

# 海洋环境用 Ti-5111 合金板材的组织与性能研究

席锦会, 葛鹏, 侯鹏, 廖强

(西部金属材料股份有限公司, 陕西 西安 710201)

**摘要:** 以经过两相区轧制得到的 25 mm 厚 Ti-5111 合金板材为研究对象, 研究了不同热处理制度下板材的显微组织和力学性能。研究发现, 800 °C 热处理后的组织为等轴组织, 950 °C 热处理后的组织为双态组织, 1 000 °C 热处理后为魏氏体组织。950 °C 热处理后板材综合性能最好, 其  $R_m = 870$  MPa,  $R_{p0.2} = 775$  MPa,  $A = 14\%$ ,  $A_{KV} = 81$  J。分析了不同热处理温度下 Ti-5111 合金冲击试样的断口形貌, 并分析了影响材料韧性的因素, 发现 Ti-5111 合金板材的冲击韧性与组织类型有关, 双态组织的冲击韧性最好, 魏氏体组织的次之, 等轴组织最差。板材焊缝的力学性能与母材相当, 表现出优异的焊接性能。

**关键词:** Ti-5111 合金; 组织; 韧性; 焊接性能

中图分类号: TG146. 23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2020)04-013-05

## Microstructure and Properties of Ti-5111 Alloy Plate used in Marine Environments

Xi Jinhui, Ge Peng, Hou Peng, Liao Qiang

(Western Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

**Abstract:** The 25 mm thick Ti-5111 alloy plates were achieved by hot rolling in the  $\alpha + \beta$  field. The effect of different heat treatments on microstructure and mechanical properties of the Ti-5111 titanium alloy plates were investigated. The results show that, the microstructure is typical equiaxed structure when annealing at 800 °C, and bimodal structure at 950 °C, Widmanstätten at 1 000 °C. An excellent balance of high strength and good toughness is realized after heat treated at 950 °C, and the tensile strength, yield strength, elongation and impact toughness can achieve 870 MPa, 775 MPa, 14% and 81 J, respectively. The fracture morphologies of Ti-5111 alloy plates which heat-treated at different temperatures were analyzed, and the influence factors for toughness were discussed. It is found that the impact toughness of Ti-5111 alloy plate is related to the type of microstructure. The impact toughness of sample with dual microstructure is the best, that with Widmanstätten microstructure is the second, and that with equiaxed microstructure is the worst. The properties of sample as-welded are equivalent to the properties of the base plate, which shows excellent weldability.

**Key words:** Ti-5111 titanium alloy; microstructure; toughness; weldability

船舶服役在苛刻的海洋环境中, 由于长时间接触海水, 船体及其设备、构件(如高温排气管、海水阀和泵、螺旋桨等)很容易被腐蚀, 对其采取防护措施又极其繁琐和困难, 因此对船舶用材料提出了特殊的技术性要求: 耐海水腐蚀性好; 高、低温环境下稳定性好; 安全可靠, 维修少或维修便捷; 弯曲、

焊接等可加工性好。钛合金因具有良好的耐蚀性能和力学性能, 被认为是一种很有前途的海洋环境用材料。

目前在用的船用钛及钛合金包括纯钛、Ti-3Al-2.5V 合金以及 Ti-6Al-4V ELI 两相合金等。Ti-6Al-4V ELI 合金因具有高强度的优势而被广泛应用, 但在苛刻的应用环境下, 例如在强烈震动的情况下, 其断裂韧性和抗应力腐蚀开裂以及焊接性能不能很好地满足要求<sup>[1]</sup>。Ti-5111 (Ti-5Al-1Sn-1V-1Zr-0.8Mo)

收稿日期: 2020-04-10

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLGY05-08)

通信作者: 席锦会(1977—), 女, 博士, 教授级高工。

合金是美国研发的一种成本较低的钛合金,它具有与 Ti-6211(Ti-6Al-2V-1Nb-1Ta)合金相似的性能,能够满足深潜器对材料屈服强度的要求(不低于 690 MPa),同时保持良好的韧性和可焊性<sup>[2,3]</sup>。

本研究对热轧制备的 25 mm 厚 Ti-5111 合金板材进行了不同热处理,并对热处理后板材的组织、性能进行了检测,分析了影响材料强度、塑性及冲击韧性的因素,旨在掌握不同热处理制度下 Ti-5111 合金板材的性能水平,为后期选材及批量化生产提供依据。

