Material Sciences 材料科学, 2025, 15(10), 1955-1961
Published Online October 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ms
https://doi.org/10.12677/ms.2025.1510208

Hans汉斯

不同氧含量TC4热挤压管材热处理强化工艺研究

任伟宁*，罗登超，王　莎，李　倩，谢英杰，李　维，贠鹏飞

西部钛业有限责任公司，陕西　西安

收稿日期：2025年9月15日；录用日期：2025年10月15日；发布日期：2025年10月29日

摘　要

本文对高低氧TC4钛合金挤压管材分别进行固溶处理和固溶时效处理来研究其热处理工艺强化。固溶处理表明，高低氧TC4钛合金热挤压管材在固溶水冷过程中均得到初生α相和α' (细针状马氏体)组织，随着固溶温度提高初生α相含量下降和α'相的含量提高，同时随着氧含量提高固溶后的初生等轴α相晶粒尺寸增大，α'相含量降低。固溶时效处理表明，高低氧TC4钛合金挤压管材固溶时效热处理时发生α'马氏体分解，显微组织存在弥散析出物，该弥散析出物对TC4管材起到弥散强化的作用且随温度提高弥散程度加强，析出物增多。高低氧TC4钛合金挤压管材固溶时效处理后性能显著提高，这得益于针状α'马氏体在时效过程中发生分解析出物起到弥散强化的作用，从而提升材料的综合力学性能。

关键词

TC4钛合金，固溶时效，初生α相，α'马氏体，弥散强化

Study on Heat Treatment Strengthening Technology of Hot Extruded Tube with Different Oxygen Content TC4

Weining Ren*, Dengchao Luo, Sha Wang, Qian Li, Yingjie Xie, Wei Li, Pengfei Yun

Western Titanium Technologies CO, Ghina, Xi'an

Received: September 15, 2025; accepted: October 15, 2025; published: October 29, 2025

Abstract

In this paper, the heat treatment of high and low oxygen TC4 titanium alloy extruded pipe was

*通讯作者。

文章引用: 任伟宁, 罗登超, 王莎, 李倩, 谢英杰, 李维, 贠鹏飞. 不同氧含量 TC4 热挤压管材热处理强化工艺研究[J]. 材料科学, 2025, 15(10): 1955-1961. DOI: 10.12677/ms.2025.1510208

strengthened by solution treatment and solution aging treatment respectively. The solid solution treatment shows that the primary α phase and α' (fine acicular martensite) microstructure of the high and low oxygen TC4 titanium alloy hot extrusion pipe are obtained during the solid solution water cooling process. The primary α phase content decreases and α' phase content increases with the increase of solution temperature, and the primary isaxed α phase grain size increases with the increase of oxygen content. The results show that α' martensitic decomposition occurs during the solution aging heat treatment of high and low oxygen TC4 titanium alloy extrusion pipe, and there are dispersive precipitates in the microstructure. The dispersive precipitates play a role in strengthening the dispersion of TC4 pipe, and the degree of dispersion is strengthened with the increase of temperature. The properties of high and low oxygen TC4 titanium alloy extruded pipe are significantly improved after solution aging treatment, which is due to the dispersion strengthening effect of the acicular α' martensite decomposition precipitates during the aging process, thus improving the comprehensive mechanical properties of the material.

Keywords

TC4 Titanium Alloy, Solid Solution and Aging Treatment, Primary α Phase, α' Martensite, Dispersion Strengthening

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

TC4 (Ti-6Al-4V)合金是目前应用最广泛、发展最成熟的 $\alpha+\beta$ 两相钛合金，具有密度低、抗腐蚀性优异、损伤容限高、强塑性匹配好等性能特点[1]-[3]。TC4 钛合金具有热处理强化能力，通常采用的热处理强化工艺是“固溶－时效”。TC4 是 $\alpha+\beta$ 两相钛合金，其在稳定状态下含有少量的高温 β 相，而正是由于少量 β 相的存在使其具有热处理强化的能力。钛合金固溶处理的目的是使合金高温处理后在较快冷却条件下发生相变转变，从而获得 α'相、α''相以及 β'相等亚稳定相，为后期的时效处理提供良好的组织状态。时效处理的目的是将固溶处理中得到的亚稳定相进行等温处理，在热力学的条件下促使亚稳定相向稳定状态转变，产生细小弥散分布的析出相，从而对钛合金起到强化作用。固溶和时效处理可提高其性能，所以控制 TC4 钛合金的显微组织和晶粒尺寸对其材料性能具有重要的意义。

