

Ti-55 钛合金连续冷却转变曲线的测绘及显微组织的演变

方 波¹, 陈志勇², 陈仲强¹, 刘军和³, 王清江², 刘 艳¹, 冯贞伟³,
刘建荣², 宋玺玉¹, 魏明霞¹, 胡井祥¹

- (1. 中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司, 沈阳 110043;
2. 中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016;
3. 中国人民解放军驻黎明公司军代表室, 沈阳 110043)

摘 要: 通过 Gleeble 热模拟实验, 测绘 Ti-55 钛合金的连续冷却转变曲线(CCT 图)。结果表明: 当冷速由 0.1 /s 加快到 150 /s 时, Ti-55 钛合金中主要发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 与 $\beta \rightarrow \alpha'$ 的相转变过程, 其中 $\beta \rightarrow \alpha'$ 转变开始的临界冷速为 5 /s 左右, Ti-55 钛合金中马氏体转变开始温度为 855 , 转变结束温度为 818 。

关键词: 连续冷却转变曲线; 马氏体相变; Ti-55 钛合金

中图分类号: TG146.23

文献标志码: A

Continuous cooling transformation diagram and microstructure evolution of Ti-55 alloy

FANG Bo¹, CHEN Zhi-yong², CHEN Zhong-qiang¹, LIU Jun-he³, WANG Qing-jiang², LIU Yan¹, FENG Zhen-wei³,
LIU Jian-rong², SONG Xi-yu¹, WEI Ming-xia¹, HU Jing-xiang¹

- (1. AVIC Shenyang Liming Aero-engine (Group) Corporation, Ltd., Shenyang 110043, China;
2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. Office of Chinese Peoples Liberation Army in Shenyang Liming Aero-engine (Group) Corporation, Ltd., Shenyang 110043, China)

Abstract: The continuous cooling transformation (CCT) diagram of Ti-55 titanium alloy was plotted and the microstructure evolution of this alloy during cooling was discussed. The results show that when the cooling rate increases from 0.1 /s to 150 /s, there mainly exist two phase transformations, $\beta \rightarrow \alpha$ and $\beta \rightarrow \alpha'$. It is also shown that the critical cooling rate of the beginning of $\beta \rightarrow \alpha'$ phase transformation is 5 /s, the starting temperature of martensitic transformation is about 855 and the finishing temperature is about 818 .

Key words: continuous cooling transformation diagram; martensitic transformation; Ti-55 alloy

连续冷却转变曲线图, 简称 CCT 曲线图, 系统地表示冷却速度对材料相变开始点、相变结束点、相变进行速度和组织形成的影响情况。一般的热处理、形变热处理、热轧材的控制冷却等生产工艺, 均是在连续冷却的状态下发生相变的。根据连续冷却转变曲线, 可以选择最适当的工艺规范, 以得到合适的组织, 提高材料的强度和韧性。

Ti-55 钛合金是我国自主研发的近 α 型高温钛合金, 为了提高其高温工作环境下的综合力学性能, 合金中添加了多种合金元素, 因而其相变过程复杂, 影响因素较多。有关高温钛合金的文献中, 关于 CCT 曲线的报道很少, 早期的文献中曾给出了近 α 型及 $\alpha+\beta$ 型钛合金的 CCT 图^[1-2], 但实际的相变过程也存在一定的偏差^[3]。由于工程化应用的需求, Ti-55 钛合金零

部件之间需用焊接代替传统的铆接, 以提高推重比, 改善零部件工作效率。本研究的目的主要是通过测定 Ti-55 合金的 CCT 曲线, 预测不同冷速条件下合金的相变过程及最终的显微组织状态, 为制定 Ti-55 钛合金的焊接工艺参数, 改善焊接接头的显微组织和力学性能提供理论基础及实验指导。