## 1 实验

Ti-5111 合金铸锭(相变点为 975~980 °C)经过  $\beta$  相区及  $\alpha + \beta$  相区锻造得到 100 mm 厚板坯,再经过  $\alpha + \beta$  两相区顺轧得到 25 mm 厚板材。分别在 800、950、1 000 °C 对 Ti-5111 合金板材进行热处理,保温 1 h,空冷。

从 Ti-5111 合金板材上截取实验用料,经加工制备成  $\phi 10$  mm  $\times$  65 mm 的拉伸试样,10 mm  $\times$  10 mm  $\times$  55 mm 的 V 形缺口冲击试样。采用 INSTRON-1185 万能力学试验机进行拉伸性能测试。采用 PTM2100 摆锤式冲击试验机进行冲击性能测试。采用金相显微镜观察合金的组织形貌,金相试样腐蚀液为氢氟酸、硝酸和水组成的混合溶液,体积比为 1:2:5。采用 JSM-6460 扫描电镜(SEM)观察冲击试样断口形貌。

为了考察该合金的焊接性能,采用电子束焊接将 2 块长 150 mm、宽 300 mm 的 Ti-5111 合金板材进行拼焊,拼焊成 300 mm  $\times$  300 mm 的板材,经过热处理后测试其室温拉伸性能和冲击韧性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 热处理制度对板材组织的影响

轧制态(R)及经不同制度热处理后 Ti-5111 合金板材的显微组织如图 1 所示。从图 1 可见,R 态为等轴组织,由初生  $\alpha$  相和  $\beta$  转变相组成,初生  $\alpha$  相含量为 70%~80%, $\beta$  转变相中次生  $\alpha$  相为短棒状,纵横比小。比较 R 态横向与纵向组织可发现,2 个方向初生  $\alpha$  相尺寸略有差异,纵向初生  $\alpha$  相尺寸为 18  $\mu$ m,横向初生  $\alpha$  相尺寸为 13  $\mu$ m,纵向初生  $\alpha$  晶粒被拉长,这是由于板材为顺轧,晶粒在变形过程中被压扁并拉长。800 °C  $\times$  1 h/AC 普通退火后仍为等轴组织,组织形态与 R 态相似,初生  $\alpha$  相含量依然为 70%~80%,纵向、横向初生  $\alpha$  相尺寸分别为 18  $\mu$ m 和 14  $\mu$ m。950 °C  $\times$  1 h/AC 热处理后为双态组织,初生  $\alpha$  相含量减少,为 40%;次生  $\alpha$  相呈片状,横向初生  $\alpha$  相尺寸比纵向略小,含量也少。纵向、横向初生  $\alpha$  相尺寸分别为 17  $\mu$ m 和 14  $\mu$ m。1 000 °C  $\times$  1 h/AC  $\beta$  热处理后获得魏氏体组织, $\alpha$  相全部转化为原始  $\beta$  相, $\beta$  晶粒粗大,为 100~200  $\mu$ m,但晶界  $\alpha$  及晶内  $\alpha$  片均非常薄,晶内由位向不同的细长  $\alpha$  集束组成。

