固溶冷却方式对Ti150合金组织及性能的影响

瞿兆银，王清，白家元，牟旭祥，刘至唯
贵州航宇科技发展股份有限公司　贵州贵阳　550081

摘要：主要研究了不同固溶冷却方式对Ti150合金组织及力学性能的影响。通过采用不同的热处理制度对Ti150合金试样分别进行热处理，然后对试样的室温拉伸、高温拉伸、硬度、金相组织及高温蠕变进行测试与分析。结果表明：不同的固溶冷却方式对材料的金相组织及力学性能有明显影响。随着冷却速度的降低，Ti150合金的强度逐渐降低，固溶水冷时，室温抗拉强度达1176MPa，空冷时降至1027MPa；塑性逐渐提升，室温伸长率由水冷时的8.4%升高到空冷时的14.1%；硬度方面，不仅随着固溶冷却速度的降低而降低，而且相同制度下试样心部硬度也明显低于表面硬度。结论认为：这是由于Ti150合金具有较强的固溶强化效应，固溶冷却速度越慢，合金元素扩散越充分，初生α相逐渐长大，次生α相板条变粗，位错密度降低，所以强度、硬度降低，抗蠕变能力变差；反之，固溶冷却速度越快，强度、硬度越高，因此，要想获得较高的强度及抗蠕变能力，固溶宜采用水冷。

关键词：固溶；硬度，扩散；蠕变；α相

Effect of solution cooling on microstructure and properties of Ti150 alloy

QU Zhaoyin, WANG Qing, BAI Jiayuan, MU Xuxiang, LIU Zhiwei
Guizhou Aviation Technical Development Co., Ltd., Guiyang 550081, Guizhou, China

Abstract: This article mainly studies the effects of different solution cooling methods on the structure and mechanical properties of Ti150 alloy were studied.The Ti150 alloy sample was heat treated by different heat treatment methods, and then the temperature tensile, high temperature tensile, hardness, microstructure and high temperature creep of the sample were tested and analyzed. The results show that different solution cooling methods have obvious effects on the microstructure and mechanical properties of the material. With the decrease of the cooling rate, the strength of Ti150 alloy gradually decreases. The tensile strength of Ti150 alloy at room temperature reaches 1176MPa when it is cooled by solution water and 1027MPa when it is cooled by air. The plasticity gradually increased, and the tensile elongation at room temperature increased from 8.4% in water cooling to 14.1% in air cooling. In terms of hardness, it not only decreases with the decrease of the solution cooling rate, but also the core hardness of the sample under the same system is significantly lower than the surface hardness. Conclusion the analysis shows that Ti150 alloy has a strong solid solution strengthening effect, the slower the solid solution cooling rate, the more fully the alloying element diffusion, the primary α phase gradually grows, the secondary α phase slat thickens, the dislocation density decreases, so the strength and hardness decrease, and the creep resistance becomes worse. Conversely, the faster the solution cooling rate, the higher the strength and hardness, Therefore, in order to obtain high strength and creep resistance, water cooling should be used for solid solution.

Keywords: solution; hardness; diffusion; creep; α phase

1 序言

自20世纪中叶钛合金被开发运用以来，在各行各业得到了广泛的应用，特别是在航空航天领域，传统的钢、铝等材料已经不能完全满足使用要求。因其具有重量轻、比强度高，以及耐腐蚀与耐高温等特点，钛合金在航空工业中迅速脱颖而出。在航空发动机领域，为减轻发动机重量、提高其推重比，正朝着使用部分钛合金代替耐热钢及高温合金的方向发展[1]。因此，现在对钛合金的性能也提出了更高的要求，特别是在高温、高应力、高转速环境中的使用性能。

