

文章编号: 1000-8055(2005)06-0958-06

一种单晶镍基高温合金在不同温度下的静拉伸性能

于慧臣, 李影, 李骋, 李嘉荣, 吴学仁
(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 研究了一种单晶镍基高温合金在不同温度下的静拉伸性能, 初步建立了该合金不同温度下的弹性模量与任意取向之间的定量关系。在恒定温度下, 该合金的弹性模量可由唯一的变量晶向参数定量描述。合金的屈服强度和抗拉强度依赖于晶体取向和温度, 室温时[111]取向的屈服强度高于[001]取向, 而在温度较高时, [111]的屈服强度最低。

关键词: 航空、航天推进系统; 单晶镍基高温合金; 晶体取向; 弹性模量; 屈服强度; 抗拉强度
中图分类号: V 216.4 **文献标识码:** A

Tensile Behavior of a Single Crystal Ni-Base Superalloy at Different Temperatures

YU Hui-chen, LI Ying, LI Cheng, LI Jia-rong, WU Xue-ren
(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The tensile behavior at different temperatures of a single crystal Ni-base superalloy was studied. It was found that temperature and the crystal orientation has notable effect on the elastic properties of the alloy, and the elastic modulus of the alloy can be defined with a single variable, which is the three-dimensional crystal orientation parameter of the specimen. Moreover, the yield strength and the tensile strength of the alloy depend deeply on temperature and the crystal orientation index, the yield strength of [111] orientation is higher than that of [001] at room temperature, and [111] shows the lowest yield strength at high temperature.

Key words: aerospace propulsion system; single crystal Ni-base superalloy; crystal orientation; elastic modulus; yield strength; tensile strength

单晶镍基高温合金在涡轮叶片上的应用, 使发动机的工作性能得到进一步的改善和发展。无晶界的单晶合金同传统的等轴晶或定向镍基高温合金相比具有更优异的高温力学性能, 然而单晶合金中强化相 γ 沿一定的晶体学方向均匀地分布于基体中, 使得单晶合金具有宏观力学性能各向异性的特点^[1], 即单晶合金不同晶体取向的力学性能有很大的差异。另外, 在含有高体积分数 γ 相的两相高温合金里, 内应力不但与外部载荷

相关, 而且与温度引起的两相不匹配以及晶格缺陷相关^[2]。

该单晶合金是我国研制成功的第二代单晶镍基高温合金, 对该合金在[001]取向附近的拉伸性能已有一定研究^[3], 但对于标准三角极中另外两个角附近取向的拉伸性能的研究还几乎没有开展。本文研究了不同晶体取向及不同温度对合金的拉伸性能的影响, 初步建立了不同温度下合金的弹性模量与任意取向之间的定量关系。

收稿日期: 2004-12-10; 修订日期: 2005-04-10

作者简介: 于慧臣(1964-), 男(满族), 辽宁本溪人, 北京航空材料研究院, 博士, 主要从事材料的疲劳与断裂方面的研究

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与试样

试验材料为第二代单晶合金, 圆棒毛坯铸出后, 采用劳厄背 X 射线反射法 (Laue back reflection X-ray technique) 测出试样轴线与两个以上低指数取向之间的夹角。然后, 将标准三角极中任意取向离散为 $[h\ k\ 100]$, 通过对比, 找出夹角值最接近测试值的取向, 即为该试样的三维取向指数。计算可知, 用这种方法得到的取向指数偏角小于 1° 。

对合金进行了固溶热处理 ($1\ 290^\circ\text{C}/1\ \text{h} + 1\ 300^\circ\text{C}/2\ \text{h} + 1\ 315^\circ\text{C}/4\ \text{h}/\text{AC}$) 与时效热处理 ($1\ 120^\circ\text{C}/4\ \text{h}/\text{AC}$ 的一次时效处理, 以及 $870^\circ\text{C}/32\ \text{h}/\text{AC}$ 的二次时效处理)。将热处理后的圆棒毛坯加工成标准静力拉伸试样, 室温以及高温静力拉伸试样标距部分的尺寸分别为 $\Phi 5 \times 25\ \text{mm}$ 和 $\Phi 5 \times 27\ \text{mm}$ 。

