

其 他

GB/T 2965-2023《钛及钛合金棒材》 标准解析

解 晨^{1,2}, 马忠贤^{1,2}, 冯军宁^{1,2}, 李 巍¹, 魏佳琦², 冯永琦^{1,2}, 胡志杰^{1,2},
马佳琨^{1,2}, 庆达嘎^{1,2}, 王若飞¹

(1. 宝鸡钛业股份有限公司, 陕西 宝鸡 721014; 2. 宝钛集团有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘 要:介绍了新版标准 GB/T 2965-2023 的修订原因和演变过程, 并从标准的主要修订点, 包含: 术语和定义、产品分类、外形尺寸及其允许偏差、热处理制度、力学性能、试验方法、取样规定、检验结果的判定等相关内容进行了解析, 为标准在后续生产、检验过程提供指导, 从而对新版标准起到推广和宣贯的作用。

关键词:钛; 钛合金; 棒材; 标准; 解析

中图分类号: TF823, G255.54 文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)05-0199-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.05.027

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

Interpretation on GB/T 2965-2023: Titanium and titanium alloy bars

Xie Chen^{1,2}, Ma Zhongxian^{1,2}, Feng Junning^{1,2}, Li Wei¹, Wei Jiaqi², Feng Yongqi^{1,2}, Hu Zhijie^{1,2},
Ma Jiakun^{1,2}, Qing Daga^{1,2}, Wang Ruofei¹

(1. Baoji Titanium Industry Company Limited, Baoji 721014, Shaanxi, China; 2. Baoti Group Company Limited, Baoji 721014, Shaanxi, China)

Abstract: In this paper the revision reasons and process evolution of new standard GB/T 2965-2023 had been briefed. And interpretation had been made on the following points such as terms and definition, product category, dimension and tolerance, heat treatment, mechanical properties, sampling and test result determination. It is hoped that this interpretation can provide guidance for production and inspection of the standard in the follow-up process.

Key words: titanium, titanium alloy, bars, standard, analysis

0 引言

GB/T 2965-2007《钛及钛合金棒材》^[1]在我国钛工业的发展进程中起到了基础的推动作用, 为化学工业、航空航天、火力、海水淡化、体育休闲用品、生活用品、船舶领域提供了大批量的钛及钛合金棒材。

随着科技工业的进步, 工业生产设备的提升, 钛及钛合金棒材、棒坯逐步向大规格方向发展, 原有的尺寸规格已无法满足现有的产品需求, 不同牌号的钛及钛合金棒材得到大力推广, 但目前仍无可执行的国家标准, 现阶段 GB/T 2965-2007 急需修订相关技术条款, 以适应工业的发展; 同时随着 GB/T 3620.1-2016《钛及钛合金牌号和化学成分》^[2]的颁

收稿日期: 2024-04-12

作者简介: 解晨, 1987 年出生, 男, 陕西延安人, 硕士, 高级工程师, 主要从事稀有金属标准化研究及材料加工, E-mail: xiechen@baoti.com。

布实施,钛及钛合金牌号也做了相应变化,也促使GB/T 2965-2007急需修订,从而完善我国钛及钛合金标准体系,为持续提高军民标准通用化进程打好基础。

目前,新版标准GB/T 2965-2023《钛及钛合金棒材》^[3]已于2023年9月7日发布,2024年4月1日起正式实施。本标准发布实施后,将进一步优化钛及钛合金加工产品国家标准体系,使我国一般工业用钛及钛合金棒材质量达到甚至领先国际棒材水平,提高我国钛及钛合金棒材的市场适配度,以及国际市场的竞争力,为国内钛及钛合金棒材的订货、生产和检验提供更优的选择和指导。鉴于此,为方便国家标准的使用和推广,笔者主要介绍了钛及钛合金棒材国家标准的制修订过程,技术指标确定的依据,为标准的使用者提供一个较为清晰、明确的解读。

