

拉伸速率和转速位置对 Nb47Ti 合金拉伸测试的影响

王玺玉, 李芹芹, 高慧贤, 樊智涛, 罗文忠, 刘向宏

(西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 利用万能试验机研究了拉伸速率和转速位置对 Nb47Ti 合金拉伸测试的影响, 通过计算其真应力-应变曲线、加工硬化指数 (n) 和应变速率敏感系数 (m) 分析了 Nb47Ti 合金的力学行为。结果表明: Nb47Ti 合金加工硬化能力十分有限, 其屈服比接近 1; 随着拉伸速率的提高, 加工硬化效果进一步减弱; 拉伸速率对强度的影响较为显著, 根据恒速率拉伸法计算其应变速率敏感系数为 0.0263。转速试验中, 随着拉伸速率的转换, 应力值骤增。在加工硬化阶段的不同应变处转速时, 突变幅值相对稳定, 但整体随着应变量的增加而降低。本研究可为 Nb47Ti 合金拉伸测试时拉伸速率和转速点等参数的选取提供参考。

关键词: Nb47Ti 合金; 应变速率敏感系数; 拉伸速率; 加工硬化指数; 转速位置

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2024)05-033-05

Effect of Tensile Rate and Rate Shift Point on Tensile Test of Nb47Ti Alloy

Wang Xiyu, Li Qinqin, Gao Huixian, Fan Zhitao, Luo Wenzhong, Liu Xianghong

(Western Superconducting Technology Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: The effects of tensile rate and rate shift point on tensile test of Nb47Ti alloy were studied by universal testing machine. The mechanical behavior of Nb47Ti alloy was analyzed by calculating true stress-strain curve, work hardening coefficient (n) and strain rate sensitivity coefficient (m). The results show that the work hardening ability of Nb47Ti alloy is very limited, and the ratio of yield strength to tensile strength approaching 1. With the increase of tensile rate, the work hardening effect decreases further. The tensile rate has a significant effect on strength, the strain rate sensitivity coefficient calculated by constant rate tensile method is 0.0263. In the two-stage tensile test, the stress value changes abruptly with the conversion of tensile rate, and the amplitude of abrupt change is relatively constant when transitions rate at different strains in work hardening stage, but it decreases with the increase of strain on the whole. This study can provide references for the selection of tensile rate and rate shift point during tensile test of Nb47Ti alloy.

Keywords: Nb47Ti alloy; strain rate sensitivity coefficient; tensile rate; work hardening coefficient; rate shift point

NbTi 基合金是一种低温超导材料, 具有良好的中低磁场超导性能、优异的机械加工性能以及较为低廉的原料和加工成本, 常以 NbTi/Cu 多芯复合超导线材形式大量应用于热核聚变、核磁共振成像、高能物理、磁悬浮等高新技术领域^[1-2]。NbTi 合金锻件的力学性能对于后续棒材加工及丝材拉拔具有重要影响, 提高其检测结果的可靠性和有效性对于准确反映材料性能至关重要^[3-4]。按照 ASTM E8 标准要求, Nb47Ti 合金作为一种超塑性金属, 其拉伸应

采用两段速率进行, 屈服强度的测定速率推荐为 0.15 mm/min, 屈服后抗拉强度的测定速率为 1.5~15 mm/min。但在前期检测中发现, 拉伸速率切换时, Nb47Ti 合金会出现应力骤升, 直接产生最大力, 报出抗拉强度。显然, 屈服后拉伸速率选取的不同可能会对抗拉强度测试结果造成较大差异。然而, 对于转速位置的选取, 美标中也未作出明确规定, 在不同应变处切换速率是否会对测试结果造成影响尚不清楚。因此, 系统研究了不同拉伸速率下 Nb47Ti 合金的力学行为, 计算了其应变速率敏感系数和加工硬化指数, 并评估了不同拉伸速

收稿日期: 2024-06-28

通信作者: 王玺玉 (2000—), 男, 助理工程师。

率以及不同转速位置带来的强度测试差异,以期为该合金拉伸性能的测试提供参考。

1 实验

实验材料为 Nb47Ti 合金铸锭,经开坯锻造后得到直径为 193.5 mm 棒材。棒材经退火处理后,组织如图 1 所示,其平均晶粒度 3.5 级,再结晶率大于 90%。在棒材 R/2 处取样并按 ASTM E8 加工成直径 6 mm、平行段长度 30 mm 的标准拉伸试样。

