冷轧变形量对TA2纯钛板材的组织和力学性能的影响

尚笑宇，李壮，蔡一钦，蔡文豪，李晋宇，王灏旭，陈胜楠

沈阳航空航天大学材料科学与工程学院　辽宁沈阳　110136

摘要：TA2纯钛作为α型钛合金中的一种，在航空航天工业中被广泛使用。通过在实验室对TA2纯钛进行了不同变形量的冷轧处理，对其组织性能进行了分析。结果表明：TA2纯钛经过冷轧变形后，随变形量的增加，等轴状的α晶粒明显细化，组织呈明显的纤维状形貌。随冷轧变形量增加，强度增加、硬度增大，而塑性降低。经过53%冷轧变形后的试样，其抗拉强度达712.9MPa；断后伸长率为7.7%；维氏硬度达294.44HV。造成TA2纯钛力学性能变化的原因是由于变形导致了晶粒碎化，位错密度增加，因此其强度硬度增加。

关键词：TA2纯钛；冷轧变形量；晶粒；性能

1　序言

TA2纯钛是α型钛合金中典型的一种，它具有密度小、比强度高、耐热性能好、耐腐蚀性能卓越以及无磁无毒等优点[1]，在各行各业大受欢迎[2]。TA2纯钛一般退火组织为单α相，它不能进行热处理强化，在实际生产和工程应用中，可以采用不同的加工手段来决定它们加工后的组织和性能。TA2纯钛同淬火回火低合金钢相比，其冲击强度不相上下，其强化机制为冷变形强化[3, 4]。搞清TA2纯钛在变形中的组织演变，获得良好的加工工艺很有必要。

基金项目：国家“863”计划项目（2015AA03A501）；沈阳航空航天大学大学生创新创业训练计划项目（201910143070）。

本文将TA2纯钛原料经过不同工艺冷轧处理，将原料与冷轧后试样的组织性能进行比较，对其强化机制进行分析，为获得最佳的机械加工工艺提供理论依据。

2　试验材料与方法

本试验采用TA2纯钛作为试验材料，其化学成分为：w_O=0.140%，w_{Fe}=0.021%，w_C=0.010%，w_N=0.007%，w_H=0.001%，其余为Ti。热轧TA2纯钛经过900~1000℃加热，800~850℃轧制后，得到热轧退火态的TA2纯钛原料。经过线切割，制备12块15mm×15mm×120mm的棱柱状试样。将其分为4组，其中3组分别放在ϕ150mm冷轧机上进行冷轧。冷轧变形量分别为27%、40%和53%。

4　结束语

正火温度会引起球墨铸铁基体组织的改变，造成基体组织中的珠光体在数量、形状、分布位置的改变，正是由于这些改变，使硬度发生了改变。因此，正火温度能够引起QT500-7球墨铸铁硬度的改变，并随着正火温度的增加，硬度逐步提高。

参考文献：

[1] 朱杰武.球墨铸铁强韧化热处理技术的研究[J].热加工工艺，2001，30（1）：43-44.

[2] 王群，陈志坚，房应荣.改变基体组织热处理的理论及工艺[J].装备制造技术，2013（1）：66-68.

[3] 中国工程机械学会热处理学会.热处理手册[M].北京：机械工业出版社，2008.

[4] 全国铸造标准化技术委员会.球墨铸铁金相检验：GB/T 9441—2009[S].北京：中国标准出版社，2010.

[5] 吴德海.球墨铸铁[M].北京：中国水力水电出版社，2006.