1 GB/T 2965 标准的演变

YB 766-1970《钛及钛合金棒材》^[4]首次发布于1970年,是我国第一项钛及钛合金棒材标准。标准由较为常用的TA1、TA2、TA3、TA5、TA6、TA7、TA8、TB1、TB2、TC1、TC2、TC4、TC5、TC6、TC7、TC8、TC9和TC10共18个钛及钛合金牌号组成,主要涉及热锻、热轧和热挤压三种工艺生产的钛及钛合金棒材,热锻棒材直径范围为15~200 mm,其中方棒边长范围为25~100 mm;挤压棒直径或边长范围为8~30 mm;轧棒直径范围为8~80 mm。其技术要求覆盖了相应牌号棒材的化学成分、外形尺寸及其允许偏差、拉伸性能、表面质量和低倍组织。

因国家标准化管理机构发生变更,1982年对冶标YB 766-1970《钛及钛合金棒材》开始了首次修订,修订后的国家标准GB 2965-1982《钛及钛合金棒材》^[5]为强制性国家标准,主要扩大了产品规格范围;增加了棒材的冶炼方式;增加了附录A棒材的热处理规范;增加了显微组织和超声检测可由供需双方协商的技术要求。同时,明确罗列各牌号钛及钛合金化学成分,便于标准的使用和查阅。

GB 2965-1987《钛及钛合金棒材》^[6]在1982版的基础上增加了新研制并成熟应用的TC11钛合金,删除了使用率较低的TB1、TC5、TC8三种钛合金;考虑到材料的熔炼方式无法在产品检验时进行验证,删除了材料的熔炼方式;增加了室温力学性能中屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 的技术要求,为后续该指标的确定打下基础。同时,从本次修订开始,产品的试验方法基本

以国家标准为主,这也标志着我国钛及钛合金材料检验国家方法标准体系基本完善。

GB/T 2965-1996《钛及钛合金棒材》^[7]再次将标准修订为推荐性国家标准。随着钛及钛合金国家标准体系的完善以及各标准之间分类细化,本次修订最核心理念是将标准定义为一般工业用钛及钛合金棒材,删除了之前标准中对材料冲击韧性、布氏硬度等特殊要求,将主要的技术指标集中于材料最基础的室温和高温拉伸性能的考核。与此同时,增加了牌号TA0、TA9、TA10、TC12及其技术要求,删除牌号TC7。

GB/T 2965-2007《钛及钛合金棒材》修订了力学性能要求所对应的棒材横截面积和截面厚度的规定;扩大了棒材的尺寸范围:最小直径或截面厚度从8 mm变为 >7 mm,棒材的最大直径从200 mm扩大到230 mm,退火态棒材的长度范围扩大为300~3 000 mm;根据GB/T 3620.1中工业纯钛牌号及其化学成分的修订情况,将工业纯钛的牌号相应修改为TA1、TA2、TA3、TA4;增加了TA13、TA15、TA19、TC4 ELI等钛合金牌号及其技术要求;提高了棒材直径或截面厚度的尺寸允许偏差要求。

近年来,在钛及钛合金棒材的研制应用中,不仅实现了新型钛合金棒材的批量化生产和应用,并将其产品范围进行了大幅度的扩展,对其尺寸允许偏差、力学性能、取样规定等技术要求进行了较大的改变,产品实物的技术要求也达到了国外先进技术标准水平。因此,修订国家标准GB/T 2965-2007《钛及钛合金棒材》的时机已成熟。

2 GB/T 2965-2023 标准解析

GB/T 2965-2023与GB/T 2965-2007相比,整体要求上进行了大范围的改动,淘汰了挤压和拉拔工艺,仅保留锻造和轧制两种工艺生产的棒材技术要求;增加了TA1G、TA2G、TA3G、TA4G、TA18、TB6、TC17、TC18、TC21、TC25等钛及钛合金牌号及其技术要求,标准主要修订点包含:术语和定义、产品分类、外形尺寸及其允许偏差、热处理制度、力学性能、试验方法、取样规定、检验结果的判定等相关内容。

