

Nb 含量对 Ti-Nb-0.7Ta-2Zr-1.4O 合金 室温压缩流变行为的影响

杨 义^{1,2}, 李阁平¹, 吴松全^{1,3}, 李玉兰¹, 杨 柯¹

- (1. 中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016;
2. 西北有色金属研究院 钛合金研究所, 西安 710016;
3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 研究 Ti-xNb-0.7Ta-2Zr-1.4O(x=22.4, 22.85, 24.5) 钛合金的室温压缩流变行为。结果表明: 合金的真应力—真应变曲线上塑性变形阶段均表现出应力振荡现象, 即应变硬化和应变软化交替出现, 应力振荡是由压缩过程中占主导地位的变形机制发生变化所引起的。随着合金中 Nb 含量的升高, 塑性变形初始阶段的应力平台阶段消失, 应变软化阶段缩短, 应力软化值减小。这种现象是由于 Nb 含量的变化改变了合金的塑性变形机制所致。

关键词: 钛合金; 压缩; 流变行为; 变形机制

中图分类号: TG146.2; TG115.5

文献标志码: A

Effect of Nb content on flow behavior of Ti-Nb-0.7Ta-2Zr-1.4O alloy during cold compression

YANG Yi^{1,2}, LI Ge-ping¹, WU Song-quan^{1,3}, LI Yu-lan¹, YANG Ke¹

- (1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Titanium Alloy Research Centre, Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China;
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The flow behaviors of Ti-xNb-0.7Ta-2Zr-1.4O (x=22.4, 22.85, 24.5) alloys during room-temperature compression were investigated. The results show that the true stress—strain curve exhibits stress oscillation phenomenon characterized by alternate strain hardening and softening, which is caused by a change in the dominant deformation mechanisms. With increasing the Nb content, the stress plateau at the initial stage of plastic deformation disappears, and the strain softening stage and stress softening value decrease, which results from the change of deformation mechanism.

Key words: titanium alloy; compression; flow behavior; deformation mechanism

Gum Metal 是日本丰田中央研究所于 2001 年研制成功的一类新型多功能钛合金, 其典型成分有 Ti-23Nb-0.7Ta-2Zr-O、Ti-9Nb-12Ta-3V-6Zr-O 和 Ti-20Nb-3.5Ta-3.4Zr-O(摩尔分数, %, 下同)等^[1-3]。在经历严重的冷变形后, 该类合金可同时具有高强度、高塑性、非线性超弹性、低弹性模量, 以及 Invar 和 Elinvar 性能等^[1,4]。由于冷变形前后性能的巨大差异^[1], 目前

的大多数研究主要关注合金的塑性变形机制, 而不同研究者的研究结果出现非常大的差异。据文献[1, 3-10], Ti-23Nb-0.7Ta-2Zr-1.2O 合金的室温塑性变形与应力诱发相变、孪生和位错滑移等传统变形机制无关, 而是通过层间变形(理想剪切)形成大平面缺陷来进行的, 他们称之为“无位错塑性变形机制”。而较低 Nb 含量或较低 O 含量的合金主要通过 {332}⟨113⟩ β 李

生和/或应力诱发 α'' 马氏体(SIM α'')转变进行塑性变形,较高Nb含量的合金则通过位错滑移进行塑性变形。然而,XING等^[11-13]和TALLING等^[14-15]在冷变形的Ti-23Nb-0.7Ta-2Zr-1.2O合金中发现了位错、应力诱发 ω 相、 $\{112\}\langle 111 \rangle_{\beta}$ 形变孪晶和SIM α'' ,表明合金是以传统变形机制进行塑性变形。本文作者^[16-18]对Ti-22.4Nb-0.73Ta-2Zr-1.34O合金进行了研究,发现其通过位错滑移、应力诱发 ω 相变、SIM α'' 相变、 $\{332\}\langle 113 \rangle_{\beta}$ 和 $\{112\}\langle 111 \rangle_{\beta}$ 孪生、扭折、剪切等多种机制进行塑性变形。可见,尽管对该类合金的变形行为已经有了较多研究,但是目前仍然缺乏一个能够被各方共同认可的结论,因此今后该类合金的研究焦点仍将是变形行为。