2. 试验材料及方法

2.1. 试验材料

Table 1. Chemical composition of TC4 titanium alloy (mass fraction wt%)
表 1. TC4 钛合金化学成分(质量分数 wt%)

试样	Al	Fe	V	H	N	O	C	Ti
	6.16	0.020	4.12		0.003	0.052	0.010	
低氧	6.10	0.020	4.06	<0.0006	0.003	0.059	0.010	基体
	6.16	0.020	4.11		0.003	0.050	0.011	
	6.36	0.150	4.09		0.008	0.15	0.006	
高氧	6.39	0.148	4.06	<0.0006	0.008	0.15	0.005	基体
	6.34	0.149	4.07		0.007	0.16	0.005	

试验材料选择西部钛业公司熔炼的 TC4 钛合金铸锭，选用一级海绵钛、铝－钒中间合金等为熔炼原材料，利用真空自耗电弧熔炼法(VAR)通过至少两次以上熔炼制备原始 TC4 铸锭，高氧和低氧 TC4 钛合金的化学成分如表 1 所示，图 1 为 TC4 原始 R 态棒坯显微组织，二者原始组织均为两相区加工组织主要由等轴 α 相和晶间 β 相组成，无原始 β 晶界，无粗大的魏氏组织。随后通过五火次大变形锻造工艺获得 TC4 实心棒坯，棒坯经钻镗孔处理后获得待挤压空心管坯棒，后采用 2000T 卧式挤压机设备进行热挤压，挤压加热温度 930℃~950℃，保温时间 120~240 min，最终获得高氧和低氧 TC4 热挤压管材。

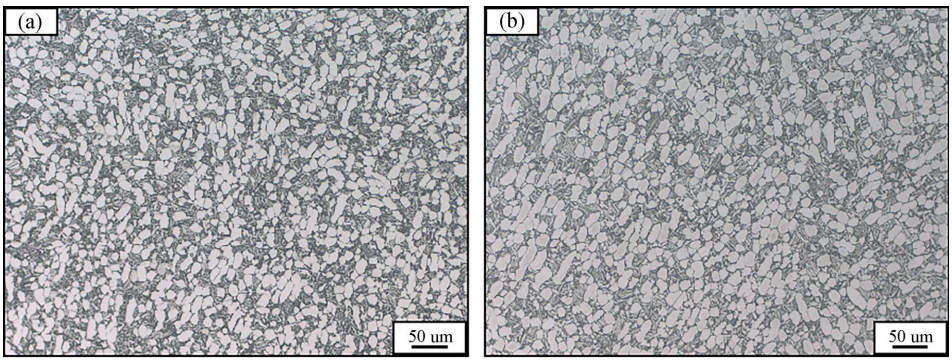

Figure 1. Microstructure of the initial R-state bar billet. (a) Original low-oxygen bar billet, (b) original high-oxygen bar billet
图 1. 初始 R 态棒坯显微组织。(a) 原始低氧棒坯；(b) 原始高氧棒坯

2.2. 试验方法

Table 2. Chronic heat treatment system of TC4 extrusion pipe
表 2. TC4 挤压管材固溶时效热处理制度

名称	方案	固溶时效热处理工艺
低氧料	A	910˚C/120min/WC + 460˚C/240min/AC
	B	910˚C/120min/WC + 510˚C/240min/AC
	C	930˚C/120min/WC + 460˚C/240min/AC
	D	930˚C/120min/WC + 510˚C/240min/AC
	E	950˚C/120min/WC + 460˚C/240min/AC
	F	950˚C/120min/WC + 510˚C/240min/AC
高氧料	A	910˚C/120min/WC + 460˚C/240min/AC
	B	910˚C/120min/WC + 510˚C/240min/AC
	C	930˚C/120min/WC + 460˚C/240min/AC
	D	930˚C/120min/WC + 510˚C/240min/AC
	E	950˚C/120min/WC + 460˚C/240min/AC
	F	950˚C/120min/WC + 510˚C/240min/AC

