钒钛材料与应用

α+β 两相钛合金的动态压缩性能对抗弹性能的影响分析

杨 柳，王 莹，吴静怡，刘 昕

（成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司，四川 成都 610300）

摘 要：以研究钛合金材料动态压缩性能对抗弹性能的影响为目的，选用 TC4、TC6、TC11 三种不同强度级别的 α+β 两相钛合金为研究对象，采用动态压缩试验、准静态拉伸试验以及 5.8 mm 口径实弹靶试测试等方法，对材料微观组织、力学性能、动态压缩性能、弹坑形貌进行了对比分析。结果显示，TC4、TC6 和 TC11 三种 α+β 两相钛合金经过固溶时效热处理后，TC11 钛合金的拉伸强度和动态压缩强度最高，分别达到 1 258 MPa 和 1973 MPa，采用 12 mm 厚度的三种钛合金靶板进行靶试测试，对垂直入射的 5.8 mm 口径钢芯弹均进行了有效防护，TC11 钛合金开坑深度 2.4 mm，开坑尺寸 7.5 mm×5.5 mm，均小于其他两种钛合金靶板的弹坑尺寸，对钢芯弹的侵彻有更好的防护作用。针对普通钢芯弹的防护，材料的动态压缩性能与其抗弹性能存在对应关系，动态压缩强度越高，临界断裂应变 ε_{cr} 越大，受冲击过程吸收的能量越多，抗弹性能越好。

关键词：α+β 两相钛合金；动态压缩性能；抗弹性能；固溶时效强化

中图分类号：TF823 **文献标志码：**A **文章编号：**1004−7638(2022)04−0042−06

DOI：10.7513/j.issn.1004-7638.2022.04.007 **开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID)：**

听语音 聊科研 与作者互动

Influence of dynamic compression properties on ballistic performance of α+β two-phase titanium alloy

Yang Liu, Wang Ying, Wu Jingyi, Liu Xin

(Chengdu Advanced Metal Materials Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, Sichuan, China)

Abstract: In order to study the effect of dynamic compression properties on ballistic resistance of titanium alloy materials, three different strength grades of α+β two-phase titanium alloys, TC4, TC6 and TC11, are selected for the dynamic compression test, quasi-static tensile test and 5.8 mm caliber bullet target test to compare and analyze the microstructure, mechanical properties, dynamic compression properties and crater morphology. The results show that TC4, TC6 and TC11 strengthened by solution and aging heat treatment, the tensile strength and dynamic compressive strength of TC11 titanium alloy are the highest, reaching 1 258 MPa and 1 973 MPa, respectively. Three kinds of titanium alloy target plates with a thickness of 12 mm are used for target test, and the 5.8 mm caliber bullet with vertical incidence is effectively protected. The pit depth of TC11 titanium alloy is 2.4 mm and the pit size is 7.5 mm × 5.5 mm, which is smaller than the crater size of the other two titanium alloy, and shows a better protective effect. For the protection of 5.8 mm caliber bullet, there is a corresponding relationship between the dynamic compression performance and its elastic resistance. The higher of the dynamic compression strength and the critical fracture strain, the more energy absorbed by the impact process,

收稿日期：2022−03−21

作者简介：杨柳（1987—），男，重庆人，硕士，高级工程师，主要从事钛合金材料开发，E-mail:yang512 liu@126.com。

and the better the ballistic performance.