严重的冷变形是该类合金获得独特性能的必要工艺,但是目前对冷变形过程中合金的流变行为仍然缺乏研究。研究该类合金的室温流变行为将不仅对合金制备工艺的优化具有指导意义,也将有助于进一步认清合金的塑性变形机制。本文作者将以Ti-23Nb-0.7Ta-2Zr-O合金为基础,研究Nb含量对其室温压缩流变行为的影响。

1 实验

选用合金的成分分别为Ti-22.4Nb-0.73Ta-2Zr-1.34O、Ti-22.85Nb-0.68Ta-1.94Zr-1.49O和Ti-24.5Nb-0.7Ta-2Zr-1.4O。3个合金除了Nb含量有较大的差别外,其余元素含量基本相同,统称为Ti-Nb-0.7Ta-2Zr-1.4O合金,按照Nb含量的不同,编号依次为Ti224、Ti228和Ti245。采用真空自耗或非自耗法熔炼合金,1080开坯后在750锻造,以细化晶粒,然后经过(950, 0.5 h),WQ(β 单相区)的固溶处理后加工成 $d5\text{ mm} \times 8.5\text{ mm}$ 的圆柱试样。冷变形时沿轴向压缩至约82%形变量,压缩速率为0.01 mm/s(初始应变速率为 $1.18 \times 10^{-3}/\text{s}$)。物相分析采用Cu K α 射线在Rigaku D/max-2400PC XRD衍射仪上进行,使用ZEISS Axiovert200 MAT金相显微镜观察显微组织,电解抛光法制备金相试样,电解抛光液成分为6 g AlCl₃+28 g ZnCl₂+10 mL 正丁醇+90 mL 乙醇,温度为-20~-30,电流密度0.16~0.8 A/cm²。

2 结果与讨论

图1所示为室温压缩应力—应变(σ — ε)曲线和真应力—真应变(σ_t — ε_t)曲线。由图1可以看到,3个成

分的合金均表现出优异的室温压缩塑性,被压缩至形变量约82%(真应变约175%)后仍没有断裂,对压缩后的试样表面进行细致的观察均没有发现裂纹。

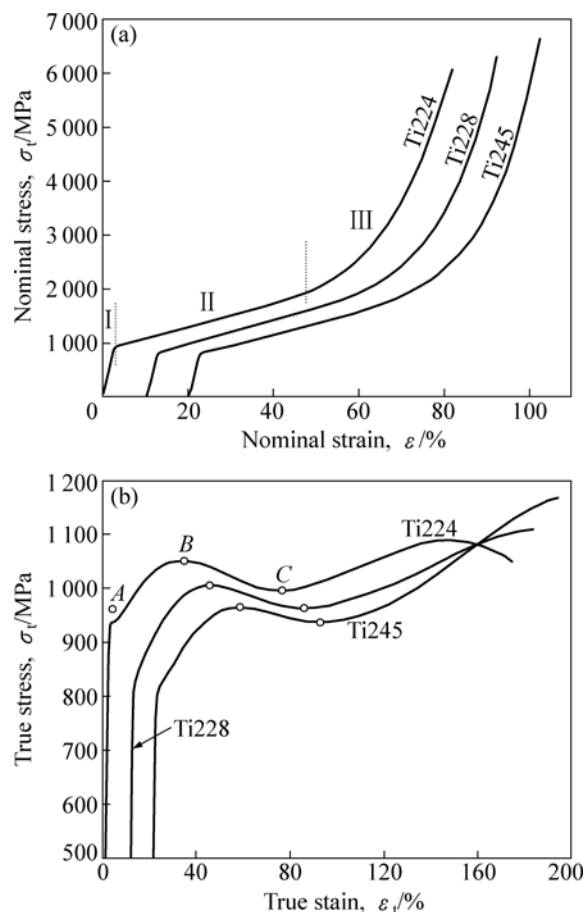


图1 Ti-Nb-0.7Ta-2Zr-1.4O合金的压缩应力—应变曲线(a)和压缩真应力—真应变曲线(b)

