DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.01.006

深冷处理对 TC6 钛合金热导率和热膨胀系数的影响

赵金柱
(河北建材职业技术学院 材料工程系,河北 秦皇岛 066002)

摘　要:对 TC6 钛合金进行深冷处理,通过对比深冷处理前后合金在 25～600 ℃范围内的热导率和热膨胀系数的变化,探讨了深冷处理对 TC6 钛合金热导率和热膨胀系数的影响。结果表明:随着温度升高,经深冷处理合金的热导率先小于后大于未经深冷处理合金的热导率,而热膨胀系数则先略大于后小于未经深冷处理合金的热膨胀系数。600 ℃时,经深冷处理合金的热导率和热膨胀系数分别为 7.95 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$ 和 $1.17\times10^{-5}\cdot ℃^{-1}$,较相同温度下未经深冷处理的分别增大和减小了 14.88%(1.03 $W.m^{-1}\cdot K^{-1}$)和 1.62%($0.19\times10^{-6}\cdot ℃^{-1}$)。

关键词:TC6 钛合金;深冷处理;热导率;热膨胀系数

中图分类号:TG146.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)01-0026-04

Effects of Cryogenic Treatment on Thermal Conductivity and Thermal Expansion Coefficient of TC6 Titanium Alloy

ZHAO Jinzhu
(Department of Material Engineering, Hebei Vocational & Technical College of Building Materials, Qinhuangdao 066002, China)

Abstract: A cryogenic treatment test was carried on TC6 titanium alloy, the effects of cryogenic treatment on the thermal conductivity and thermal expansion coefficient of TC6 alloy under the temperature range of 25 ~ 600 ℃ were investigated. The results show that the thermal conductivity of the cryogenic treated alloy is first less and then greater than that of the original alloy; however, thermal expansion coefficient of TC6 alloy is first slightly greater and then less than that of the original alloy with the increase of temperature. When the temperature is up to 600 ℃, thermal conductivity and thermal expansion coefficient of the cryogenic treated TC6 alloy are 7.95 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$ and 1.17×10^{-5} $℃^{-1}$, and increases and decreases by 14.88% (1.03 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$) and 1.62% ($0.19\times10^{-6}$ $℃^{-1}$) respectively than that of the original alloy at the same temperature.

Key words: TC6 titanium alloy; cryogenic treatment; thermal conductivity; thermal expansion coefficient

TC6 钛合金具有良好的热强性,可在 450 ℃下长时间工作[1],因而作为一种应用于航天航空等领域的重要结构材料备受相关研究者的重视[2,3]。由于很多 TC6 钛合金部件是在高温条件下工作,因此开展提高 TC6 钛合金热稳定性及高温性能的研究具有重要的实际意义。深冷处理具有改善金属材料的性能及稳定工件尺寸等特点,已广泛应用在钢铁、硬质合金、铝合金、钛合金和铜合金等方面[4,5]。钛合金的热物理性能(如膨胀性、导热性等)直接影响其在高温条件下的尺寸稳定和使用性能。目前,关于深冷处理后钛合金热物理性能的研究较少。鉴于此,本文对 TC6 钛合金进行深冷处理,并测试深冷处理前后合金在 25~600 ℃范围内的热导率和热膨胀系数,所得结果为深冷处理在钛合金方面的应用提供参考。

1　试验材料及方法

试验材料为退火态 TC6 钛合金棒料,主要化学成分 w(%)为:6.12 Al,2.64 Mo,1.86 Cr,0.44 Fe,0.32 Si,其余 Ti。对退火棒料进行深冷处理,工艺制度为:加热至 950 ℃保温 20 min 后,快速浸入液氮中(-196 ℃)停留 30 min。将深冷处理前后的棒料分别加工成试验样品,测试合金在 25 ~ 600 ℃范围内的热扩散系数和热容。热扩散系数用 TC-7000 型热常数测试仪测试,精度为±7%,试样尺寸为 ϕ 6 mm×1.5 mm,热容在 STA449C 热分析仪上测试。根据 $\lambda=100\ \alpha\cdot\rho\cdot C_p$ 计算出热导率[6],式中 λ 为热导率($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$),$\alpha$ 为热扩散系数 ($cm^2\cdot s^{-1}$),ρ 为密度

收稿日期:2018-01-21

作者简介:赵金柱(1976-),内蒙古赤峰人,博士生,讲师.研究方向:材料加工及性能.电话:13780479792,
E-mail:273412517@qq.com

($g\cdot cm^{-3}$),C_p 为热容($J\cdot g^{-1}\cdot K^{-1}$)。用 DIL402C 精密膨胀仪测试合金在 25~ 600 ℃范围内的热膨胀系数,精度为±3%,Al_2O_3 作参比,试样尺寸为 ϕ6 mm×25 mm。利用 Axiovert200MAT 型光学显微镜和 JEM-2010 透射电镜观察深冷处理前后 TC6 钛合金的组织特征。

