

文章编号: 1000-6893(1999)03-0279-04

冷轧变形对 Inconel 718 合金 δ 相 γ 相析出行为的影响

刘文昌¹, 陈宗霖², 肖福仁¹, 姚枚¹, 姜照群², 王少刚²

(1 燕山大学 材料工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

(2 沈阳黎明发动机制造公司, 辽宁 沈阳 110043)

EFFECT OF COLD ROLLING ON THE PRECIPITATION BEHAVIOR OF δ PHASE AND γ PHASE IN INCONEL 718

LIU Wen-chang¹, CHEN Zong-lin², XIAO Fu-ren¹,

YAO Mei¹, JIANG Zhao-qun², WANG Shao-gang²

(1 College of Material Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(2 Shenyang黎明 Engine Manufacturing Company, Shenyang 110043, China)

摘要: 采用 X 射线衍射技术测定了冷轧 Inconel 718 合金在 860 加热温度下的 δ 相和 γ 相含量, 研究了冷轧变形对 δ 相和 γ 相析出行为的影响。结果表明, 冷轧变形影响 δ 相的析出形貌, 随冷轧变形量增加, δ 相由针状向颗粒状转变。 δ 相析出的重量百分数与时间的关系符合 Avrami 方程, 随冷轧变形量增加, n 值减小, α 值增加。在 860 加热温度下, 等温 15min 时已有 γ 相析出, 随时间增加, γ 相含量增加, 达到最大值后又降低。在试验中给定的时间条件下, 随冷轧变形量增加, γ 相含量降低, 而 δ 相含量增加。

关键词: Inconel718 合金; 冷轧; 析出相

中图分类号: V 252 **文献标识号:** A

Abstract: The weight percentages of δ phase and γ phase in Inconel 718 cold rolled to different reductions and then treated at 860 for different times were measured by the X-ray diffraction method, and the effect of cold rolling on the precipitation behavior of δ phase and γ phase was investigated. The results show that cold rolling affects the morphology of δ phase. As cold rolling amount increases, the shape of δ phase changes gradually from needle to spheroid. The relationship between the weight percentage of δ phase and annealing time follows the Avrami equation. As cold rolling amount increases, the value of n decreases, whereas the value of α increases. In the case of 860 for 15 minutes, the γ phase has been precipitated in austenite matrix. With the increasing time, the weight percentage of γ phase increases to a maximum value, and then decreases. For a given time in this experiment, as cold rolling amount increases, the weight percentage of γ phase decreases, whereas the weight percentage of δ phase increases.

Key words: Inconel 718; cold rolling; precipitates

在 Inconel 718 合金的应用过程中, 一些零件采用冷变形工艺成型, 冷变形将影响 δ 相、 γ/γ' 相的析出行为^[1-3]。在 910 加热温度下, 仅析出 δ 相, 冷变形对 δ 相析出行为的影响已进行了研究^[3]。在低于 900 的温度下, 析出 δ 相 γ/γ' 相, 冷变形的作用尚不完全清楚。本文采用 X 射线衍射技术测定不同冷轧变形 Inconel 718 合金在 860 加热温度下等温不同时间时的 δ 相和 γ 相含量, 研究了冷轧变形对 δ 相和 γ 相析出行为的影响。

1 试验方法

试验材料为 Inconel 718 合金 $\varnothing 20$ mm 棒料

改轧的 10mm 厚的板条, 其化学成分 (wt %) 为: 0.04C, 52.52Ni, 18.34Cr, 5.10Nb, 3.07Mo, 1.00Ti, 0.50Al, 0.02Mn, 0.11Si, 0.002S, 0.004P, Fe 余量。经 1040 等温 1h 空冷处理后冷轧, 冷轧变形量为: 25%, 40%, 50%, 65%。将冷轧板线切割成小块, 然后在 860 保温不同时间后水冷。金相组织观察和 X 射线衍射分析在冷轧试样的纵截面上进行, 用 D/max-rB 型衍射仪测定 Inconel 718 合金的 X 射线衍射图谱, 采用 CuK α 辐射, 带石墨单色器。利用微机对重叠峰进行分离, 并计算奥氏体 δ 相和 NbC 衍射峰的积分强度。为提高点阵常数的测量精度, 衍射峰的位置利用 Si 粉末标样的衍射结果进行校正, 用 Nelson-Riley 函数外推法计算奥氏体点阵常数。在 860 加热温度下, 在奥氏体中析出 γ , γ' , δ 相,