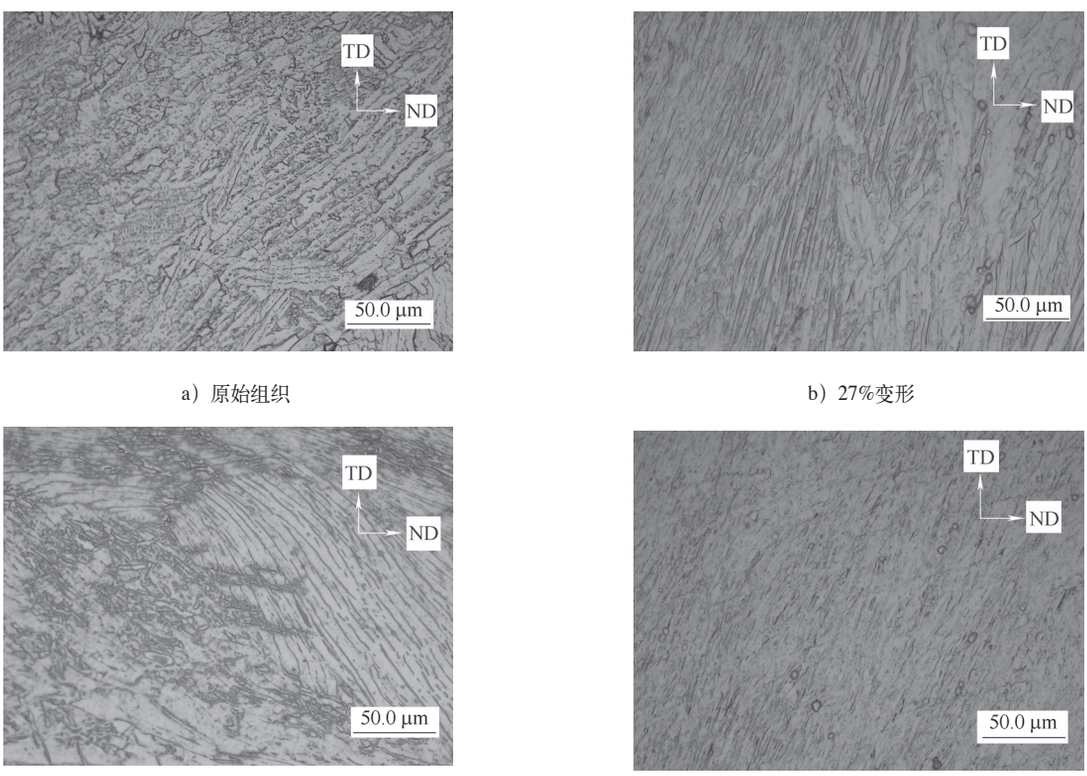
MW 20200614

按照GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》加工出拉伸试样。将原料与冷轧料，经过磨、抛、4%HNO_3酒精试剂腐蚀后，分别在金相显微镜（OLYMPUS）和透射电镜（EM400T）下对其显微组织进行分析。在HVS-1000数显维氏硬度计上测量其维氏硬度（载荷为1000g），每个试样上测5个点取平均值。在INSTRON4206型电子机械拉伸试验机上完成拉伸试验，每3组取其平均值。

3 试验结果与讨论

3.1 显微组织

图1为TA2纯钛的原始组织（见图1a）、27%、40%和53%冷轧变形后的金相组织（见图1b~d）。通过图1中几种组织的比较，不难发现，TA2纯钛的组织受冷轧的影响是很大的。在原始组织中，我们可以看出等轴晶粒的存在（见图1a）；而经过27%的冷轧变形后，等轴α晶粒拉长，呈纤维状（见图1b）；经过40%和53%冷轧变形后，α晶粒的纤维状程度加剧（见图1c、图1d）。冷轧前以及不同变形量冷轧后TA2纯钛的晶粒平均尺寸分别为：4.11μm、3.71μm、3.18μm、2.75μm。



a）原始组织　b）27%变形

c）40%变形　d）53%变形

图1 TA2纯钛的显微组织

53%冷轧变形后试样的透射电镜照片如图2所示。从图2可以看到，经过53%冷轧变形后，α晶粒中产生大量的位错，这种高密度的位错无疑会对TA2纯钛的力学性能产生影响。

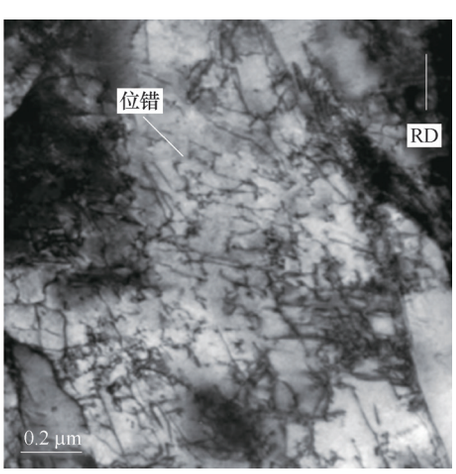


图2 TA2纯钛的53%冷轧变形试样的TEM组织

3.2 力学性能

显微组织的变化对其宏观力学性能产生了影响。上述四组试样的抗拉强度（R_m）、屈服强度（$R_{P0.2}$）、断后伸长率（A）和维氏硬度（HV）的平

均值见表1。表1中，未冷轧变形的TA2纯钛的原始试样抗拉强度最低，为321.8MPa；断后伸长率最高，达28.3%；维氏硬度也最低，为209.63HV。随变形量加大，试样的抗拉强度、屈服强度增高，断后伸长率降低，维氏硬度也增高。经过53%冷轧变形后的试样，其抗拉强度最高，达712.9MPa；断后伸长率最低，为7.7%；维氏硬度也最高，达294.44HV。

