

Ti₃Al 和 Ti₂AlNb 基合金的研究与应用

张建伟, 李世琼, 梁晓波, 程云君

(钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要: 概述钢铁研究总院在 Ti₃Al 合金和 Ti₂AlNb 合金研究与应用方面取得的进展。钢铁研究总院现已通过系统的合金化和组织结构的设计, 建立 Ti₃Al 合金和 Ti₂AlNb 合金具有自主知识产权的高韧性合金体系, 合金综合性能达到国际先进水平; 依托国内现有生产设备条件, 建立合金制备加工工艺技术, 形成小批量供货的能力; 近年来, 针对这两类合金应用在我国航空航天领域的研制工作进展顺利, 所研制部件已在多个重要武器型号中开始应用。

关键词: Ti₃Al 合金; Ti₂AlNb 合金; 合金化; 制备技术; 应用

中图分类号: TF 804.3

文献标志码: A

Research and application of Ti₃Al and Ti₂AlNb based alloys

ZHANG Jian-wei, LI Shi-qiong, LIANG Xiao-bo, CHENG Yun-jun

(Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The research and application progress of Ti₃Al and Ti₂AlNb based alloys in Central Iron and Steel Research Institute (CISRI) were summarized. A family of Ti₃Al and Ti₂AlNb based alloys with independent intellectual property rights was established in CISRI by alloying and designing on microstructure systematically. The comprehensive of mechanical properties of the alloys reaches the international advanced level. The manufacture processing of the alloys relying on the domestic equipments was built up and the ability to supply small-batch production was formed. The application research of the alloys on aerospace and aeronautics service is going well. Some components are applied in some important weapon program.

Key words: Ti₃Al based alloys; Ti₂AlNb based alloys; alloying; manufacture technology; application

Ti₃Al 合金和 Ti₂AlNb 合金同属 Ti-Al 系金属间化合物材料, 均具有密度低、比强度高和抗氧化性好等突出特点, 被视为有助于航空航天飞行器发动机通过结构质量减轻实现性能提升的理想轻密度高温结构材料。其中 Ti₃Al 合金可作为航空发动机材料在 650 条件下长时工作, 或作为航天发动机材料在 900 条件下短时工作; Ti₂AlNb 合金相比于 Ti₃Al 合金, 尽管密度略大, 但因其高温强度显著提高而展示出更高的高温比强度, 使得其工作温度有待于进一步提高^[1-2]。但是, 作为金属间化合物材料, 原子长程有序排列和金属键/共价键共存性在带来优异高温强度的同

时, 也造成可开动的滑移系数目有限、超结构位错柏氏矢量大、位错交滑移困难, 使合金塑性和韧性偏低。解决 Ti₃Al 合金和 Ti₂AlNb 合金脆性、提高塑性加工变形能力、并探索相应的制备及加工技术是实现实用化的前提。

在我国“863”高技术新材料项目的支持下, 钢铁研究总院分别于“七五”和“九五”期间先后启动 Ti₃Al 合金和 Ti₂AlNb 合金的研究。通过系统的合金化研究和组织-性能关系研究, 探索出使合金塑性、韧性以及工艺性能显著改善的合金成分设计和组织设计, 确立具有工程应用意义的合金牌号, 合金综合性能达到国

际领先水平。进而,在我国军工型号任务需求的牵引下和军工配套项目的支持下,依据国内生产设备条件,建立合金制备和加工的基本工艺技术,并针对特定型号部件的结构要求和工况条件,与相关单位合作进行广泛的应用性研究,目前已取得全面进展,多种型号的部件已进入试车考核阶段,其中部分部件顺利通过全面考核验证,得到正式应用。本文作者将着重介绍钢铁研究总院在 Ti₃Al 合金和 Ti₂AlNb 合金在合金成分设计与性能水平、制备与加工技术以及应用研究方面的进展。