收稿日期: 1998-05-18; 修订日期: 1998-07-20
基金项目: 中国航空工业总公司重点攻关项目 (FW S1006)



采用文献[4]提出的方法测定 δ 相和 γ 相的含量。

2 试验结果与分析

(1) 冷轧变形对 δ 相析出形貌的影响 冷轧 Inconel 718 合金在 860 加热温度下的金相观察发现。在 25% 冷轧变形条件下, 当加热时间为 4h 时, δ 相在晶界、孪晶界和晶内析出, 显颗粒状, 数量很少; 当加热时间为 24h 时, 在晶内析出大量的针状 δ 相。在 40% 冷轧变形条件下, 当加热时间为 15min 时, δ 相在晶界和孪晶界上析出; 当加热时间为 1h 时, 在变形带上析出颗粒状的 δ 相; 随加热时间增加, δ 相的数量增加; 当加热时间为 24h 时, 晶内析出大量针状的 δ 相。在 65% 冷轧变形条件下, 当加热时间为 15min 时, δ 相在初始晶界、孪晶界和再结晶晶界及晶内析出, 显颗粒状; 随加热时间增加, δ 相的数量增加; 当加热时间为 24h 时, 析出的大多数 δ 相为短棒状, 少量 δ 相连接成针状。从以上观察可见, 冷轧变形缩短了 δ 相的开始析出时间。在给定的加热时间条件下, 随冷轧变形量增加, δ 相数量增加, 冷轧变形促进了 δ 相的析出。在长时间加热条件下, δ 相的形貌也发生了变化, 随冷轧变形量增加, δ 相由针状向颗粒状转变。

(2) 冷轧变形对 δ 相析出动力学的影响 图 1 为冷轧 Inconel 718 合金在 860 加热温度下 δ 相重量百分数与等温时间的关系。可见, 在冷轧变形量一定的条件下, 随等温时间增加, δ 相含量增加, 最后达到平衡状态。平衡态时 δ 相的含量 (W_δ) 取决于加热温度, 在 860 加热温度下, W_δ 大约为 10%。冷轧变形量也影响 δ 相的含量, 在加热时间一定的条件下, 随冷轧变形量的增加, δ 相含量增加。

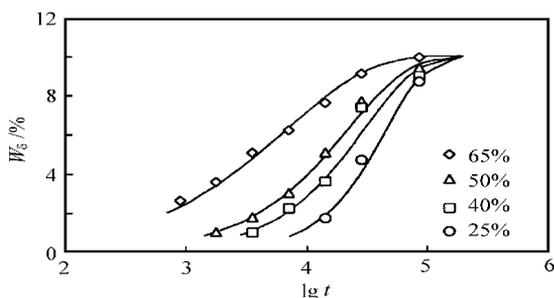


图 1 860 加热温度下 δ 相的重量百分数与等温时间的关系

在一定加热温度下, δ 相的重量百分数与等温时间 t 的关系可用 Avrami 方程表示

$$W_\delta = W_s [1 - \exp(-\alpha t^n)] \quad (1)$$

式中: n 为时间指数, 其数值取决于 δ 相的形核与长大机制; α 为 δ 相析出速度, W_s 为给定加热温度下 δ 相析出的平衡含量。根据图 1 的实验结果作 $\ln[-\ln(1 - W_\delta/W_s)]$ 与 $\lg t$ 的关系曲线 (图 2), 通过回归分析, 求出的 δ 相析出动力学参数如表 1 所示。冷轧变形量对 δ 相析出动力学的影响可借助于 n 和 α 值的变化来反映, 随冷轧变形量增加, n 值降低, α 值增加。

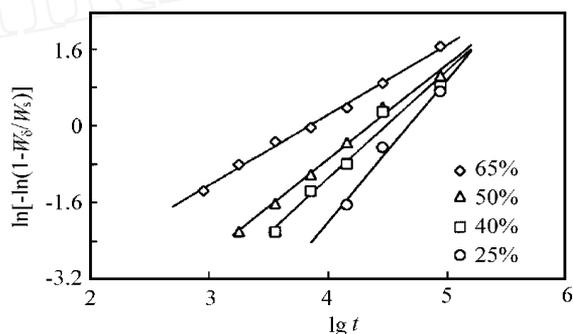


图 2 $\ln[-\ln(1 - W_\delta/W_s)]$ 与 $\lg t$ 的关系

表 1 δ 相析出动力学参数

$\epsilon/\%$	α	n
25	8.353×10^{-7}	1.301
40	3.931×10^{-5}	0.982
50	1.740×10^{-4}	0.864
65	3.522×10^{-3}	0.638

