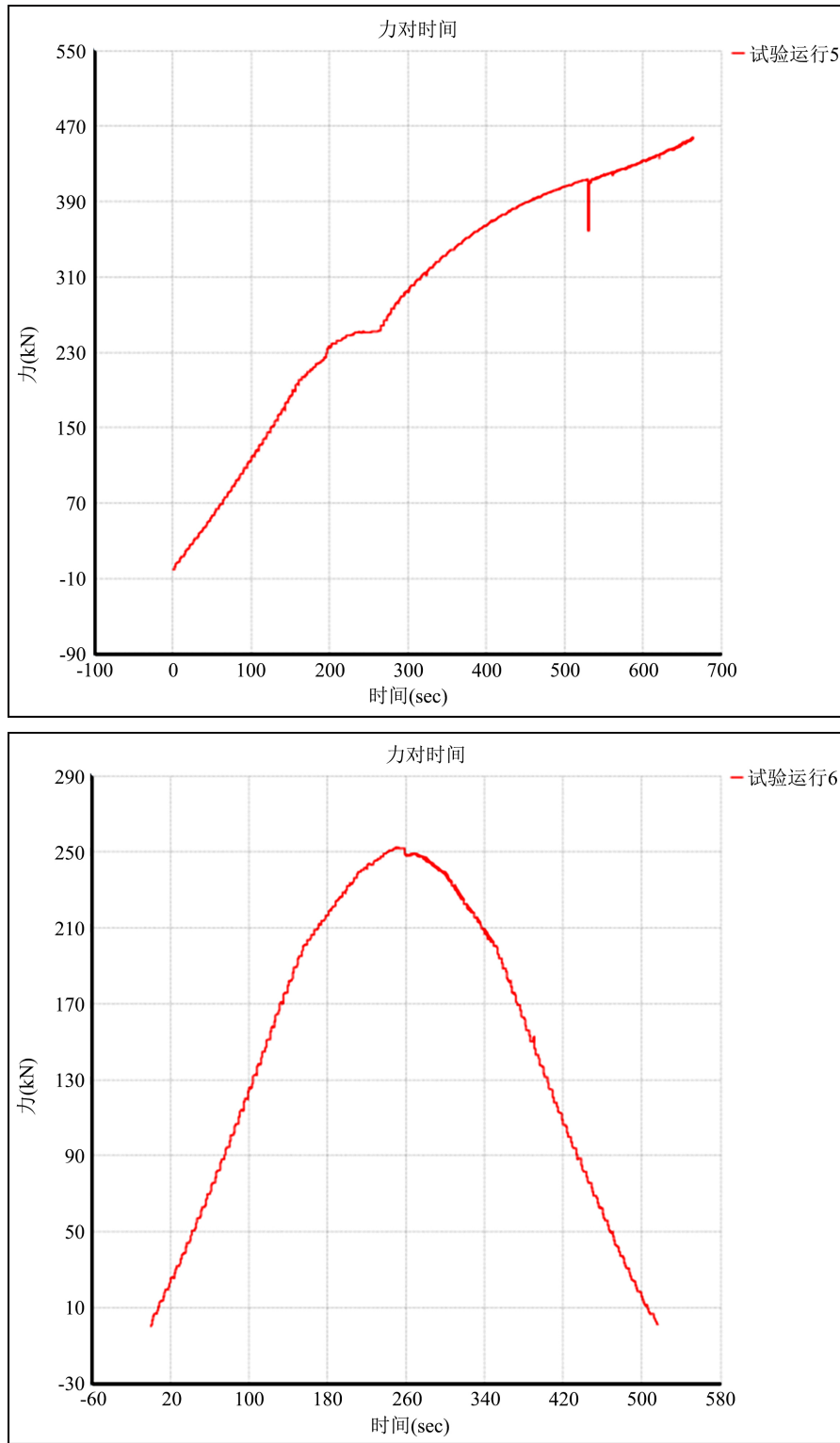


Figure 6. Load curve of test piece 1 and test piece 2

图 6. 试验件 1 和试验件 2 试验加载曲线

Table 2. Test data
表 2. 试验数据

试验件编号		试验件 1		
载荷级	加载载荷(KN)	试压前同轴度(mm)	试压后同轴度(mm)	破坏模式
60%	75.3	/	/	目视无裂纹
100%	125.5	/	/	目视无裂纹
200%	251.0	/	/	目视无裂纹
400%	458.0	0.004	25	永久塑性变形
试验件编号		试验件 2		
载荷级	加载载荷(KN)	试压前同轴度(mm)	试压后同轴度(mm)	破坏模式
60%	75.3	/	/	目视无裂纹
100%	125.5	/	/	目视无裂纹
200%	251.0	0.002	0.003	目视无裂纹

试验件 1 静力试验后发生永久塑性变形，详见图 7。



Figure 7. Permanent deformation diagram of test piece 1
图 7. 试验件 1 发生永久变形图

综上可得出试验件在加载 60%、100%、200%限制载荷试验时，试验过程未出现异常，试验件未出现裂纹和塑性变形，加载 400%限制载荷试验，试验过程未发现异常，试验完成后，拆除试验件，试验件未出现裂纹，试验件出现明显的永久性塑性变形。用现有工艺加工的零件满足设计功能要求，加工工艺方法可行、可靠。

5. AF1410 材料零件加工

结合上述 1Cr15Ni4Mo3N 材料加工试验结论，按照实际生产需要，编制 AF1410 钢材料热喷涂用零件生产工序工艺规程，经静载试验等性能试验要求，检测合格，工序设计合理得当，工艺方法可靠，满足生产装配要求，零件尺寸及加工样件详见图 8。