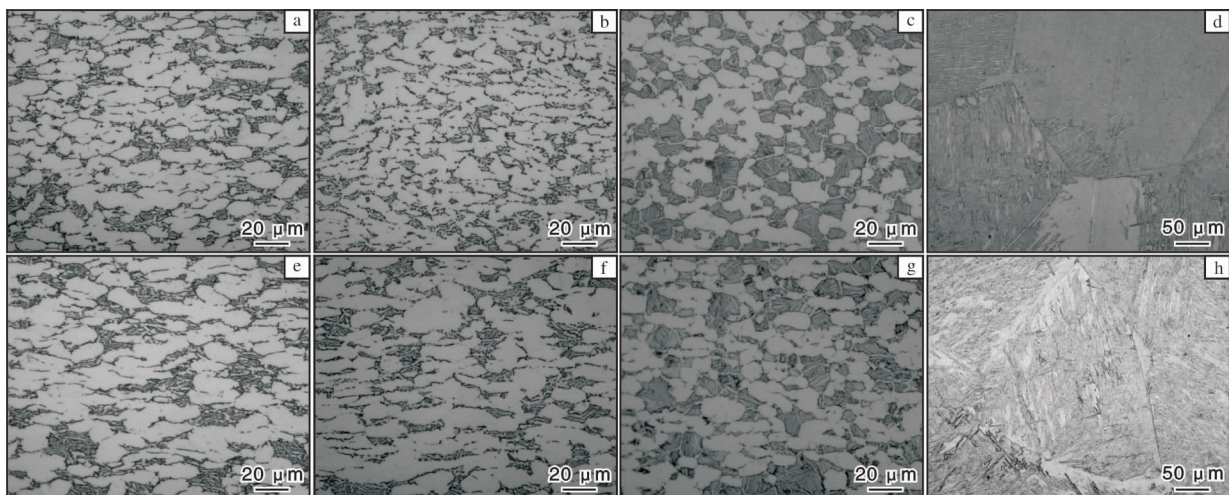


图 1 轧制态及不同制度热处理后 Ti-5111 合金板材金相照片

Fig. 1 Metallographs of Ti-5111 alloy plate after different heat treatment: (a)R state, transverse; (b)800 °C  $\times$  1 h/AC, transverse; (c)950 °C  $\times$  1 h/AC, transverse; (d)1 000 °C  $\times$  1 h/AC, transverse; (e)R state, longitudinal; (f)800 °C  $\times$  1 h/AC, longitudinal; (g)950 °C  $\times$  1 h/AC, longitudinal; (h)1 000 °C  $\times$  1 h/AC, longitudinal

### 2.2 热处理制度对板材拉伸性能的影响

Ti-5111 合金板材经不同制度热处理后的室温拉伸性能见图 2。从图 2 可见，随着热处理温度的升高，抗拉强度和屈服强度呈降低趋势，且屈服强度下降幅度更大，说明热处理制度对屈服强度的影响强烈。800 °C 热处理后，板材的抗拉强度和屈服强度下降了 20 MPa，塑性基本保持不变。950 °C 热处理后，抗拉强度较 R 态下降了 30 MPa，屈服强度降低 70 MPa。1 000 °C 热处理后，抗拉强度较 R 态下降了 50 MPa，屈服强度降低 100 MPa。热处理温度超过了相变点后，板材延伸率明显降低，这是由于板材组织变为粗大的  $\beta$  晶，导致强塑性下降。Margolin 与 Greenfield 在研究  $\alpha + \beta$  钛合金的拉伸断裂机理时指出，对于等轴组织，断裂应力与等轴初生  $\alpha$  相晶粒间距、原始再结晶  $\beta$  晶粒直径的平方根成反比；对于魏氏体片状组织，其断裂应力与再结晶  $\beta$  晶粒直径、晶界  $\alpha$  相厚度的平方根成反比<sup>[4,5]</sup>。而在给定的退火温度下，等轴组织中等轴  $\alpha$  相的平均直径则与原始再结晶  $\beta$  晶粒直径成正比<sup>[5]</sup>。因此，等轴组织的断裂应力实际上与等轴  $\alpha$  相的晶粒尺寸和间距的平方根成反比。在双态组织中原始再结晶  $\beta$  晶粒尺寸指亚晶  $\alpha$  相集束的尺寸。本研究中，魏氏体片状组织原始再结晶  $\beta$  晶粒粗大，远大于等轴组织和双态组织的原始再结晶  $\beta$  晶粒，因此，具有魏氏体组织的试样综合抗拉强度最低。等轴组织的原始  $\beta$  晶粒比双态组织的再结晶  $\beta$  晶粒度略小，故其抗拉强度最高。

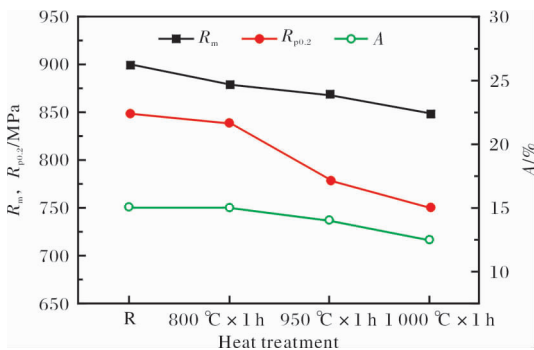


图 2 不同热处理制度下 Ti-5111 合金板材的抗拉强度和塑性  
Fig. 2 Tensile strength and ductility of Ti-5111 alloy plate under different heat treatment processes