2.1 术语和定义

随着国家标准GB/T 6611^[8]、GB/T 34647^[9]、GB/T 38982^[10]的相继发布实施,为了增加国家标准行业用语的一致性,增加了术语和定义,引用上述标准中如钛合金、普通退火、等温退火、直径、长度、平直度、切斜度等术语和定义。

2.2 产品分类

鉴于型号使用要求,对 GB/T 3620.1-2016 进行修订,以保证相关钛及钛合金牌号与早期项目研制牌号技术要求保持一致。GB/T 2965-2023 的修订增加了主要应用于紧固件、化工领域中结构件用轴、杆等仍在使用的 GB/T 2965-1994 中 TA1、TA2、TA3 纯钛牌号及其技术要求;增加了有望大力推广,部分产品已成熟应用于民用市场的新型钛及钛合金棒材牌号 TA1G、TA2G、TA3G、TA4G、TA18、TB6、TC17、TC18、TC21、TC25 及其技术要求。

同时,本次修订将产品规格从“ $>7 \sim 230 \text{ mm}$ ”修改为“ $7 \sim 100 \text{ mm}$ ”,看似规格缩小,实际上主要基于以下 2 个方面的考虑。

a) 国家标准 GB/T 32185-2015《钛合金大规格棒材》^[11] 中产品规格为“ $100 \sim 300 \text{ mm}$ ”, GB/T 2965 修订后,将与该标准在规格衔接上协调一致,方便用户按不同规格产品订货时进行选择。

b) 原标准 GB/T 2965-2007 中 3.3.2 条为“棒材横截面积不大于 64.5 cm^2 且矩形棒的截面厚度不大于 76 mm 时,其纵向室温力学性能应符合表 2 的规定”,修订后为“棒材的直径或截面厚度不大于 100 mm 时,其室温力学性能应符合表 3 的规定”,从而与实际检测棒材性能的产品规格范围保持一致,避免标准在使用过程中产生异议,故本次修订实际上扩大了棒材检测室温力学性能的规格范围。同时,将退火态产品的长度范围从“ $300 \sim 3\,000 \text{ mm}$ ”扩大到“ $300 \sim 5\,000 \text{ mm}$ ”。

2.3 外形尺寸及其允许偏差

按照需方市场对于棒材精度的高标准、严要求,配合上原材料生产商设备能力和工艺技术的不断提升。宝钛主导制定了适用于现阶段对棒材外形尺寸及其允许偏差等技术要求不同需求的国家标准 GB/T 39799-2021《钛及钛合金棒材和棒材尺寸、外形、重量及允许偏差》^[12],本次修订对棒材外形尺寸及其允许偏差的技术要求进行直接引用,其中包括直径允许偏差,定尺及倍尺长度允许偏差、切斜度和平直度等外形尺寸及其允许偏差的相关规定。

近年来,随着需方对产品超声检测、尺寸精度、外观质量等技术要求的不断加严,现各原材料生产厂家很少接到以黑皮状态供货的合同,本次修订将黑皮交货的供货状态删除。同时,在满足现有生产方式、加工精度的前提下,删除了挤压和拉拔的相关技术要求。

2.4 热处理制度

将资料性附录 A 纳入文件正文,作为推荐性热

处理制度进行规定,便于标准使用者的查询和使用,并对本次新增和修改的钛及钛合金牌号的推荐热处理制度进行规定,具体依据如下:

a) 标准新增了 GB/T 2965-1996 中 TA1、TA2、TA3 三个纯钛牌号,其热处理制度仍按 GB/T 2965-1996 的规定执行。

b) 基于军民融合政策,为使国家标准的适用性更强,适用范围更广,对比 GJB 2218 A-2018《航空用钛及钛合金棒材和锻坯规范》^[13] 中 TA13 的推荐热处理制度,GB/T 2965-2007 中规定的范围却更小,不利于生产应用,本次修订依据 GJB 2218A-2018 的规定对 TA13 的推荐热处理制度进行调整。

c) 为后期国家标准“简标行动”落实落地,以及标准融合的顺利进行,新增了 TA18、TB6、TC21、TC25 钛合金牌号,其热处理制度依据 GB/T 32185-2015 中的规定执行。

d) 鉴于 TC17、TC18 钛合金在重要领域应用日渐成熟,为加速钛合金推广和应用,本次修订增加 TC17、TC18 两种钛合金,其推荐的热处理制度主要参照相应型号标准的规定执行。