进入21世纪以来，世界各国在高温钛合金的研发上有了长足的进步，已经研发出能在600℃以上长期使用的高温钛合金及钛基复合材料，如英国的IMI834合金、美国的Ti-1100合金及俄罗斯的BT18Y合金等[2]。国内对于高温钛合金的研发及应用也取得了一些成绩，如Ti60、Ti65、Ti2AlNb及Ti150等钛合金的研发及应用[3-5]。Ti150是国内研发的近α型高温钛合金，其能在600℃的高温环境中长期使用，适合制造在高温下服役的静子件和转子件[6]。目前，国内外对Ti150合金的研究集中在固溶温度对显微组织和力学性能的影响[7]，虽然获得了一些Ti150合金组织和性能随固溶温度变化的规律，但是还缺乏对该材料固溶冷却方式的研究，本文通过研究固溶冷却方式对Ti150合金显微组织和力学性能的影响，为今后的生产实践提供参考。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

本次试验所用材料为经过3次真空自耗电弧炉熔炼的Ti150合金铸锭，其名义成分见表1。经金相法测得该合金α相＋β相→β相变点为1051℃。铸锭经β相区开坯锻造，在α相＋β相区改锻为ϕ180mm规格棒材，试块尺寸加工至200mm×25mm×25mm，然后在箱式电阻炉内进行固溶和时效处理。

表1 Ti150合金铸锭名义成分（质量分数）（%）

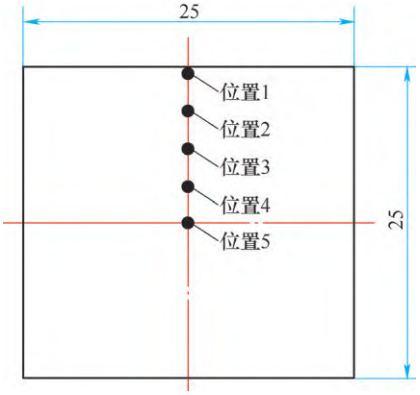
Ti	A1	Sn	Zr	Mo	Nb	Si	C
1.0	5.8	4.0	3.5	0.5	0.7	0.35	0.06

2.2 试验方法

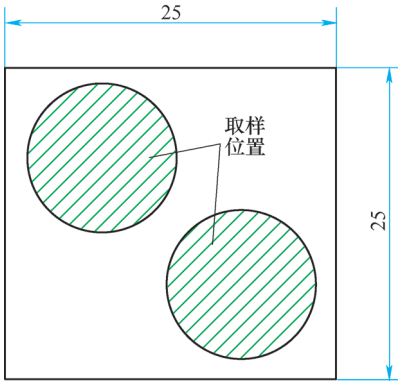
将以上试块分4组进行热处理，具体热处理制度见表2。试样热处理后进行理化检测，然后通过对检测结果进行分析，明确固溶冷却方式对材料组织及性能的影响。硬度检测位置、拉伸和蠕变试验取样位置如图1所示。

表2 热处理制度

试块组号	固溶	时效
1	1026℃×120min，水冷	700℃×120min，空冷
2	1026℃×120min，油冷	700℃×120min，空冷
3	1026℃×120min，风冷	700℃×120min，空冷
4	1026℃×120min，空冷	700℃×120min，空冷



a）硬度检测位置



b）拉伸及蠕变试验取样位置

图1 检测和取样位置示意

3 试验结果及讨论

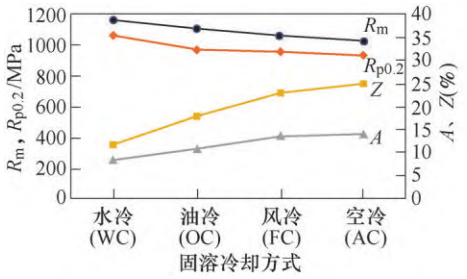
3.1 力学性能测试

热处理后对试块进行室温拉伸、高温拉伸、高温蠕变及硬度检测，结果如图2所示。从图2可看出，经过不同的热处理制度，材料力学性能有明显差异。从图2a、b可知，随着冷却速度的降低，Ti150合金强度降低，塑性升高；当固溶采用水冷时，材料的室温抗拉强度达1176MPa、伸长率8.4%，600℃高温抗拉强度也高达763MPa；固溶采用空冷时，材料室温抗拉强度为1027MPa、伸长率

