TC11合金片状组织的热处理改进

葛志明　刘战胜

α β钛合金在β区加热以后，就获得片状组织，亦称针状α组织或魏氏组织。这类组织的特点是原始β晶粒粗大，而且具有一个有一定厚度的连续的晶界α。它的断裂韧性、高温持久和蠕变强度较等轴组织的高，但其室温拉伸塑性和高周疲劳强度则比等轴组织的低得多，往往影响常规使用。

一般认为，不通过在α+β区的适当变形，用单纯的热处理目前还无法从片状组织获得等轴组织　但是，采用循环热处理有可能在一定范围内改变原来的片状组织的形貌，从而在一定程度上改善拉伸塑性[1,2]。

在锻件的实际生产中，由于种种原因而实际获得片状组织的情况是常有的，如果通过适当的热处理能将原片状组织锻件的拉伸塑性提高到技术条件所允许的范围内，那就有实际应用价值。

我们在研究TC11（Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.25Si）合金不同显微组织的机械性能和断口特征时，发现片状组织的低塑性断裂，是与显微组织中有一层具有一定厚度的连续的晶界α密切相关的，正是这一层连续的晶界α导致材料有微孔聚合型的晶间断裂[3]。

本研究的目的在于通过一定的热处理，消除晶界α或使晶界α的厚度减薄到裂纹容易穿过的程度，从而改变晶间断裂为穿晶断裂，以达到改善片状组织材料的拉伸塑性的目的。

试验结果与讨论

我们采用了以循环热处理为核心的复合热处理规范来达到改变片状组织的断口特征和改善拉伸塑性的目的。这个复合热处理规范包括如下三个组成部分：①在1010℃保温30分钟后淬水，以获得片状组织，同时细化晶界α和晶内α片；②在970℃进行4次循环热处理，调整α片的长、宽比，切断和消除晶界α；③在970℃保温30分钟后以250℃/小时的速度冷却至700℃后空冷，进一步发展循环热处理的效果。

从表1所列的试验数据可以看到，β处理后获得的片状组织如果只进行950℃/530℃的双重退火，则材料的室温拉伸塑性差（δ≤9%，ψ≤11%），显微组织中有一连续的有一定厚度的晶界α（图1），拉伸断口特征为晶间断裂（图2）。热处理规范C引进了循环热处理，结果是材料的拉伸塑性提高了，并且比较稳定（δ≈15%，ψ≈23%），但拉伸强度则有所下降，这样的显微组织中的晶界α大部分已消除（图3），拉伸断口的特征为穿晶断裂和晶间断裂的一种混合断口（图4）。热处理规范B区别于C的地方是未经循环热处理，拉伸塑性虽有提高，但不稳定，有一个试样的拉伸塑性没有提高，仍保持晶间断裂的断口特征。热处理规范D是在规范C的的基础上增加了常规的双重退火，其结果是拉伸强度提高了，拉伸塑性也有提高，但不如规范C，其拉伸试样的断口与规范C的相同，属穿晶和晶间断裂混合断口。

从上述分析可以看出，引进了循环热处理的规范C在改善材料的拉伸塑性方面效果显著。为了探明消除了晶界α的网篮状组织材料的综合性能，我们测定了其500℃的持久强度和室温旋转弯曲疲劳性能。表2所列数据表明，经过复合热处理后，消除了晶界α的网篮状组织材料，其500℃持久强度虽然低于具有连续

表 1　不同热处理后室温拉伸性能与断口特征

试样号	热处理规范*	σ_b，公斤/毫米^2	δ_5，%	ψ，%	断　　口
1	A	110.2	9.0	11.1	晶间断裂（见图2）
2		111.3	7.7	8.1	晶间断裂
3	B	105.1	13.9	20.9	穿晶＋晶间断裂
4		108.0	6.8	9.6	晶间断裂
5		101.0	13.5	20.9	穿晶＋晶间断裂
6	C	98.9	16.4	24.3	穿晶＋晶间断裂（见图4）
7		98.8	14.0	22.6	穿晶＋晶间断裂
8		99.0	16.1	24.0	穿晶＋晶间断裂
9	D	112.5	9.8	20.5	穿晶＋晶间断裂
10		112.8	10.8	16.9	穿晶＋晶间断裂
11		114.7	10.8	17.0	穿晶＋晶间断裂

* A：1050°C/1小时，空冷＋950°C/1小时，空冷＋530°C/6小时，空冷。
B：1010°C/30分，水淬＋970°C/30分，以250°C/小时的冷速冷至700°C后，空冷。
C：1010°C/30分，水淬＋970°C/30分，水淬，反复4次＋970°C/30分，以250°C/小时的冷速冷至700°C后，空冷。
D：1010°C/30分，水淬＋970°C/30分，水淬，反复4次＋970°C/30分，以250°C/小时的冷速冷至700°C后，空冷＋950°C/1小时，空冷＋530°C/6小时，空冷。