2 试验结果与分析

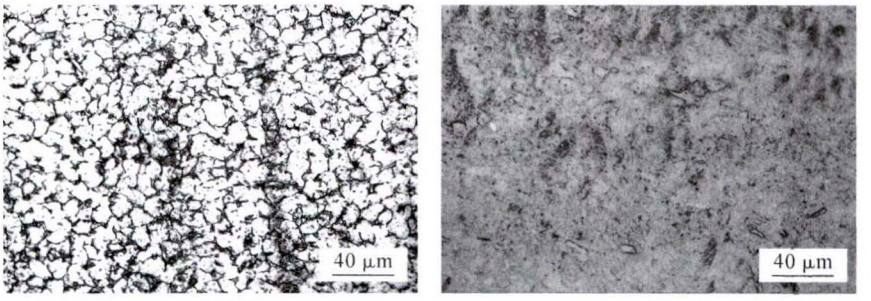
2.1 显微组织

图 1 为深冷处理前后 TC6 钛合金的显微组织。可以看出,原始态合金组织由密排六方晶格的初生等轴状 α 相和体心立方晶格的晶间 β 相组成;深冷处理后的组织由未溶的块状 α 相和 α′相(钛的密排六方结构的过饱和固溶体)组成。由图 2 的 TEM 照片可知,原始态合金基体内主要是粗大的初生 α 相,而深冷处理后合金中的初生 α 相尺寸减小,出现大量的细针状 α′相,晶界密度明显增大,晶粒内的位错数量也增多。这是由于 TC6 钛合金被加热到 950 ℃时,合金处在 α+β 两相区;在随后的冷却过程中,残留的初生 α 相不变,β 相将发生转变,由于在液氮中冷却,冷速较快,致使 α 相来不及从 β 相析出[10],从而造成 β 相形成具有六方结构的过饱和固溶体,即六方马氏体 α′相。

2.2 导热性

图 3 为深冷处理前后 TC6 钛合金的热导率与温度的关系曲线。可以看出,在 25~600 ℃范围内,深冷处理后合金的热导率随着温度升高先小于后大于未经深冷处理的,两种状态合金的热导率在 400 ℃时均最低。当温度为 100 ℃时,深冷处理后合金的热导率为 7.12 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$,较同温度下未经深冷处理合金的热导率减小了 4.81%(0.36 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$);600 ℃时,深冷处理后合金的热导率为 7.95 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$,较未经深冷处理的增大了 14.88%(1.03 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)。

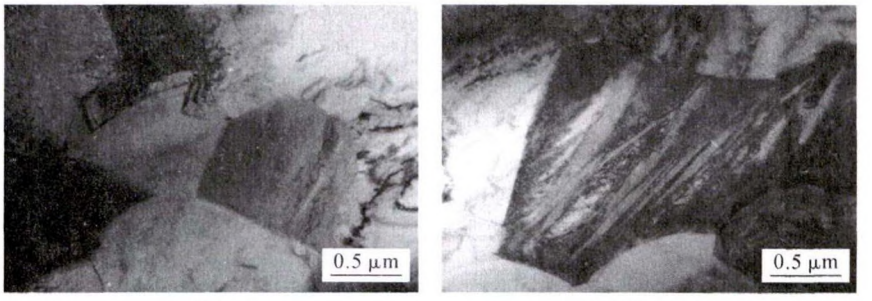
深冷处理后 TC6 钛合金组织中存在细针状 α′相,造成晶界密度增大;同时,在深冷处理过程中因体积收缩而造成合金组织中产出应力、晶格畸变和位错等缺陷,加大了对电子的散射作用[8],增大电子运动阻力,从而使合金的导热能力下降。原始态合金组织由 α 和 β 相组成,而深冷处理后的组织由 α 和 α′相组成,α 和 α′相均为密排六方晶格,β 相为体心立方晶格。由于 β 相的晶格致密度比 α 相小,原子在 β 相中的扩散系数比 α 和 α′相大,所以在较低温条件下,经深冷处理后 TC6 钛合金的导热性较未经深冷处理的导热性差。随温度的升高,由深冷处理造成的应力和位错等缺陷得以消除,对电子的散射作用减小,降低了材料的热阻;同时不稳定的 α′相分解形成 α+β 相,有利于原子的扩散,提高合金的导热能力。另一方面,由于材料内部的孔隙能恶化材料的导热性能[9],TC6 钛合金在深冷处理过程中体积收缩,使材料内的部分微孔得到弥合有利于提高材料的导热性能。所以温度