Fig.1 Compression stress—strain (a) and true stress—true strain (b) curves of Ti-Nb-0.7Ta-2Zr-1.4O alloy

3个合金的真应力—真应变(σ_t — ε_t)曲线极为相似,均由3个部分依次组成,即弹性阶段(阶段I)、塑性平台阶段(阶段II)和抛物线阶段(阶段III)(见图1(a))。在弹性阶段,随应变的增加,应力迅速地线性增加;在塑性平台阶段,随应变的增加,应力缓慢地线性增加;在抛物线阶段,随应变的增加,应力按照抛物线关系增加。

Ti228和Ti245合金的真应力—真应变(σ_t — ε_t)曲线特征基本相同,它们的室温压缩流变行为与Ti224合金的相比,除屈服点附近外,并无本质差别:Ti224合金的 σ_t — ε_t 曲线在弹性阶段之后出现了一个应力平台阶段(A点附近),紧接着是应变硬化阶段(AB阶段和C点之后)和应变软化阶段(BC阶段)交替出现(见图1(b)),形成了应力振动现象。Ti228和Ti245合金的

$\sigma_t-\varepsilon_t$ 曲线在弹性阶段之后无应力平台,直接进入应力振动阶段(见图1(b))。同时,随Nb含量的增加,3个合金的应变软化阶段大小($\Delta\varepsilon_t$)(见图1(b)中曲线上C点与B点的真应变差)和应力软化值($\Delta\sigma_t$)(见图1(b)中曲线上B点与C点的真应力差)均减小(见图2),即Nb抑制了应变软化。

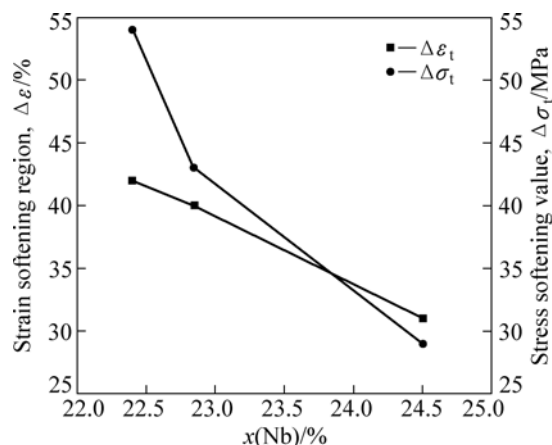


图2 Nb含量对Ti-Nb-0.7Ta-2Zr-1.4O合金的应变软化阶段的影响

Fig.2 Effects of Nb content on strain softening region of Ti-Nb-0.7Ta-2Zr-1.4O alloy

YANG等^[18]曾详细研究了Ti224合金的室温压缩塑性变形机制,发现随变形量的增加,合金中占主导地位的变形机制不断变化。在塑性变形的最初阶段,合金以位错滑移、应力诱发 ω 相变、SIM α'' 相变、 $\{332\}\langle 113 \rangle_\beta$ 和 $\{112\}\langle 111 \rangle_\beta$ 孪生等多种机制进行塑性变形,在这一阶段合金中的缺陷较少,位错还没有发生塞积和缠结,此时这种多方式变形机制的协调和配合使得合金很容易就能发生塑性变形,从而导致了应力平台的出现。随着应变的增加,应力诱发转变继续进行, β 晶粒被分割,使得有效晶粒尺寸减小,导致位错自由滑移程缩短,造成了与细晶强化相同的效果,大量位错的塞积和缠结引起了第一次应变硬化。进一步变形时,应力诱发转变基本停止,而且位错塞积已经相当严重,材料已经无法依靠应力诱发转变和滑移继续进行较大程度的塑性变形。为了适应外力使材料不致被破坏,晶体会发生局部弯曲,即产生扭折,并快速形成 $\{200\}_\beta$ 择优取向。扭折是一种协调性变形,它的形成有助于协调相邻晶粒之间及同一晶粒中不同部位之间的变形,引起应力松弛,同时还引起晶体的再取向,促使晶体的变形能力得到进一步提高,这造成了应变软化阶段的出现。当通过扭折形成的 $\{200\}_\beta$ 择优取向趋于饱和时,依靠扭折为主的塑性变形无法继

