

快速变形法细化 TiAl 晶粒^①

黄伯云 贺跃辉 曲选辉 陈小群

(中南工业大学粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要 探讨了快速变形法细化钛铝合金晶粒。铸态 TiAl 合金不仅晶粒粗大而且成分偏析严重, 通过对其进行第一次快速锻造变形及热处理后, 绝大部分粗大晶粒可以得到细化, 但仍残留少量粗大晶粒。随后再继续对其施以第二次快速锻造变形及热处理, 使残存的粗大晶粒全部得到细化。经过晶粒细化, TiAl 合金具有理想的力学性能。

关键词 TiAl 基合金 快速锻造 晶粒细化

钛铝合金是一种有着广阔应用前景的高温结构材料, 然而它的室温脆性以及难成型加工性却严重制约了它在工业部门的广泛应用。为了解决 TiAl 合金目前存在的这些问题, 许多研究者进行了长期的努力^[1-3], 其中包括添加一种或多种合金化元素、等温锻造细化晶粒、合金均匀化处理、相结构和显微组织控制等。所有这些方法, 都在不同程度上显示了其优越性, 推动了 TiAl 合金研究的不断进展。本研究所要探讨的是 TiAl 合金的二次快速锻造变形及热处理工艺。该工艺的特点一方面是能充分地细化晶粒, 另一方面是能获取各种不同的显微组织, 从而控制材料的力学性能。特别值得提及的是: 该工艺由于采用包套锻造, 因而能在整个被处理的试件内得到各种性能都均匀样品, 避免了被处理试样中各部分组织不均匀的现象^[4]。

1 实验过程

实验所用的合金成分为: Ti-33Al-3Cr-0.5Mo(质量分数)。铸锭总重为 17kg, 由真空自耗电弧炉熔炼而成。为了避免锭块成分的不均匀性, 采用二次重熔技术。二次重熔的锭

块再经 1040℃, 48h 的真空均匀化退火。随后使用电火花线切割机从铸锭中切取 $d 40\text{mm} \times 50\text{mm}$ 圆柱状试样并施以包套处理, 采用了 500t 的油压机对其进行第一次高温快速热锻变形, 随后冷至室温。然后再进行 1250℃, 保温 4h 的第一次热处理, 此过程统称之为第一次快速热锻变形和热处理(亦称第一次热机械处理)。在完成了第一次快速热锻变形和热处理后, 紧接着再进行第二次快速热锻变形及第二次热处理(亦称第二次热机械处理)。第二次的快速热锻变形条件基本上与第一次相同。不过, 第二次热处理与第一次热处理有所不同。我们将根据对样品的最终性能要求来施以不同的第二次热处理条件。换句话说, 不同条件的第二次热处理将使样品产生不同的显微组织结构, 而这种不同的显微组织结构将导致不同的最终力学性能。样品经过第二次热处理后即最终产品, 最后再进行性能测试和组织观察。

进行力学性能测试的样品按照标准方法进行制备。显微组织观察使用 Polyvar 光学金相显微镜和 X650 型扫描电子显微镜。用于 TEM 分析的薄膜试样是用双喷电解抛光技术制得的, 透射电子显微镜为 CM12 型, 操作电压为 120kV。

2 实验结果及分析

铸态的钛铝合金往往具有粗大的晶粒结构,同时还存在着成分偏析。正是由于这种粗大的晶粒和成分偏析,导致了 TiAl 合金的室温脆性和难于加工成型。图 1 所示即为这种铸态粗大晶粒。

图 1 TiAl 原始铸态粗大晶粒的
光学显微镜图像

为了细化这些粗大的晶粒,一方面,许多研究者采用了加入一种或多种合金元素来阻止粗大晶粒的形成;另一方面,不少研究者运用等温锻的方法以获取细小晶粒结构。

本研究所采取的方法是多次快速锻造变形及热处理。

2.1 第一次快速锻造变形及热处理结果分析

第一次快速锻造变形是在普通油压机上进行的,其锻造温度为 1180°C ,而变形速率为 $2 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$,变形量为 60%。图 2 所示是第一次快速锻造变形后未经任何其他处理之样品的金相组织照片。从图 2 可以看出,该变形显微组织由三部分组成。第一部分为等轴细晶区(图 2 中的 A 区),它是热变形过程中动态再结晶的产物。第二部分为曲线型层片状晶团(图 2 中的 B 区),此类组织的变形亚结构如图 3 所示。

图 2 TiAl 合金经第一次快速锻造后的金相组织

图 3 曲线型层片状晶团(图 2 中 B 区)
的 TEM 分析结果

图 3 的 TEM 组织结构及相分析结果表明,这种组织是由 γ 和 α 组成,其中 γ 相有两个显著的特征。第一个特征是 γ 相板条内存在着高的位错密度。第二个特征是 γ 相内有許多变形孪晶,这些变形孪晶可以分为两大类,一类是平行于原 γ 板条,另一类横穿于 γ 板条内。横穿 γ 板条的孪晶通常只出现于有严重变形的 TiAl 合金中。很显然,图 2 和图 3 的结果都显示了曲线型层片状晶团是一种经历了严重变形并储存了大量畸变能的区域。第三部分是直线型的层片状晶团(图 2 中 C 区),它几乎仍然完