Key words: α+β two-phase titanium alloy, dynamic compression performance, ballistic performance, solution and aging strengthening

0　引言

钛合金因具有高的比强度, 良好的塑性、韧性、抗腐蚀性, 加之优异的抗弹性能而被用作防护装甲材料, 其已在 M1A2 艾布拉姆斯主战坦克、M2 布雷德利装甲运兵车上实现了应用。目前, 对钛合金材料动态力学性能和抗弹性能的研究, 主要以 TC4 钛合金为主。Singh 等[1] 的研究表明, α+β 区锻造的 TC4 钛合金具有良好的强塑性匹配特征, 抗弹性能优异。Lee 等[2] 研究了 TC4 钛合金双态和等轴 2 种组织靶板的抗弹性能, 结果表明: 双态组织的抗弹性能优于等轴组织, 在双态组织靶板中产生的绝热剪切带数量较少并局限于距表面较浅的区域内。Zheng 等[3] 研究了微观组织对 TC4 钛合金抗弹性能的影响, 研究表明: 转变 β 区上分布着较宽 α 片层的双态组织具有最好的抗弹性能。Sukumar 等[4] 的研究发现, 强度和硬度明显高于 TC4 钛合金的 β-CEZ 钛合金, 抗弹性能却与之相近。杨凯文等[5] 通过 α+β 区锻造和 β 区锻造获得了双态组织和片层组织 TC21 钛合金, 研究了热加工工艺对其动态力学性能和抗弹性能的影响。笔者以 TC4 钛合金作为基础材料, 选用了强度级别更高的同类型两相钛合金 TC6 和 TC11 作为对比材料, 进行了力学性能和动态压缩性能的表征分析, 并通过靶试试验, 分析了材料性能对抗弹性能的影响, 为抗弹防护用钛合金材料组织性能调控工艺优化的制定提供参考依据。

1　试验

1.1　试验材料

选用某公司工业生产的 TC4、TC6、TC11 三种 α+β 两相钛合金热轧板材(轧制态)作为动态压缩试验和靶试试验材料, TC4、TC6 钛合金板材原始厚度 12 mm, TC11 钛合金板材原始厚度 14 mm, 三种钛合金的化学成分如表 1 所示。DSC 测试的材料相变温度分别为 983.3 ℃(TC4)、986.1 ℃(TC6)、1 020.9 ℃(TC11)。为了使材料强度得到进一步提高, 采用 β 相区固溶+时效的热处理方式对材料进行强化处理, 具体热处理工艺如下:

TC4：990 °C/1 h + WQ + 550 °C/6 h + AC　(1)

TC6：1 000 °C/1 h + WQ + 550 °C/6 h + AC (2)

TC11：1 030 °C/1 h + WQ + 650 °C/6 h + AC (3)

表 1　三种 α+β 两相钛合金的化学成分

Table 1　The chemical compositions of materials　%

材料	Al	V	Cr	Mo	Si	Fe	Zr	Ti
TC4	5.95	4.12				0.25		余量
TC6	6.05		1.47	2.62	0.24	0.50		余量
TC11	6.52			3.36	0.25	0.20	1.55	余量

将热处理后的三种钛合金板材都加工为 100 mm×200 mm 尺寸规格, TC11 板材厚度机加工到 12 mm, 作为靶试试验的靶板。

1.2　试验方法

对试样进行磨抛处理后进行腐蚀, 腐蚀液成分为 HF：HNO_3：H_2O=1：3：16 的混合腐蚀液, 浸蚀时间 10 ~ 15 s, 发现试样光亮表面变灰暗后, 立即用大量清水和酒精冲洗, 随后采用 LEICA DM6000M 光学显微镜进行金相组织观察。

采用 Instron5569 电子拉伸试验机, 按 GB/T 228—2010《金属材料 拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法》对三种热处理后的板材沿横向取样, 进行力学性能测试, 获得抗拉强度、屈服强度以及伸长率。

在钛合金板材上沿着厚度方向取 Ø5 mm×5 mm 的圆柱体试样, 进行动态压缩试验。动态压缩试验在Ø14.5 mm 分离式 Hopkinson Bar 上进行, 采用 200 mm 撞击杆, 打击气压为 3 ~ 5 MPa, 通过控制打击气压使样品的应变率维持在 2 500 ~ 3 000 s^{-1}, 每组材料测试获得至少两组有效数据, 计算获得试样在动态轴向压缩加载条件下的动态真应力-