续进行,变形机制转向为以具有最大切应力的 $\{110\}_\beta$ 面剪切为主导,剪切带内的晶体发生严重变形和碎化,从而导致了第二次应变硬化阶段的出现。

与Ti224合金的应力振动各阶段机理相对应,Ti228和Ti245合金的第一次应变硬化阶段主要是由于位错的塞积和缠结造成的,应变软化阶段的主导变形机制均为扭折, $\{110\}_\beta$ 面剪切变形引起的晶体变形和碎化造成了第二次应变硬化。可见,这种室温压缩过程中的应力振动现象是由于变形过程中占主导地位的变形机制不断变化的结果。因此,Nb含量对合金流变行为的影响实际上是对变形机制的影响。

图3所示为3种合金冷压前后(形变量约5%)的XRD谱。由图3可见,变形前合金均由单一 β 相组成(见图3(a)),变形后Ti224和Ti228合金中出现了SIM α'' 相,而Ti245合金仍由单一 β 相组成(见图3(b))。金相观察表明,变形前的合金具有等轴 β 相组织(见图4(a)、(c)和(e)),变形后,晶粒内部均出现了一些不同方向的平行细线(见图4(b)、(d)和(f))。结合XRD分析

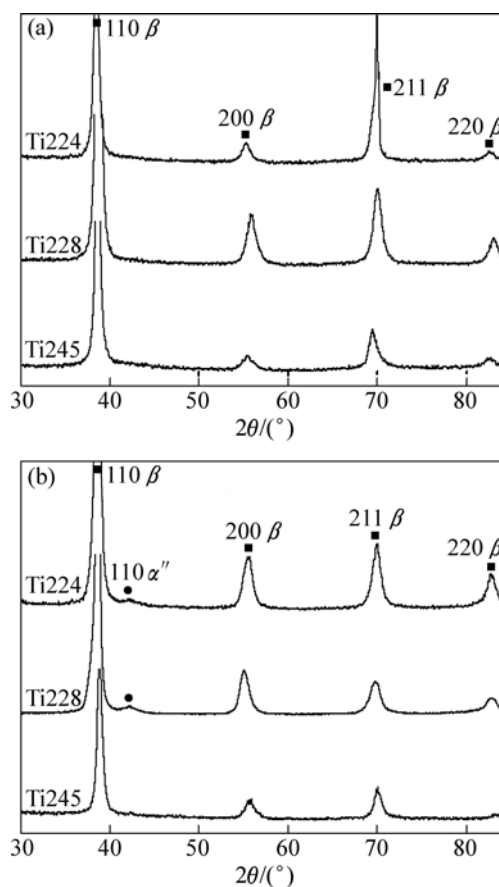


图3 Ti-Nb-0.7Ta-2Zr-1.4O合金冷压前(a)后(b)的XRD谱
Fig.3 XRD patterns of Ti-Nb-0.7Ta-2Zr-1.4O alloys before (a) and after (b) cold compression (Scanned planes of deformed samples are parallel to compression direction)