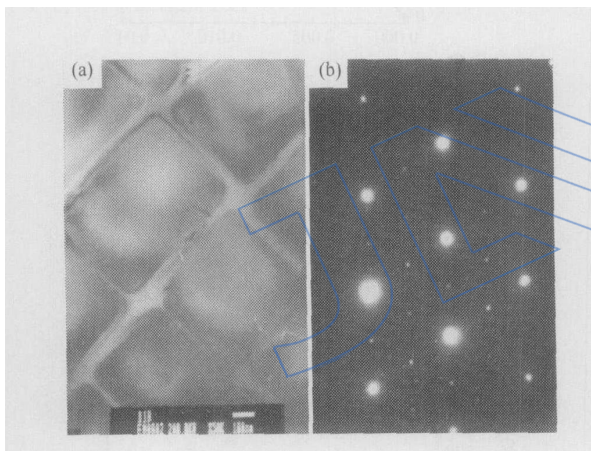


图 1 热处理后合金的微观组织

Fig 1 Microstructures of the alloy after heat treatment

经过热处理后, 合金的微观组织如图 1(a) 所示。微观组织中包含基体以及均匀分布于基体中的高体积分数的 γ 立方体粒子, γ 粒子的平均尺寸约为 $0.3 \sim 0.5\ \mu\text{m}$, 体积分数约为 65%。图 1(b) 为 γ 粒子的衍射斑点, 通过测量各斑点之间的距离, 可以判定其为面心立方超点阵结构 γ 在 $[111]$ 方向的衍射斑点。

1.2 试验方法

拉伸试验在 INSTRON 4507 和 INSTRON 1196 试验机上进行。拉伸试验分两个阶段, 在第一阶段采用应变控制, 室温拉伸试验 (HB5143-96)

时应变速率为 $1 \times 10^{-3}\ \text{S}^{-1}$, 高温拉伸试验 (HB5195-96) 时应变速率为 $1 \times 10^{-4}\ \text{S}^{-1}$ 。当应变量达到 2% 时进入第二阶段, 改用应力控制, 直到试样断裂。拉伸试验后, 在试样断口附近切取薄片, 并采用双喷减薄方法和等离子减薄方法进行减薄, 制成透射电镜 (TEM) 样品。然后采用 JEOL 1000 型透射电镜在 200 V 的电压下对所制成的 TEM 样品进行位错组态观察。

2 试验结果与分析

2.1 单晶合金在不同温度、晶体取向下的静力拉伸性能

图 2(a)~(c) 分别为 $[001]$ 晶体取向、 $[011]$ 晶体取向和 $[111]$ 晶体取向的拉伸应力-应变曲线。试验结果表明, 无论对于哪个晶体取向 ($[001]$, $[011]$ 或 $[111]$ 晶体取向), 随温度的升高, 弹性模量是逐渐降低的; 试验温度和晶体取向对合金的屈服强度、抗拉强度都有很大的影响, 但图 2(a) 中 650°C 与 760°C 的拉伸曲线几乎重合。对图 2 中的静力拉伸数据按照温度进行整理并示于图 3 中。图 3(a), (b) 分别示出了单晶合金 DD6 在 20°C 和 760°C 温度下, 不同晶体取向的拉伸应力-应变曲线, 图 3 可进一步说明在同一温度下, 不同晶体取向对拉伸性能的影响, 从图中可观察到单晶合金的晶体取向对弹性模量有显著的影响。