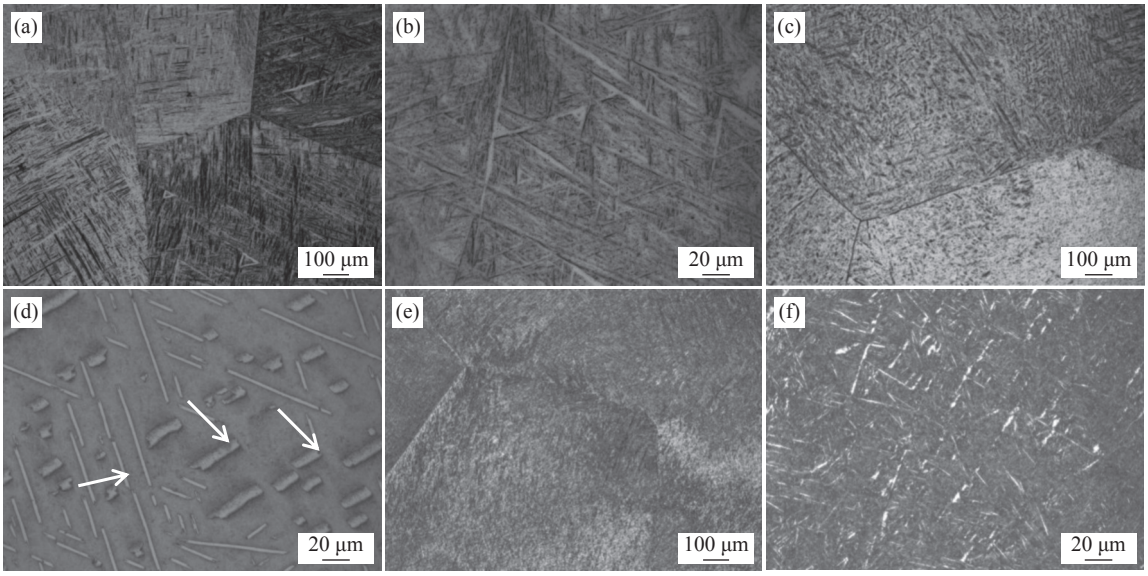
应变曲线。

在靶场进行靶试试验，采用 87 式自动步枪和配套的 5.8 mm 口径普通钢芯弹，子弹初速度为 900 ~ 930 m/s，射击条件为 100 m 射距、0°入射角，命中靶板且垂直着弹记为有效命中。

2　结果及分析

2.1　组织与拉伸性能

TC4、TC6、TC11 经过 β 相区固溶后水冷时效处理的金相组织如图 1 所示，可以看出在相变温度以上加热保温时，组织中的晶粒明显粗化，可以明显观察到保留下来的原始 β 晶界，但是由于添加合金类型和含量的差异，导致原始 β 粗大晶粒内部的亚结构有明显的差异。从图 1(a)(b)中可以观察到，TC4 钛合金晶粒内部为典型的交叉排列分布的针状马氏体 α'。经过 β 相区固溶、水冷时效处理后，TC6 钛合金组织中可以观察到棒状或条状 α 相，该组织为非平衡态的马氏体 α'组织在热处理过程中向平衡态转变并粗化所形成，如图 1(d)中箭头标注所示，并且形成的 α 相之间具有严格的取向关系。而 TC11 钛合金晶粒内部可以观察到由 β 组织转变形成的白色次生 α 相以及大量细小析出物，如图 1(f)所示。



(a)TC4 的典型针状马氏体 α ' 组织,×100; (c)TC6 晶粒内部的棒状或条状 α 相, ×100; (e)TC11 中的白色次生 α 相和大量细小析出物, ×100;(b)(d)(f) 依次为 (a)(c)(e) 的放大, ×500

