

# 单晶涡轮叶片合金的薄截面尺寸效应

Size Effects of Thin Section for Single Crystal

Turbine Blade Superalloys

郑运荣

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

ZHENG Yun-rong

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 单晶涡轮叶片合金存在明显的薄截面尺寸效应, 当截面尺寸小于 0.5mm 时, 持久寿命大幅降低, 尤其是中温持久寿命。截面尺寸效应是由于试样厚度减小引起显微组织和表面完整性的变化以及实验误差综合影响所致。

**关键词:** 单晶高温合金; 截面尺寸效应; 显微组织; 持久性能

**中图分类号:** TG132.3, TG113    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2007)07-0074-04

**Abstract:** The size effects of thin section exist obviously in single crystal turbine blade superalloys. The stress rupture life decreased sharply with reduction of specimen thickness to 0.5mm, especially the stress rupture life at intermediate temperature. These effects contribute to the comprehensive factors, such as the variation of microstructure and surface integrity of specimens, and testing error caused by reduction of specimen thickness.

**Key words:** single crystal superalloys; section size effect; microstructure; stress rupture properties

随着航空发动机制造业的发展, 高温合金铸件得到了广泛的应用, 铸件的形状和尺寸愈加复杂, 壁厚从小于 0.5mm 到大于数十毫米。从铸件不同截面尺寸部位取样测得的力学性能通常都低于标准铸造成形试棒, 这种由截面尺寸引起性能偏离的程度称为尺寸效应。广义的截面尺寸效应既包括了薄截面, 也包括厚截面的作用, 但对于气冷空心叶片, 人们更多关注的是薄截面尺寸效应。

半个世纪以来, 人们对普通铸造<sup>[1-5]</sup>、定向凝固<sup>[6-8]</sup>和单晶高温合金<sup>[9-12]</sup>的薄截面尺寸效应进行了广泛的研究, 获得了大量不同截面尺寸的性能数据, 初步探明了产生截面尺寸效应的原因, 研制出了适合于薄截面的铸造合金和与之配合的铸造工艺及涂层体系。国外用于制造涡轮叶片合金不仅有标准试样的性能数据, 而且有零件取样的性能数据, 对气冷叶片合金还备有薄壁性能数据, 这些为燃气涡轮设计者设计出更可靠的涡轮零件提供了保证。

尽管铸造高温合金薄壁试样的力学性能比较分散, 但其影响的趋势是明显的。薄壁对等轴晶铸件影响最大, 对定向凝固铸件影响次之, 对单晶铸件影响较小。对 760℃ 中温性能影响最大, 对室温和高温性能影响最小。Kaufman<sup>[2]</sup>的实验证明, 等轴晶 Rene80 合金铸造 1.5mm 薄板试样与  $\phi 6.4$ mm 铸造标准试样

相比, 其室温、760℃ 和 982℃ 拉伸强度分别降低 4%, 13% 和 10%, 而其 760℃/565MPa, 982℃/145MPa 持久寿命分别下降了 78% 和 60%。当厚度降到 0.75mm, 上述持久性能分别下降 90% 和 81%。从定向 DZ22 板块加工出的厚度为 1.5mm 和  $\phi 5$ mm 试样相比较, 760℃/724MPa 和 980℃/220MPa 持久寿命分别下降了 47% 和 28%<sup>[7]</sup>。

近几年, 随着先进单晶涡轮叶片冷却通道日益复杂化, 叶片壁厚显著减小, 对单晶截面尺寸效应更加重视。有研究表明, 截面尺寸对 CMSX-4 单晶合金 0.5%~1.0% 蠕变强度不产生影响, 但强烈影响蠕变断裂寿命。Doner<sup>[9]</sup>实验证明无涂层的 CMSX-3 的持久寿命有明显的尺寸效应, 而涂层的试样与试样截面尺寸关系不大, 然而 Soeching<sup>[13]</sup>证明带涂层的 PWA1480 单晶试样截面厚度由 1.52mm 降到 0.25mm 时, 蠕变断裂强度降低 30%~40%, 这些不一致的结果有待于更严密的实验对比加以澄清。