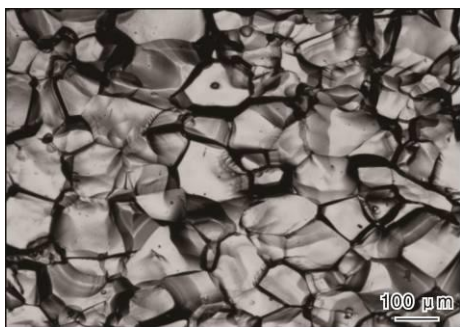


图 1 Nb47Ti 合金棒材退火态显微组织

Fig.1 Microstructure of annealed Nb47Ti alloy bar

采用 INSTRON 万能材料试验机进行室温拉伸试验。恒速率拉伸试验在 ASTM E8 推荐范围内共设置 7 级拉伸速率,分别为 0.15、0.30、0.45、1、2、5、10 mm/min;转速试验固定屈服前后拉伸速率(0.15 mm/min+2 mm/min),只选择在不同应变处进行速率切换,具体方案如表 1 所示。每组试验均设置 3 根平行试样。真应力-应变曲线通过工程应力-应变曲线数学计算转换而来。加工硬化指数通过最小二乘法拟合计算加工硬化阶段的对数真应力-应

变曲线得到。应变率敏感系数 m 通过对拉伸速率和与其同等应变时的应力值回归计算得到。

表 1 Nb47Ti 合金拉伸试验方案

Table 1 Tensile test processes of Nb47Ti alloy

No.	Tensile test process
1	Constant tensile rate 0.15 mm/min
2	Constant tensile rate 0.30 mm/min
3	Constant tensile rate 0.45 mm/min
4	Constant tensile rate 1 mm/min
5	Constant tensile rate 2 mm/min
6	Constant tensile rate 5 mm/min
7	Constant tensile rate 10 mm/min
8	0.15 mm/min+2 mm/min, shift at 2% strain
9	0.15 mm/min+2 mm/min, shift at 4% strain
10	0.15 mm/min+2 mm/min, shift at 8% strain
11	0.15 mm/min+2 mm/min, shift at 20% strain

2 结果与讨论

2.1 室温拉伸变形行为

Nb47Ti 合金在 0.15 mm/min 恒拉伸速率下的室温拉伸曲线如图 2 所示。从图 2a 工程应力-应变曲线可知,在弹性阶段后,应力随弹性变形而线性增加,随后材料发生微塑性变形进入屈服阶段,应力达到峰值,屈服后应力下降,随后进入均匀塑性变形阶段;随着应变增加,应力缓慢上升,加工硬化效果十分有限,导致加工硬化后最高应力低于屈服阶段的峰值应力,最终使得 Nb47Ti 合金的抗拉强度与屈服强度相当。