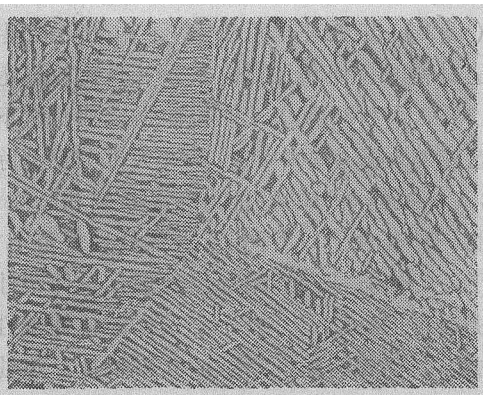

图 1　具有连续晶界α的片状组织　500×

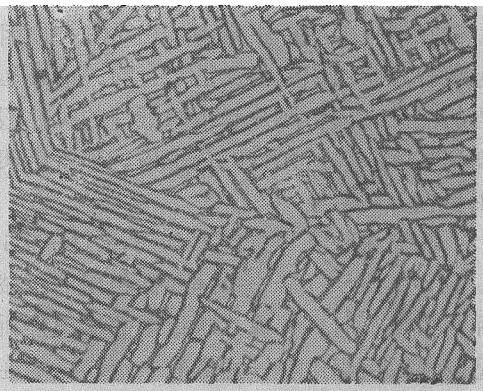

图 3　消除了晶界α的网篮状组织　500×

图 2　具有连续晶界α的片状组织试样的电子断口相

36×

图 4　经复合热处理后试样的电子断口相

36×

晶界α的片状组织和常规等轴组织材料的，但仍高于材料技术条件规定的最低性能

表 2 不同显微组织材料500℃的持久强度

热处理规范	显微组织	持久强度 公斤/毫米²
950°C，1 小时，空冷＋530°C，6 小时，空冷	等轴组织	62
A*	具有连续晶界α的片状组织	66
C*	消除了晶界α的网篮状组织	61
材料技术条件规定指标，不小于		60

*具体规范见表1附注。

表 3 所示数据表明，经规范C处理后材料的室温旋转弯曲疲劳寿命比用规范A处理的有所降低。这是因为在低应力高循环次数的条件下，消耗在裂纹生核和裂纹扩展第Ⅰ阶段上的寿命往往达到总疲劳寿命的90%以上[4]。而在具有较粗α（不论是片状还是等轴）的组织中，裂纹比较容易在粗α的相界面上生核，因此具有这种组织的材料表现出较短的疲劳寿命[5,6]。在我们的试验中，规范C处理的结果使α片变短但却变粗了。由于采用缓冷，没有次生α析出，因而使初生α长得更大些，所以疲劳寿命反而比片状组织的降低了。

表 3 不同热处理后材料的室温旋转弯曲疲劳性能

热处理规范	室温疲劳	
	应力，公斤/毫米²	断裂循环数，N_f
A*	34	$\geqslant 2\times10^7$
C*	34	1.46×10^6 3.045×10^6

*具体规范见表1附注。

从以上分析可以看出，采用以循环热处理为核心的复合处理方法，在对其它性能损害不太大的前提下，是可以大大改善具有连续的晶界α的片状组织的拉伸塑性的。这种性能上的改善是与断裂特征从晶间断裂改变为穿晶和晶间断裂的混合断口密切相关的。而这种断裂特征又是晶界α被消除或切断的结果，晶界α被切断的情况从图5可以清楚地看出。

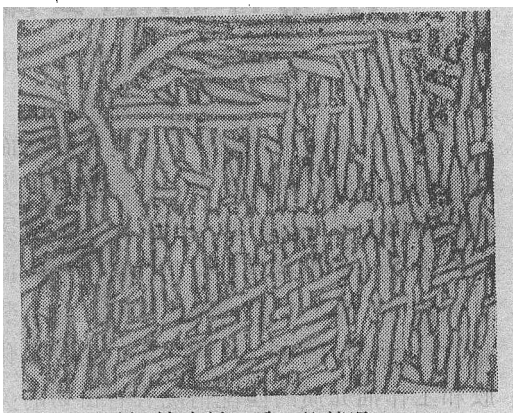

图 5 晶界α被分割、吞蚀的情况 500×

结 论

1.采用以循环热处理为核心的复合热处理方法，在对其它性能损害不大的前提下能根本改善片状组织材料的拉伸塑性。片状组织材料室温拉伸延伸率可从9%提高到14%以上，断面收缩率约可从10%提高到23%。

2.循环热处理可以消除或部分消除片状组织中的晶界α，从而使材料的断裂特征从晶间断裂改变为穿晶断裂或部分穿晶断裂。

参 考 文 献

〔1〕 Александров В.К. и др., Титановые сплавы: Полуфабрикаты из титановых сплавов, Москва, 1979.

〔2〕 茨木善朗等，日本金属学会志，43卷(1979)，No.9和44卷（1980），No.3.

〔3〕 葛志明，航空材料专刊，第1卷，第2期，1981。

〔4〕 颜鸣皋，航空材料，1978，No.5，1。

〔5〕 D.Hoeppner, Forging and Properties of Aerospace Materials, 103.

〔6〕 M.Peters, A.Gysler and G.Luetjering, Titanium's 80 Science and Technology, V.3, P.1777.