

热处理工艺对包套挤压镍微合金化 TiAl 合金组织与性能的影响

Effect of Heat Treatment on Microstructures and Properties of Canned Extruded TiAl Alloy Containing Minor Ni

袁志山¹, 陈岁元¹, 韩鹏彪², 姜明智², 张 继², 刘常升¹

(1 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004;

2 钢铁研究总院 高温材料研究所, 北京 100081)

YUAN Zhì-shan¹, CHEN Suì-yuan¹, HAN Peng-biao²,

JIANG Míng-zhī², ZHANG Jì², LIU Cháng-shèng¹

(1 School of Materials and Metallurgy, Northeastern

University, Shenyang 110004, China; 2 High Temperature Materials

Research Institute, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

摘要: 以包套挤压镍微合金化 TiAl 合金为研究对象, 研究了热处理工艺对合金组织和室温、800℃ 拉伸性能的影响。结果表明, 70% 变形量包套挤压合金经($\alpha + \gamma$) 双相区 1250℃ 热处理获得了再结晶完全的双态组织, 其中不含有残留的层片结构; 挤压合金经($\alpha_2 + \gamma$) 双相区退火处理后, 合金室温拉伸屈服强度为 535 MPa, 抗拉强度为 650 MPa, 延伸率为 3%; 800℃ 拉伸屈服强度为 365 MPa, 抗拉强度为 400 MPa, 延伸率为 156%, 这种组织有利于进一步加工成形, 使超塑成形成为可能。

关键词: TiAl 合金; 包套挤压; 再结晶; 拉伸性能

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2005)09-0037-04

Abstract: The effect of heat treatment on microstructures and properties of canned extruded TiAl alloy containing minor Ni was investigated at room temperature and elevated temperature. The results showed that full static recrystallization in ($\alpha + \gamma$) phase field occurred to the microstructure of 70% deformation induction extruded alloy, it produced duplex microstructure, and the remnant lamellar structure in extruded alloy was eliminated; after heat treatment at ($\alpha_2 + \gamma$) phase field on extruded TiAl alloy, its yield tensile strength, ultimate tensile strength and plastic elongation were 535, 650 MPa and 3%; and its yield tensile strength, ultimate tensile strength and plastic elongation at 800℃ were 365, 400 MPa and 156%, which was suitable for further processing and made superplastic forming possible.

Key words: TiAl alloy; canned extrusion; recrystallization; tensile property

TiAl 基合金具有密度低, 比强度高和抗氧化性好等优点, 是航空航天、汽车工业等领域最具有潜力的高温结构材料之一^[1,2]。但由于 TiAl 基合金晶体结构有序, 以及合金铸态组织粗大层片团的力学性能表现出强烈的各向异性, 限制了热加工性能。实验表明, 采用大于 70% 变形量约束锻造的变形组织仍不均匀, 经($\alpha + \gamma$) 双相区热处理组织显著细化, 但残留少量层片结构, 这种组织对合金的力学性能和后续部件的热加工成形不利^[3-6]。本工作研究了($\alpha + \gamma$) 双相区 1250℃ 热处理对 70% 变形量包套挤压镍微合金化 TiAl 合金变形组织和性能的影响。为了利用流线均匀分布的挤压

变形组织, 进一步研究了($\alpha_2 + \gamma$) 双相区退火处理对挤压变形组织和性能的影响。

1 实验材料与方法

实验材料的名义化学成分(原子分数/%) : Al 46.3, V 2.0, Cr 1.0, Ni 0.5, Ti 余量。采用冷坩埚真空感应磁悬浮炉熔炼, 重熔两次后浇入石墨模, 制备出 $\phi 72\text{mm} \times 200\text{mm}$ 的圆铸锭。铸锭经 1250℃/180 MPa/3h 热等静压, 以挤压比 3.75:1(变形量约为