## 1 纯薄截面尺寸效应

单晶的纯薄截面效应是指在化学成分、晶体取向、显微组织和实验环境相同的条件下考察截面厚度变化对力学性能的影响, 通常是从已测定取向的整块单晶

切取不同厚度的试样保证材料的枝晶间距、显微偏析、显微疏松等冶金参数一致。典型的取样图如图 1 所示。

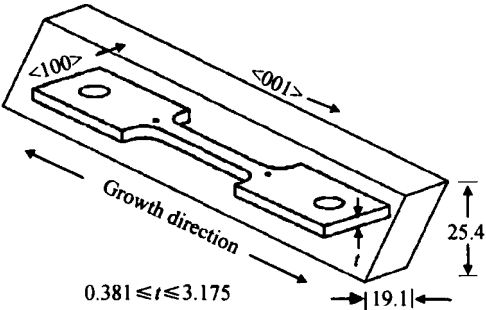


图 1 单晶板状试样取样示意图<sup>[12]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of the sheet specimen in a cast single crystal bar, all dimensions are in mm

Seetharaman<sup>[12]</sup> 利用图 1 所示的厚度为 0.38, 0.76, 1.52, 3.18mm 的 PWA1484 单晶试样, 测定了它们在 760℃/758MPa, 871℃/413MPa, 982℃/207MPa 和 982℃/248MPa 的蠕变和持久性能。结果表明, 薄截面对 1% 应变时间无明显影响, 但对断裂寿命有明显影响, 尤其是在 760℃ 中温下截面厚度影响最剧烈, (图 2)。

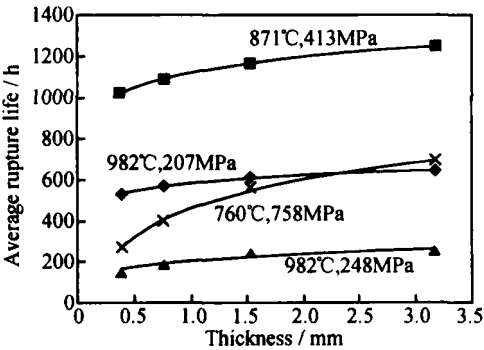


图 2 试样厚度对不同温度下平均持久寿命的影响<sup>[12]</sup>

Fig. 2 Effect of specimen thickness on average stress rupture life

把不同厚度试样的持久寿命与  $\phi 3.2$  标准试棒的寿命比值作纵坐标得到如图 3 所示的厚度-薄截面寿命关系曲线。由图 3 可清楚看出在 760℃/758MPa 下, 厚度 0.38mm 试样的寿命只有标准寿命的 40% 左右, 而在 871℃ 和 982℃ 下影响要小得多。上述结果表明, 单晶合金存在明显的薄截面尺寸效应。

2 截面尺寸复合效应

复合尺寸效应除了试样截面尺寸效应外, 还包括试样的几何形状(如有棱边的板状试样和圆形的管状试样), 截面尺寸的变化引起显微组织的变化, (如偏析、显微疏松、枝晶尺寸和取向偏离等), 试样表面完整

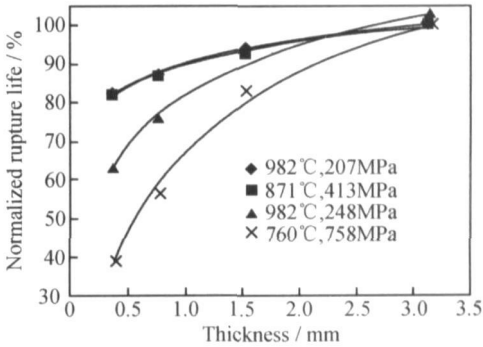


图 3 试样厚度与归一化持久寿命(薄截面寿命/标准寿命)的关系<sup>[12]</sup>

Fig. 3 Normalized rupture life (thick section life/ standard life) vs. specimen thickness

性(包括氧化、合金贫化、涂层和表面加工损伤)和蠕变实验误差。总之复合尺寸效应涉及试样加工、冶金和实验各个环节。

为了探明各个环节的影响, 得从试样设计开始, Doner<sup>[9]</sup> 设计的 CMSX-3 单晶试样如图 4 所示。试样 A 是从  $\phi 15.9$  的 CMSX-3 单晶棒机加工成  $\phi 6.4$ mm 标准试棒, 试样 B 是从壁厚 0.6mm 的薄壁空心单晶叶片上加工的 0.51mm 厚的微型板状试样; 试样 C 和 D 分别从  $\phi 15.9$  单晶棒加工成 0.51 厚微型板状试样和外径 5.4mm、壁厚 0.51mm 的管状试样。B, C, D 试样与 A 试样比较可得到薄截面对持久性能的影响, C 和 D 试样比较可得到试样形状的影响结果; 而 B 和 C 试样比较可得到凝固条件不同引起显微组织变化造成的影响结果。