图 1　三种钛合金材料的金相组织

Fig. 1　The metallographic structure of three titanium alloy materials

正是由于组织的精细结构不同，导致三种钛合金的拉伸性能也有明显差异。热处理后三种钛合金的准静态拉伸性能如图 2 所示，拉伸强度大小依次为 TC4<TC6<TC11，强度最高的 TC11 比 TC4 高近 200 MPa，但是伸长率只有 2.5%，表明 TC11 在该热处理工艺条件下，是一种高强低韧材料，其他两种钛合金伸长率也只有 4.5% 和 3%，塑性较差。因此，采用 β 相区固溶+水冷+时效的热处理工艺，可以使得材料强度大幅度提高，但是粗大的晶粒以及亚结构对位错的钉扎使得位错滑移十分困难，导致材料塑性急剧恶化。

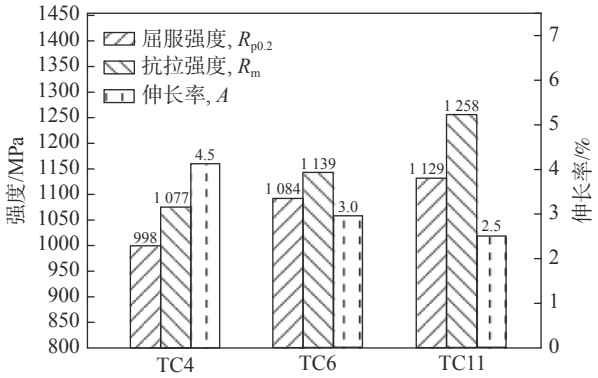
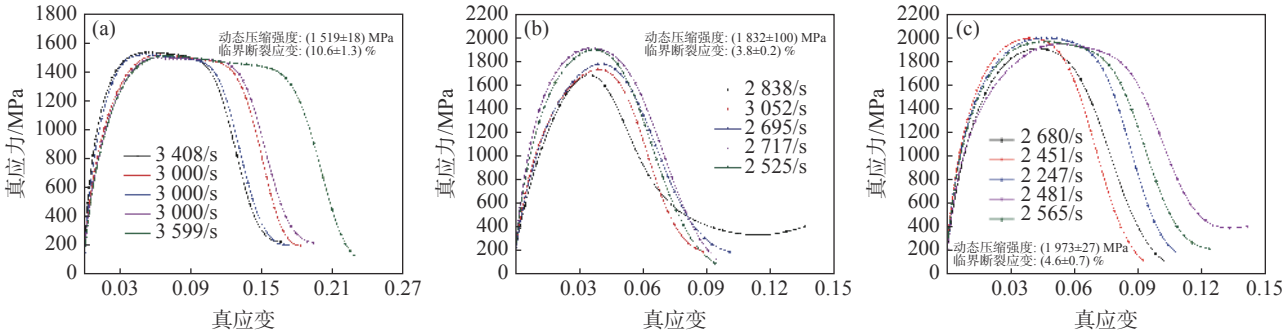


图 2　三种钛合金材料的拉伸性能

Fig. 2　The tensile properties of three titanium alloy materials

2.2　动态压缩性能

对 TC4 、TC6、TC11 三种钛合金材料的试样进行应变速率为 2 500 ~ 3 000 s^{-1} 的动态压缩试验, 每种材料测试五组数据, 获得的动态真应力-应变曲线如图 3 所示, TC4 在该应变速率条件下进行压缩, 如图 3(a)所示, 可以观察到真应力-应变曲线存在屈服平台, 临界断裂应变(ε_{cr})达到 10.6%, 压缩过程发生了明显的塑性变形过程, 动态压缩强度(σ_d)为 1 519 MPa。TC6 和 TC11(图 3(b)、(c)) 的动态压缩曲线都没有出现屈服平台, 临界断裂应变分别为 3.8% 和 4.6%, 仍然表现出脆性断裂特性, 动态压缩强度较 TC4 有更大幅度的提高, 分别达到 1 832 MPa 和 1 973 MPa。