70%)、变形温度约为 1100~ 1200℃包套挤压。通过金相法确定合金的 T_{α} 点(α 相转变点)为 1365℃ \pm 5℃。热处理在(α + γ) 双相区 1250℃保温 15h 空冷,然后在 950℃稳定化处理保温 12h 炉冷;退火处理在(α_2 + γ) 双相区 950℃保温 12h 炉冷,和参照的 70% 变形量包套锻造合金的热处理制度等如表 1 所示。制作金相试样的浸蚀剂为 2% HF+ 10% HNO₃+ 88% H₂O (体积分数)。显微组织和断口形貌观察分析使用普通光学显微镜、Leica MEF4A 定量显微图像分析仪和 JEOL JSM-6400 扫描电镜。室温拉伸实验使用 INSTRON 1186 试验机;800℃拉伸使用 RS-2 试验机,位移速率为 0.5mm/ min。采用 ϕ 4mm \times 20mm 的螺纹拉伸试样,拉伸方向平行于挤压纤维方向。

2 实验结果

2.1 初始组织

图 1 为 70% 变形量挤压棒材纵截面宏观组织,左侧为尾部,右侧为头部。对棒材纵截面宏观组织分析可见,宏观组织流线遍布整个变形区,在不同视角观察显示出头部流线没有尾部流线细密。

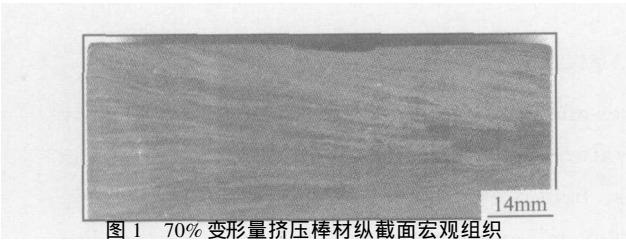


图 1 70% 变形量挤压棒材纵截面宏观组织
Fig. 1 As-extruded macrostructure under 70% deformation induction extrusion

图 2a, b 分别为挤压棒材尾部横截面和纵截面显微组织。显微组织基本由层片团破碎形成的层片组织和等轴晶粒组成。棒材尾部显微组织的层片结构几乎完全被破碎,层片发生严重扭曲、宽化,呈纤维状,存在大量再结晶形成的等轴晶粒。

2.2 组织转变

图 3a, b 为参照的 70% 变形量锻坯经 1250℃ \times 15h 热处理后的纵截面显微组织,图 3c, d 为 70% 变形量挤压棒材经相同热处理后尾部横截面和纵截面的显微组织。经热处理后锻坯变形组织基本转变为细小的双态组织,如图 3a,但其中还残留有少量较大的平直层片结构,如图 3b,为不完全再结晶组织。经相同热处理后挤压变形组织则完全转变为双态组织,其中不存在残留的平直层片结构,为完全再结晶组织。但挤

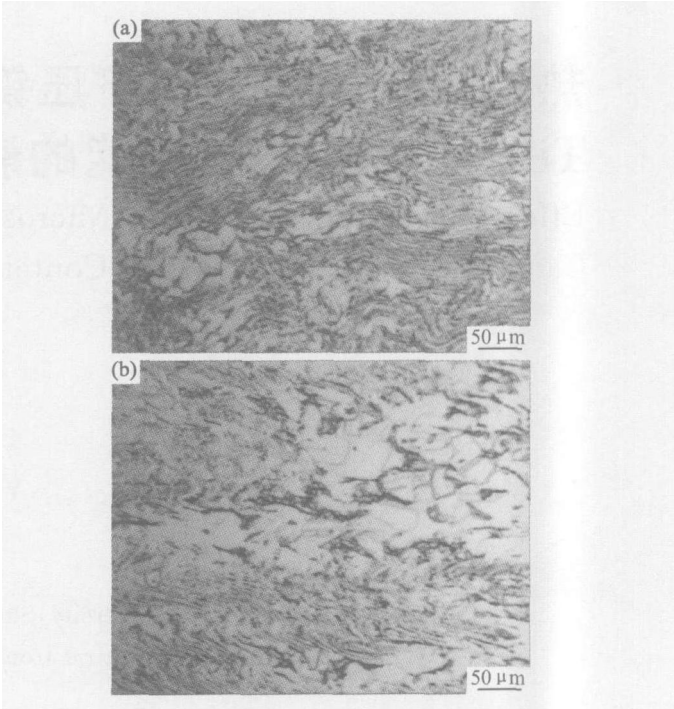


图 2 挤压棒材尾部横截面组织 (a) 和纵截面显微组织 (b)

Fig. 2 Deformed microstructures in cross and longitudinal section of extruded alloy