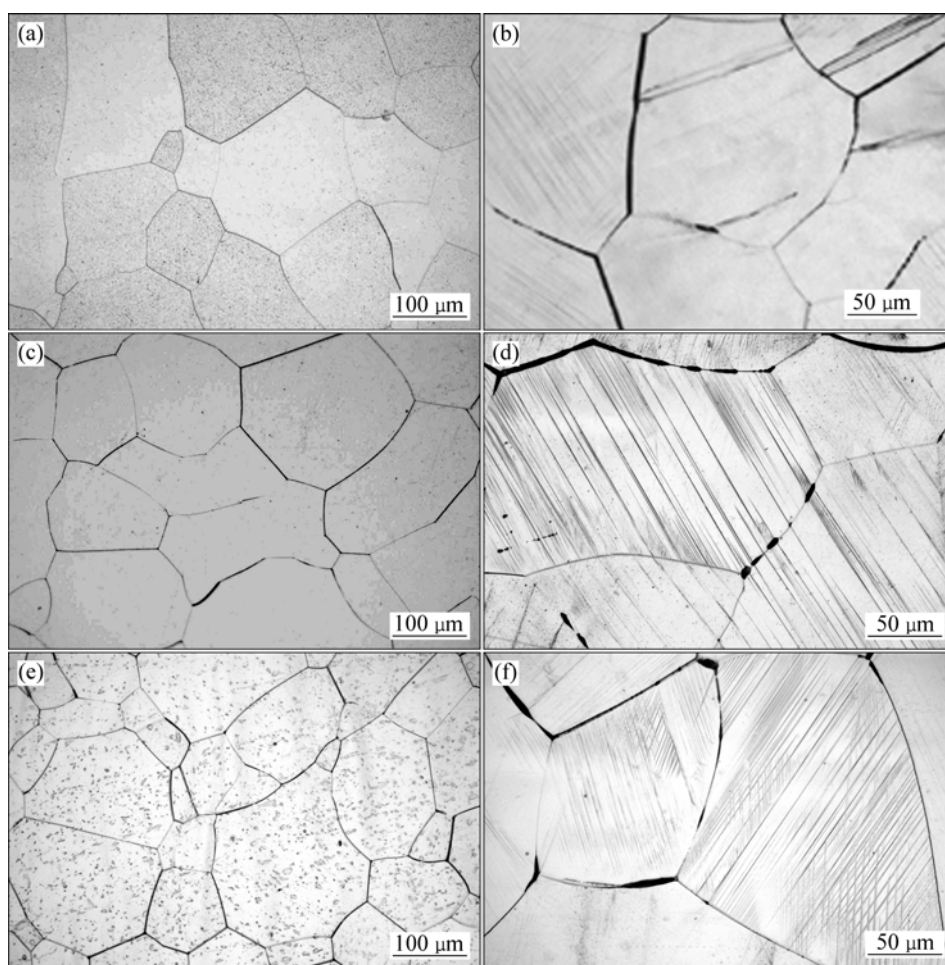


图 4 Ti-Nb-0.7Ta-2Zr-1.4O 合金冷压前(a, c, e)后(b, d, f)的显微组织

Fig.4 Optical microstructures of Ti-Nb-0.7Ta-2Zr-1.4O alloys before (a, c, e) and after (b, d, f) cold compression: (a, b) Ti224 alloy; (c, d) Ti228 alloy; (e, f) Ti245 alloy

结果可知, Ti224 和 Ti228 合金中的细线为 SIM α'' 和滑移线(见图 4(b)和(d)), Ti245 合金中的细线均为滑移线(见图 4(f))。同时, 在 Ti228 和 Ti245 中均没有发现存在于 Ti224 合金中的 $\{332\}\langle 113 \rangle_{\beta}$ 形变孪晶板条^[16, 18]。结合 TEM 分析后可以确定, 在塑性变形最初阶段, Ti228 合金以位错滑移、应力诱发 ω 相变、SIM α'' 相变和 $\{112\}\langle 111 \rangle_{\beta}$ 孪生相结合进行塑性变形, Ti245 合金仅通过 $\{112\}\langle 111 \rangle_{\beta}$ 孪生和位错滑移进行塑性变形。与 Ti224 合金相比, 变形机制均有所减少, 特别是 $\{332\}\langle 113 \rangle_{\beta}$ 孪生被抑制后, 由其引起的应力松弛作用消失, 从而造成了 Ti228 和 Ti245 合金流变曲线上应力平台阶段的消失。

3 结论

1) Ti-Nb-0.7Ta-2Zr-1.4O 钛合金的室温压缩真应

力—真应变曲线上塑性变形阶段均表现出了应力振动现象, 即应变硬化和应变软化交替出现, 这种现象是由于压缩过程中占主导地位的变形机制发生变化引起的。

2) 随着 Nb 含量的升高, 压缩真应力—真应变曲线上弹性阶段之后的应力平台阶段消失, 应变软化阶段缩短、应力软化值减小。

3) 随着 Nb 含量的提高, $\{332\}\langle 113 \rangle_{\beta}$ 孪生首先被抑制, 随后 SIM α'' 转变和应力诱发 ω 相变被抑制, 同时, 扭折变形也有被抑制的趋势。