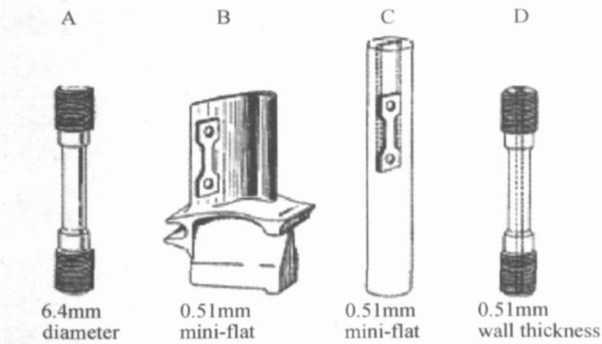


图 4 用于研究截面厚度对持久性能影响的试样<sup>[19]</sup>

Fig. 4 Specimens used for section thickness effects on stress rupture properties

上述四种试样在 900~ 1093℃ 温度范围和 90~ 345MPa 应力范围做持久实验, 结果综合在图 5。图 5 表明, 所有厚度为 0.51mm 薄试样, 其持久性能均低于  $\phi 6$ mm 标准试样的持久性能。从叶片取样持久性能下降更大, 在 138MPa 低应力条件下, 叶片的薄壁试样持久寿命降低了 2 倍。图 5 还表明, 从  $\phi 15.9$ mm

单晶棒加工出厚度为 0.5mm 的板状和管状试样的持久性能无明显差别。这证明了试样的几何形状对持久性能无影响。从叶片上加工的比从单晶棒加工的 0.51mm 厚试样持久性能更低,表明显微组织的差异对持久性能产生明显影响。

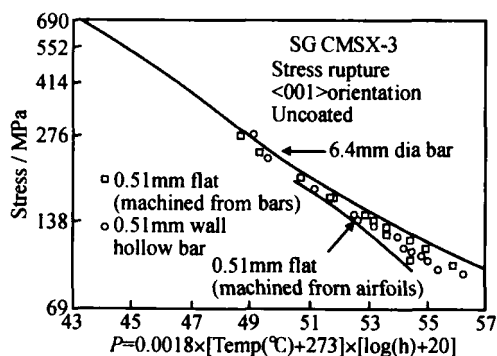


图 5 不同几何形状厚度为 0.51mm CMSX-3 单晶试样与标准试棒持久性能比较<sup>[9]</sup>

Fig. 5 Comparison of stress-rupture properties of 0.51mm thick CMSX-3 specimens with various geometries

为了证明氧化对薄试样持久性能的影响,从叶片上切取的 0.51mm 厚的试样加上渗铝涂层,在计算试样的实验载荷时,扣除了涂层的厚度,以消除涂层对截面承载能力的影响。实验结果证明,加涂层的试样与标准试样的持久性能完全相同,证明薄平板试样持久性能的降低主要是由于氧化引起的。为了进一步证明上述实验结果,没涂层的 0.51mm 厚试样在高纯氩气中做持久实验,结果没涂层试样在高纯氩气下持久性能与涂层试样在空气中的持久性能完全相同,其结果综合在图 6 中。该图还表明,随着温度升高和应力减小,裸态薄试样持久性能下降更多,这也证明了高温氧化对厚度小于 0.51mm 薄试样的持久性能产生重要影响。

### 3 截面尺寸效应的原因及对策

已经证实,多晶合金的薄截面效应主要与截面的晶粒数目有关。当截面尺寸小于 0.5mm 时,在许多情况下截面厚度方向上只有 1-2 个晶粒,造成贯通壁厚晶界的晶界,在高温持久实验时,裂纹很容易扩展并穿透壁厚<sup>[3,4]</sup>。定向合金虽然消除了横向晶界,但仍有小段横向柱晶界和枝晶间区。单晶合金没有晶界,它只受亚晶和枝晶间的影响。因此薄截面上一次枝干的数目影响持久寿命。原因是裂纹通常萌生于二次或三次枝晶间,在其扩展的路径上必须切断平行于主应力轴的一次枝晶干。单晶叶片的凝固速度比普通铸造叶片要低得多,因此枝晶较粗大。薄壁单晶叶片的一次枝