金相法测得 TC4 钛合金管材低氧料相变点(Tβ)为 971℃，高氧料相变点(Tβ)为 1001℃。利用锯床和线切割获得热处理试样，随后利用箱式电阻炉(炉温均匀性 ±5℃)进行固溶时效热处理试验，具体热处理制度见表 2。利用 OLYMPUS 光学金相显微镜，采用 HF/HNO_3/H_2O (体积比 1:5:50)腐蚀液进行浸蚀，观察管材热处理后显微组织，并采用万能拉伸试验机和摆锤冲击试验机进行室温力学拉伸性能测试和试验，试样为管材纵向切取的 φ6 mm 的棒状拉伸试样和标准 U 型缺口块状冲击试样；随后进行试样显微硬度

(HV)测试。

3. 结果与讨论

3.1. 固溶处理对不同氧含量 TC4 热挤压管材显微组织影响

图 2 是 TC4 钛合金挤压管材 910℃~950℃固溶热处理后的显微组织，由图可知高低氧 TC4 钛合金挤压管材固溶热处理 + 水冷处理后的组织均由等轴初生 α 相和细针状马氏体组成。这是由于 TC4 钛合金在加热过程中，随着温度的升高，α 相逐渐转变为 β 相，当加热温度未高于相变点温度时，高温状态下组织由未溶解的初生等轴 α 相和 β 相构成；在连续冷却过程中，未溶解的初生等轴 α 相进行扩散型长大，水冷时的冷却速率极快，冷却过程基本在瞬间完成，导致 $\beta\rightarrow\alpha$ 的扩散型相变来不及发生，β 相通过晶格切变的形式进行原子集体的、有规律的近程迁移，生成针状马氏体(α'马氏体)，最终相的构成包含 α 相与 α'相。由图 2 可知，随着退火温度的升高 TC4 钛合金固溶 + 水冷后的初生等轴 α 相含量显著降低，针状马氏体含量增加显著。

图 2(a)~(d)是低氧含量 TC4 钛合金挤压管材固溶热处理后的显微组织，图 2(e)~(h)是高氧含量 TC4 钛合金挤压管材固溶热处理后的显微组织，由于高低氧 TC4 钛合金的相变温度不同由图可以看出二者显微组织中的初生等轴 α 相含量和晶粒尺寸大小存在明显差异，高氧含量 TC4 钛合金固溶后的初生等轴 α 相晶粒尺寸相对较大，且针状马氏体含量降低。