2.2 单晶合金弹性模量的定量描述

图 4 示出了不同取向的弹性模量与温度之间的变化关系, 从图中可观察到晶体取向与温度对弹性模量的影响。图中符号 ∇ 表示的值为文献 [3] 中测试的 $[001]$ 晶体取向的数据, 与本研究测试的数据相当一致。随温度的增加, 各个晶体取向的弹性模量都有降低的趋势, 这主要是因为随着温度的升高, 原子间的间距变大, 原子的结合力下降, 所以抵抗材料变形的能力也随之下降。另外可以观察到, 合金的弹性性能存在显著的取向相关性, $[111]$ 取向的弹性模量最大, $[011]$ 取向次之, $[001]$ 取向的弹性模量最小。室温时 $[111]$ 取向的弹性模量是 $[001]$ 取向的弹性模量的近 3 倍。

从定性的角度分析, (111) 面在单晶体中是最密排面, 两相邻的原子面之间的间距最小, 所以对于 $[111]$ 取向要实现相同的变形量, 需要更大的载荷; 而相邻的 (001) 原子面的间距相对较大, 所以弹性相对较小。对于任意取向 $[hkl]$ 的单晶合金的弹性模量, 可由下式计算^[4, 5]:

$$E_{[hkl]} = [S_{11} - 2(S_{11} - S_{12} - S_{44}/2)A_{[hkl]}]^{-1} \quad (1)$$

$$A_{[hkl]} = \frac{h^2k^2 + k^2l^2 + l^2h^2}{(h^2 + k^2 + l^2)^2} \quad (2)$$

式中:

$S_{11} = \frac{1}{E_{[001]}}$, $S_{13} = \frac{\nu_{[001]}}{E_{[001]}}$, $S_{44} = \frac{1}{G_{[001]}}$
 $E_{[001]}$ 为[001]取向的弹性模量、 $\nu_{[001]}$ 为[001]取向的泊松比、 $G_{[001]}$ 为[001]取向的剪切弹性模量。
 $A_{[hkl]}$ 为晶向参数, 对于已知的晶体取向 $[hkl]$, 可由下式进行计算:

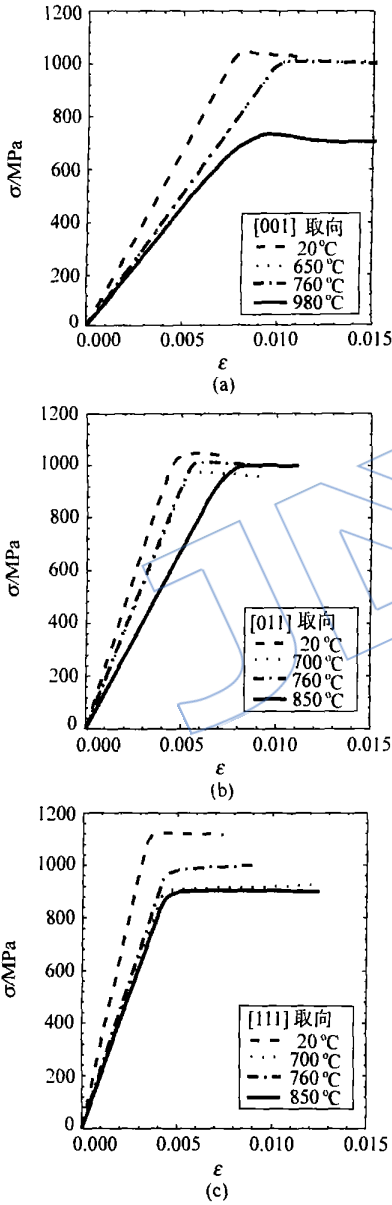


图 2 合金在不同温度、晶体取向下的拉伸应力-应变曲线

Fig 2 Tensile stress-strain curve of the alloy

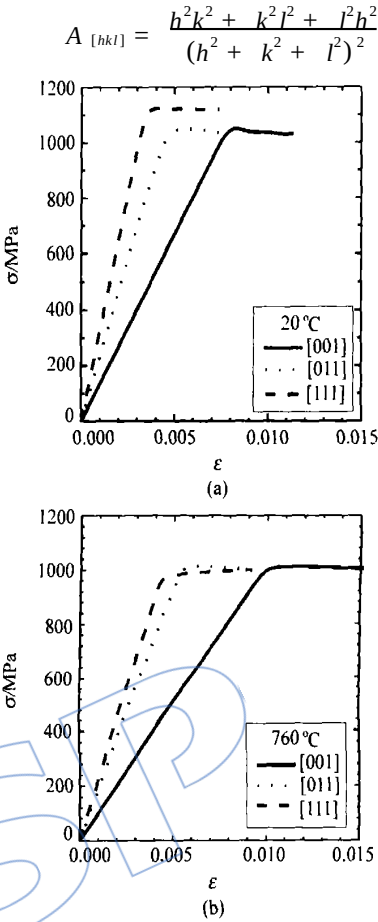


图 3 晶体取向对合金静力拉伸性能的影响
Fig 3 The orientation influence on tensile behavior

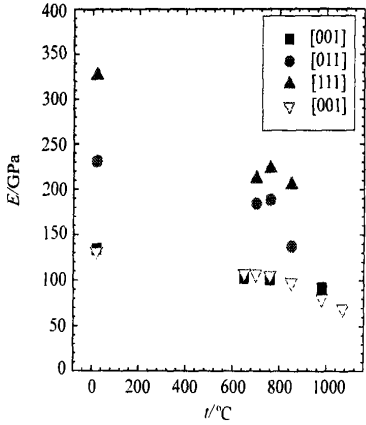


图 4 合金在不同温度与晶体取向下的弹性模量
Fig 4 The Young's modulus of the alloy at different temperature and orientation

在表 1 中给出了根据晶体取向的测定值计算的试样的精确晶体取向 $[hkl]$ 和试验测得的弹性模量值 E_{expo}

表 1 试样的取向计算
Table 1 The orientation calculation of specimens

温度 /°C	编号	测定的单晶取向偏离度/(°)							[hkl]	$E_{\text{exp}} /$ GPa
		001	113	012	011	133	111	112		
20	LL 4	1	26	27					[0 1 100]	134
	T36		25			20	3		[89 90 100]	330
	T87			19	4	9			[11 99 100]	235
	T67			16.5	4	10			[8 93 100]	228
760	LL 2	6	21	20					[3 10 100]	101
	T04			17.8	1	12.5			[2 98 100]	193
	T64			17	1	11.5			[2 98 100]	180
	T73			15	4	10.3			[6 90 100]	189
	T15					21	1	18	[96 99 100]	223

在式(1)中, S_{11} 和 $2(S_{11}-S_{12}-S_{44}/2)$ 可分别看作两个与取向无关的常数, 因此可通过对 3 个不同晶体取向的试样的取向测定, 以及试验测得的弹性模量值 E_{exp} , 可计算出该两个与取向无关的常数值, 从而确定任意取向弹性模量的计算方程。表 2 列出了计算得到的常数值。

表 2 弹性模量方程常数
Table 2 Coefficients in Young's modulus equations

温度/°C	S_{11}/GPa^{-1}	$2(S_{11}-S_{12}-S_{44}/2)/\text{GPa}^{-1}$
RT	0.007 49	- 0.013 23
760	0.009 92	- 0.017 59

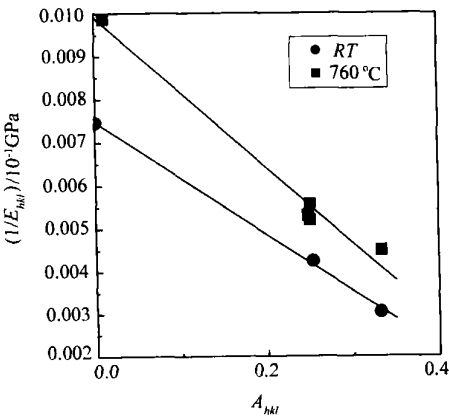


图 5 $E_{[hkl]}^{-1}$ 与 $A_{[hkl]}$ 之间的关系
Fig 5 The relationship between $E_{[hkl]}^{-1}$ and $A_{[hkl]}$