1 实验

1.1 实验材料

本实验所用 Ti-55 钛合金是一种近 α 型高温钛合金, 其名义化学成分为 Ti-5.6Al-3.5Sn-3Zr-0.5Mo-0.3Si-0.4Nb-0.4Ta, β 转变温度为 1 010 $^{\circ}\text{C}$ 。热模拟实验前的显微组织如图 1 所示, 主要由变形的初生 α 相组成。

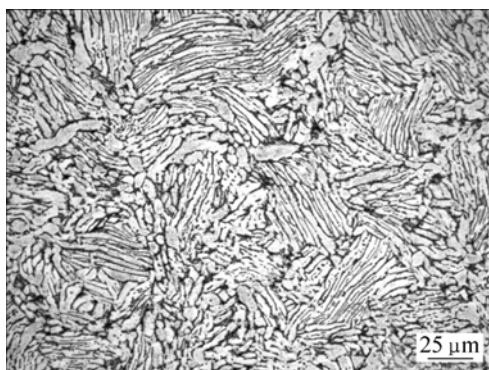


图 1 实验前 Ti55 钛合金的显微组织

Fig.1 Microstructure of Ti-55 alloy before testing

供货态的材料为 $\phi 50$ mm 的 Ti-55 合金棒材。

1.2 实验设备与方法

连续冷却实验在 Gleeble3800 热模拟实验机上进行, 整个试验过程在氩气保护下进行, 以防止高温下试样被氧化。试样的两端采用 Ta 片润滑, 不仅能减小摩擦对试样应力状态的影响, 还能降低试样两端热量的损失, 有利于试样的均匀变形。试样采用电阻加热法进行加热, 并由焊于试样中部的铂金—铂铑热电偶来控制并测量试样的温度, 升温速率为 5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 并在设定的温度下保温 10 min; 然后, 按照设定的冷却速度进行冷却。将 Ti-55 钛合金试样置入 Gleeble 3800 热/力模拟试验机的真空室中, 加热到 1 120 $^{\circ}\text{C}$ 后保温, 再分别以 0.1、5、30、50、150 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 连续冷却到室温。在连续冷却过程中, 高温相即发生相应的转变, 在膨胀曲线上可以记录相应冷却速度下, 转变开始点和转

变结束点的温度。然后, 以温度为纵坐标, 时间为横坐标, 将相同性质的相转变开始点和结束点分别连成曲线, 得到 Ti-55 钛合金的连续冷却转变曲线图。

2 结果与讨论

2.1 CCT 曲线的测绘

图 2 所示为不同冷速条件下 Ti-55 钛合金的 CCT 曲线。由图 2 可知, 当冷速从 0.1 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 增加到 150 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时, Ti-55 合金中主要发生了 2 个相变过程: $\beta \rightarrow \alpha$ 转变及 $\beta \rightarrow \alpha'$ 的转变。将图 2 的局部放大于图 3 中来分析相变的临界条件。由图 3 可知, 当冷速小于图中虚线 C(5~10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$) 时, 冷却过程只发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 转变, 转变的最终产物为 β 相和 α 相; 当冷速大于 C 小于