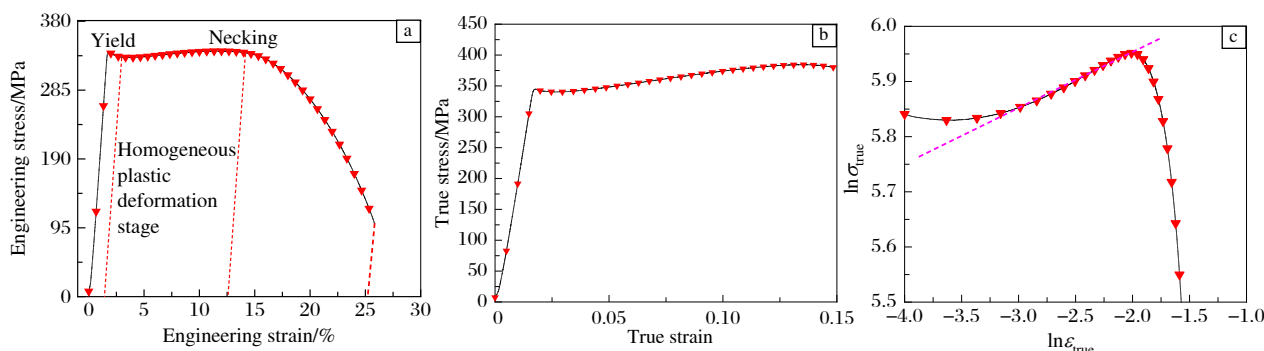


图 2 Nb47Ti 合金在恒拉伸速率(0.15 mm/min)下的拉伸曲线

Fig.2 Tensile curves of Nb47Ti alloy at constant tensile rate of 0.15 mm/min: (a) engineering stress-strain curve; (b) true stress-strain curve; (c) fit curve of $\ln\sigma_{true}-\ln\epsilon_{true}$

从图 2b 真应力-应变曲线来看,Nb47Ti 合金存在加工硬化阶段,该段从屈服到开始颈缩之间的应

变强化行为可根据经验公式 Hollomon 方程描述^[5]。

$$\sigma_{true} = K \times \epsilon_{true}^n \quad (1)$$

式中， n 为加工硬化指数， K 为常数。对式（1）两边取对数可得：

$$\ln \sigma_{\text{true}} = n \times \ln \varepsilon_{\text{true}} + \ln K \tag{2}$$

通过对 $\ln \sigma_{\text{true}} - \ln \varepsilon_{\text{true}}$ 曲线拟合，计算斜率即可获得该拉伸条件下加工硬化阶段的硬化指数 n 为 0.105，其值小于大部分钛合金棒材。 n 值越小，材料越容易发生不均匀塑性变形，一般更容易颈缩。

2.2 拉伸速率对拉伸性能的影响

Nb47Ti 合金在不同拉伸速率下的力学性能如表 2 所示。从表 2 可以看出，随着拉伸速率的提升，

表 2 Nb47Ti 合金在不同拉伸速率下的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Nb47Ti alloy at different tensile rates

No.	Tensile rate /mm min ⁻¹	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	Tensile time /min
1	0.15	339	337	51.6
2	0.30	343	341	31.5
3	0.45	351	350	20.3
4	1	358	356	9.1
5	2	362	361	4.3
6	5	370	370	1.7
7	10	379	378	0.8

抗拉强度和屈服强度同步提升，在较低拉伸速率（0.3~0.45 mm/min）下，强度增加幅度最大，且增幅随着拉伸速率的增加而变小。随着拉伸速率的增加，拉伸时长大幅缩短。

金属材料发生塑性变形时，流变应力大小主要与变形温度、变形量和变形速率相关^[6]，在对流变应力的贡献中，所需克服的晶格阻力是应变速率和温度的函数。相比于面心立方结构（FCC）金属，体心立方结构（BCC）金属的晶格阻力更高，通常表现出强烈的屈服强度应变速率敏感性^[7]。因此，属于 BCC 晶体结构的 Nb47Ti 合金对应变速率较为敏感。

图 3 为 Nb47Ti 合金在不同拉伸速率下的工程应力-应变曲线和真应力-应变曲线。从图 3a 可以看出，在不同拉伸速率下，曲线峰值应力均位于屈服阶段，屈服后硬化效果减弱，出现应力持续降低的现象。从图 3b 真应力-应变曲线来看，在不同拉伸速率下仍存在加工硬化阶段，同样根据式（1）和式（2）对不同拉伸速率下的 $\ln \sigma_{\text{true}} - \ln \varepsilon_{\text{true}}$ 曲线拟合，通过计算斜率获得加工硬化系数 n ，如图 3c 所示。从图 3c 可以看出，随着拉伸速率的增大，应变硬化效果逐渐减弱。