材料的塑性除了与再结晶  $\beta$  晶粒尺寸有关外，还与晶界  $\alpha$  相有关。片状组织中，具有一定厚度的连续晶界  $\alpha$  相为显微孔洞的形核及长大到临界尺寸

提供了一条捷径，从而导致晶间断裂，使片状组织的塑性大大低于等轴组织和混合组织。

### 2.3 热处理制度对板材韧性的影响

Ti-5111 合金板材经不同制度热处理后的室温冲击韧性见图 3。从图 3 可见，在相变点以下热处理时，随着热处理温度的升高，冲击韧性提高，热处理温度超过相变点后，冲击韧性又降低。R 态及经不同制度热处理后，V 形缺口试样冲击功  $A_{KV}$  均可达 60 J 以上，表现出良好的韧性。

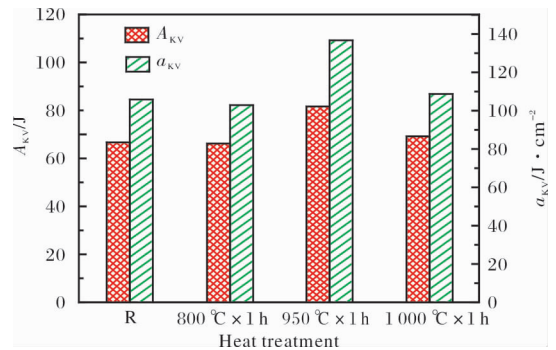


图 3 不同热处理制度下 Ti-5111 合金板材的冲击韧性  
Fig. 3 Toughness of Ti-5111 alloy plate under different heat treatment processes

为了分析影响 Ti-5111 合金板材冲击韧性的因素，对不同热处理温度下冲击韧性试样断口的宏观形貌进行分析，见图 4。从图 4 可见，R 态、800 °C 及 950 °C 热处理后的冲击试样断面差异很小，断口

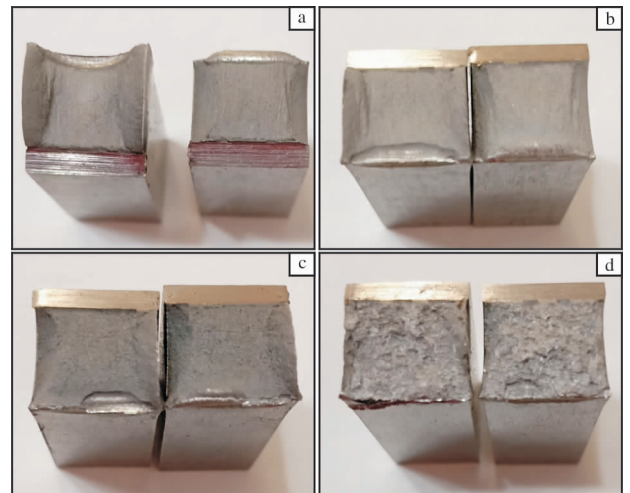


图 4 不同热处理制度下 Ti-5111 冲击试样断口宏观形貌  
Fig. 4 Fracture morphologies of Ti-5111 impact specimens under different heat treatment processes: (a) R state; (b) 800 °C × 1 h/AC; (c) 950 °C × 1 h/AC; (d) 1 000 °C × 1 h/AC

表面较为平直,呈灰色;而1 000 ℃热处理后断口非常粗糙,表面有较大的起伏,存在大量金属光泽的小平面。

图5为Ti-5111合金冲击试样断口的SEM照片。从图5可见,800 ℃热处理后,断口韧窝深、细密

且分布均匀,呈等轴状,其尺寸与显微组织中的等轴 $\alpha$ 晶粒大小相当;950 ℃热处理后,断口韧窝更深更大,断面中可见大量的显微孔洞和二次裂纹;1 000 ℃热处理后,断口韧窝数量很少,局部可见准解理断裂特征,解理平面内存在河流花样。