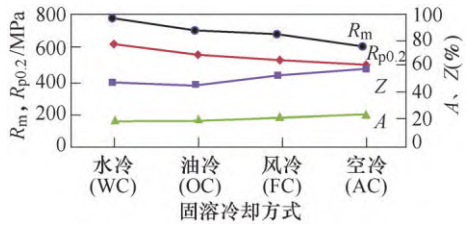
14.1%，600℃高温抗拉强度降至611MPa。试样经过蠕变测试（600℃，150MPa，100h）后的残余伸长率如图2c所示，从图2c可知，随着固溶冷却速度降低，抗蠕变能力变差。将每组试块切取一个试样按图1a所示位置进行硬度检测，结果如图2d所示。从图2d可看出，硬度随固溶冷却速度的降低而降低，水冷时，试样表面硬度为383HBW，心部硬度为349HBW；空冷时，表面硬度为335HBW，心部硬度为321HBW，从不同位置硬度还可看出，硬度从表面向心部逐渐降低。

3.2 金相组织观察

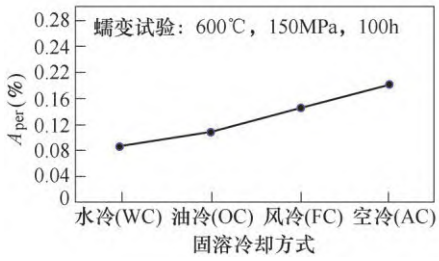
试验材料热处理后典型的显微组织如图3所示。从图3可看出，在α相＋β相→β相变点以下25℃时固溶，冷却速度不同的情况下，时效后的组织形貌均



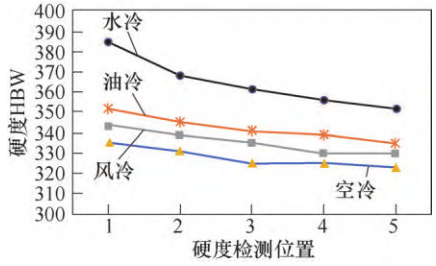
a）室温拉伸



b）600℃拉伸

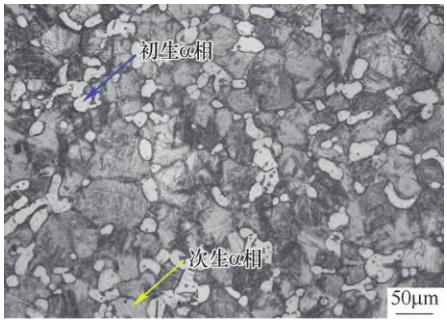


c）蠕变

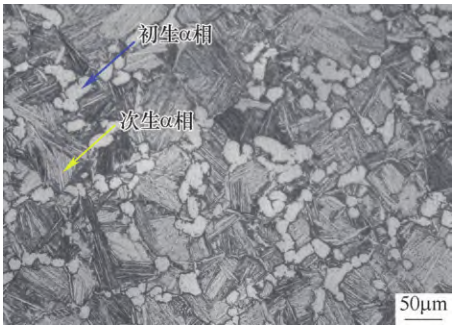


d）硬度

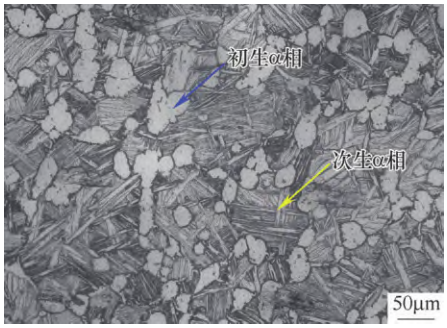
图2　试样热处理后的力学性能



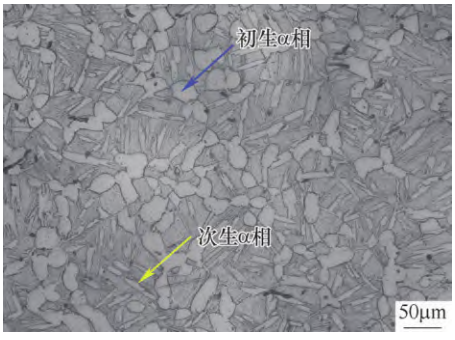
a）水冷



b）油冷



c）风冷



d）空冷

图3　不同热处理后的显微组织（200×）

为双态组织，在β相转变组织的基体上均匀分布着等轴初生α相[8]；次生α相由过饱和β相和马氏体α′相分解形成，形态呈片层状，优先从晶界开始析出。不同的是，随着冷却速度的降低，初生α相含量逐渐增加（从水冷时的约20%增加到空冷时的30%），尺寸也逐渐长大（水冷时初生α相直径为12～18μm，空冷时长大至20～25μm）。而且随着固溶冷却速度的降低，次生α相也明显增加，片层间距变粗，水冷时为极细的板条，空冷片层逐渐变粗甚至呈短棒状。