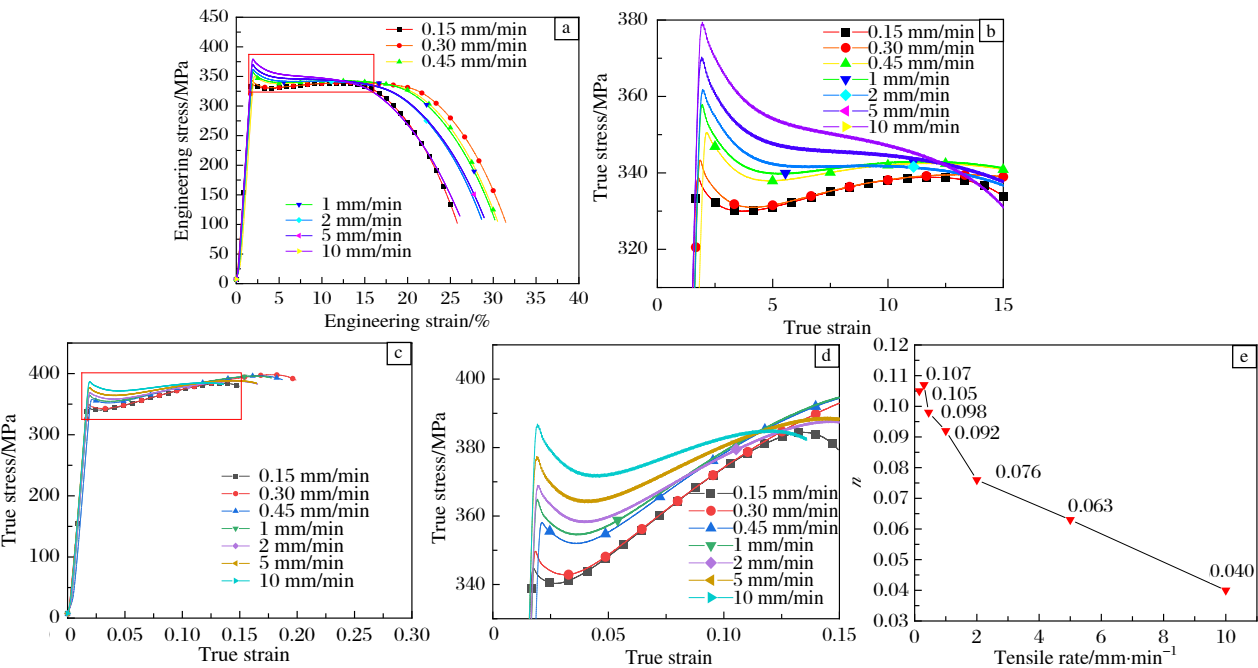


图 3 Nb47Ti 合金在不同拉伸速率下的拉伸曲线

Fig.3 Tensile curves of Nb47Ti alloy at different tensile rates: (a) engineering stress-strain curve; (b) local implication in fig.3a; (c) true stress-strain curve; (d) local implication in fig.3c; (e) curve of tensile rate vs. hardening coefficient

加工硬化主要与位错累积及位错相互作用有关。多晶体金属材料在拉伸变形时，由于各晶粒取向不同，其变形具有不同同时性，而材料的均匀变形需要各晶粒的相互协调和参与，软取向晶粒位错先

向不同，其变形具有不同同时性，而材料的均匀变形需要各晶粒的相互协调和参与，软取向晶粒位错先

启动, 通过在晶界处塞积产生应力集中促使相邻晶粒发生滑移, 实现变形的传递。随着应变量的增加, 位错密度增加, 位错累积增多, 晶内形成位错割阶等, 变形阻力持续增大, 使已变形晶粒发生硬化而停止变形, 未变形部分开始变形。当应力超过一定程度后, 某些薄弱区域将发生局部塑性变形, 截面缩小而纵向延长, 由于拉伸为位移控制, 维持同等变形所需的载荷将持续下降, 直至试样断裂。然而, 当拉伸速率较高时, 变形太快, 位错滑移和塑性变形难以快速均匀传递到各个晶粒, 过早发生应力集中而导致试样提前进入颈缩阶段, 如图 3c 所示。因此, 拉伸速率过快时将无法使更多晶粒变形至硬化状态, 加工硬化能力被削弱, 加工硬化产生的峰值应力也较低。

应变速率敏感指数 m 通常用来确定材料的超塑性行为和变形机制, m 值越大, 材料抗缩颈能力越大。 m 不同于加工硬化系数, 不通过应变而是同等应变下所需时间发挥作用, 反映的是材料在应变速率变化时发生强化的倾向^[5]。基于 Nb47Ti 合金室温下的等应变速率拉伸数据, 通过经验公式可计算出其应变速率敏感系数 m ^[8]。

$$\sigma = C\dot{\varepsilon}^m \quad (3)$$

式中: σ 为流变应力, MPa; C 在一定应力状态下为常数; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, s^{-1} 。对式 (3) 两端取对数, 可得:

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} \quad (4)$$

采用最小二乘法拟合得到 Nb47Ti 合金的应变速率敏感系数 m 为 0.0263, 见图 4。

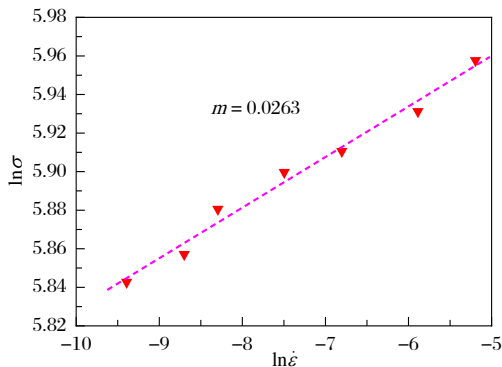


图 4 Nb47Ti 合金的 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 拟合曲线

Fig.4 Fit curve of $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ of Nb47Ti alloy

2.3 不同转速位置对测试结果的影响

拉伸速率为 0.15 mm/min+2 mm/min 时, Nb47Ti 合金分别在屈服阶段 (应变 2%)、加工硬化初期

(应变 4%)、加工硬化阶段 (应变 8%) 和颈缩阶段 (应变 20%) 进行转速, 测试结果见图 5 和表 3。拉伸速率切换后, 应力均出现骤升, 而且在前三个阶段转速时, 应力骤升直接超过了峰值应力, 产生了由拉伸速率突变导致的抗拉强度。此外, 在应变较小时转速, 应力突变幅值大致相当, 但整体随着转速点的右移呈下降趋势。

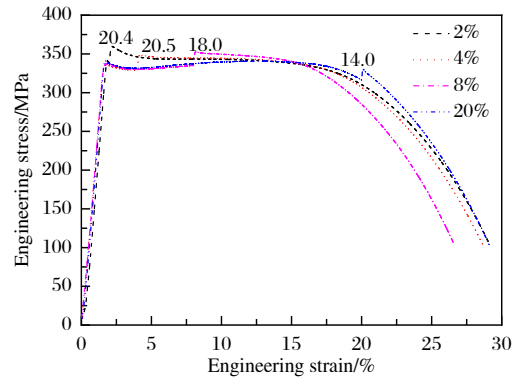


图 5 Nb47Ti 合金在不同应变处转速的拉伸曲线

Fig.5 Tensile curves of Nb47Ti alloy transition rate at different strains

表 3 Nb47Ti 合金在不同应变处转速时力学性能测试结果

Table 3 Mechanical properties test results of Nb47Ti alloy transition rate at different strains

Rate shift point	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	Stress increment /MPa
2%	352	334	20.4
4%	349	335	20.5
8%	353	337	18.0
20%	341	339	14.0

对于拉伸速率造成的强度提升可借助屈服理论来解释:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \propto \rho b v \quad (5)$$

式中: ρ 为位错密度; b 为柏氏矢量; v 为位错运动速度, $v = (\tau/\tau_0)^m$, 其中, τ 为外加有效应力, τ_0 为位错作单位速度运动时所需的应力, m 为应力敏感指数。由式 (5) 可得, 合金开始塑性变形时, 位错密度小, 为保证应变速率恒定, 需较大应力以增加位错运动速度。而当位错密度增加至一定程度后, 应力便下降, 从而产生屈服。位错的运动和增殖需要时间, 因此当应变速率突然升高, 剧烈的塑性变形需要大量位错运动配合协调, 而位错来不及大量增殖, 故流变应力迅速增加以加快位错运动速度。

此外,随着转速点的右移,应力突变值呈下降趋势。主要是由于随着应变量的增加,材料的位错密度不断增加,转速时维持较高应变速率所需的外加有效应力逐渐减小。

3 结 论

(1) 恒拉伸速率在 0.15~10 mm/min 之间时, Nb47Ti 合金加工硬化阶段的硬化效果均有限,最高硬化指数 n 仅为 0.105,导致合金的抗拉强度与屈服强度相当,且随着拉伸速率的增加,加工硬化效果逐渐减弱。

(2) 拉伸速率对 Nb47Ti 合金抗拉强度的测试值存在影响,经拟合计算得到 Nb47Ti 合金的应变速率敏感系数为 0.0263。

(3) 随着转速点的右移,应力突变幅值整体呈降低趋势,但在加工硬化阶段,转速突变幅值相对稳定。

参考文献 References

[1] 李建峰,张平祥,刘向宏,等. ITER 用 NbTi 超导线材微

观组织及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(2): 263-265.