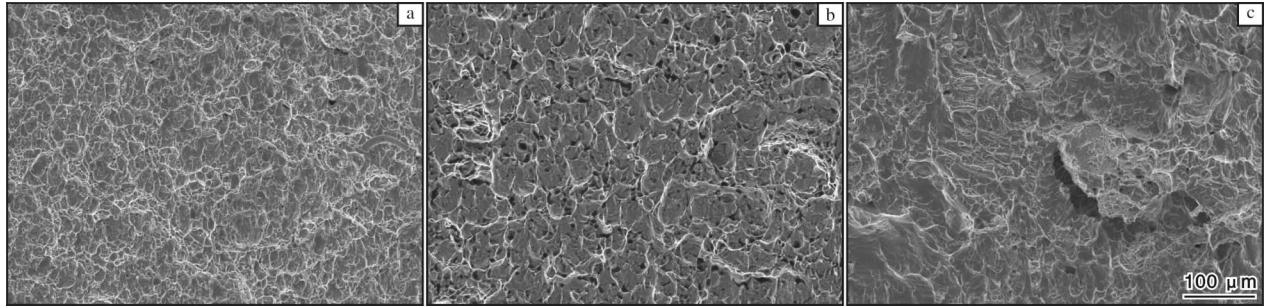


图5 不同热处理制度下Ti-5111合金冲击试样断口SEM照片

Fig. 5 SEM images of Ti-5111 alloy impact specimens under different heat treatment processes: (a)800 ℃ × 1 h/AC; (b)950 ℃ × 1 h/AC; (c)1 000 ℃ × 1 h/AC

钛合金断裂过程中,初生 $\alpha$ 相是裂纹萌生和扩展的通道,材料的断裂韧性随着初生 $\alpha$ 相内部平均自由程的增加而提高<sup>[6]</sup>。

$$L_m = \left( \frac{4R_0}{3f} \right) (1 - f) \quad (1)$$

式中: $L_m$ 为 $\alpha$ 相内部平均自由程; $R_0$ 为初生 $\alpha$ 相半径; $f$ 为初生 $\alpha$ 相含量。根据式(1)及不同热处理制度下板材显微组织可以看出,由于950 ℃热处理后,初生 $\alpha$ 相含量显著减少,但初生 $\alpha$ 相尺寸与R态和800 ℃热处理后的初生 $\alpha$ 相尺寸相当,故初生 $\alpha$ 相内部的平均自由程较大,因此950 ℃热处理后材料的韧性高。裂纹一般主要在初生 $\alpha$ 相晶界、 $\alpha/\beta$ 相界或 $\beta$ 晶粒的晶界上形成。材料的韧性不仅与初生 $\alpha$ 相的体积分数有关,还与 $\alpha$ 相的形貌有关。在应力作用下,裂纹一般沿着相界面进行扩展,既可以

平直穿过 $\alpha$ 相,也可以绕过 $\alpha$ 相。对于含有片状 $\alpha$ 相的混合组织,若片状 $\alpha$ 相的位向与主裂纹扩展方向相近,裂纹沿 $\alpha$ 片间通过;若片状 $\alpha$ 相的位向与主裂纹走向不一致,裂纹穿过片层 $\alpha$ 相,但裂纹扩展至片层边界时,将产生停滞效应或被迫改变方向。魏氏体组织中,晶内 $\alpha$ 片层呈网篮状交织分布,有助于材料保持较高的韧性。因此,对于不同类型的钛合金组织来说,混合组织,即双态组织的冲击韧性最好,魏氏体组织次之,等轴组织最差<sup>[7-8]</sup>。

#### 2.4 Ti-5111合金板材焊缝性能

Ti-5111合金板材焊缝与母材的力学性能见表1。从表1可以看出,不同热处理制度下焊缝的性能与母材相当,说明Ti-5111合金具有优异的焊接性能。其中,950 ℃热处理后板材综合性能最好, $R_m = 870$  MPa,  $R_{p0.2} = 775$  MPa,  $A = 14\%$ ,  $A_{KV} = 81$  J。

表1 不同热处理制度下Ti-5111合金板材焊缝与母材的力学性能

Table 1 Mechanical properties of weldment and base metal of Ti-5111 alloy plate under different heat treatment processes