3.3 分析讨论

相关研究表明，近α相钛合金组织转变主要为扩散型固态相变，转变过程受固溶冷却速度的影响较大[9, 10]。Ti150合金在α相＋β相→β相变点以下进行高温固溶时，保温一定时间后，α相和β相逐渐达到平衡，合金元素重新分配，在固溶后快速冷却时，初生α相相对较小，β相转变成过饱和马氏体α′相越多，后续的时效过程中，过饱和马氏体α′相又转变为次生α相[11]。由此得出Ti150合金在快速冷却时，合金元素来不及扩散，初生α相来不及长大，次生α相的长大过程被抑制，形成不同方向的细片层状，冷却速度较慢时则形成粗大的板条或棒状，板条尺寸的增加使得位错密度降低，使位错滑移变得更加容易，从而影响材料的力学性能。

组织形态决定了钛合金性能。从室温、高温拉伸性能看，随着冷却速度降低，材料的强度也明显降低，塑性增加。这主要是由于在快速冷却条件下，原子来不及扩散和聚集，初生α相的长大被抑制，相应的含量略低，次生α相也更细小，所以强度高、塑性差；反之，冷却速度越慢，初生α相含量越多，次生α相也随之长大，合金强度更低[12]。从硬度检测结果看，冷却速度越快，硬度越高，而且试样不同位置硬度差异非常明显。这主要是由于合金β相稳定元素含量较少，因此导致材料淬透性较差[13]。从蠕变性能看，由于固溶冷却速度越慢，初生α相含量越多，因此抗蠕变能力也更差[14]。

4 结束语

1）通过试验研究表明，Ti150合金随着固溶冷却速度的降低，强度和抗蠕变能力逐渐降低，塑性明显提高。

2）固溶冷却速度越低，初生α相的含量略有增加，尺寸长大；次生α相也随着冷却速度的降低，形态由细小的片层状变为粗条状及棒状。

3）从硬度检测情况看，硬度不仅随着冷却速度的降低而降低，而且同一个试样从表面到心部硬度也逐渐降低，说明材料淬透性较差。

4）通过试验研究表明，要得到较高的强度及抗蠕变能力，Ti150合金固溶后应采用水冷比较合适。

参考文献：

[1] 金和喜，魏克湘，李建明，等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报，2015，25（2）：281-292.

[2] 侯金健，高强强，安晓婷. 国内外高温钛合金研究及应用的最新发展[J]. 热加工工艺，2014，43（10）：11-15.

[3] 曾立英，赵永庆，洪权，等. 600℃高温钛合金的研发[J]. 钛工业进展，2012，29（5）：1-5.

[4] 王旭，李四清，李臻熙，等. 固溶处理对Ti65高温钛合金组织与性能的影响：“全国钛及钛合金学术交流会”论文集[C]. 北京：科学出版社，2013.

[5] 刘石双，曹京霞，周毅，等. Ti2AlNb合金研究与展望[J]. 中国有色金属学报，2021，31（11）：3106-3126.

[6] 彭文雅，潘波，赵春玲，等. 微织构对Ti150合金锻件拉伸性能的影响[J]. 钛工业进展，2022，39（3）：1-6.

[7] 张雪敏，陈秉刚，李巍，等. 固溶温度对Ti150合金棒材组织及力学性能的影响[J]. 钛工业进展，2019，36（3）：31-34.

[8] BORCHERT B，DAEUBLER MA. Influence of microstructure of IMI834 on mechanical properties relevant to jet engines：“Sixth World Conference on Titanium”Proceedings[C]. Les Ulis：Les Editions de Physique，1988.

