

# Analysis of Reduced Dimension for Inconel 718 Alloy Precision Bolt Shank

Wanjuan Jin, Tianlong Sui, Jingyuan Wang, Dan Zhang

China Aviation Industry Standard Parts Manufacturing Co. Ltd., Guiyang Guizhou  
Email: jinwanjun1982@163.com

Received: May 2<sup>nd</sup>, 2017; accepted: May 22<sup>nd</sup>, 2017; published: May 25<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

This article analyzes the reasons for the Inconel 718 alloy precision bolt shank reduced dimension of solid-state phase transformation during the aging treatment. From this, we also studied the influence of aging on dimension for four superalloys, including Inconel 718, Rene'41, Waspaloy and A286 alloy. Result shows that dimensions of the four kinds of alloys are all reduced after aging treatment, and the reduction is proportional to the dimension before aging. Therefore, we can reserve some allowance for dimension before aging to solve the problem of reduced dimension for stress-type superalloy precision bolts.

## Keywords

Inconel 718, Superalloy, Precision Bolt, Heat Treatment, Solid-State Phase Transformation

---

# Inconel 718合金精密杆螺栓光杆尺寸变小的原因分析

金万军, 隋天龙, 王京园, 张丹

中国航空工业标准件制造有限责任公司, 贵州 贵阳  
Email: jinwanjun1982@163.com

收稿日期: 2017年5月2日; 录用日期: 2017年5月22日; 发布日期: 2017年5月25日

---

## 摘要

本文分析了Inconel 718合金精密杆螺栓光杆尺寸变小的原因是时效热处理发生固态相变所致, 同时举一反三, 研究了时效对Inconel 718等四种高温合金尺寸的影响规律。结果表明, 时效热处理发生固态相变

导致Inconel 718高温合金精密杆尺寸变小, Inconel 718、Rene'41、Waspaloy和A286合金的尺寸经时效后均有所减小, 减小量均与时效前尺寸成正比。在时效前预留一定的尺寸余量, 可有效解决应力持久型高温合金精密杆螺栓光杆尺寸偏小的问题。

## 关键词

Inconel 718, 高温合金, 精密杆, 热处理, 固态相变

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

Inconel 718 合金对应国内牌号 GH4169, 是以体心四方的  $\gamma''$  和面心立方的  $\gamma'$  相沉淀强化的镍基高温合金, 在低温和 700℃ 以下具有高的屈服强度、拉伸强度和持久强度, 同时具有良好的抗疲劳、抗氧化、耐腐蚀性能, 以及良好的加工性能、焊接性能和长期组织稳定性, 广泛应用于航空发动机高温部件[1] [2], 是发动机紧固件常用高温合金。

在生产 Inconel 718 高温合金精密杆螺栓的终检工序中发现, 螺栓光杆部位的直径小于产品设计尺寸要求。经查过程检验记录, 螺栓杆部的尺寸加工工序检验结果满足要求。为了找到问题的原因, 在各工序加工前后进行尺寸测量对比, 经跟踪排查最终确定, 时效热处理工序造成精密杆光杆直径变小。本文分析了时效热处理造成 Inconel 718 高温合金精密杆尺寸变小的原因及其影响规律, 避免产品报废。同时举一反三, 对其他三种常用高温合金精密杆螺栓的尺寸受时效热处理的影响规律进行了较为系统的研究。

## 2. Inconel 718 合金精密杆螺栓杆部直径变小的原因分析

对于应力持久型 Inconel 718 合金精密杆螺栓, 其主要加工工艺流程为: 头部成形→固溶处理→机械加工→滚压螺纹→时效处理。固溶和时效处理之间的机械加工工序完成了螺栓的尺寸精加工和滚压螺纹, 光杆部位直径已加工到最终尺寸。在各工序排查发现, 规格为  $\phi 10$  的精密杆螺栓时效后的光杆直径尺寸比时效前减小 0.009 mm~0.010 mm。说明时效热处理是导致 Inconel 718 合金的尺寸变小的原因, 但其内在机理还需要进一步分析。