2.5 力学性能

本次修订涉及的产品力学性能主要包括新增钛及钛合金牌号力学性能的确定,以及原标准中相关牌号技术指标的调整。

本次修订恢复了 GB/T 2965-1996 中 TA1、TA2、TA3 三种纯钛牌号,力学性能按其规定执行。TA18、TB6、TC17、TC18、TC21 和 TC25 钛合金的力学性能的技术指标主要依据相应型号标准和供需双方签订的技术协议确定。

GB/T 2965-2007 中 TA5 的室温拉伸性能要求过严,断后生产率和断面收缩率无法稳定达到考核指标,考虑到 TA5 棒材主要应用于舰船领域,在查阅大量数据和标准后,依据《中国材料工程大典》^[14]、GB/T 2965-2007 及供需双方签订的技术协议对 TA5 棒材的断后生产率和断面收缩率进行调整。

新增钛及钛合金牌号的室温拉伸性能见表 1,新增钛合金高温力学性能见表 2。

2.6 试验方法

YS/T 1262-2018^[15] 是利用 ICP-OES 法测定海绵钛、钛及钛合金中化学元素的方法标准,其优点是可同时进行多元素含量的测定,更符合检测人员的实际操作,显著提高工作效率,但缺点在于无法对气体元素进行测定,本次修订在保证化学成分检测合理的情况下,统一检验方法,故增加 YS/T 1262-2018 以规范、统一检测方法,以弥补标准只用 GB/T

4698^[16]分析化学成分所带来的实际检测方法执行不一致,检测效率低的问题。

表1 新增钛及钛合金棒材室温拉伸性能

Table 1 Tensile properties of newly added titanium and titanium alloy bars at room temperature

牌号	抗拉强度(R_m) /MPa	规定塑性延伸强度 ($R_{p0.2}$)/MPa	断后伸长率 (A)/%	断面收缩率 (Z)/%
TA1	≥370	≥250	≥20	≥30
TA2	≥440	≥320	≥18	≥30
TA3	≥540	≥410	≥15	≥25
TA5	≥685	≥585	≥13	≥25
TA18	≥620	≥518	≥12	≥25
TB6	≥1 105	≥1 035	≥8	≥15
TC17	≥1 120	≥1 030	≥7	≥16
TC18 1 080 ~ 1 280		≥1 010	≥9	≥25
TC21	≥1 100	≥1 000	≥8	≥15
TC25	≥980		≥10	≥20

表2 新增钛合金棒材高温力学性能

Table 2 Mechanical properties of newly added titanium alloy bars at elevated temperature

牌号	试验温度/ ℃	抗拉强度 (R_m)/MPa	持久性能	
			试验应力 (σ)/MPa	试验时间 (t)/h
TA18	≥350	≥340	≥320	≥100
	≥400	≥310	≥280	≥100
TC17	≥400	≥885	≥685	≥100
TC25	≥500	≥735	≥637	≥50

国家标准 GB/T 228^[17]和 GB/T 4338^[18]已完成修订,分别被 GB/T 228.1^[19]和 GB/T 228.2^[20]代替,经核实,新版标准技术要求可完全覆盖旧版要求。因此,将相应拉伸方法进行修订。

国家标准 GB/T 23605-2020《钛合金 β 转变温度测定方法》^[21]已于 2021 年正式发布实施,完全可以满足 β 转变温度的测定要求,如需方确需其他方法进行 β 转变温度的检查验收,可在订货单中进行规定。因此,本次修订将 β 转变温度试验方法由“ β 转变温度用金相淬火法或其他方法测定”修改为“产品的 β 转变温度按 GB/T 23605 的规定进行”。