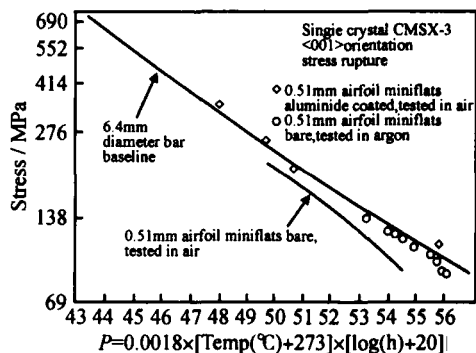


图 6 0.51mm 厚渗铝涂层试样在空气下实验和无涂层试样在纯氩气下持久性能与无涂层标准试棒性能比较<sup>[9]</sup>

Fig. 6 Comparison of stress-rupture properties for alumine coated 0.51mm thick miniflats tested in air and uncoated miniflats tested in high purity argon with those for 6.4mm diameter bars tested in air

晶干间距通常在 250μm 左右,当壁厚为 0.5mm 时,在壁厚方向上一次枝晶干的数目小于 2,裂纹极易切断主干而穿透薄壁,这是单晶薄试样持久性能低于标准试棒的重要原因。

在普通铸造条件下,薄截面由于冷速快往往得到更细的枝晶和析出更细的 MC 碳化物而对性能产生有利的作用。单晶凝固时冷速比普通铸件要慢得多,而且薄截面凝固时的冷速与厚截面相差不大,不可能获得更高的枝晶密度,相反薄截面枝晶取向更容易受壳模和型芯的影响,产生偏离 [001] 取向大于 6° 的亚晶,而取向的偏离会显著降低单晶的持久寿命<sup>[14]</sup>。另外,单晶缓慢的凝固冷却速度促进气孔形成,而薄截面不利于气体逸出,也使气孔数量增加。这些气孔的尺寸在 14~32μm 范围,是单晶合金疲劳和持久裂纹萌生的位置。上述这些不利的冶金因素使从叶片上切取的试样持久性能低于从单晶棒上切取相同厚度试样的持久性能。

实际生产的单晶空心叶片,其最薄的截面小于 0.5mm,冶金条件比加工等厚度的薄试样更加苛刻,由于脱芯和低倍腐蚀会在枝晶间区造成过度腐蚀,这种损伤通常在 10μm 以内,对厚截面而言,远小于壁厚的公差,但对厚度只有 0.3~0.5mm 的薄截面可能会影响其性能。

从上面分析可知,截面尺寸效应主要反映在单晶铸件内部冶金组织和表面状态。减轻截面尺寸效应最有效的办法是增加一次枝晶干的密度和减少气孔与疏松的数量和尺寸。而提高单晶叶片凝固时的温度梯度是最有效的措施。近几年国外采用液体金属冷却法 (LMC 法) 代替传统的 Bridgman 法生产单晶,使一次枝晶干密度大大提高。当炉子的温度梯度由 70 °C/cm

提高到  $250^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  时, N4 单晶叶片的一次枝晶间距由  $180\sim 290\mu\text{m}$  减小至  $95\sim 154\mu\text{m}$  范围<sup>[15]</sup>。枝晶间距的减小也同时减少了疏松和气孔的数量与尺寸。例如 PWA1480 一次枝晶间距由  $440\mu\text{m}$  降到  $220\mu\text{m}$  时, 气孔量由 1.01% 降至 0.30% (体积分数), 气孔的平均尺寸由  $32\mu\text{m}$  降至  $14\mu\text{m}$ , 从而有效地提高了持久和疲劳寿命<sup>[15]</sup>。进一步闭合气孔和疏松对于薄截面更加重要, 因为  $30\mu\text{m}$  的气孔在一个  $0.3\sim 0.5\text{mm}$  厚度截面上占了厚度的  $1/10$  左右, 必然会对性能产生重要影响。对单晶叶片采用热等静压技术可有效地闭合这些缺陷, 但应防止再结晶。

基于上述原因, 对薄壁空心单晶叶片应有更严格的技术条件和更高的检测水平。显微组织和铸造缺陷的精确控制除了靠铸造设备和工艺水平不断提高以外, 还需要精度更高的无损检测技术。在持久实验方面, 厚度小于  $0.5\text{mm}$  的试样对加载对中极为敏感, 使测试数据更加分散。Kaufman 曾做过实验, 当不用刀口加载系统而直接加载时, 薄壁试样平均持久寿命提高了 25%<sup>[2]</sup>。显然对薄试样应有更好的力学性能测试方法。