REFERENCES

- [1] SAITO T, FURUTA T, HWANG J H, KURAMOTO S, NISHINO K, SUZUKI N, CHEN R, YAMADA A, ITO K, SENO Y, NONAKA T, IKEHATA H, NAGASAKO N, IWAMOTO C, IKUHARA Y, SAKUMA T. Multifunctional

- alloys obtained via a dislocation-free plastic deformation mechanism[J]. *Science*, 2003, 300: 464–467.
- [2] FURUTA T, NISHINO K, HWANG J H, YAMADA A, ITO K, OSAWA S, KURAMOTO S, SUZUKI N, CHEN R, SAITO T. Development of multi functional titanium alloy, “Gum Metal”[C]//LUTJERING G, ALBRECHT T J. *Ti-2003 Science and Technology*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003: 1519–1526.
- [3] GUTKIN M Y, ISHIZAKI T, KURAMOTO S, OVID'KO I A. Nanodisturbances in deformed gum metal[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54: 2489–2499.
- [4] KURAMOTO S, FURUTA T, HWANG J H, NISHINO K, SAITO T. Elastic properties of Gum Metal[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 442: 454–457.
- [5] FURUTA T, KURAMOTO S, CHEN R, HWANG J H, NISHINO K, SAITO T, IKEDA M. Effect of oxygen on phase stability and elastic deformation behavior in Gum Metal[J]. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 2006, 70: 579–585.
- [6] FURUTA T, KURAMOTO S, HWANG J H, NISHINO K, SAITO T. Elastic deformation behavior of multi-functional Ti-Nb-Ta-Zr-O alloys[J]. *Materials Transactions*, 2005, 46: 3001–3007.
- [7] KURAMOTO S, FURUTA T, HWANG J H, NISHINO K, SAITO T. Plastic deformation in a multifunctional Ti-Nb-Ta-Zr-O alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, 37: 657–662.
- [8] HWANG J, KURAMOTO S, FURUTA T, NISHINO K, SAITO T. Phase-stability dependence of plastic deformation behavior in Ti-Nb-Ta-Zr-O alloys[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2005, 14: 747–754.
- [9] KURAMOTO S, FURUTA T, HWANG J H, NISHINO K, SAITO T. EBSD analysis on microstructure of Gum Metal after plastic deformation[J]. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 2005, 69: 953–961.
- [10] LI T S, J. W. MORRIS J, NAGASAKO N, KURAMOTO S, CHRZAN D C. “Ideal” engineering alloys[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98: 105503.
- [11] XING H, GUO W Y, SUN J. Substructure of recovered Ti-23Nb-0.7Ta-2Zr-0 alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, 17: 1456–1458.
- [12] XING H, SUN J, YAO Q, GUO W Y, CHEN R. Origin of substantial plastic deformation in Gum Metals[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92: 151905.
- [13] XING H, SUN J. Mechanical twinning and omega transition by $\langle 111 \rangle \{112\}$ shear in a metastable β titanium alloy[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92: 031908.
- [14] TALLING R J, DASHWOOD R J, JACKSON M, DYE D. On the mechanism of superelasticity in Gum Metal[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57: 1188–1198.
- [15] TALLING R J, DASHWOOD R J, JACKSON M, KURAMOTO S, DYE D. Determination of (C11-C12) in Ti-36Nb-2Ta-3Zr-0.3O (wt.%) (Gum metal)[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59: 669–672.
- [16] YANG Y, LI G P, CHENG G M, LI Y L, YANG K. Multiple deformation mechanisms of Ti-22.4Nb-0.73Ta-2.0Zr-1.34O alloy[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94: 061901.
- [17] YANG Y, LI G P, CHENG G M, WANG H, ZHANG M, XU F, YANG K. Stress-introduced α'' martensite and twinning in a multifunctional titanium alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 58: 9–12.
- [18] YANG Y, WU S Q, LI G P, LI Y L, LU Y F, YANG K, GE P. Evolution of deformation mechanisms of Ti-22.4Nb-0.73Ta-2Zr-1.34O alloy during straining[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58: 2778–2787.

(编辑 袁赛前)