2.7 取样规定

结合生产实际,参照国际先进标准的取样要求,细化产品取样规定。GB/T 2965-2007 中只对产品的取样方向(纵向)进行了规定,并未对产品取样的具体位置进行详细规定,实际取样位置均依靠经验或行业默认的方式进行,存在因人员差异等因素的

不确定性。本次修订,着重对力学性能和显微组织的取样位置进行了明确规定。依据钛行业中相关型号标准以及国际先进标准中对取样位置的推荐要求,将本次标准的取样位置确定为当直径或截面厚度不大于 38 mm 时,在棒材中心或 1/2 截面厚度处取纵向;当直径或截面厚度大于 38 mm 时,在棒材 D/4 或 1/4 截面厚度处取纵向。

同时,增加了产品取样的其他要求按 GB/T 23604-2009《钛及钛合金产品力学性能试验取样方法》^[22]的规定执行的要求。从而统一试样在制备过程中的具体要求,保证生产检验和用户复验试样状态的一致性,增强试验结果的一致性。

2.8 检验结果的判定

加严控制低倍组织和显微组织检验结果的判定,与近期换版修订的其他钛及钛合金加工材国家标准保持一致,不允许当判定结果不合格时,逐根检验,合格者交货的要求,统一修改为:“当低倍组织、显微组织检验结果不合格时,判定该批产品不合格。”

2.9 附录 B

本次修订删除了资料性附录 B,但具体内容均已纳入文件正文。原附录 B 中牌号及其化学成分符合 GB/T 3620.1 的规定;工业纯钛的室温力学性能符合 GB/T 2965-2023 中表 2 的规定。

3 结语

GB/T 2965-2023《钛及钛合金棒材》的修订是以国际先进标准为标杆,加强了原材料标准体系建设,完善了“十四五”原材料标准体系,建立了覆盖产品全生命周期、上下游协同的标准体系,促进资源节约和材料合理应用。

GB/T 2965-2023 经 6 次研制修订,其中涉及的钛及钛合金牌号覆盖面更广,规定的技术指标更合理,将为国家标准“简标行动”的提前部署,后期标准的融合打好基础。

最后,GB/T 2965-2023 的发布实施将有利于一般工业用钛及钛合金棒材的推广应用,保证国家标准中相关技术要求的一致性、协调性,优化了钛及钛合金加工材产品国家标准体系,解决了旧版标准在使用期间发现的各类问题,对我国钛及钛合金棒材的质量提升必将起到显著作用。

参考文献

- [1] Zhang Pinghui, Wang Yongmei, Huang Yongguang, et al. GB/T 2965-2007 Titanium and titanium alloy bars[S]. Beijing:

China Standards Press, 2008.

(张平辉,王永梅,黄永光,等. GB/T 2965-2007《钛及钛合金棒材》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.)