[2] Sun D, Wang Z, Jiang S Y, et al. Interface compatibility during different temperature Cu/NbTi cladding extrusion: simulation and experiment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(2): 441-447.

[3] 吕天伟. NbTi 合金线材的微观组织与变形行为[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.

[4] 戴超, 刘勃, 秦经刚, 等. NbTi、Nb₃Sn 超导线拉伸性能研究[J]. 低温物理学报, 2014, 36(3): 475-481.

[5] 朱艳春, 邵珠彩, 罗媛媛, 等. Ti₂AlNb 合金应变速率敏感指数和应变硬化指数与变形参数和晶粒尺寸关系研究[J]. 材料导报, 2023, 37(5): 156-161.

[6] 苟曼曼, 白瑞敏, 孟利军. 应变速率对钛合金室温拉伸性能的影响[J]. 湖南有色金属, 2020, 36(1): 52-54+80.

[7] Wang M, Huang M X. Abnormal TRIP effect on the work hardening behavior of a quenching and partitioning steel at high strain rate[J]. Acta Materialia, 2020, 188: 551-559.

[8] 张晓华, 邱晓刚, 卢国清, 等. 应变速率敏感系数(m 值)测试方法探讨[J]. 钢铁钒钛, 2001, 22(1): 63-68.

行业动态

ATI 公司 2024 年第 2 季度经营状况

美国 ATI 公司 2024 年第 2 季度(2024 年 4 月 1 日至 6 月 30 日)销售额为 10.95 亿美元,较 2023 年第 2 季度增长 4.7%,较 2024 年第 1 季度增长 5.0%;净利润为 8190 万美元,较 2023 年第 2 季度下降 9.4%,较 2024 年第 1 季度增长 23.9%;航空航天及国防领域销售额进一步增长,占到总销售额的 62%。其中,高性能金属部销售额为 5.62 亿美元,较 2024 年第 1 季度增长 6.1%;先进合金&解决方案部销售额为 5.33 亿美元,较 2024 年第 1 季度增长 3.9%。

ATI 总裁兼首席执行官 Kimberly A.Fields 表示:ATI 公司 2024 年第 2 季度依旧表现出强劲势头,航空航天及国防业务快速增长,主要源于公司多元化的发动机及机身客户。(何蕾编译自美国 ATI 公司官网)

日本大阪钛科技公司 2024 财年第 1 季度结算速报

日本大阪钛科技公司 2024 财年第 1 季度(2024 年 4 月 1 日至 6 月 30 日)销售额为 124.66 亿日元,较 2023 财年第 1 季度的 141.30 亿日元下降了 11.8%;营业利润为 30.91 亿日元,较 2023 财年第 1 季度的 16.91 亿日元增长了 82.8%;净利润为 25.68 亿日元,较 2023 财年第 1 季度的 20.73 亿日元增长了 23.9%。

其中,钛事业部 2024 财年第 1 季度的销售额为 111.57 亿日元,较 2023 财年同期下降 16.8%。主要是由于面向航空领域出口的海绵钛销售额较上年同期减少 7.2%,日本国内一般工业及民用领域海绵钛销售额较上年同期减少 34.1%。(何蕾编译自大阪钛科技公司官网)

日本东邦钛公司 2024 财年第 1 季度结算速报

日本东邦钛公司 2024 财年第 1 季度(2024 年 4 月 1 日至 6 月 30 日)营业额为 214 亿日元,较 2023 财年第 1 季度的 162 亿日元增长了 32.1%;营业利润为 14 亿日元,较 2023 财年第 1 季度的 7 亿日元增长了近 1 倍;净利润为 13 亿日元,较 2023 财年第 1 季度增长了 30%。(何蕾编译自东邦钛公司官网)