(a)原始态　　(b)深冷处理

图 1 TC6 钛合金的金相组织

Fig.1 Microstructure of TC6 titanium alloy



(a)原始态　　(b)深冷处理

图 2 TC6 钛合金的 TEM 照片

Fig.2 TEM images of TC6 titanium alloy

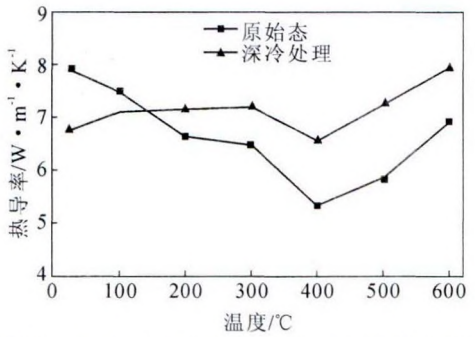


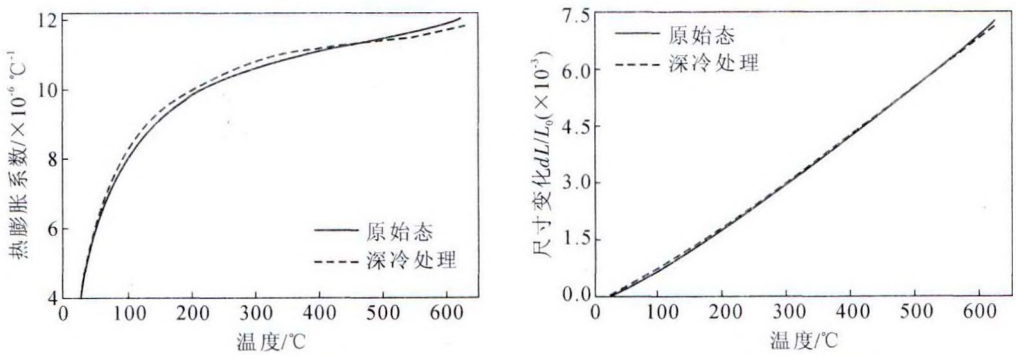
图 3 TC6 钛合金的的热导率随温度变化曲线
Fig.3 Relationship between the temperature and the thermal conductivity of TC6 titanium alloy

降至一定程度时，深冷处理后合金的热导率将大于未经深冷处理合金的热导率。

2.3 热膨胀性

图 4 为深冷处理前后 TC6 钛合金的膨胀曲线。可以看出，在温度 25～600 ℃范围内，两种状态合金的热膨胀系数和长度变化率随温度的升高趋势一致，深冷处理后合金的热膨胀系数先大于后小于未经深冷处理的。当温度低于约 487 ℃时，深冷处理后合金的热膨胀系数较大；超过 487 ℃时，未经深冷处理合金的热膨胀系数较大（见图 4a）。由图 4(b)可见，TC6 钛合金的尺寸变化随温度升高基本呈线性增加。当温度低于约 487 ℃时，深冷处理后合金的尺寸变化略大于深冷处理前的，但深冷处理对 TC6 钛合金的热膨胀性的影响不大。温度为 100 ℃和 600 ℃时，深冷处理后 TC6 钛合金的热膨胀系数分别为 8.21×10^{-6}·℃$^{-1}$ 和 1.17×10^{-5}·℃$^{-1}$，较同温度下未经深冷处理合金的分别增大和减小了 2.79%和 1.62%。这是由于深冷处理后 TC6 钛合金组织中的 α' 相含有较高浓度的位错和空位，而位错和空位均能削弱原子之间的结合力[10]，使合金在受热时容易发生膨胀。随着温度的升高，α' 相将发生分解，位错和空位浓度减小。而未经深冷处理的 TC6 钛合金组织中不含 α' 相。这可能是导致深冷处理前后 TC6 钛合金的热膨胀系数在加热过程中出现图 4(a)结果的主要原因。

综上所述，与未经深冷处理的 TC6 钛合金相比，深冷处理后，合金在较高的温度条件下具有高的导热性和低的热膨胀性。



(a)热膨胀系数　　(b)长度变化率

图 4 TC6 钛合金的膨胀曲线
Fig.4 The expansion curves of TC6 titanium alloy

3 结论

(1)在 25～600 ℃范围内，深冷处理后 TC6 钛合金的热导率随着温度升高先小于后大于未经深冷处理的，而热膨胀系数则先略大于后小于未经深冷处理的；深冷处理不改变热膨胀系数随温度的变化趋势。

(2)深冷处理能提高 TC6 钛合金在高温工况下的导热性，降低其热膨胀性能；当温度为 600 ℃时，经深冷处理合金的热导率和热膨胀系数分别为 7.95 W·m^{-1}·K^{-1} 和 1.17×10^{-5}·℃$^{-1}$，较相同温度下未经深冷处理的分别增大和减小了 14.88%和 1.62%。

参考文献：

[1] 熊爱明，黄维超，陈胜晖，等. 热处理制度对 TC6 钛合金显微组织的影响[J]. 中国有色金属学报，2002，12(S1):206-209.