1 合金的成分设计与力学性能

1.1 Ti₃Al 合金

在 Ti₃Al 合金成分设计方面,钢铁研究总院系统调整 Al 含量、Nb 合金化以及多种配比组合的 Nb-V-Mo 合金化的研究,先后试制 Ti-24Al-14Nb-3V-0.5Mo (摩尔分数, %)、Ti-24Al-14Nb-3V、Ti-24Al-17Nb-1Mo、Ti-23Al-17Nb 等试验合金,依据综合改善合金强度、塑性、韧性、抗蠕变、抗疲劳和抗氧化等性能,简化制备工艺和提高加工变形性能,以适于工程应用的原则,最终确定 Ti-23Al-17Nb 的成分设计。该成分合金的密度为 4.9 g/cm³,企业牌号为 TAC-1B 合金,新订的国标牌号为 JG1302。该合金与美国研制的 Ti-24Al-11Nb(α_2 合金)和 Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo(超 α_2 合金)相比,由于添加更多的稳定 β 相的合金元素 Nb,而使合金常规组织由 $\alpha_2 + B2$ 两相变为 $\alpha_2 + B2 + O$ 三相,加之 O 相的强度和变形能力优于 α_2 相的,可以通过组织设计提高合金的性能。该合金通过适当的热变形和热处理工艺可获得均匀细化的三相双态组织,其力学性能和工艺性能都全面超过美国的 α_2 和超 α_2 合金^[3-4]。该合金在不同温度条件下的拉伸性能见表 1,其它主要力学性能见表 2。从表 1 和 2 中可以看到,即使在 -100 的低温条件下该合金仍具有良好的塑性和韧性;在 960 具有高达 1 150%的超塑性;尽管合金强度随温度的提高而减小,但在 650 及以上温度,强

度均显著高于传统的高温钛合金,并具有良好的抗疲劳和高温持久性能,到 900 仍有较大的抗拉强度(290 MPa)。另外,该合金合金在 850 大气暴露 100 h 的氧化质量增加小于 1.5 mg/cm²,达到完全抗氧化级别。

表 1 Ti-23Al-17Nb 合金的拉伸性能
Table 1 Tensile properties of Ti-23Al-17Nb alloy

$\theta/$	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$
-100	1 100	945	10
-80	1 110	925	11
-60	1 100	935	13
-40	1 030	880	15
RT	1 160	940	16
650	865	605	17
750	555	410	18
850	455	220	20
900	290	120	60

1.2 Ti₂AlNb 基合金

在 Ti₂AlNb 合金成分设计方面,钢铁研究总院系统进行调整 Al 和 Nb 含量以及添加 Ta 的合金化研究,先后试制 Ti-22Al-23Nb、Ti-22Al-25Nb、Ti-22Al-27Nb、Ti-22Al-24Nb-3Ta、Ti-22Al-20Nb-7Ta 等试验合金,依据综合改善合金力学性能和抗氧化等性能、降低密度、减小成本、简化制备工艺和提高加工变形性能,以适于工程应用的原则,最终确定 Ti-22Al-25Nb 的成分设计。该成分合金密度为 5.3 g/cm³,企业牌号为 TAC-3A 合金,新订的国标牌号为 JG1201。该合金在不同温度条件下的拉伸性能如表 3 所列,其它主要力学性能见表 4。从表 3 和 4 中可看出,该合金在室温和高温条件下具有良好的塑性和韧性,室温断裂韧性达到 39 MPa·m^{1/2};在整个温度范围内,强度、抗疲劳和高温持久性能较 Ti₃Al 合金均有明显提高,到 900 时,抗拉强度仍为 370 MPa。另外,该合金在 750 暴露 100 h 时,氧化质量增加小于 1 mg/cm²,达到完全抗氧化级别;在 850 暴露 100 h 时,氧化质量增

表 2 Ti-23Al-17Nb 合金的其它力学性能

Table 2 Other mechanical properties of Ti-23Al-17Nb based alloy

$K_{IC}/$ (MPa·m ^{1/2})	Fatigue strength after 10 ⁷ cycle, σ_{-1}/MPa		Stress rupture life, τ/h			Impact energy, $a_k/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$			Superplasticity, $\delta/\%$
	RT	600	600 360 MPa	600 400 MPa	650 320 MPa	RT	-100	-196	960
28	560	460	739	150	312	9.0	5.5	2.0	1 150

表 3 Ti-22Al-25Nb 合金的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of Ti-22Al-25Nb alloy

$\theta/$	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$
RT	1 150	1 070	11.5
400	1 010	900	20.0
500	1 000	880	20.5
600	930	835	21.0
650	885	795	21.0
700	840	700	19.0
750	800	645	24.0
900	370	270	60.0