(3) 冷轧变形对 γ 相析出行为的影响 图 3 为 860 加热温度下 γ 相的重量百分数与时间的关系。可见, 在保温 15min 时, 已有 γ 相析出, 在不同冷轧变形量条件下, 析出的 γ 相含量在 2.29% ~ 4.51% 范围内变化。随时间增加, γ 相含量增加, 达到最大值后又降低, 在大约 16h 时, γ 相的含量降到接近为 0。

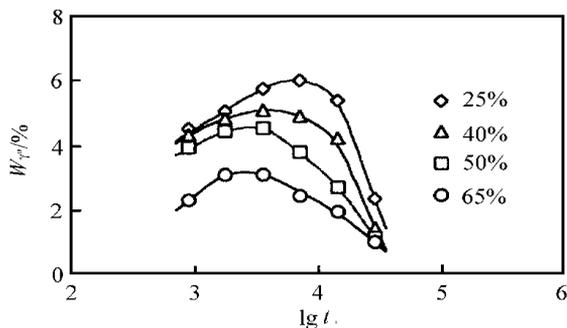


图 3 在 860 加热温度下 γ 相的重量百分数与保温时间的关系

冷轧变形影响 γ 相的析出过程, 图 4 是不同时间条件下 γ 相和 δ 相含量与冷轧变形量的关系曲线。在试验中给定的时间条件下, 随冷轧变形量

增加, γ 相含量降低, 而 δ 相含量增加, 即在较低的冷轧变形量条件下, 合金具有较多的 γ 相和较少的 δ 相; 在较大的冷轧变形量条件下, 合金具有较少的 γ 相和较多的 δ 相, 此定量相分析结果与 R. P. Singh^[2]的扫描电镜观察结果相符。冷轧变形也影响 γ 相含量达到最大值的时间, 随冷轧变形量增加, 达到最大值所需要的时间减小。

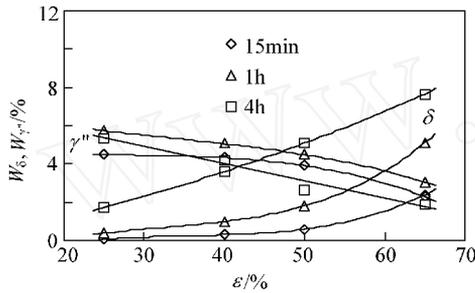


图4 在860 加热温度下 γ 相和 δ 相的重量百分数与冷轧变形量的关系

3 讨论

在固溶 Inconel 718 合金中, δ , γ , γ 相析出行为被广泛研究^[1, 2, 5, 6]。在高于 900 的温度下, 合金中仅析出 δ 相, δ 相是在奥氏体中直接形核析出的。在低于 900 的温度下, 合金中析出 γ/γ 相和 δ 相, γ/γ 相先于 δ 相析出。 δ 相主要是在 γ 相中的层错上形核, 发生 γ 相- δ 相转变, 最终 γ 相被针状的 δ 相所取代。

R. P. Singh^[2]采用扫描电镜研究了冷轧 Inconel 718 合金中 γ , δ 相的析出行为。在 857 等温 4h 时, 发现 30% 冷轧试样具有较多的 γ 相和较少 δ 相, 而 50% 冷轧试样具有较少的 γ 相和较多的 δ 相。在 885 等温 4h 时, 发现 30% 冷轧试样具有 γ 相和 δ 相, 而 50% 冷轧试样仅具有 δ 相。观察的结果似乎是低应变提高 γ 相含量, 而高应变促进 δ 相析出。对于这种现象, 他认为冷轧变形过程中产生的变形带可以作为 δ 相的形核位置, 促进 δ 相的析出。同时 δ 相的析出减少了合金中 Nb 的含量, 降低了 γ 相含量。