Inconel 718 合金组织主要由  $\gamma$  基体相、 $\delta$  相、碳化物相和作为主要强化相的  $\gamma''$ ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ )相和  $\gamma'$ ( $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb})$ )相组成[1] [2]。研究表明[3], 经固溶处理,  $\delta$  相、 $\gamma''$  相和  $\gamma'$  相溶入基体  $\gamma$  相, 该合金在 720℃ 保温 8 h, 析出  $\gamma''$  相和  $\gamma'$  相, 在 620℃ 保温 8 h, 主要析出  $\gamma'$  相。此外, 有研究表明[4], Inconel 718 经标准热处理后, 发生固态相变, 析出的  $\gamma''$  相和  $\gamma'$  相以共格方式镶嵌在  $\gamma$  基体中。并通过实验证明, 经时效后,  $\gamma$ 、 $\gamma''$  和  $\gamma'$  相的晶格常数略有减小。初步分析认为, Inconel 718 合金经时效热处理后, 在微观上各相的晶格常数和体积分数都发生变化, 因而在宏观上表现出尺寸的变化。

为了验证以上理论分析结果, 进行了以下工艺试验: 将固溶状态的 Inconel 718 合金用无心磨床精磨到直径为  $10_{-0.010}^0$  mm, 并用指示千分尺(精度为 0.001 mm)测量其两端和中间三个部位的直径尺寸, 并做好位置标记, 经标准热处理时效后(时效工艺为: 将产品装炉并抽真空至(0.1~0.5) MPa→升温至 720℃ 保温 8 h→以 55℃/h 冷却至 620℃ 保温 8 h→气冷。), 用同样的方法测出相同位置的直径尺寸, 发现尺寸比时效前减小 0.009 mm~0.013 mm。以上试验说明时效处理后, 试样的直径尺寸变小 0.009 mm~0.013 mm。然

而，再次将时效热处理后的试样进行固溶处理，用同样的方法测出相同部位的尺寸，发现此时的直径尺寸与时效前的尺寸基本一致，说明固溶处理后，直径尺寸比固溶处理前(时效状态)变大 0.009 mm~0.013 mm。这进一步证明了合金的尺寸变化是由于固态相变所致。

### 3. Inconel 718 合金尺寸变小原因的试验验证和影响规律

为了研究时效热处理对 Inconel 718 合金的尺寸影响规律。根据产品尺寸特点，选取 3 个直径规格为 ( $\phi 6.1$ 、 $\phi 8.1$ 、 $\phi 10.1$ ) 的原材料进行试验，原材料技术条件为 AMS5708K，炉号分别为 L1543、FM69、HT0593EY。用无心磨床分别将其精磨成直径为 ( $\phi 6_{-0.010}^0$ 、 $\phi 8_{-0.010}^0$ 、 $\phi 10_{-0.010}^0$ ) 的圆柱形试样(如图 1 所示)，每个规格制 10 个试样，每个试样分别测两端和中间三个部位，每个部位均垂直测量两次取平均值，得到每个试样 3 组数据，每个直径规格 10 个试样共 30 组数据。采用指示千分尺进行测量，精确到 0.001 mm，分别测出时效前后的尺寸 D 和 D'，然后计算相应的尺寸变化量(D-D')，共 30 组数据，对其取平均值进行数据分析。利用 OriginPro7.5 软件进行分析，拟合成一条直线，得到其时效前后尺寸关系函数。

时效对 Inconel 718 合金的尺寸影响规律如图 2 所示，从图中可以看出，时效后合金的尺寸减少量与时效前尺寸成正比，经 OriginPro7.5 软件直线拟合得出其函数关系为： $D-D' = 0.00125D - 0.00133$ ，D 和 D'分别为时效前后的直径。

### 4. 时效对 Rene' 41、Waspaloy 和 A286 合金的尺寸影响规律

本着举一反三的原则，对精密杆螺栓涉及的其他三种高温合金 Rene'41、Waspaloy 和 A286 合金，预测其与 Inconel 718 合金一样，尺寸经时效后也会变小，但由于成分的区别，变化规律有所区别。