加也只有 2.686 8 mg/cm²，达到抗氧化级别^[3, 5]。

2 合金制备加工技术

近十年来，在以航空航天领域应用的推动下，钢铁研究总院在 Ti₃Al 和 Ti₂AlNb 基合金韧化及强化取得突破性进展、获得国际领先水平的合金综合性能的基础上，依据国内钛合金生产设备条件，初步建立合金制备加工工艺技术和小批量供货的能力。并针对特定型号部件的结构要求和工况条件，进行广泛的应用性研究。

2.1 合金熔炼制备技术

在合金熔炼制备方面，立足于国内现有钛合金熔炼设备，采用真空自耗和真空凝壳多重组合熔炼方法，先后形成百公斤级和一吨级的合金锭熔炼制备工艺技术。通过对原材料纯净度以及电极制备、熔炼工艺过程的控制，有效克服合金元素的熔点和密度相差大带来的不利影响，实现合金锭成分准确均匀及高纯净度。表 5 所列为一吨级 Ti₂AlNb 合金铸锭成分分析结果。

2.2 合金变形加工技术

在热加工成型方面，依据铸锭均匀化热处理 → B2 相区温度开坯 → α₂ + B2 或 α₂ + B2 + O 相区温度二次热变形的基本流程，对两种合金的变形行为以及热成形棒、板、环及模锻件的各工艺环节进行系统研究。

在合金热变形行为研究方面，通过 Ti₂AlNb 基合

金 B2 相区温度和 α₂ + B2 及 α₂ + B2 + O 相区温度的等温热压缩试验，建立合金稳态变形时的动力学本构关系，并结合 OM、SEM 和 TEM 等微观分析手段，应用耗散结构理论所建立的动态材料模型，系统地研究合金高温变形行为及组织演变规律，建立合金在铸锭开坯和二次变形时的热加工图。并在此基础上确定合金最佳变形和组织控制条件，优化合金开坯和二次热变形的基本工艺参数^[6]。

在合金开坯技术研究方面，依据锭型规格和成形件的具体情况，先后探索自由锻造、近静压锻造和挤压等开坯工艺及相应的硬/软包套方法。通过合理加热温度、变形速率和变形量控制，有效解决开坯过程中各部分温升、温降的不同以及变形不均匀而造成易开裂和组织不均匀等问题，成材率得到显著提高。

在型材热加工成形研究方面，通过合理的保温措施及变形量和变形速率的控制，显著改善合金的成材率及变形组织。所探索出的成形加工前的预处理工艺使合金的热变形性能得到显著改善，创新性成形后，热处理工艺使型材的组织性能得到充分的保障。以此已建立合金棒材、板材、环件及模锻件的加工工艺技术。两种合金均已研制出直径为 10 ~ 230 mm 的棒材、宽幅达 800 mm 的热轧板材和外径大于 700 mm 的环形件，其中包括高度达 500 mm、直径为 500 mm 的超高环形件。航空发动机用 Ti₃Al 合金三角拉杆模锻件、Ti₂AlNb 合金叶片模锻件及连轴转子模锻件也已试制成功。

钢铁研究总院已探索出 Ti₃Al 合金和 Ti₂AlNb 合金的薄板及箔材冷轧成形技术^[7]。通过独创的预处理工艺可使合金的冷加工塑性及冷轧成材率大幅提高。目前，Ti₃Al 合金已研制出 0.08 mm×100 mm×500 mm 的箔材，Ti₂AlNb 合金已研制出 1.5 mm×900 mm×200 mm 的冷轧板材、0.15 mm×300 mm×500 mm 和 0.10 mm×100 mm×300 mm 的箔材。图 1 所示为两种合金的部分成形产品。

3 部件成形技术

结合 Ti₃Al 和 Ti₂AlNb 基合金在军工型号中的应

表 4 Ti-22Al-25Nb 合金的其它力学性能

Table 4 Other mechanical properties of Ti-22Al-25Nb alloy

$K_{IC}/$ (MPa·m ^{1/2})	Fatigue strength after 10 ⁷ cycle, σ_{-1}/MPa		Stress rupture life, τ/h			Impact energy, $a_k/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$			Superplasticity, $\delta/\%$
	RT	650	600 500 MPa	650 360 MPa	650 400 MPa	RT	650	750	960
39	549	600	103	281	148	11	56	77	700