- [2] Feng Junning, Xie Chen, Ma Zhongxian, *et al.* Analysis of standard GB/T 3620.1-2016: Designation and composition of titanium and titanium alloys[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(2): 192-196.
(冯军宁, 解晨, 马忠贤, 等. GB/T 3620.1-2016《钛及钛合金牌号和化学成分》标准解析 [J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(2): 192-196.)
- [3] Xie Chen, Feng Junning, Li Wei, *et al.* GB/T 2965-2023 Titanium and titanium alloy bars[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
(解晨, 冯军宁, 李巍, 等. GB/T 2965-2023《钛及钛合金棒材》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.)
- [4] YB 766-1970 Titanium and titanium alloy bars[S]. Beijing: China Standards Press, 1970.
(YB 766-1970《钛及钛合金棒材》[S]. 北京: 中国标准出版社, 1970.)
- [5] Huang Liping. GB 2965-1982 Titanium and titanium alloy bars[S]. Beijing: China Standards Press, 1982.
(黄礼平. GB 2965-1982《钛及钛合金棒材》[S]. 北京: 中国标准出版社, 1982.)
- [6] Huang Liping, Jin Shuangfeng. GB 2965-1987 Titanium and titanium alloy bars[S]. Beijing: China Standards Press, 1987.
(黄礼平, 金双凤. GB 2965-1987《钛及钛合金棒材》[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.)
- [7] Huang Liping, Feng Yinglei, Gui Jun, *et al.* GB/T 2965-1996 Titanium and titanium alloy bars[S]. Beijing: China Standards Press, 1996.
(黄礼平, 冯英雷, 归军, 等. GB/T 2965-1996《钛及钛合金棒材》[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.)
- [8] Huang Yongguang, Wang Yongmei, Xu Zhuping, *et al.* GB/T 6611-2008 Terminology and metallographs for titanium and titanium alloys[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
(黄永光, 王永梅, 徐祝萍, 等. GB/T 6611-2008《钛及钛合金术语和金相图谱》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.)
- [9] Feng Junning, Chen Zhanqian, Hu Zhijie, *et al.* GB/T 34647-2017 Temper designation system for titanium and titanium alloy[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
(冯军宁, 陈战乾, 胡志杰, 等. GB/T 34647-2017《钛及钛合金产品状态代号》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.)
- [10] Ma Zhongxian, Zhang Jiao, Xie Chen, *et al.* GB/T 38982-2020 dimensions, shape, weight and tolerances of titanium and titanium alloy bars and wires[S]. Beijing: China Standards Press, 2020.
(马忠贤, 张佼, 解晨, 等. GB/T 38982-2020《钛及钛合金加工产品外形尺寸检测方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.)
- [11] Hu Zhijie, Li Weiqing, Feng Junning, *et al.* GB/T 32185-2015 Titanium alloy large-sized bars[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.
(胡志杰, 李渭清, 冯军宁, 等. GB/T 32185-2015《钛合金大规格棒材》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.)
- [12] Hu Zhijie, Feng Junning, Xie Chen, *et al.* GB/T 39799-2021 dimensions, shape, weight and tolerances of titanium and titanium alloy bars and wires[S]. Beijing: China Standards Press, 2021.
(胡志杰, 冯军宁, 解晨, 等. GB/T 39799-2021《钛及钛合金棒材和丝材尺寸、外形、重量及允许偏差》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.)
- [13] Hu Zhijie, Li Weiqing, Feng Junning, *et al.* GJB 2218A-2018 Specification for titanium and titanium alloy bars and forging stocks for aircraft[S]. Beijing: National Military Standards Publishing and Distribution Department, 2019.
(胡志杰, 李渭清, 冯军宁, 等. GJB 2218A-2018《航空用钛及钛合金棒材和锻坯规范》[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2019.)
- [14] Huang Boyun, Li Chenggong, Shi Likai, *et al.* China materials engineering canon[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
(黄伯云, 李成功, 石力开, 等. 《中国材料工程大典》[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.)
- [15] Li Jian, Luo Ce, Lei Xiaoyan, *et al.* YS/T 1262-2018 Method for chemical analysis of titanium sponge, titanium and titanium alloys—Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry[S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018.
(李剑, 罗策, 雷小燕, 等. YS/T 1262-2018《海绵钛、钛及钛合金化学分析方法多元素含量的测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法》[S]. 北京: 冶金工业出版社, 2018.)
- [16] Wang Yanjun, Zheng Yanguan, Li Bo, *et al.* GB/T 4698 methods for chemical analysis of titanium sponge, titanium and titanium alloys[S]. Beijing: China Standards Press, 2009.