(a) TC4; (b) TC6; (c) TC11

图 3　三种钛合金材料的动态压缩曲线

Fig. 3　The tensile properties of three titanium alloy materials

2.3　靶试试验

对 TC4、TC6 和 TC11 靶板进行靶试测试, 每块靶板取两发有效命中, 分别观察靶板的正面(迎弹面)和背面的宏观损伤情况, 如图 4 所示, 三种钛合金靶板在被 5.8 mm 口径钢芯弹以 900 ~ 930 m/s 、0°入射角的条件侵彻后, 均未被穿透, 在迎弹面的着弹位置形成了外观形貌不同的弹坑。对比分析弹坑宏观形貌, 从图 4(a)可以看出, 子弹击中 TC4 靶板表面后形成椭圆形弹坑, 经测量两个弹坑侵入深度约 4 mm, 如表 2 所示, 开坑尺寸分别为 15.0 mm×11.5 mm 和 13.0 mm×14.5 mm, 背面可以观察到明显的背凸(图 4(d)), 而 TC6 和 TC11 钛合金靶板形成的弹坑尺寸大小明显小于 TC4 靶板(图 4(b)、(c)), 子弹侵入深度仅有 3 mm 和 2.5 mm, 靶板背面有轻微背凸(图 4(e)、(f)), 表明 TC6 和 TC11 较 TC4 靶板对钢芯弹的侵彻能够起到更好的防护作用。