J. L. Burger^[1]借助于 TEM 的观察和硬度的测定, 研究了冷变形对 γ 相析出的影响。在 816 时效温度下, 固溶处理试样等温 4min 时析出 γ 相, 而固溶处理后 20% 冷加工试样在 1min 之前就已析出 γ 相, 他认为冷变形产生的位错作为 γ 相的形核位置促进 γ 相的析出。显然, 冷轧变形对 γ , δ 相析出行为的影响尚未讨论清楚。

从本试验结果来看, 在冷轧 Inconel 718 合金中, γ 相先于 δ 相析出, 然后发生 γ 相- δ 相转变。

γ 相的析出导致 γ 相含量增加; 而 γ 相- δ 相转变导致 γ 相含量的降低, 其综合作用结果, 在 γ 相含量与时间关系曲线上存在一个最大值。在最大值之前, γ 相析出起主要作用, γ 相含量随时间增加; 在最大值之后, γ 相- δ 相转变起主要作用, γ 相含量随时间降低, 最终 γ 相被 δ 相所取代。

虽然, δ 相和 γ 相含量随冷轧变形量的变化规律与 R. P. Singh 的实验结果相同, 但不能用 R. P. Singh 的理论来解释冷轧变形的作用, 而应从两个方面来考虑。一方面, 形变促进 γ 相析出; 另一方面, 形变促进 γ 相- δ 相转变。在 860 加热温度条件下, γ 相析出孕育期较长, 而 δ 相析出孕育期较短。在保温 15min 时, γ 相尚未完全析出时, 已开始发生 γ 相- δ 相转变。由于形变对 γ 相- δ 相转变的促进作用, 因此导致 δ 相含量随冷轧变形量增加而增加, 而 γ 相含量随冷轧变形量增加而降低。

4 结论

- (1) 冷轧变形影响 δ 相的析出形貌, 随冷轧变形量增加, δ 相由针状向颗粒状转变。
- (2) δ 相析出的重量百分数与时间的关系符合 Avrami 方程, 随冷轧变形量增加, n 值减小, α 值增加。
- (3) 在 860 加热温度下, 在等温 15min 时, 已有 γ 相析出, 随时间增加, γ 相含量增加, 达到最大值后又降低。
- (4) 在试验中给定的时间条件下, 随冷轧变形量增加, γ 相含量降低, 而 δ 相含量增加。

参考文献

- [1] Burger J L, Biedeman R R, Coutts W H. The effects of starting condition on the aging response of as-forged alloy 718[A]. In: Loria EA eds. Superalloy 718 Metallurgy and Applications[C]. TMS, 1989, 207~ 217.
- [2] Singh R P, Hyzak J M, Howson T E *et al*. Recrystallization Behavior of Cold Rolled Alloy 718[A]. In: Loria EA eds. Superalloys 718, 625 and Various Derivatives[C]. TMS, 1991. 205~ 215.
- [3] LIU Wen-chang, YAO Mei, LIU Run-guang, *et al*. The kinetics of δ phase precipitation in cold rolled inconel 718 alloy [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 1997, 10 (3): 213~ 216.
- [4] LIU W C, XIAO F R, YAO M, *et al*. Quantitative phase analysis of inconel 718 by X-ray diffraction [J]. Journal of Materials Science Letters, 1997, 16(9): 769~ 771.
- [5] Salignac M P, Foucault M, Cloure J M. Effects of cold

working on microstructural and mechanical properties and SCC behavior of alloy 718[A]. In: Loria EA eds Superalloy 718 625 706 and Various Derivatives[C]. TMS, 1994, 751~761.

- [6] 蔡伯成, 杨玉荣, 梁学峰, 等. GH169 合金轧板的再结晶[J]. 金属学报(增刊), 1995, 31(7): S41~43

作者简介:



刘文昌, 男, 36岁, 副教授, 1987年在东北重型机械学院获硕士学位, 1997年在哈尔滨工业大学获博士学位。主持参加完成了国家、省部级科研项目5项, 获国家教科技进步二等奖一项, 主要研究方向为微合金钢, 贝氏体钢, 奥氏体钢, 高氮及高温合金冷热塑性加工的变形金属学。已发表学术论文50余篇。



肖福仁, 男, 32岁, 工程师, 1993年在燕山大学获硕士学位。现为燕山大学博士研究生。主要从事材料X射线衍射分析工作、大型锻件热处理, 已发表学术论文15篇。

姚枚, 男, 62岁, 教授, 博士生导师。主要研究方向为金属力学性能的微细观理论, 现任中国机械工程学会、材料专业学会副理事长。

Chinese Journal of Aeronautics (航空学报英文版)