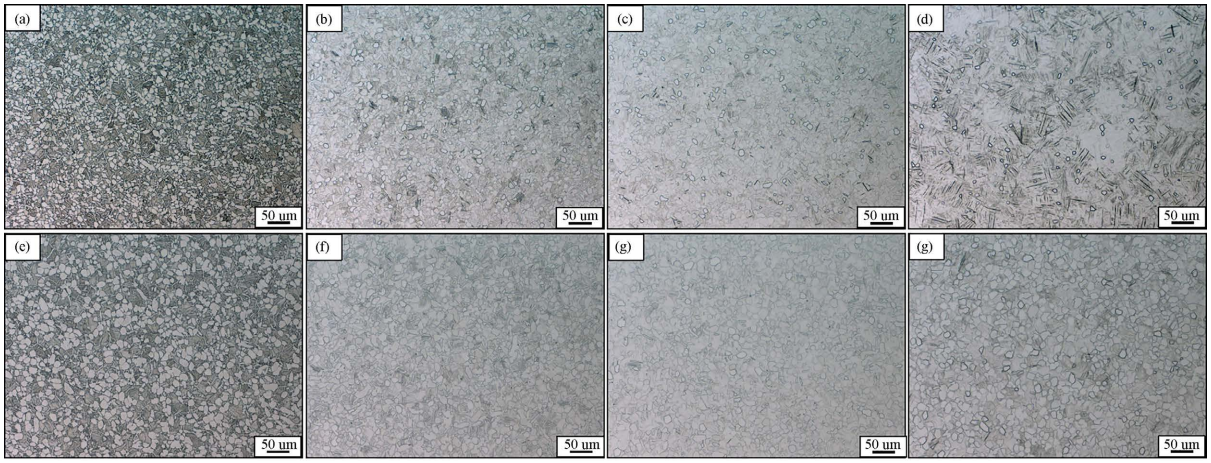

Figure 2. Microstructure of TC4 tubes after different solution heat treatments. (a) Low-oxygen extruded R-state; (b) low-oxygen 910˚C/2 h/WC; (c) low-oxygen 930˚C/2 h/WC; (d) low-oxygen 950˚C/2 h/WC; (e) high-oxygen extruded R-state; (f) high-oxygen 910˚C/2 h/WC; (g) high-oxygen 930˚C/2 h/WC; (h) high-oxygen 950˚C/2 h/WC

图 2. TC4 管材不同固溶热处理后的显微组织。(a) 低氧挤压 R 态；(b) 低氧 910℃/2 h/WC；(c) 低氧 930℃/2 h/WC；(d) 低氧 950℃/2 h/WC；(e) 高氧挤压 R 态；(f) 高氧 910℃/2 h/WC；(g) 高氧 930℃/2 h/WC；(h) 高氧 950℃/2 h/WC

3.2. 时效处理对不同氧含量 TC4 热挤压管材显微组织影响

对于 $\alpha+\beta$ 和近 β 钛合金而言，固溶 + 时效处理是最常用的热处理强化制度。图 3 是低氧含量 TC4 钛合金挤压管材固溶时效热处理后的显微组织，图 4 是高氧含量 TC4 钛合金管材固溶时效热处理后的显微组织。由图 3 和图 4 可以看出，时效温度从 460℃增加到 510℃，初生 α 相晶粒尺寸及体积分数无变化，说明在 460℃~510℃温度区间内进行时效时，时效温度对于初生 α 相的影响很小，间接说明固溶处理决定初生 α 相的形态及体积分数。由显微组织可知，TC4 钛合金经不同温度时效 4 小时后，组织内出现了弥散白色颗粒状物和短棒状析出物。由图 3 和图 4 可以看出，随着时效温度的提高组织内部的弥散白色颗粒状物和短棒状析出物含量显著增加且析出物尺寸也进一步增加。