[9] 覃佳栋，屠孝斌，刘继雄，等. 固溶冷却方式对Ti60钛合金大规格棒材组织和力学性能的影响[J]. 科技创新与应用，2020（6）：120-122.

[10] SINGH A，BALASUNDAR I，GAUTAM J P，et al. Effect of primary a phase fraction on tensile behavior of IMI834 alloy[J]. Procedia Structural Integrity，2019，14：78-88.

[11] 李四清，王旭，邓雨亭，等. 固溶温度对IMI834

（下转第47页）

表1　环保型淬火油槽温度控制系统与现有降温方式的对比

项 目		增加循环水降温	塔式风冷降温	环保型温度调节系统
费用/万元		2.0	3.5（设备购置成本）	5.0（设备购置和改造成本）
油槽淬火冷却介质温度/℃	上部	50.8	47.5	45.2
	中部	58.1	50.2	46.5
	下部	65.5	53.1	48.3
油温均匀度（%）		77.5	89.5	93.6
使用噪声/ dB		（1m处）37～45	（1m处）78～83	（1m处）39～46
不足		油温高低不能检测，淬火后硬度波动范围较大	噪声较高，油在冷却过程中容易吸入粉尘等而受到污染	冷却水需经常更换，浪费水资源

注：1. 因测试3种设备不是同一厂家使用的产品，且每家工艺也有些差别，所以测试的结果具有一定的参考作用。

2. 油温均匀度计算式为：[1－（最大温度－最小温度）/最大温度]×100%。

5　产品性能验证

将改进后淬火油槽在实际生产过程中使用所得的产品性能与传统方式的增加油槽储油量降温和冷却塔式风冷降温所得到的产品性能，从淬火后产品硬度和淬火效果上进行对比，具体数据见表2。从表2可知，本文提供的改进措施切实可行。

表2　产品检测数据对比

项 目	增加油槽容积（3m³）降温	塔式风冷降温	环保型温度调节系统
产品直径/mm	20	20	20
硬度HRC	60～76	65～72	64～70
淬火效果	一般	均匀度较好	均匀度较好

6　结束语

本文设计的环保型淬火油槽、淬火油温度控制系统通过增加降温模块及温度检测配合外置冷却水循环机构，有效降低了淬火油温度升高，减少了油气挥发，降低了原有设备噪声高的不利因素，稳定了淬火油的淬火性能，具有操作简便、噪声低、性价比高和节能环保的特性，值得推广。

参考文献：

[1] 宋锴，陈志宏. 淬火介质冷却性能的测定方法[J]. 机械传动，2007（1）：86-89.

[2] 王小增，杨久红，曾辉. 大型轴承钢球热处理过程中瞬态温度和应力分布[J]. 热加工工艺，2012，41（20）：199-203.

[3] 何嘉生，鲍文铨. 螺旋板式换热器在淬火油池上的应用[J]. 金属热处理，1986（9）：58-59.

[4] 张克俭，聂晓霖，郝学志，等. PAG淬火液使用中的变化规律[J]. 金属热处理，1999（5）：41-43.

[5] 王忠诚，王东. 热处理常见缺陷分析与对策[M]. 2版. 北京：化学工业出版社，2012.

[6] 王秉铨，姜生远，王秋. 工业炉设计手册[M]. 北京：机械工业出版社，2011.

[7] 孙克钧，戚辉，李善文. 大型套圈淬火油槽冷却装置的改进[J]. 轴承，2010（1）：19-20.

MW 20241220

（上接第43页）

钛合金锻件组织及性能的影响[J]. 航空制造技术，2019，62（19）：47-52.

[12] 王宁，贾蔚菊，毛小南，等. 热处理对IMI834钛合金组织及拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2022，51（8）：3077-3088.

[13] 吴欢，赵永庆，葛鹏，等. β稳定元素对钛合金α相强化行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2012，41（5）：805-810.

[14] TORSTER F，ANDRES C，LÜTJERING G，et al. Correlation between texture and high temperature mechanical properties of the titanium alloy IMI 834[J]. Zeitschrift Fuer Metallkunde，1999，90（3）：174-181.

MW 20241210