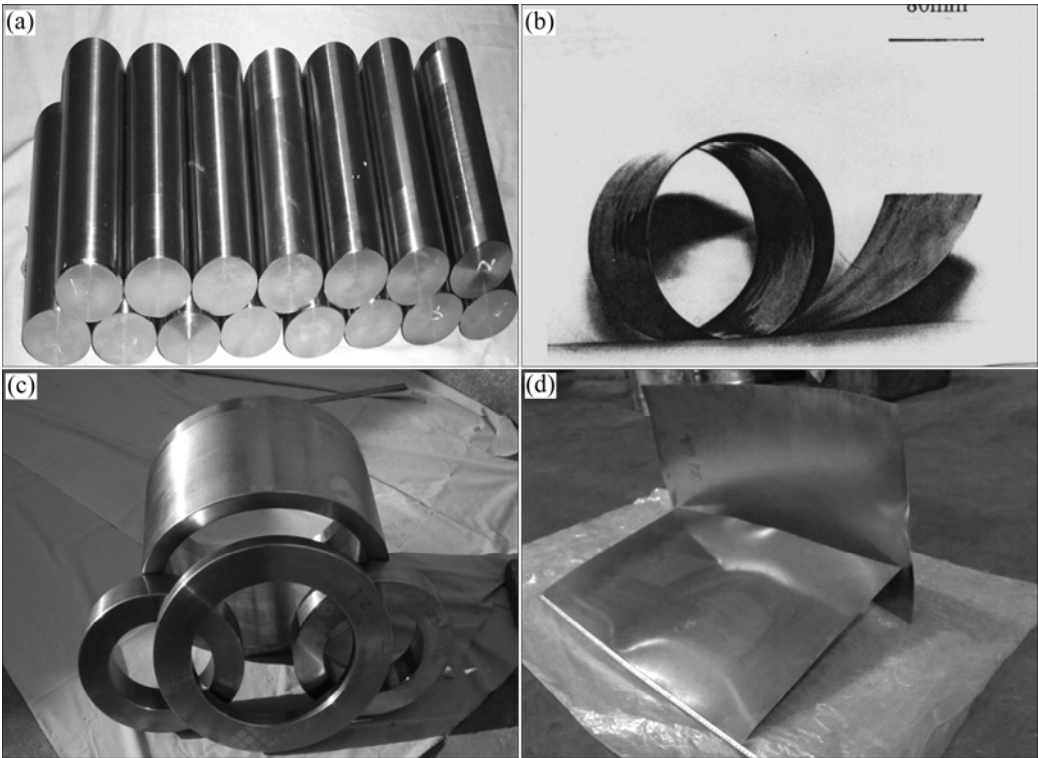


图 1 Ti₃Al 合金和 Ti₂AlNb 合金成形产品照片

Fig.1 Photos of products of Ti₃Al (a), (b) and Ti₂AlNb (c), (d) based alloys: (a) Rod; (b) Foil; (c) Ring; (d) Sheet

表 5 Ti-22Al-25Nb 合金吨级铸锭成分分析结果

Table 5 Chemical analysis results of Ti-22Al-25Nb alloy ingots of with mass about 1 t

Position	Mole fraction/%		Mass fraction/%	
	Al	Nb	O	N
Upper	21.89	25.33	0.065	0.002
Middle	22.24	25.21		
Lower	22.19	24.92	0.071	0.002
Average	22.10	25.15		

用，钢铁研究总院与相关单位通力合作，对这两种合金的焊接技术和钣金成形技术进行广泛探索。

在焊接方面，目前两种合金均已形成合金自身之间及与其钛合金、铌合金等异种金属材料之间的电子束焊、激光焊、氩弧焊和钎焊工艺。其中 Ti₃Al 合金自身之间及其与钛合金、铌合金之间的电子束焊和钎焊工艺、Ti₂AlNb 合金自身电子束焊和氩弧焊均已应用于实际部件的制造中。表 6 所列为 Ti₃Al 和 Ti₂AlNb 合金电子束焊缝的拉伸性能。