整地保存着铸态组织的结构。该组织在整个快速锻造变形过程中没有发生什么大的变化。也就是说,它很少储存畸变能。通常,我们把这种没有经历大的变形的直线型晶团称为硬取向晶团^[5],而把曲线型晶团称为软取向晶团。直线型硬取向晶团的TEM组织示于图4。比较图3和图4可以看出直线型晶团内只有一种形式的孪晶,它平行于 α/γ 层片板条。

图4 直线型层片状晶团(图2中C区)的TEM分析结果

将经过第一次快速热锻变形的TiAl合金试样在1250℃至1310℃的温度范围内进行退火处理(即第一次热处理),其退火后的显微组织又将发生新的变化。此种变化的规律表现为,在第一次热变形后形成的流线型层片状晶团可以通过再结晶而形成大量细晶粒。然而,由于试样中存在的直线型粗大层片状晶团畸变能较低,表现出很高的显微组织热稳定性,即使经过长时期退火加热也不会发生大的变化。

很显然,经第一次热机械处理后,TiAl合金中仍然残存着未被破碎的粗大的 α/γ 直线型层片状晶团。为了进一步得到均匀细小的显微组织,我们需对其再一次施以热机械处理,即第二次热机械处理。

2.2 第二次快速热锻变形及热处理结果分析

TiAl合金的第二次快速热锻变形温度为1040℃,变形量为50%,变形速率同于第一次热机械处理。图5所示为经第二次快速热锻

变形后样品的金相显微组织照片。比较图2和图5,很显然,经第二次热锻后,直线型粗大晶团已消失。图2中的硬取向直线型晶团经第二次热机械处理后已基本转变为曲线型晶团。

图5 第二次快速热锻后样品的金相显微组织

第一次热机械处理后残存的直线型晶团能在第二次快速热锻变形中转变为曲线型,应归咎于第一次退火热处理。经第一次热机械处理后,直线型晶团的周围形成了许多细小的晶粒,在这样一种良好的周边环境下,直线型硬取向晶团可以在第二次热锻过程中发生转动而变为软取向,一旦硬取向变为软取向状态,直线型晶团便可在外力的作用下进一步变形,获取大量畸变能,从而转化为曲线型晶团结构。

对于具有图5中金相组织的TiAl合金样品再施以第二次热处理后,全部曲线型晶团可以再结晶,形成许多细小的晶粒。第二次热处理的温度、时间以及随后的冷却条件(包括快冷、空冷和随炉冷却等)的选择是多种多样的,不同的热处理条件将导致不同的显微组织,而不同的显微组织将有着不同的综合性能。因此,取决于最终产品的性能要求,人们可选取不同的第二次热处理条件。当第二次热处理的温度为1250℃时,我们可以获得细小的双态组织晶粒,该类组织有较好的室温延性,一般可以达到5%至6%。当热处理温度为1280℃时,可以获得近层片状的细小晶粒。

如果退火温度提高至 1 305 ℃, 则可得到均匀、细小的全层片状组织, 此种组织有着良好的断裂韧性, 一般可以达到 $32 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。图 6 所示即为此种全层片状组织。从图 6 可以看出: 第二次快速热锻变形及随后热处理, 使铸态 TiAl 粗大的晶粒通过储存畸变能及再结晶过程得到了大大的细化, 其晶粒尺寸一般约为 $10 \mu\text{m}$ 左右, 而层片间距为 $0.05 \mu\text{m}$ 左右。正是由于这种晶粒细化的作用, TiAl 合金的力学可以得到显著提高。

图 6 经第二次快速变形及热处理后形成的全层片状细晶组织

3 结论

为了最大限度地改善 TiAl 合金的力学性能, 毫无疑问, 细化晶粒是一项最重要的措施。从本研究关于快速变形细化晶粒的探索工作, 可得出如下结论:

(1) 快速热锻变形并随后进行热处理可十分显著地细化 TiAl 合金的铸态粗晶。

(2) 快速锻造变形细化晶粒是通过畸变储能, 形成大量再结晶晶粒的机制进行的。

(3) 采用快速锻造变形细化晶粒时, 必须经过至少二次快速锻造变形和热处理才能最充分地细化晶粒。

参考文献

- 1 Koepee P A *et al.* Metall Trans, 1993, 24A: 1735.
- 2 黄伯云, 贺跃辉等. 中南工业大学学报, 1995, 26(5): 652.
- 3 Sastry S M L *et al.* Metall Trans, 1977, 8A: 299.
- 4 Huang Baiyun, He Yuehui *et al.* Trans NFsoc, 1995, 3:
- 5 贺跃辉, 黄伯云等. 热加工工艺, 1995, 1: 13.

GRAIN REFINING OF TiAl BY RAPID DEFORMATION

Huang Baiyun, He Yuehui, Qu Xuanhui, Chen Xiaoqun

State Key P/M Lab.,

Central South University of Technology, Changsha 410083

ABSTRACT Grain refining of TiAl intermetallics by rapid deformation was investigated. The as-cast TiAl alloy had large grain size and serious composition segregation. Most of the large grains of TiAl alloy could be refined after the first rapid deformation and heat treatment. However, a few large grains of TiAl still remained. When the second rapid deformation and heat treatment were conducted, all of the remaining large TiAl grains could be refined. After the grains were refined, the mechanical properties of TiAl were significantly improved.

Key words TiAl rapid deformation grain refining

(编辑 彭超群)