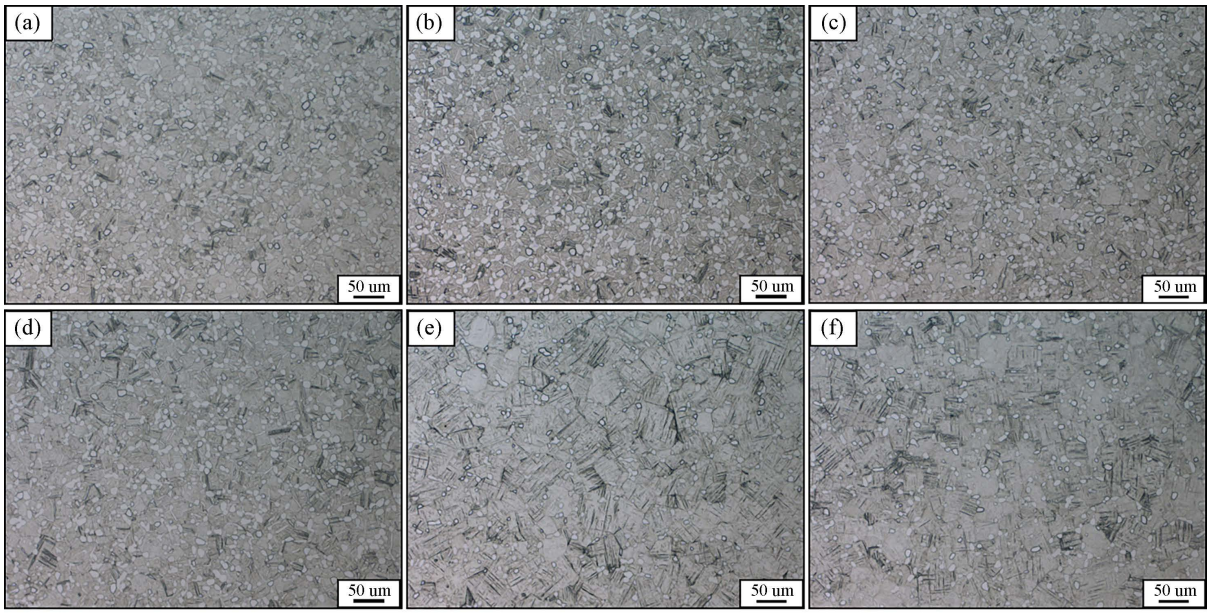

Figure 3. Microstructure of low-oxygen TC4 extruded tubes after different solution and aging heat treatments. (a) 910˚C/2 h/WC + 460˚C/4 h/AC; (b) 910˚C/2 h/WC + 510˚C/4 h/AC; (c) 930˚C/2 h/WC + 460˚C/4 h/AC; (d) 930˚C/2 h/WC + 510˚C/4 h/AC; (e) 950˚C/2 h/WC + 460˚C/4 h/AC; (f) 950˚C/2 h/WC + 510˚C/4 h/AC

图 3. 低氧含量 TC4 挤压管材不同固溶时效热处理后的显微组织。(a) 910℃/2 h/WC + 460℃/4 h/AC；(b) 910℃/2 h/WC + 510℃/4 h/AC；(c) 930℃/2 h/WC + 460℃/4 h/AC；(d) 930℃/2 h/WC + 510℃/4 h/AC；(e) 950℃/2 h/WC + 460℃/4 h/AC；(f) 950℃/2 h/WC + 510℃/4 h/AC

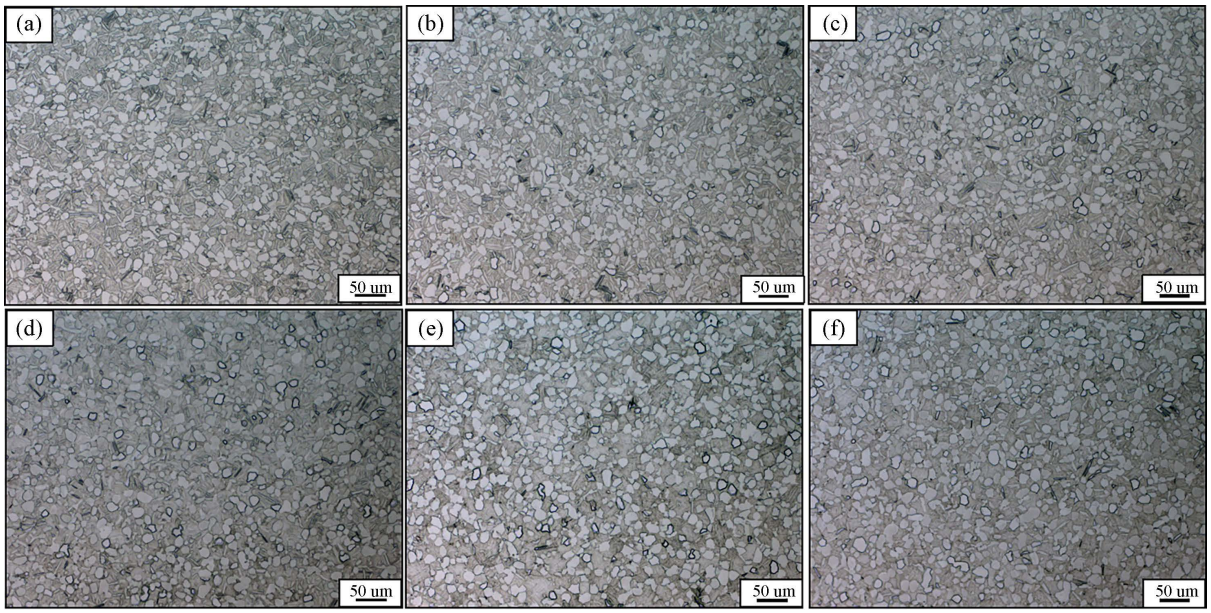

Figure 4. Microstructure of high-oxygen TC4 extruded tubes after different solution and aging heat treatments. (a) 910˚C/2 h/WC + 460˚C/4 h/AC; (b) 910˚C/2 h/WC + 510˚C/4 h/AC; (c) 930˚C/2 h/WC + 460˚C/4 h/AC; (d) 930˚C/2 h/WC + 510˚C/4 h/AC; (e) 950˚C/2 h/WC + 460˚C/4 h/AC; (f) 950˚C/2 h/WC + 510˚C/4 h/AC