在钣金成形方面，Ti₃Al 合金成功进行多种特定构件超塑成形、夹层结构的超塑成形/扩散连接、筒形

表 6 Ti₃Al 合金和 Ti₂AlNb 合金电子束焊缝拉伸性能

Table 6 Tensile properties of Ti₃Al and Ti₂AlNb based alloys electron beam welding

Alloy weld	$\theta/^\circ$	σ_b/MPa	$\delta/\%$	Fracture location
Ti ₃ Al	RT	1 010	8.0	FZ
	650	680	18.0	FZ
Ti ₂ AlNb	RT	1010	7.0	FZ
	650	675	8.5	FZ

件的热卷成形。目前，正在进行热模压成形技术的研究。其中 Ti₃Al 合金的超塑成形技术已应用于实际部件研制。Ti₂AlNb 合金也成功进行了特定构件超塑成形、热旋压成形、冷冲成形、热模压成形、以及筒形件的冷/热卷成形。其中热模压成形和热卷成形已应用于实际部件研制。图 2 所示为两种合金部分钣金成形实验件。

4 应用进展

目前，钢铁研究总院研制的 Ti₃Al 合金(Ti-23Al-

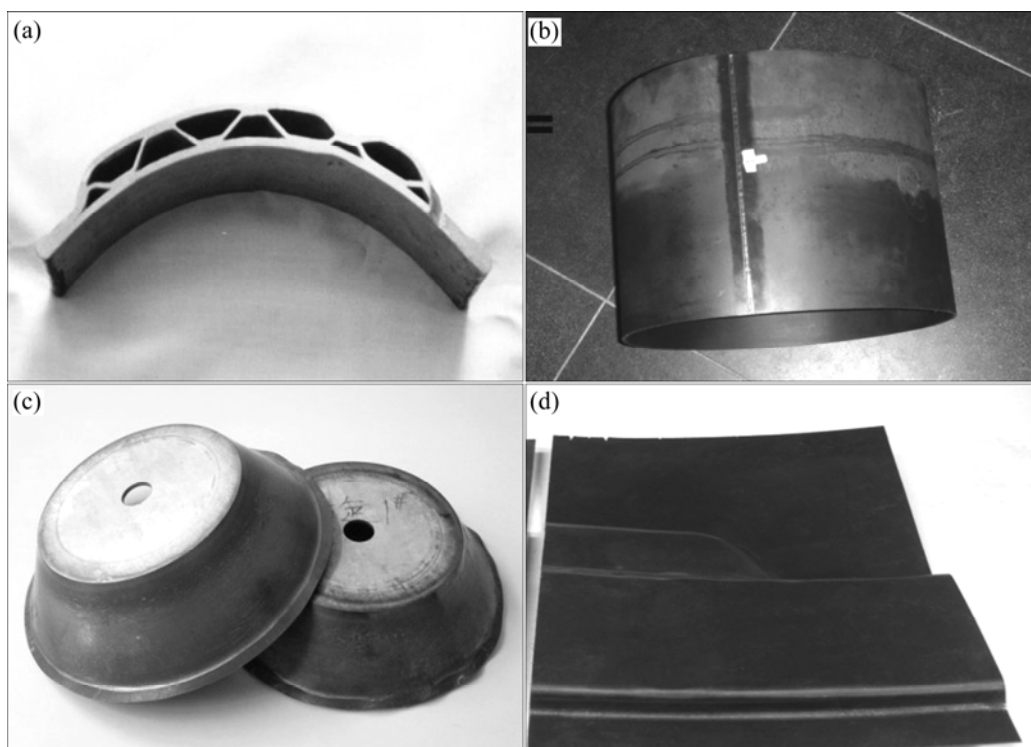


图2 Ti_3Al 合金和 Ti_2AlNb 合金钣金成形实验件

Fig.2 Photos of sheet testing components of Ti_3Al (a), (b) and Ti_2AlNb (c), (d) based alloys

17Nb 合金)和 Ti_2AlNb 合金(Ti-22Al-25Nb 合金)在我国航天及航空领域的应用工作已取得多项成果。在 Ti_3Al 合金方面,以该合金制造天线展开机构、锁紧机构及斜螺钉等零部件在我国神舟飞船中得到实际应用;该合金的涡轮泵壳体 and 发动机喷管延长段分别成功应用于两种新型导弹中;该合金卫星发动机部件的考核工作正在顺利推进;航空发动机所需的该合金模锻部件已通过台架考核,组合焊件的研制工作正在顺利推进。在 Ti_2AlNb 合金方面,以该合金制造的构件已成功应用于我国卫星发动机中;另一种卫星发动机构件和两种导弹发动机部件均已通过台架试车;航空发动机机匣试验件已试制成功,另一钣金焊接组合件正在研制中。