摘要

后掠激波和边界层干扰的研究= Study of swept shock wave and boundary layer interactions/邓学莹(北京航空航天大学). - 1998, 11(4). - 241~249

本文简述了后掠激波/边界层干扰研究的近期进展。干扰流动结构复杂和影响干扰流动的参数众多是该研究领域的两大难点。本文重点讨论和着重强调如何应用分区分析方法和相关分析方法克服该干扰研究上述难点的进展情况。在应用分区方法的基础上, 深入讨论了各区复杂干扰流场, 包括物面流动和空间流场的结构特性, 以此建立反映各区不同流动特性的分析框架。本文在锥形分析框架的基础上, 以进而讨论如何应用相关分析方法研究四类不同的激波发生器所引起的锥形干扰的相关特性, 揭示锥形干扰流动的控制参数和干扰的物理机理。最后展望了该领域今后的研究工作, 并提出了尚须深入研究的问题。参24

关键词 后掠激波, 激波/边界层干扰, 分区分析法, 相关分析法

下反桨尖旋翼的气动特性分析方法= Analytical approach to aerodynamic characteristics of the helicopter/徐国华(南京航空航天大学), 王适存. - 1998, 11(4). - 250~256

基于升力面分析和使用圆弧曲涡元的全展自由尾迹模型, 建立了一个新的适用于新型下反桨尖旋翼气动特性计算的分析方法, 该方法适用于各种桨尖形状, 例如尖削、后掠、下反及其组合形状。针对悬停和前飞状态, 进行了不同的下反及其组合形状的算例计算, 给出了旋翼诱导速度、桨叶剖面升力分布、叶尖涡轨迹以及旋翼性能的计算结果, 并对下反桨尖对旋翼气动特性的影响进行较详细的分析。参12

关键词 直升机, 旋翼, 气动特性, 桨尖形状, 自由涡

用双襟翼控制旋涡对改善大后掠三角翼气动特性的实验和计算研究比较= Comparison of the experimental and computational study on the effects of vortex control by deflecting flaps on a highly swept delta wing/袁礼(中国科学院

力学研究所), 忻鼎定(北京航空航天大学). - 1998, 11(4). - 257~264

为了解用襟翼控制旋涡对改善大后掠机翼的大迎角气动特性的效果, 对装有前端襟翼和前缘襟翼的74后掠三角翼进行了模型实验和相应气动特性计算结果之间的比较, 内容包括流场显示和气动测力。数值计算系用拟压缩性方法求解Navier-Stokes方程。对比表明, 适当地向下偏转两种襟翼, 确实可以延缓旋涡系的破裂, 增加涡系合并后的旋涡强度, 使切向力减小、法向力和升阻比增大, 从而表明该双襟翼系具有良好的控涡效果。参11

关键词 襟翼控制, 大迎角, 不可压缩流, 实验和N-S方程数值模拟

利用模糊补偿器的机动目标跟踪= Maneuvering target tracking using fuzzy compensator/肖昌美(哈尔滨工业大学), 张福恩, 尔联结(北京航空航天大学). - 1998, 11(4). - 265~272

提供了一种估计任意机动目标运动状态的新方法。采用模糊补偿器来处理由于目标的任意机动而带来的不确定性。采用模糊T-S模型和RH控制策略来设计非线性系统的观测器。相对于别的文献中采用的技术, 初始估测值与其真实值之间的差值要求不严格。数值仿真结果表明, 所提出的算法能够实时任意机动目标运动状态的进行精确估计, 实现对目标的精确跟踪。参9

关键词 目标跟踪, 模糊T-S模型, 模糊补偿器

用于直升机结构响应主动控制的FTF算法研究= Study on fast transversal filter (FTF) algorithm for active control of structural response (ACSR) of helicopter/彭福军(南京航空航天大学), 顾仲权. - 1998, 11(4). - 273~280

从结构响应主动控制的基本原理和最小二乘准则出发, 导出了适用于直升机结构响应主动控制的多通道时延filtered-x FTF算法, 并提出其约束稳定化方法、理想响应重构技术。数值仿真表明, 该算法在稳定性、鲁棒性、收敛速度、跟踪能力以及对多通道情况适用性等方面均具有良好的性能, 对直升机机体的振动响应具有(下接第284页)