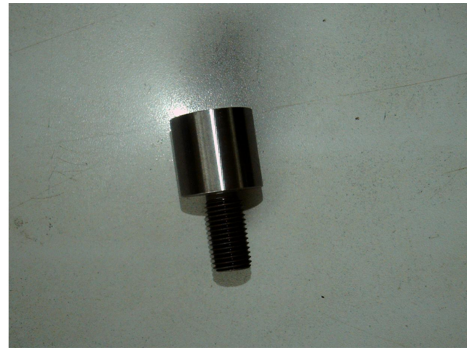
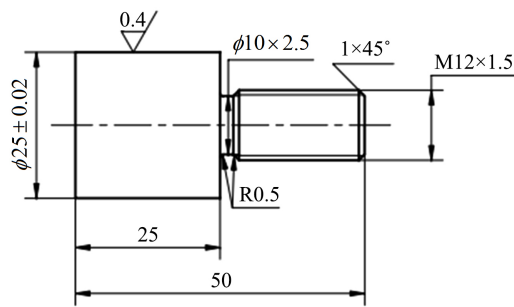


Figure 8. Two-dimensional drawing and physical object of AF1410 parts

图 8. AF1410 零件二维图及实物

6. 结论

本文通过研究 1Cr15Ni4Mo3N 材料塑性载荷试验, 验证了加工工艺的合理性, 并将工艺方法推广应用至 AF1410 的材料加工, 解决了超高强度钢加工难题, 其研究进一步验证了超高强度钢材料具有较好的塑性性能和承载容限能力。

基金项目

空军修理科研项目(项目编号 87-技-17-71)。

参考文献

- [1] 徐昌淦, 张少锐. 高韧性超高强度钢 AF1410[J]. 特殊钢, 1993(6): 11-14.
- [2] Garrison, J.W.M. (1987) Influence of Inclusion Spacing and Microstructure on the Fracture Toughness of the Secondary Hardening Steel AF1410. *Metallurgical Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, **18**, 1257-1263. <https://doi.org/10.1007/BF02647195>
- [3] 李阿妮, 王春旭, 刘宪民. 二次硬化型超高强钢的发展[J]. 材料导报网刊, 2007, 2(1): 13-16.
- [4] 桂毓林, 刘仓理, 王彦平. AF1410 钢的层裂断裂特性研究[J], 高压物理学报, 2006, 20(1): 34-38.