(a) in center of cross section; (b) in edge of longitudinal section

压棒材径向中心,横截面如图 3c,纵截面如图 3d,都存在等轴晶粒尺寸不均匀的现象,有少量较大的等轴晶粒存在,在棒材边缘这种情况有所改善。

图 4 为经(α_2 + γ) 双相区 950℃保温 12h 的挤压棒材纵截面显微组织。退火处理组织由部分再结晶形成的细小等轴 γ 晶粒和沿挤压方向均匀分布的层片纤维组成。变形组织中残留的平直层片择优取向,平行于挤压方向。

2.3 拉伸性能

表 1 为热处理工艺与锻造和挤压合金室温及 800℃拉伸性能关系。挤压合金退火组织的室温性能高于含有残留层片结构的锻造双态组织性能,其 800℃塑性较高,且有一定的强度,有利于进一步的加工成形。

表 1 热处理工艺和组织对室温与 800℃拉伸性能影响

Table 1 The effect of heat treatment and microstructures on tensile properties at RT and 800℃

Heat treatment and microstructure	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%
DP(RT): 1250℃ \times 15h, AC+ 950℃ \times 12h, FC	615	432	2.5
DP(800℃): 1250℃ \times 15h, AC+ 950℃ \times 12h, FC	469	350	92
EM(RT): 1250℃ \times 15h, AC+ 950℃ \times 12h, FC	—	—	—
EM(RT): 950℃ \times 12h, FC	650	535	3
EM(800℃): 950℃ \times 12h, FC	400	365	156

DP: duplex microstructure; EM: extruded microstructure

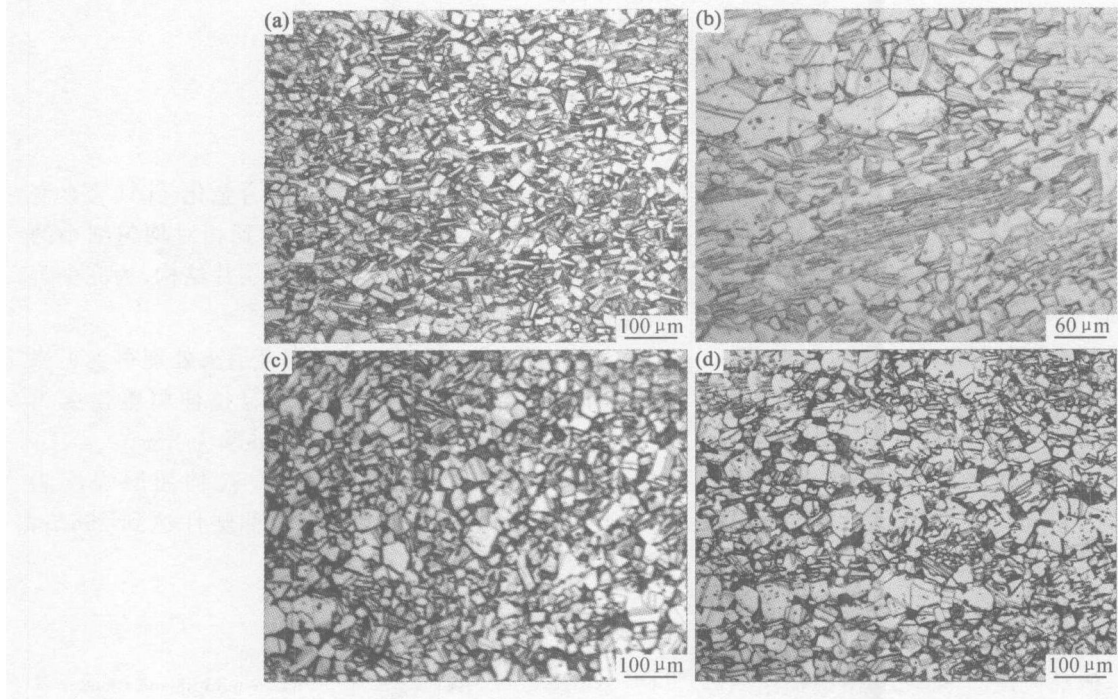


图3 1250℃×15h 热处理后的锻造合金双态组织(a) , (b) 和挤压合金显微组织(c) ,(d)
Fig.3 Duplex microstructures (a) and (b) of as-forged alloy, duplex microstructures in cross section (c) and longitudinal section (d) of extruded billet after heat treatment at 1250℃ for 15h