Heat treatment	Material	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	$A_{KV}$ /J	$\alpha_{KV}$ /J·cm <sup>-2</sup>
R state	Weldment	893	784	13.5	48	66	82.3
	Base plate	900	850	15.0	55	67	83.7
800 ℃ × 1 h/AC	Weldment	867	758	13.0	46	62	77.5
	Base plate	880	840	15.0	53	66	82.3
950 ℃ × 1 h/AC	Weldment	855	753	12.5	47	80	99.5
	Base plate	870	775	14.0	52	81	108.7
1 000 ℃ × 1 h/AC	Weldment	860	740	10.5	24	63	78.7
	Base plate	850	738	12.5	28	68	85.0



### 3 结 论

(1) Ti-5111 合金板材经 950 °C × 1 h/AC 热处理后为双态组织, 可得到良好的综合性能, 其  $R_m = 870$  MPa,  $R_{p0.2} = 775$  MPa,  $A = 14\%$ ,  $A_{KV} = 81$  J。

(2) Ti-5111 合金板材的冲击韧性与组织类型有关, 双态组织的冲击韧性最好, 魏氏体组织的次之, 等轴组织最差。

(3) Ti-5111 合金板材焊缝的力学性能与母材相当, 表现出优异的焊接性能。

#### 参考文献

- [1] Stauffer A C, Czyryca E J, Koss D A. The Influence of Processing on the Microstructure and Properties of the Titanium Alloy Ti-5111; WCCD-61-TR-2004116 [R]. Carderock Division; Naval Surface Warfare Center, 2004.
- [2] Been J, Faller K. Using Ti-5111 for marine fastener applications[J]. JOM, 1999, 51(6): 21 - 24.
- [3] Pao P S, Fonda R W, Jones H N, et al. Fatigue crack growth in friction stir welded Ti-5111 [J]. The Minerals, Metals & Materials Society, 2009, 9: 29 - 38.
- [4] Margolin H, Greenfield M A. The mechanism of void formation, void growth, and tensile fracture in an alloy consisting of two ductile phases[J]. Metallurgical Transactions, 1972, 3(10): 2649 - 2659.
- [5] 葛志明.  $\alpha + \beta$  钛合金不同显微组织的机械性能与断口特征[J]. 航空材料, 1981, 1(2): 8 - 14.
- [6] 刘睿, 惠松骁, 叶文君, 等. 退火温度对 TC4 钛合金动态断裂韧性的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(10): 1799 - 1803.
- [7] 卢凯凯, 周立鹏, 段启辉, 等. 热处理工艺对 TA15 钛合金棒材组织和性能的影响[J]. 钛工业进展, 2018, 35(4): 35 - 39.
- [8] 徐戊矫, 谭玉全, 龚利华, 等. 退火温度和冷却速率对 TC4 钛合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(11): 2932 - 2936.

## 2020 年 1—6 月中国钛、锆产品进出口统计

项 目	进口数量/kg	进口金额/美元	出口数量/kg	出口金额/美元
<b>钛相关产品</b>				
钛矿砂及其精矿	1 533 150 757	324 828 910	792 000	971 641
钛的氧化物	4 416 245	17 432 958	3 782 778	7 048 183
钛白粉	77 557 424	223 156 722	77 287 406	148 286 611
海绵钛	3 282 566	27 293 234	16 060	73 222
其他锻轧钛及钛制品	715 110	10 319 696	16 685	227 028
钛粉末	190 240	1 774 225	7 749	211 264
钛条、杆、型材及异型材	926 348	41 422 325	2 659 542	57 762 262
钛丝	104 530	7 758 244	354 225	11 771 157
厚度 ≤ 0.8 mm 的钛板、片、带、箔	1 243 933	23 890 243	133 510	4 318 450
厚度 > 0.8 mm 的钛板、片、带	691 651	35 366 924	2 425 401	68 058 882
钛管	249 963	8 319 118	936 707	25 616 821
其他锻轧钛及钛制品	325 329	129 803 667	1 112 469	48 091 646
<b>锆相关产品</b>				
锆矿砂及其精矿	513 373 637	402 915 038	4 844 410	51 303 031
锆的氯化物及氢氧基氯化物	7 615	482 769	24 685 415	388 353 579
碳酸锆	—	—	9 295 615	201 528 843
未锻轧锆及粉末	34 830	662 285	68 294	15 724 817
锻轧锆及锆制品	126 923	9 240 334	26 460	24 206 184