[2] Nie X F, He W F, Zhou L C, et al. Experiment investigation of laser shock peening on TC6 titanium alloy to improve high cycle fatigue performance [J]. Materials Science and Engineering A, 2014,594: 161-167.

[3] 羊健. 激光冲击强化对 TC6 钛合金疲劳性能的影响 [J]. 铸造技术，2015，36(2):375-377.

[4] Chang Y P, Chou H M, Horng J H, et al. Effects of deep cryogenic treatment on tribological properties of the tool steel DC53 [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 311: 477-481.

[5] 曹栋，贾昭，谌岩. 深冷处理对 TC6 钛合金高温抗压能力的影响[J]. 金属热处理，2017，42(2)：160-162.

[6] 杨伏良,甘卫平,陈招科. 粉末粒度对高硅铝合金材料组织及性能的影响[J]. 材料科学与工艺,2006,14(3):268-271.

[7] 张翥,王群骄,莫畏. 钛的金属学和热处理[M]. 北京:冶金工业出版社,2009: 62.

[8] Ma Y Q. Effects of 4 GPa pressure heat treatment on mechanical properties and electrical conductivity of CuCrNiAl alloy[J]. Materials Transactions, 2013,54(5): 725 -728.

[9] 杨伏良,甘卫平,陈招科. 挤压温度对高硅铝合金材料物理性能的影响[J]. 机械工程学报, 2006,42(6):7-10.

[10] 陈丽萍,司乃潮. 热处理对 CuZnAl 形状记忆合金热膨胀特性的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2005,25(8):459-461.

河北省冀州市华北铸钉铸造工具总厂

冀州市华北铸钉铸造工具总厂座落于河北省冀州市城南白庄工业区，紧靠全国大动脉京九、石梅铁路，交通十分便利。我厂是生产铸顶（泥芯撑)、羊毛掸笔、硬扫笔、圆水笔的专业厂家。建厂36多年来,技术设备先进，产品销往全国各地,深受用户欢迎。本厂始终承诺：诚信至上，守信誉,质高价低，实行三包，交货及时，代办发运，可供图订做。热情欢迎国内外来人来电选购。

四同

同类产品比质量　同等质量比价格
同样价格比服务　同等服务比速度

两免

免费为客户提供产品技术咨询
免费为客户提供初期试用产品

一、常用修造工具规格（材质为不锈钢或弹簧钢）

/mm

名称	型号	规格	名称	型号	规格	名称	型号	规格	名称	型号	规格
刮刀	2#	160×45	秋叶	1#	180×30	三角光子	2#	50×30	东北压钩	1#	270×50
尖刮刀	3#	140×35	单头钢批	2#	240×22	蛋圆光子	1#	75×50	圆型钩	2#	200×30
提钩	2#	350×15	单头钢批	3#	210×20	压钩	1#	270×50	长把压钩	1#	220×30
提钩	4#	300×10	法兰钩	1#	270×14	压钩	2#	240×45	柳叶钩	1#	240×40
钢批钩	1#	280×16	榔头铲	1#	240×24	单齐压钩	2#	240×45	单开提钩	2#	320×12

二、掸笔、硬扫笔：20～120 mm 10个品种； 圆水笔：12～17 mm 3个品种；
三、铸顶（芯撑）有圆、方、长方形，单、双、多柱、异形铸顶等各种铸铁、铸钢用铸顶材质为A3或A3F，表面镀锌、镀锡等；
四、过滤网、木型工具、皮风箱、铸尺、百叶轮、角磨片、树脂油、固化剂、粘结剂、木型锤等。

图中从左至右依次为：1.刮刀 2.尖刮刀 3.压勺 4.单齐压勺 5.提钩 6.单头钢批 7.秋叶 8.单开提钩 9.法兰钩 10.钢批钩 11.掸笔、扫笔 12.圆水笔 13.铸顶

诚征各地代理商

厂址：河北省冀州市城南白庄工业区（053200） 联系人：白英韩 13831863803 白其水 13582484193（中国农行金穗卡，户名：白英韩 卡号：9559982130332490310)
电话/传真：0318-8682135 网址：www.hbzhz.com E-mail:hbbyh@hbzhz.com 银行汇款：冀州市华北铸钉铸造工具总厂 开户行：市中行 帐号：100148643069

经销处
哈尔滨市铸材门市部 13831863803　包头市铸材经销处 13633184318
杭州市中亚铸材有限公司 13932860882　贵阳市忠信铸材公司 13831888322
长沙市铸材办事处 13831823340　西宁市铸材办事处 13931810511
上海市铸材办事处 13932894585　南宁市铸材办事处 0771-8994686

本单位为一般纳税人，增值发票税率17%。