时效对 Rene'41、Waspaloy 和 A286 合金的尺寸影响规律分别如图 3、图 4 和图 5 所示，从图中可以看出，时效后合金的尺寸减少量与时效前尺寸均成正比，经 OriginPro7.5 软件直线拟合得出其函数关系分别为： $D-D' = 0.001D - 0.003$  (Rene'41)、 $D-D' = 0.000761D + 0.00239$  (Waspaloy)和  $D-D' = 0.001259D - 0.00073$  (A286)，D 和 D'分别为时效前后的直径。

### 5. 预防措施

根据以上试验及分析结果，针对产品的不同材料及规格，总结四种合金在常用尺寸变化范围的经时效后的尺寸变化情况如表 1 所示。

高温合金精密杆螺栓分为疲劳型和应力持久型，两者对光杆部位尺寸精度要求很高。对于疲劳型精

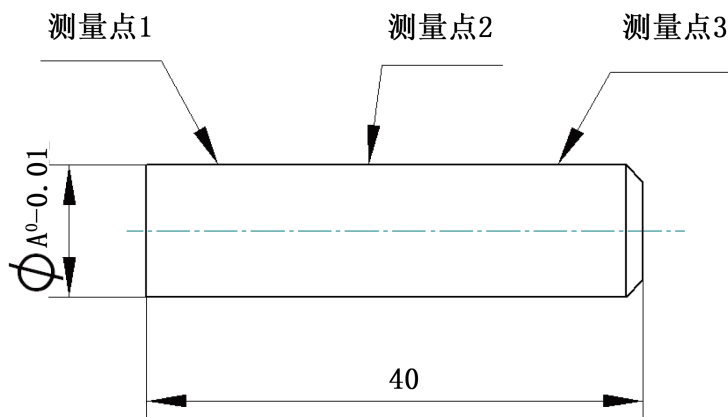


Figure 1. Schematic diagram of dimensional measurement  
图 1. 尺寸测量示意图

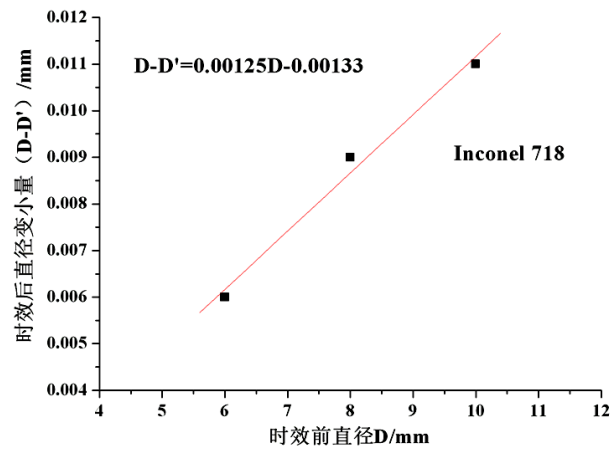


Figure 2. Effect of aging treatment on the dimension of Inconel 718 alloy

图 2. 时效对 Inconel 718 合金尺寸的影响规律

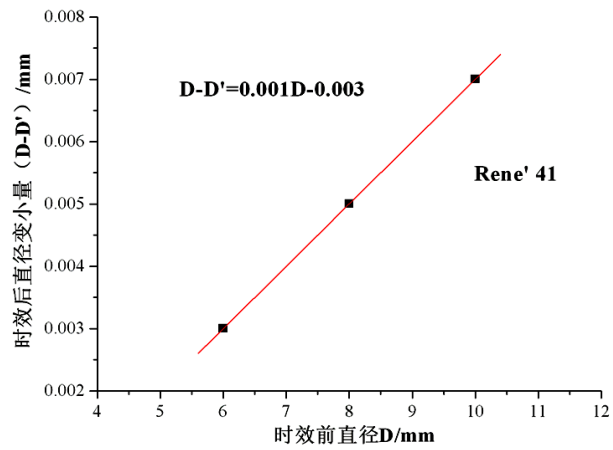


Figure 3. Effect of aging treatment on the dimension of Rene'41 alloy

图 3. 时效对 Rene'41 合金尺寸的影响规律

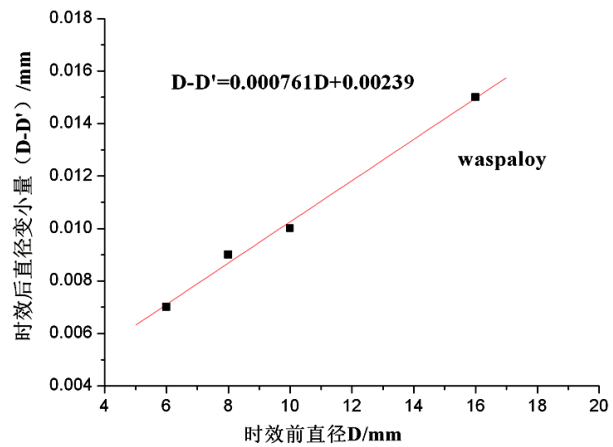


Figure 4. Effect of aging treatment on the dimension of Waspaloy alloy

图 4. 时效对 Waspaloy 合金尺寸的影响规律

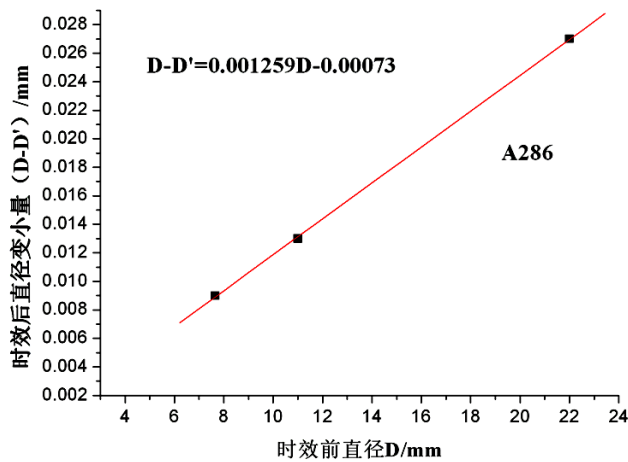


Figure 5. Effect of aging treatment on the dimension of A286 alloy

图 5. 时效对 A286 合金尺寸的影响规律