将弹性模量方程用实线示于图 5 中, 无论是

室温, 还是 760°C 高温下, 其与试验点有很好的—致性。用建立的弹性模量方程求得的弹性模量值与试验得到的弹性模量值也相当一致, 见图 6。

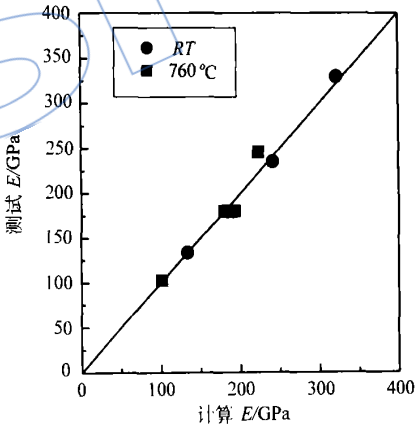


图 6 合金的测试弹性模量与计算弹性模量之间的关系
Fig 6 The relationship between experimental value and calculation one of Young's modulus

2 3 晶体取向及温度对合金的屈服强度和抗拉强度的影响

从上述的静力拉伸试验结果(拉伸应力-应变曲线)可分别得到合金不同取向的屈服强度和抗拉强度与温度之间的变化关系, 如图 7(a), (b)所示。从图中可以观察到晶体取向和温度对屈服强度和抗拉强度的影响。在室温时, [111]取向的屈服强度高于[001]取向; 而在温度较高时, [111]的屈服强度最低。同样在室温时, [111]取向的抗拉强度最高, 而[011]取向的最低, [001]取向的则