表1 TA2纯钛试样力学性能

试样	R_m /MPa	$R_{P0.2}$ /MPa	A (%)	维氏硬度HV	测试误差 (%)
原始试样	321.8	268.5	28.3	209.63	4.3
27%变形	558.3	483.2	12.1	247.13	3.2
40%变形	633.4	552.5	8.8	263.44	3.4
53%变形	712.9	621.8	7.7	294.44	4.1

3.3 结果分析与讨论

由于TA2为α纯钛，其常温下显示出α相特征。因此，冷变形后组织都为α相的晶粒。在TA2原料的组织中，有些α晶粒呈条状，其中，等轴状α晶粒不均匀地分布在条状α晶粒中（见图1a）。随冷轧变形量的加大，等轴状α晶粒明显细化，组织呈现出明显的纤维状形貌（见图1）。在经过不同变形量的冷轧变形后，随着变形量的增大，α晶粒由于受到挤压，条状被压扁，晶粒破碎，等轴α晶粒变得更加细小。经过27%和40%冷轧变形后，其金相组织中仍发现有轧成“V”形状的α晶粒（见图1b、图1c），而在53%变形后，“V”形状的α晶粒已经完全破碎，但仍可发现等轴α晶粒的存在（见图1d）。TA2纯钛在塑性变形过程中消耗了能量，它们大多转化成热能而消失了，由于采用了多次的冷轧，冷轧时因放热，甚至再结晶有可能发生，此时，等轴α晶粒形成。随着变形量的增加，等轴α晶粒进一步破碎，在大变形量下产生纤维组织。

原始试样、27%、40%和53%冷轧变形后试样的力学性能试验表明，随着冷变形量的增加，强度、硬度增加，而断后伸长率降低。冷变形时晶粒发生了碎化，变形越剧烈，碎化的越彻底，最后得到细小的晶粒。晶粒尺寸对材料力学性能的影响可以通过Hall-Petch关系式进行说明，当晶粒直径变得越小时，则其抗变形能力越大。晶粒越细，塑性也越好。当冷轧变形量最大时，强度最高、硬度最大（见表1），此时晶粒细化最大，但同时塑性有所降低。

冷轧变形量增大的同时造成了金属位错密度的增加。TA2纯钛经过53%冷轧变形后产生了大量的位错（见图2），金属中的这种高密度位错缠结在一起，增加了位错运动的阻力，使位错运动困难，需要增加外力来使位错运动[5]。因此，冷轧变形提高了TA2纯钛的强度和硬度。变形量27%、40%和53%的冷轧试验，有效地提高了TA2纯钛的力学性能。

4 结束语

1）TA2纯钛经过冷轧变形后，随冷轧变形量的增加，等轴状α晶粒明显细化，组织呈明显的纤维状形貌。

2）TA2纯钛随冷轧变形量增加，强度增加、硬度增大，但同时塑性降低。经过53%冷轧变形后的试样，其抗拉强度达712.9MPa，断后伸长率为7.7%，维氏硬度达294.44HV。

3）TA2纯钛力学性能变化的原因是由于变形导致了晶粒碎化，位错密度增加，因此其强度、硬度增加。

参考文献：

[1] 方劲，刘芳，第文琦，等.冷轧工艺参数对商业纯钛力学性能和腐蚀性能的影响[J].塑性工程学报，2019，26（6）：98-105.

[2] R. R. BOYER. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J].Materials Science and Engineering A，1996，213（1-2）：103-114.

[3] L. PENG，Q. HU，X. WU. Quantitatively Analyzing Strength Contribution vs Grain Boundary Scale Relation in Pure Titanium Subjected to Severe Plastic Deformation[J].Metallurgical & Materials Transactions A，2016，47A（5）：1922-1928.

[4] B. MENG，M. W. FU，S. Q. SHI.Deformation behavior and microstructure evolution in thermal-aided mesoforming of titanium dental abutment[J]. Materials & Design，2016，89：1283-1293.

[5] V. PARMAR，A. K. CHANGEL，B. SRINIVAS. Relationship between dislocation density and antibacterial activity of cryo-rolled and cold-rolled copper[J].Materials，2019，12（2）：1-11.

MW 20200514