5 展望

由于应用轻质高温材料可实现推进系统轻质化、进而促进飞行器性能的进一步提升,因此,随着我国航空航天事业的发展, Ti_3Al 合金和 Ti_2AlNb 合金已开始得到越来越多的重视。面对可望形成的更为广泛的应用,尽管我们已在合金成分与组织设计、制备与加

工技术及应用取得了上述进展,但是仍有较多问题尚需通过深入系统的研究予以解决,近期有待开展的工作重点集中于以下几个方面。

1) 在合金制备与加工技术的工程化方面。亟待探索更大规格的铸锭熔炼工艺,有效解决因锭型扩大所暴露出的成分偏析、间隙杂质含量过高、组织粗大及不均匀问题等冶金质量问题;同时需探索理想的大规格铸锭开坯技术,以提高其成材率和组织均匀性。

2) 在提高合金型材组织性能稳定性方面。亟待对现有成形和热处理工艺细节进行规范,并进一步探索和完善合金棒材热轧、板材包覆轧制、饼盘件等温锻造等能够改善组织性能的稳定加工成形工艺。

3) 结合新的实际应用,对合金诸如阻燃、耐磨损、抗应力腐蚀等特殊性能进行深入研究,对合金在特定工况条件下的损伤失效模式进行验证分析,并建立系统全面的合金性能数据库。

REFERENCES

- [1] 李世琼, 邹敦叙, 张继, 张建伟, 张志宏. Ti-Al 系金属间化合物合金的研究与开发[J]. 钢铁研究学报, 1999(增刊): 389-394.

- LI Shi-qiong, ZUO Dun-xu, ZHANG Ji, ZHANG Jian-we, ZHANG Zhi-hong. Development and research of Ti-Al intermetallic compounds [J]. Journal of Iron and Steel Research, 1999(S): 389-394.
- [2] 李世琼, 张建伟, 程云君, 梁晓波. Ti_3Al 和 Ti_2AlNb 基金属间化合物结构材料研发现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(S3): 104-109.
- LI Shi-qiong, ZHANG Jian-wen, CHENG Yun-jun, LIANG Xiao-bo. Current status on development of Ti_3Al and Ti_2AlNb intermetallic structural materials [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(S3): 104-109.
- [3] BANERJEE D. Intermetallic compounds: Practice (Vol.2) [M]. New York: John Wiley and Sons Ltd., 1994: 91-131.
- [4] 张建伟, 张海深, 张学成, 梁晓波, 程云君, 李世琼. Ti-23Al-17Nb 合金双态组织的控制及其对力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(2): 372-376.
- ZHANG Jian-wei, ZHANG Hai-shen, ZHANG Xue-cheng, LIANG Xiao-bo, CHENG Yun-jun, LI Shi-qiong. Control of duplex-microstructure of Ti-23Al-17Nb alloys and its effect on mechanic properties [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(2): 372-376.
- [5] LI Shi-qiong, CHENG Yun-jun, LIANG Xiao-bo, ZHANG Jian-wei. Recent work on alloy and process development of Ti_2AlNb based alloys [J]. Materials Science Forum, 2005, 475/479: 559-562.
- [6] LIANG Xiao-bo, LI Shi-qiong, CHENG Yun-jun, ZHANG Jian-wei. Flow stress behavior and deformation characteristics of Ti-22Al-25Nb alloys at elevated temperature [J]. Materials Science Forum, 2005, 475/479: 825-828.
- [7] 张建伟, 程云君, 梁晓波, 李世琼. (α_2+B_2+O) 三相区温度变形的 Ti_3Al 基板材的组织 and 性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S3): 561-564.
- ZHANG Jian-wei, CHENG Yun-jun, LIANG Xian-bo, LI Shi-qiong. Study on the microstructure and properties of the rolling sheets of Ti_3Al based alloy processed in (α_2+B_2+O) phase field [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S3): 561-564.

(编辑 李艳红)