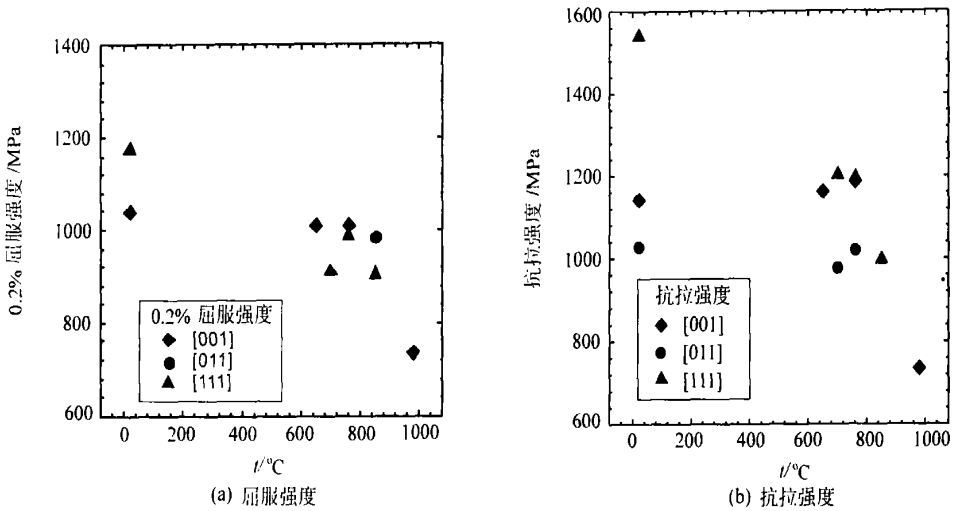


图 7 合金在不同温度下的屈服强度和抗拉强度

Fig 7 0.2% Proof stress and tensile strength at different temperature

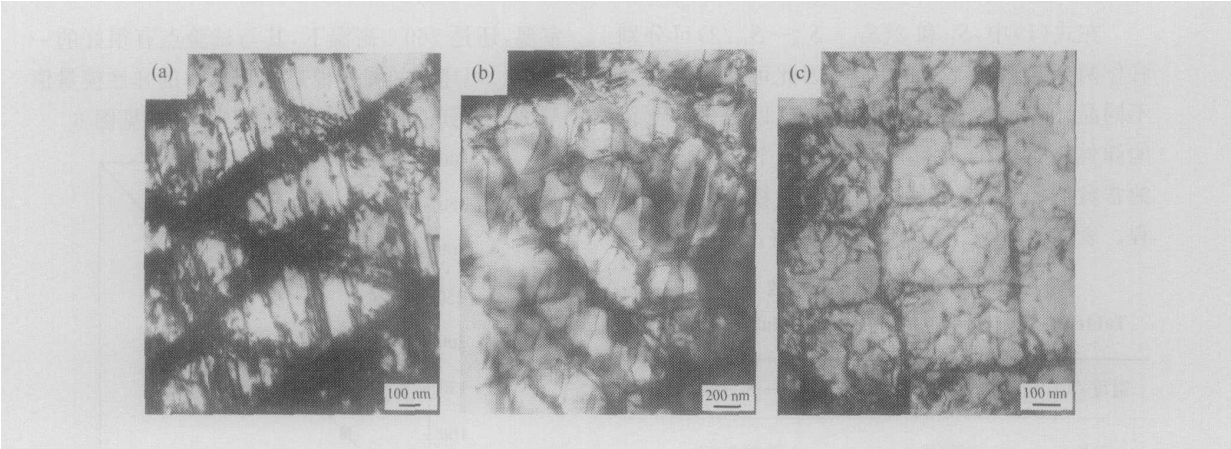


图 8 在不同温度下拉伸试验后合金的 TEM 形貌

Fig 8 TEM Morphologies of the alloy after tensile test

介于二者之间;而在其他的较高温度下,基本上也是同样情况。

2.4 合金在静拉伸条件下的变形机制

分别对在 650°C、760°C 和 980°C 温度下的静力拉伸试样进行了 TEM 分析。图 8(a) 是 650°C 的拉伸试样沿 [111] 面切片后的 TEM 形貌, 图 8(b) 是 760°C 的拉伸试样沿 [111] 面切片后的 TEM 形貌, 图 8(c) 是 980°C 温度的拉伸试样沿 [001] 面切片后的 TEM 形貌。从图 8 中可观察到, 在 650°C 的温度下, 在 γ 相分布着大致相互平行的直线型的位错, 它们属于同一个滑移系, 合金的变形以单滑移系为主。在 760°C 的温度下, 在 γ' 相出现少量的滑移系不同的位错, 表明合金的变形虽然以一个滑移系为主, 但也有其他滑移系的作用。在 980°C 的温度下, 由于温度较高, 开动各

种滑移系的激活能下降, 因而开动了多种不同滑移系并形成位错缠结的形貌。

3 结 论

- (1) 晶体取向对于该合金的弹性模量有显著影响。[001]取向的弹性模量最小, [111]取向的弹性模量最大, 而[011]取向的弹性模量在两者之间。
- (2) 通过引入晶向参数, 建立了不同温度下任意取向的弹性模量方程。用方程求得的弹性模量值与试验值相当一致。
- (3) 该合金的屈服强度依赖于晶体取向及温度, 在室温时, [111]取向的屈服强度高于[001]取向;而在温度较高时, [111]的屈服强度最低。随着温度的升高, 合金中趋于开动较多的滑移系。

参考文献

- [1] 岳珠峰, 吕震宙. 镍基单晶合金蠕变第一阶段性能晶体取向相关性研究[J]. 材料科学与工艺, 1998, 6(2): 48~52
Yue Zhu-feng, Lü Zhen-zhou. Dependence of Primary Creep Behavior of Nickel Base Single Crystal Superalloy on Crystallographic Orientations[J]. *Material Science and Technology*, 1998, 6(2): 48~52
- [2] Feller-Kniepmeier M, Link T, Poschmann I, et al. Temperature Dependence of Deformation Mechanisms in a Single

Crystal Nickel Base Alloy with High Volume Fraction of γ' Phase[J]. *Acta Material*, 1996, 44(6): 2397~2407.