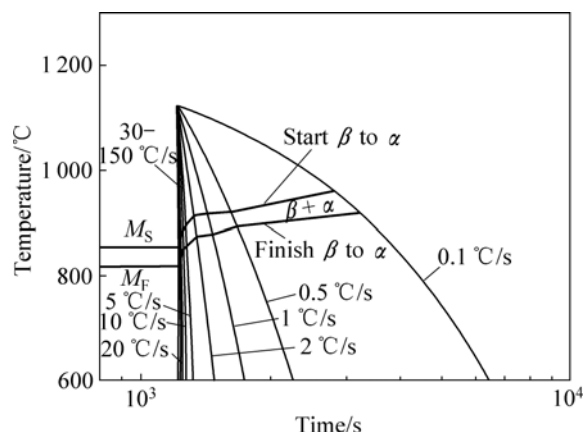


图 2 Ti-55 钛合金的 CCT 曲线

Fig.2 Continuous-cooling transformation diagram of Ti-55 alloy

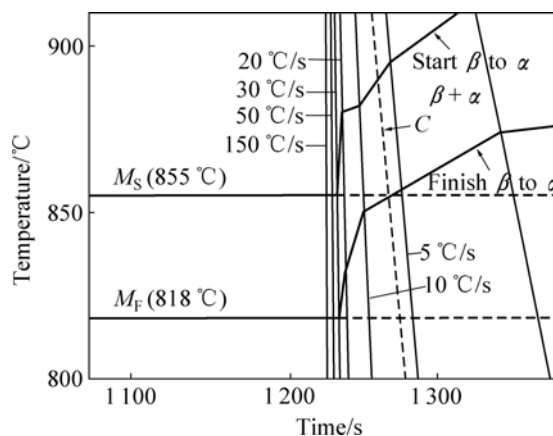


图 3 Ti-55 钛合金的局部 CCT 曲线

Fig.3 Parts of continuous-cooling transformation diagram for Ti-55 alloy

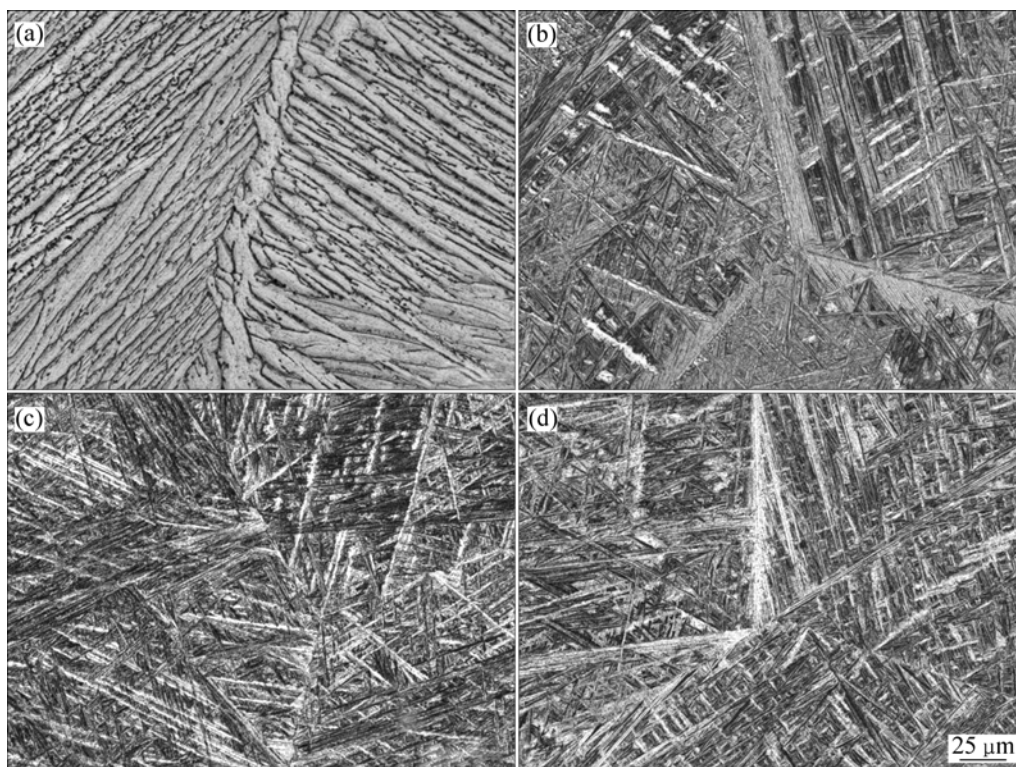


图 4 不同冷速下 Ti-55 钛合金的显微组织

Fig.4 Microstructures of Ti-55 alloys at different cooling rates: (a) 0.1 °C/s; (b) 5 °C/s; (c) 30 °C/s; (d) 50 °C/s