## 4 结语

制造气冷薄壁单晶叶片是燃气涡轮最重要的核心技术, 国外在 20 世纪 80 年代初已经实用化了, 而国内尚处于起步阶段。中国的高温合金冶金工作者不乏对国外几代单晶合金跟踪理解能力, 然而在单晶制造技术方面, 我们的差距更大。当前应进一步探明单晶叶片铸造过程要控制的环节以及每个环节的控制程度。严格的技术条件会造成低的合格率, 但这不应成为我们的包袱, 事实上美国在 20 世纪 70 年代初研发普通铸造薄壁空芯叶片时, 叶片毛坯合格率不到 10%, 但很快就达到 80%<sup>[17]</sup>。以当前我们的技术水平生产和使用单晶薄壁叶片, 出现问题在所难免, 我们不要指望靠换合金就能解决面临的问题。实际上同代合金的性能基本上处于同一水平, 更新一代单晶合金的承温能力也仅提高  $25^{\circ}\text{C}$  左右。然而控制不当的单晶空心叶片其整体使用性能甚至退化至普通叶片的水平。本文通过分析单晶叶片薄壁效应, 反映出单晶薄壁空心叶片技术的复杂性, 期望人们在单晶薄壁空芯叶片的精铸技术和质量控制上有更多的关注, 投入更多的人力和财力, 通过不断积累经验、总结教训, 建立起我们自己的技术平台。

## 参考文献

[1] HESSLER B H, EVING B A. The effect of casting variables and

section size on the stress rupture life of a high temperature nickel base alloy[J]. Design and Materials, 1970, (7): 360– 369.

- [2] KAUFMAN M. Examination of the influence of coatings on thin superalloy sections[D]. NASACR- 121115, 1972.
- [3] COLLINS H E, GRAHAM L D. Development of alloys for cast aircooled turbine blade[D]. AD744109, 1972.
- [4] 郑运荣, 蔡玉林. 影响铸造镍基高温合金中温持久性能的某些因素[D]. 北京: 中国航空科技文献 HJB830117, 1983.
- [5] 韩希鹏, 管文彪, 宋克强, 等. M17G 铸造合金薄壁效应研究[A]. 铸造高温合金论文集[C], 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 194– 197.
- [6] HARRIS K, ERICKSON G L, SCHWER R E. Directionally solidified and single-crystal superalloys [A]. ASM International Handbook Committee. Metals Handbook. Tenth Edition Volume 1 [C]. Ohio: ASM International, 1990: 995– 1006.
- [7] 穆寿昌, 王罗宝. DZ22 合金薄壁性能研究[A]. 铸造高温合金论文集[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 84– 87.
- [8] 张宏伟, 陈荣章. 一种定向凝固高温合金的薄壁效应研究[J]. 金属学报, 1997, 33(4): 370– 374.
- [9] DONER M, HECKLER J A. Identification of mechanisms responsible for degradation in thin-wall stress-rupture properties [A]. REICHMAN S. Superalloys 1988 [C]. Pennsylvania: TMS, 1988. 653– 662.
- [10] FOURIE J T, BALDAN A. Size effects in the mechanical properties of superalloy single crystals [A]. ANTOLOVICH S D. Superalloys 1992[C]. Pennsylvania: TMS, 1992. 619– 627.
- [11] DUHL D N. Directionally solidified superalloys [A]. SIMS C T. superalloys II [M]. New York: John Wiley, 1987. 189– 214.
- [12] SEETHARAMAN V, GETEL A D. Thickness debit in creep properties of PWA 1484 [A], GREEN K A. Superalloys 2004 [C]. Pennsylvania: TMS, 2004. 207– 214.
- [13] SOECHING F O. Pratt & whitney Technical Report[R]. East Hartford, CT, 1982.
- [14] 郑运荣, 杨素玲, 阮中慈. 单晶高温合金的中温 I 阶蠕变– 涡轮叶片伸长的重要因素[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(12): 1881– 1887.
- [15] ELLIOT A J, KARNEY G B, GIGLIOTTI, et al. Issues in processing by the liquid-Sn assisted direction technique [A]. GREEN K A. Superalloys 2004 [C]. Pennsylvania: TMS, 2004. 421– 430.
- [16] FRITZEMEIER L G. The influence of high thermal gradient casting, hot isostatic pressing and alternate heat treatment on the structure and properties of a single crystal nickel base superalloy [A]. REICHMAN S. Superalloys 1988 [C]. Pennsylvania: TMS, 1988. 265– 274.
- [17] HOCKIN J. Investment, casting of superalloys [A]. High Temperature Alloys Committee. Superalloys-Processing [C]. Ohio: Metals and Ceramics Information Center, 1972. C1– C8.

收稿日期: 2006-11-22; 修订日期: 2007-01-20

作者简介: 郑运荣(1941), 男, 研究员, 主要从事高温合金显微组织分析。

联系地址: 北京 81 信箱 54 分箱(100095)