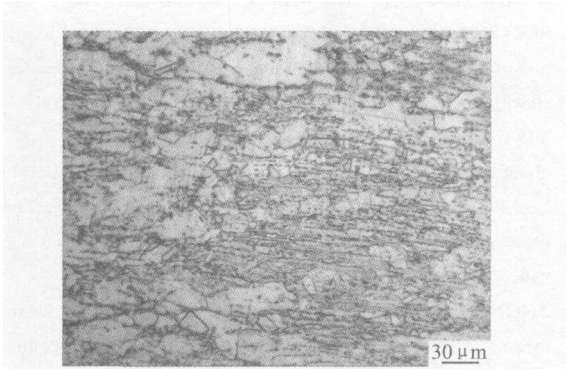


图4 挤压合金经 950℃×12h 热处理后的退火组织
Fig.4 Extruded microstructures after heat treatment at 950℃ for 12h

图 5a, b 分别为挤压合金退火组织室温拉伸试样断口形貌。在裂纹源区为准解理断裂和沿晶断裂, 断口形貌以穿晶解理面为主。穿晶解理面包括尺寸较大的分层解理面和尺寸较小的穿层解理面, 有利于塑性变形在不同层片团间传递^[3]。断口上还可可见较多的二次裂纹, 多位于等轴 γ 晶粒与层片团界面或者等轴晶粒之间的界面上。

3 讨论

3.1 ($\alpha + \gamma$) 双相区热处理后完全再结晶组织的获得
对锻造和挤压纵截面变形组织的观察表明, 挤压变形组织中的层片结构多为弯曲状, 而锻造变形组织

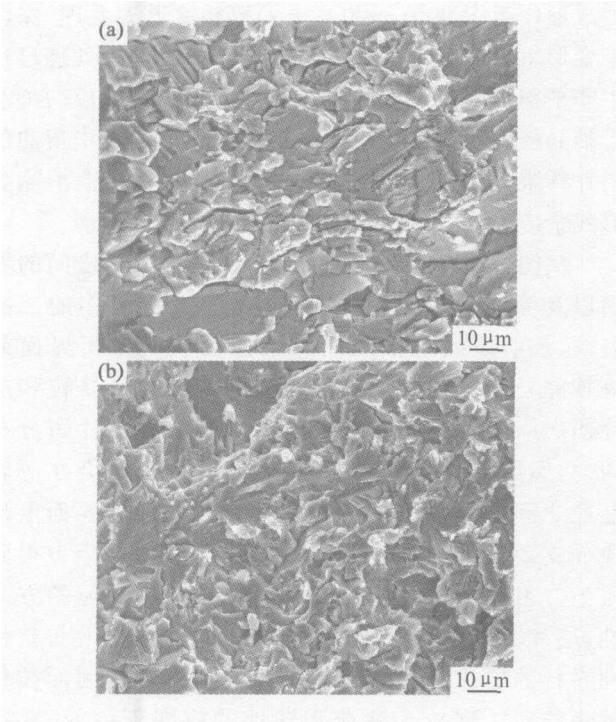


图5 挤压合金退火组织室温拉伸试样断口形貌
(a) 裂纹源区断口形貌; (b) 裂纹扩展区断口形貌
Fig.5 Fractographs of room temperature tension specimen with extruded microstructure
(a) at crack-initiated region; (b) at propagated region

的层片多为平直状, 这是两种组织的一个明显差别, 对应着退火处理后两种转变组织的特征有较大差别。挤

压和锻造变形组织层片结构中的高密度位错、变形孪晶以及等轴晶粒内的高密度位错和位错网,是变形组织再结晶形核的核心^[7,8]。锻造和挤压过程合金处于不同的应力状态,与锻造比较,挤压变形过程局部应变分布相对均匀,变形亚结构数量相对多,因此挤压变形组织经($\alpha + \gamma$)双相区热处理后变形组织发生了完全再结晶,残留的层片结构消失。