Table 1. The influence of aging on dimension for four superalloys in the commonly size

表 1. 四种高温合金在常用尺寸范围经时效后的尺寸变化情况

时效前直径/mm		5	6	7	8	9	10	11	12
时效后直径减小量/mm	Rene'41	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
	Waspaloy	0.006	0.007	0.008	0.009	0.009	0.010	0.011	0.012
	A286	0.006	0.007	0.008	0.009	0.011	0.012	0.013	0.014
	Inconel 718	0.005	0.006	0.007	0.009	0.010	0.011	0.012	0.014

密杆螺栓，为了避免时效后尺寸变小的问题，可以在时效工序后进行精加工螺栓杆部和滚压螺纹，不受时效的影响；而对于应力持久型精密杆螺栓，一般在时效之前加工到杆部最终尺寸，可以根据不同牌号的高温合金尺寸受时效热处理的影响规律，将最终直径尺寸按表 1 预留一定的尺寸余量，避免时效后出现尺寸变小。

经多批次生产验证，在时效前按表 1 预留一定的尺寸余量后，最终产品尺寸满足了产品设计要求，有效解决了光杆直径尺寸偏小的问题。

## 6. 结论

- 1) 时效热处理的固态相变导致 Inconel 718 合金精密杆螺栓光杆直径尺寸变小；
- 2) 经时效，Rene'41、Waspaloy、A286 和 Inconel 718 合金的尺寸均有所减小，减小量均与时效前尺寸成正比；
- 3) 在时效前预留一定的尺寸余量，可有效解决应力型高温合金精密杆螺栓光杆直径尺寸偏小的问题。

## 参考文献 (References)

- [1] 冶军. 美国镍基高温合金[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [2] 《工程材料实用手册》编辑委员会. 工程材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [3] 庄景云, 杜金辉, 邓群, 等. 变形高温合金 GH4169[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [4] 李振荣. 制备工艺及热处理对 GH4169 合金组织与性能的影响[D: 博士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)