- (王彦君, 郑炎官, 李波, 等. GB/T 4698《海绵钛、钛及钛合金化学分析方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.)
- [17] Liang Xinbang, Li Jiulin, Tao Liying, *et al.* GB/T 228-2002 Metallic materials-Tensile testing at ambient temperature[S]. Beijing: China Standards Press, 2002.
(梁新邦, 李久林, 陶立英, 等. GB/T 228-2002《金属材料 室温拉伸试验方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.)
- [18] Zhao Junping, Li Jiulin, Zhu Tiezhu, *et al.* GB/T 4338-2006 Metallic materials-Tensile testing at elevated temperature[S]. Beijing: China Standards Press, 2006.
(赵俊平, 李久林, 祝铁柱, 等. GB/T 4338-2006《金属材料 高温拉伸试验方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.)
- [19] Gao Yifei, Dong Li, Liu Tao, *et al.* GB/T 228.1-2021 Metallic materials - Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature[S]. Beijing: China Standards Press, 2021.
(高怡斐, 董莉, 刘涛, 等. GB/T 228.1-2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.)
- [20] Luo Jing, Gao Yifei, Zhao Junping, *et al.* GB/T 228.2-2015 Metallic materials - Tensile testing – Part 2: Method of test at elevated temperature [S]. Beijing: China Standards Press, 2015.
(罗静, 高怡斐, 赵俊平, 等. GB/T 228.2-2015《金属材料 拉伸试验 第 2 部分: 高温试验方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.)
- [21] Mu Danning, Shi Wen, Li Jian, *et al.* GB/T 23605-2020 Determination of β transus temperature of titanium alloys[S]. Beijing: China Standards Press, 2020.
(穆丹宁, 史文, 李剑, 等. GB/T 23605-2020《钛合金 β 转变温度测定方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.)
- [22] Wang Yongmei, Feng Junning, Huang Yongguang, *et al.* GB/T 23604-2009 Methods of sampling for mechanical properties testing of titanium and titanium alloy products[S]. Beijing: China Standards Press, 2009.
(王永梅, 冯军宁, 黄永光, 等. GB/T 23604-2009《钛及钛合金产品力学性能试验取样方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.)

编辑 张继东

(上接第 176 页)

- [4] Yu Hao, Kang Yonglin, Zhao Zhengzhi, *et al.* Study of microstructure and cementite in automobile beam steels produced by compact strip production with flexible technologies[J]. Mater. Sci. Eng. , A 2005, 408: 47-52.
- [5] Sha Qingyun, Sun Zuqing. Grain growth behavior of coarse-grained austenite in a Nb-V-Ti microalloyed steel[J]. Mater. Sci. Eng. , A 2009, 523: 77-84.
- [6] Wan Lanfeng, Leng Xianggui. Development of hot strip BM510L microalloyed with Nb and Ti for automobile frame[J]. Automobile Technology & Material, 2005(4): 12-15.
(万兰凤, 冷祥贵. 铌钛微合金化汽车大梁用热轧板带 BM510L 的开发 [J]. 汽车工艺与材料, 2005(4): 12-15.)
- [7] Zhang Jikui, Xin Ying, Zhang Manman, *et al.* Property and development of high strength low alloy hot rolled steel sheet for truck frame use[J]. Automobile Technology & Material, 2004(6): 42-46.
(张继魁, 辛莹, 张曼曼, 等. 汽车大梁用低合金高强度钢板性能与发展 [J]. 汽车工艺与材料, 2004(6): 42-46.)
- [8] Yang Cheng. Properties controlling of automobile beam steel WL510[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(10): 11-14.
(杨澄. 汽车大梁板 WL510 钢的性能控制 [J]. 金属热处理, 2011, 36(10): 11-14.)
- [9] Soto R, Saikaly W, Bano X, *et al.* Statistical and theoretical analysis of precipitates in dual-phase steels microalloyed with titanium and their effect on mechanical propertie[J]. Acta Materialia, 1999, 47(12): 3475-3481.
- [10] Shi Zhongran, Chai Xiyang, Chai Feng, *et al.* The mechanism of intragranular ferrite formed on Ti-rich (Ti, V) (C, N) precipitates in the coarse heat affected zone of a V-N-Ti microalloyed steel[J]. Materials Letters, 2016, 175(14): 266-270.
- [11] Mao Xinping, Huo Xiangdong, Sun Xinjun, *et al.* Strengthening mechanisms of a new 700 MPa hot rolled Ti-microalloyed steel produced by compact strip production[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(12): 1660-1666.

编辑 邓淑惠