图 4. 高氧含量 TC4 挤压管材不同固溶时效热处理后的显微组织。(a) 910℃/2 h/WC + 460℃/4 h/AC；(b) 910℃/2 h/WC + 510℃/4 h/AC；(c) 930℃/2 h/WC + 460℃/4 h/AC；(d) 930℃/2 h/WC + 510℃/4 h/AC；(e) 950℃/2 h/WC + 460℃/4 h/AC；(f) 950℃/2 h/WC + 510℃/4 h/AC

图 3(a)~(f)和图 4(a)~(f)分别是高低氧 TC4 钛合金挤压管材的固溶时效显微组织，由图可以看出高氧

料的显微组织相较于固溶处理前后变化不显著，但是低氧料相较于固溶处理显微组织变化显著，存在大量弥散颗粒析出物和棒状析出物，随时效温度提高析出物弥散程度加剧，析出物含量增加；相反高氧料显微组织内的析出物较少，未弥散分布且随时效温度提高几乎无变化。根据之前 Flower、Qazi 以及 Li 等[4]-[6]的研究结果可以推断出弥散析出物为针状马氏体(α'马氏体)时效过程时析出 β 相。

3.3. 不同氧含量 TC4 热挤压管材热处理后力学性能分析

表 3 和表 4 分别是低氧和高氧热处理后的室温拉伸性能、冲击性能以及维氏硬度(HV)。由表 3 和表 4 可以看出，高低氧 TC4 钛合金挤压管材固溶水冷后的强度相较于挤压态(R 态)有所提高，但是塑性和冲击性能下降，同时高氧料的强度相较于低氧料提升更显著，相应的塑性和冲击韧性也下降显著。随着固溶温度的提高材料的强度更近一步提升，产生上述结果的原因主要是由于水冷后的针状马氏体的存在导致强度提高[7] [8]。由表 3 和表 4 也可看出，当时效温度一致时高低氧 TC4 钛合金挤压管材固溶时效热处理后的强度随着固溶温度的提高也提升，但是塑性和冲击性能也出现下降。当固溶温度一致时高低氧 TC4 钛合金挤压管材固溶时效热处理后的强度随着时效温度的提高也提升，同样的塑性和冲击性能也出现下降。原因在于时效时 β 析出相的体积分数增加，颗粒状的 β 长大并合并成短棒状，分布在原始马氏体界面处，从而形成尺寸细小且长宽比较大的片层相间的 α 相与 β 相，使得相界面增多，从而提高合金的强度。而塑性下降的原因主要是针状马氏体的存在，时效温度较低时，短细且无规则排列的针状马氏体分解不完全，纵横交错的针状马氏体使得位错很容易找到可以开动的滑移方向，能够促进晶粒间的协调变形。同时综合性能结果可知在 930℃/2 h/WC + 510℃/4 h/AC 固溶处理性能最优。

Table 3. Performance of TC4 extruded pipes after heat treatment
表 3. 低氧含量 TC4 挤压管材热处理后的性能

热处理制度	室温拉伸				冲击性能		HV-维氏硬度
	Rm/MPa	$R_{P0.2}$/MPa	A/%	Z/%	KU2/J	aKU2/J/cm^2	
R 态	860	702	19.5	55	62.8	77.9	281
910˚C/2 h/WC	948	806	16.5	57	40.9	50.6	318
930˚C/2 h/WC	968	824	14	59	46.1	57.3	319
950˚C/2 h/WC	991	859	14.5	59	42.0	52	326
910˚C/2 h/WC + 460˚C/4 h/AC	992	868	15.5	56	42.4	52.6	326
910˚C/2 h/WC + 510˚C/4 h/AC	1036	914	16	55	40.3	49.9	327
930˚C/2 h/WC + 460˚C/4 h/AC	1024	904	17	61	43.9	54.4	326
930˚C/2 h/WC + 510˚C/4 h/AC	1056	948	15.5	57	43.8	54.3	319
950˚C/2 h/WC + 460˚C/4 h/AC	1008	878	17	60	39.6	49.1	339
950˚C/2 h/WC + 510˚C/4 h/AC	1036	933	16.5	58	36.9	45.7	320