30 °C/s 时,冷却过程中除了 $\beta \rightarrow \alpha$ 转变,还开始发生 $\beta \rightarrow \alpha'$ 的转变,转变的最终产物为 β 相、 α 相和 α' 相马氏体的混合组织;当冷速大于 30 °C/s 时,只发生 $\beta \rightarrow \alpha'$ 转变,最终产物为 α' 相马氏体。由图 3 还可以看出,马氏体转变开始温度为 855 °C,转变结束温度为 818 °C。

2.2 显微组织演变与 CCT 曲线的修正

通过对不同冷速下试样的显微组织进行金相观察,可以验证 Gleeble 热模拟实验所得出的 CCT 曲线的可靠性。分别选取冷速为 0.1、5、30 和 50 °C/s 的试样,观察其显微组织,如图 4 所示。由图 4 可以看出,当冷速为 0.1 °C/s 时,显微组织为典型的 α 板条和 β 相组成的片层状组织(见图 4(a));当冷速为 5 °C/s 时,显微组织中出现少量的细长的针状 α' 相马氏体(见图 4(b)),表明此时已经开始发生马氏体相变。图 2 和图 3 所示的 Gleeble 热模拟所测得的 CCT 图还是存在一定的偏差,在 5 °C/s 左右就已经开始发生马氏体相变;当冷速为 30 °C/s 时,显微组织中由大量针状的马氏体组成(见图 4(c));而当冷速为 50 °C/s 时,显微组织

则完全由 α' 相马氏体组成(见图 4(d))。

图 5 所示为不同冷速(0.1~50 °C/s)下 Ti-55 钛合金的显微硬度变化。由图 5 可以看出,随着冷速的加快,显微硬度值逐渐增大。这是由于随着冷却速度的增加,显微组织中马氏体组织的数量逐渐增加所致,显微硬度的变化趋势与图 4 中观察到的显微组织演变相符合。

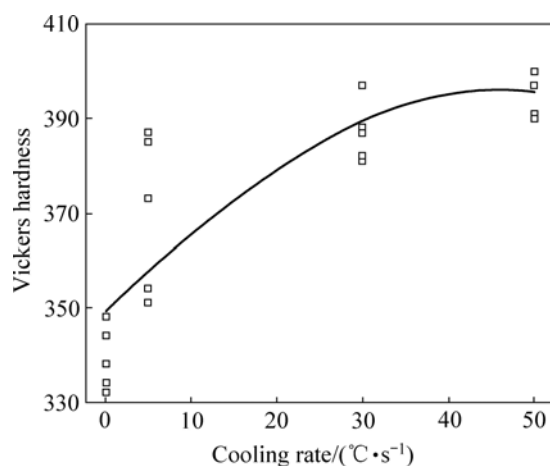


图 5 Ti-55 钛合金不同冷速下的显微硬度

Fig.5 Microhardness of Ti-55 alloy at different cooling rates

3 结论

1) 通过对 Ti-55 钛合金 CCT 曲线的测定可知, 当冷速从 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 增加到 $150\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时, Ti-55 钛合金中主要发生 2 个相变过程: $\beta \rightarrow \alpha$ 转变及 $\beta \rightarrow \alpha'$ 的转变, 其中 $\beta \rightarrow \alpha'$ 转变开始的临界冷速为 $5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 左右。

2) 从 CCT 曲线可知, 马氏体转变开始温度为 $855\text{ }^{\circ}\text{C}$, 转变结束温度为 $818\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

REFERENCES

- [1] BAESLACK III W A, BECKER D W, FROES F H. Advances in titanium alloy welding metallurgy[J]. J Metals, 1984, 36: 46–58.
- [2] MITCHELL D R, TUCKER T J. The properties and transformation characteristics in welds in Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo titanium alloy[J]. Weld J, 1969, 48: 23s–33s.
- [3] BAESLACK III W A, MULLINS F D. Cooling rate effects in Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo weldments[J]. Metall Trans A, 1984, 15: 1948–1952.

(编辑 杨 华)