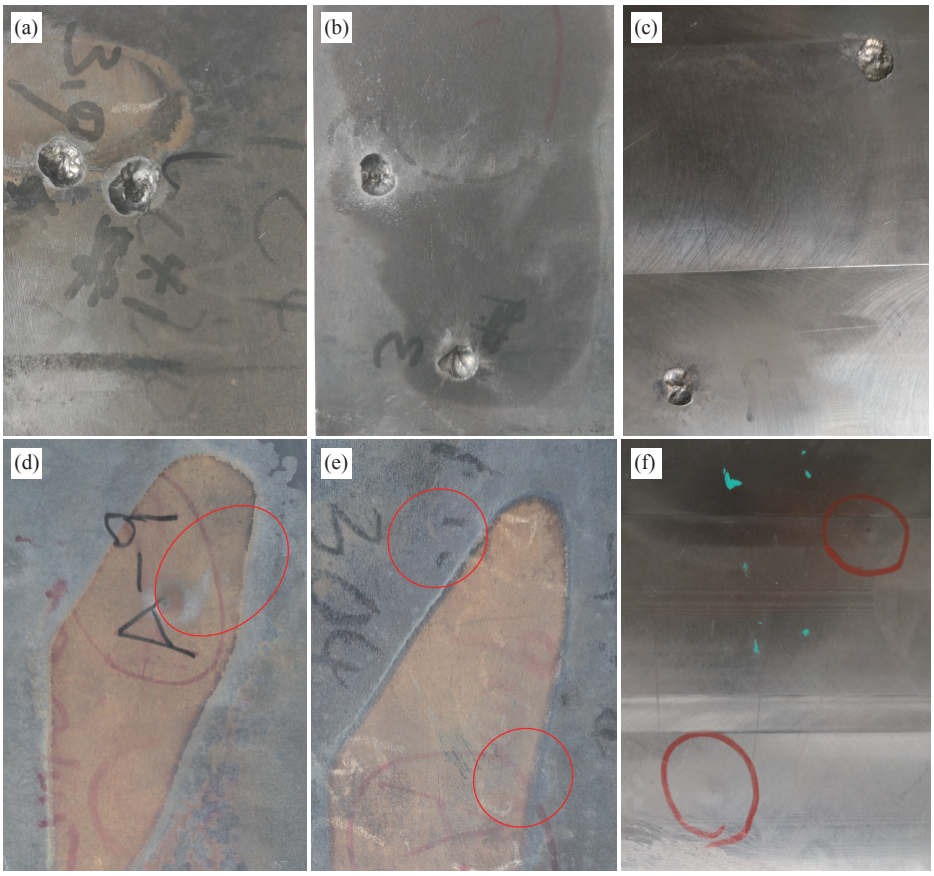
2.4　分析与讨论

子弹穿透靶板的过程可以分为三个阶段: 开坑-扩孔-崩落, 如果子弹无法穿透靶板, 表明子弹对靶板作用的能量不足以完成这三个阶段, 因此靶板在受到高速冲击过程中能够吸收能量的大小, 将很大程度上决定材料的抗弹性能。动态压缩曲线表征了材料在高速压缩过程中的压应力和压缩应变的关系, 曲线的积分面积可以看作为压缩过程中吸收的能量, 因此动态压缩强度 σ_d 增大或临界断裂应变 ε_{cr} 增大, 都可以使吸收的能量增大, 由此可以看出, 具有优异抗弹性能的材料应该在保障足够大动态压缩强度 σ_d 的同时, 还应具有高的临界断裂应变 ε_{cr}。

文中主要对比了 TC4、TC6 和 TC11 三种钛合金针对于普通钢芯弹的抗弹性能, 相关研究表明[6], 普通钢芯弹由于弹体本身强度不高, 会使在击中强度足够高的靶板时, 弹丸会破碎或反弹, 大幅度降低其侵彻能力, 因此, 大幅度提高材料强度, 是增强对普通钢芯弹防御能力的有效途径。采用 β 相区高温固溶+水淬+时效处理后, 三种 α+β 两相钛合金的拉伸强度都得到了大幅度提升, 同时动态压缩强度也达到了较高水平, TC11 钛合金的动态压缩强度 σ_d 达到了近 2000 MPa, 从结果来看, 材料的准静态拉伸强度越高, 动态压缩强度也越高。

结合三种钛合金靶板在相同厚度条件下对 5.8 mm 口径普通钢芯弹的防御效果来看, 侵入深度最大的 TC4 钛合金为 4.1 mm, 仅为靶板厚度的三分之一, 表明该条件下子弹穿透深度较浅, 对靶板的损伤程度小, 但是并不表明大于 4.1 mm 厚度的靶板便能够起到等效防护作用, 残余厚度对靶板的整体防护效果同样起到关键作用。由于三种钛合金靶板的塑性都较差, 容易发生脆性剪切断裂, 在某个临

界厚度条件下，残余厚度一旦不足以抵抗子弹的冲击时，将以冲塞破坏的形式[7] 直接被穿透。由此推断，在厚度足够大的条件下，可以近似将材料看作半无限厚，子弹以 0°入射角垂直侵入深度越小，材料被穿透的临界厚度将越小，表现为在该条件下的抗弹性能越好。综上分析可以得出，针对普通钢芯弹的防护，材料的动态压缩强度与其抗弹性能存在对应关系，动态压缩强度越高，抗弹性能越好，因此，试验选用的三种 α+β 两相钛合金中，TC11 钛合金表现出最优异的抗弹性能。



靶板正面 (a) TC4; (b) TC6; (c) TC11; 靶板背面 (d) TC4; (e) TC6; (f) TC11

图 4　不同钛合金靶板靶试后正面和背面形貌

Fig. 4　Front and back surface morphology of different titanium alloy target plates after target test

表 2　三种钛合金靶试后弹坑尺寸参数统计

Table 2　Statistics of crater size parameters of three titanium alloy targets after test

材料	侵入深度/mm	开坑尺寸/(mm×mm)	背面宏观形貌
TC4	3.9、4.1	15.0×11.5 、13.0×14.5	明显背凸
TC6	3.0、3.0	9.8×7.2 、9.0×7.5	轻微背凸
TC11	2.4、2.5	7.5×5.5、7.3×6.3	轻微背凸