Table 4. Performance of TC4 extrusion pipe after heat treatment
表 4. 高氧含量 TC4 挤压管材热处理后的性能

热处理制度	室温拉伸				冲击		HV-维氏硬度
	Rm/MPa	RP0.2/MPa	A/%	Z/%	KU2/J	aKU2/J/cm^2	
R 态	967	876	17.5	48	42.7	53.2	318
910˚C/2 h/WC	1087	946	16	45	20.4	25.3	343

续表

930˚C/2 h/WC	1100	953	14	45	18.5	22.9	350
950˚C/2 h/WC	1123	978	15.5	46	16.5	20.7	352
910˚C/2 h/WC + 460˚C/4 h/AC	1117	987	16.5	46	19.2	23.8	351
910˚C/2 h/WC + 510˚C/4 h/AC	1104	998	16	47	19.8	24.5	344
930˚C/2 h/WC + 460˚C/4 h/AC	1154	1021	15	45	26	32.2	354
930˚C/2 h/WC + 510˚C/4 h/AC	1145	1031	14.5	46	20.2	25.1	348
950˚C/2 h/WC + 460˚C/4 h/AC	1141	1021	14	46	25.5	31.6	350
950˚C/2 h/WC + 510˚C/4 h/AC	1127	1020	15	46	16.4	20.3	355

4. 结论

(1) 高低氧 TC4 钛合金挤压管材固溶水冷处理时显微组织均表现出初生 α 相和针状马氏体，且随着温度的提高初生 α 相含量降低，针状马氏体含量提高。相对于低氧料，高氧含量 TC4 钛合金固溶后的初生等轴 α 相晶粒尺寸相对较大，且针状马氏体含量降低。

(2) 高低氧 TC4 钛合金挤压管材固溶时效热处理显微组织存在弥散析出物，且随温度提高弥散程度加强，析出物增多。

(3) 高低氧 TC4 钛合金挤压管材固溶时效处理后性能显著提高，这得益于针状 α' 马氏体在时效过程中发生分解析出物起到弥散强化的作用，从而提升材料的综合力学性能。

基金项目

“先进结构与复合材料”重点专项“钛合金返回料利用及板管材高效短流程制备关键技术开发”项目(项目编号：2022YFB3705600)中子课题四“钛合金管材高效短流程关键技术研发”(编号：2022YFB3705604)。

参考文献

[1] 刘建强. TC4 钛合金的显微组织及其抗冲击韧性[J]. 热加工工艺, 2013, 42(12): 63-66.

[2] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 中国材料进展, 2010, 29(5): 1-8.

[3] 原国森, 兖利鹏, 韩艳艳. 钛合金的应用进展[J]. 热加工工艺, 2017(4): 21-24.

[4] Qazi, J.I., Senkov, O.N., Rahim, J. and (Sam) Froes, F.H. (2003) Kinetics of Martensite Decomposition in Ti-6Al-4V-xH Alloys. *Materials Science and Engineering*: *A*, **359**, 137-149. https://doi.org/10.1016/s0921-5093(03)00350-2

[5] Flower, H.M., Henry, S.D. and West, D.R.F. (1974) The $\beta \rightleftarrows \alpha$ Transformation in Dilute Ti-Mo Alloys. *Journal of Materials Science*, **9**, 57-64. https://doi.org/10.1007/bf00554755

[6] Li, J. and Wang, H.M. (2013) Aging Response of Laser Melting Deposited Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V Alloy. *Materials Science and Engineering*: *A*, **560**, 193-199. https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.09.055

[7] 刘婉颖, 朱毅科, 林元华, 等. 热处理对 TC4 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 材料导报, 2013, 27(18): 108-111.

[8] 徐建伟, 边丽虹, 薛强, 等. 固溶温度对 TA19 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2015, 32(6): 27-30.