- [3] 李骋. 单晶合金高温力学性能研究技术总结[R]. 北京: 北京航空材料研究院, 2000
- [4] Sims C T, Stokoff N S, Hagel W C. Superalloys II [M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1987.
- [5] Li S X, Ellison E G, Smith D J. The Influence of Orientation on the Elastic and Low Cycle fatigue properties of Several Single Crystal Nickel Base Superalloy[J]. *J. Strain Analysis*, 1994, 29(2): 147~153

美国Linux Networkx 公司在京发布 LS 系列Linux 超级计算系统

2005 年 12 月 1 日, 美国Linux Networkx 公司(简称“LNXI 公司”)和北京运通博远协同商务技术公司联合在北京国际会议中心召开了“新生Linux Networkx 暨新产品新闻发布会”, 正式向中国用户推介了LNXI 公司新研发的LS 系列集群产品。《航空动力学报》、《中国航空报》等航空航天系统的报刊及其他媒体应邀参加了新闻发布会。

美国LNXI 公司总裁/首席运营官Dean Hutchings 先生、LNXI 公司全球销售和市场执行副总裁Rene Copeland 先生、LNXI 日本子公司技术总监朱义普先生及北京运通博远协同商务技术有限公司副总经理苏喜兰女士等高层出席了本次发布会议。

美国LNXI 公司位于美国犹他州, 主要从事高性能集群计算机开发、制造和销售的高技术企业。多年来,LNXI 公司为美国的许多国家实验室和许多 Fortune 500 大公司建造了功能强大的高性能、高可靠性的集群计算机系统。1977 年为美国国家实验室搭建了世界上第一台商用集群系统。2002 年为Lawrence Livermore 国家实验室开发了当时世界上运行速度最快的Linux 集群计算机系统。2003 年为Los Alamos 国家实验室开发了世界上最快的基于AMD Opteron 的集群系统。2005 年美国国防部为Army Research Laboratory 购买了一套该公司开发制造的 2132 个处理器构成的集群计算机系统。全球高性能计算机 TOP500 排行的前 10 名中, 公开的LNXI 制造的产品曾占据第 3 位, 第 6 位和第 7 位。

美国LNXI 公司集群产品在航空航天领域有广泛的应用。如目前在航空航天领域应用的非常广泛计算流体力学(CFD)软件能有效地加速产品研发, 缩短产品上市时间, 是提高整体效率的必不可少的研发工具。但随着流体动力学的发展, 计算模型的规模越来越大, 复杂程度也不断提高, 因此也对超级计算系统提出了更高的性能要求。为了满足日益增大的计算需求,LNXI 公司提出了一套完整的CFD 超级计算解决方案, 通过对工作负载的优化, 实现超级计算系统的全天候运行。目前该方案已经成功应用于众多企业。在中国的一些大学也拥有LNXI 公司的产品, 如清华大学、西北工业大学、北京理工大学等。

LNXI 公司的技术专家朱义普先生在谈到LS 系列集群产品的优势时说, 全新的LS 系列由LS- 1 子系列和LS/X 组成, 其中LS- 1 主要是面向中端用户, 采用了全新的模块化设计理念, 是用户可以负担得起的、可方便管理的超级计算系统。LS- 1 专门针对用户的应用软件进行优化, 用户一拿到系统就可以立即着手处理所关注的科学工程计算问题, 而不需要再找一位集群方面的专家来进行先期的系统安装调试工作。经过测试与优化过的软硬件组合配置消除了操作上的复杂性, 同时简化了未来的升级过程, 特别是大大节省了用户的总拥有成本。LS- 1 超级计算系统对如计算流体力学软件、碰撞分析软件、结构工程软件, 流体模拟和交互式的 3D 可视化软件等专业的计算软件支持得非常好, 系统最大可以扩展到 128 个节点。而LS/X 作为具有超强计算性能的Linux 集群, 其目标定位在高端市场, 系统规模最大可达到 6, 144 个节点, 出于对系统规模的考虑, 特别加大了对系统结构的设计力度, 减少不必要的线缆, 使结构更加紧凑, 优化节点内外的流场设计, 从而提高整个系统的可靠性和可管理性。LS/X 将于今年 12 月首先同广大用户见面, LS- 1 子系列将于 2006 年第一季度正式上市。