3　结论

1）TC4、TC6 和 TC11 三种 α+β 两相钛合金经过固溶时效热处理后，TC11 钛合金的拉伸强度和动态压缩强度最高，分别达到 1 258 MPa 和 1973 MPa，微观组织可以观察到晶粒内部存在有次生 α 相以及大量细小析出物。

2）采用 12 mm 厚度的三种钛合金靶板进行靶试测试，对垂直入射的 5.8 mm 口径钢芯弹均进行了有效防护，靶板弹坑宏观形貌对比来看，TC6 和

TC11 钛合金靶板形成的弹坑尺寸大小明显小于 TC4 靶板, 对钢芯弹的侵彻有更好的防护作用。

3)针对普通钢芯弹的防护, 材料的动态压缩性能与其抗弹性能存在对应关系, 动态压缩强度越高, 临界断裂应变 ε_{cr} 越大, 受冲击过程吸收的能量越多, 抗弹性能越好。

参考文献

[1] Singh B B, Sukumar G, Bhattacharjee A, *et al*. Ballistic impact behaviour of β-CEZ Ti alloy against 7.62 mm armour piercing projectiles[J]. Materials and Design, 2012, 36: 640−645.

[2] Lee D G, Lee Y H, Lee S, *et al*. Dynamic deformation behavior and ballistic impact properties of Ti-6Al-4V alloys having equiaxed and bimodal microstructures[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35A: 3103−3109.

[3] Zheng Chao, Wang Fuchi, Cheng Xingwang, *et al*. Capturing of the propagating processes of adiabatic shear band in Ti-6Al-4V alloys under dynamic compression[J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 608: 53−58.

[4] Sukumar G, Sigh B B, Bhattacharjee A, *et al*. Ballistic impact behaviour of β-CEZ Ti alloy against 7.62 mm armour piercing projectilesInternational[J]. Journal of Impact Engineering, 2013, 54: 149−153.

[5] Yang Kaiwen, Cheng Xingwang, Zheng Chao, *et al*. Dynamic mechanical properties and ballistic performance of TC21 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(11): 2728−2732.
(杨凯文, 程兴旺, 郑超, 等. TC21钛合金动态力学性能和抗弹性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(11): 2728−2732.)

[6] Gao Ruihua, Fan Qunbo, Wang Fuchi, *et al*. Relationship between dynamic compressive mechanical properties and ballistic performance of titanium armor materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(11): 2733−2736.
(高瑞华, 范群波, 王富耻, 等. 钛合金装甲材料动态压缩力学性能及其抗弹能力关系[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(11): 2733−2736.)

[7] Li Mingbing, Zhu Zhishou, Wang Xinnan, *et al*. Investigation of dynamic mechanical behavior and damage characteristics in TC32 alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(5): 7−13.
(李明兵, 朱知寿, 王新南, 等. TC32钛合金的动态力学性能及损伤特点[J]. 航空材料学报, 2016, 36(5): 7−13.)

编辑　唐　肖

攀钢研究院与重庆大学联办《钢铁钒钛》获国家新闻出版署批复

7 月 12 日，国家新闻出版署正式批复，由攀钢集团有限公司主管、攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司主办的中文核心期刊《钢铁钒钛》，自 2022 年 7 月起，增加重庆大学作为第二主办单位。《钢铁钒钛》于 1980 年创刊，致力于报道钒钛磁铁矿资源开发与综合利用的科技创新成果，经过 40 多年的发展，现已成为国内具有较强影响力的冶金工业类中文核心期刊，被国内外多家知名数据库收录，为行业发展作出了积极贡献。

重庆大学作为国内一流大学，与攀钢有着长期深入的合作交流。为进一步提升《钢铁钒钛》期刊影响力，加大攀钢和重庆大学在钢铁钒钛尤其是钒钛领域取得的重大科技成果宣传力度，双方经过洽谈达成了合作办刊意向。通过与四川省新闻出版局和国家新闻出版署反复汇报沟通，最终合作办刊申请成功获批。

（龙凤萍 唐肖 供稿）