挤压变形过程动态再结晶形成含有高密度位错和位错网的等轴晶粒,这种等轴晶粒经历了二次变形,在最终热处理过程再结晶细化;挤压或挤压后冷却过程形成不含位错的等轴晶粒^[8],最终热处理不能使其进一步细化,因此挤压双态组织中的等轴晶粒尺寸不均匀。

3.2 挤压合金的退火组织和性能

对比挤压和锻造合金双相区热处理后的转变组织,锻造双态组织中残留有少量层片结构,挤压双态组织没有残留层片结构,但晶粒尺寸不均匀,由锻造组织的拉伸性能推测挤压组织的性能不会太理想,从而提出在($\alpha_2 + \gamma$)双相区退火以保留挤压合金中均匀分布的流线组织,为某些利用流线组织各向异性性能部件的成形作组织准备。经($\alpha_2 + \gamma$)双相区退火处理,保留了变形组织中纤维状的平直层片结构。退火处理过程中非平衡相析出形成的 γ 相和部分再结晶形成的细小等轴晶粒均匀分布在流线组织中。变形组织中弯曲的层片纤维消失,认为再结晶退火在一定程度上消除变形残余应力。

从图 5 可以看出,等轴 γ 晶粒和层片团之间的界面以及等轴 γ 晶粒之间的界面上都存在较多的二次裂纹,表明裂纹通常易在等轴晶粒和层片团界面或等轴晶粒内部形成,沿分层解理面或等轴晶粒和层片团之间的界面扩展。由于等轴晶粒和层片团分布均匀,裂纹扩展前沿遇到细小等轴晶粒时,会在等轴晶粒之间界面或等轴晶粒和层片团之间的界面上形成分支,相当于裂纹被钝化,形成主裂纹的应力得到松弛。由于挤压流线组织层片结构存在明显的方向性,层片方向多平行于拉伸方向,二次裂纹沿与拉伸轴平行的层片间界扩展,阻碍主裂纹扩展,因而拉伸试样能在达到较大载荷和塑性的应变下失效,获得较高的室温拉伸强度和塑性。800℃高温拉伸变形,晶界易于滑动,在晶界和层片严重扭折处易发生动态再结晶,促使合金软化,晶界细小 γ 相则能钉扎晶界,合金软化和强化平衡有利于变形的均匀发生,均匀分布的等轴晶粒和层片纤维也有利于均匀变形,这两方面的作用都使合金产生较高的高温塑性和拉

伸强度。

4 结论

(1) 70% 变形量包套挤压镍微合金化 TiAl 合金变形组织经 1250℃×15h 热处理,得到相对均匀细小的等轴双态组织,其中不含有残留的层片结构,为完全再结晶组织,但等轴晶粒尺寸不均匀。

(2) 挤压合金经($\alpha_2 + \gamma$)双相区退火处理得到了流线均匀分布的退火组织,合金室温拉伸屈服强度为 535MPa,抗拉强度为 650MPa,延伸率为 3%。

(3) 挤压合金退火组织 800℃拉伸屈服强度为 365MPa,抗拉强度为 400MPa,拉伸塑性达到 156%,具有超塑成形的潜力。

参考文献

- [1] TONESS A, FAUFMAN M J. Phase equilibria and transformations in intermediate titanium aluminum alloys[J]. J Acta Metall Mater, 1993, 41(2): 387- 398.
- [2] YAMAGUCHI M, INUI H, ITO K. High temperature structural intermetallics[J]. Acta Mater, 2000, 48: 307- 322.
- [3] SEETHARAMAN V, SEMIATIN S L. Plastic flow and microstructure evolution during hot deformation of a gamma titanium aluminide alloy[J]. J Metall Mater Trans A, 1997, 28A: 2309- 2321.
- [4] YUAN Zhi-shan, CHEN Sui-yuan, HAN Peng-biao, et al. The effect of heat treatment on microstructures and properties of near-isothermally forged TiAl alloy containing minor Ni[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment[J]. 2004, 25(5): 256- 259.
- [5] ZHONG Z Y, ZHANG J, LI S Q, et al. Microstructure modifications of wrought and cast TiAl alloys[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1999, 9(S1): 188- 193.
- [6] ZHANG J, LI S Q, ZHOU D X, et al. Recent advances of wrought TiAl alloys[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2002, 12(4): 592- 595.
- [7] KIM YOUNG-WON. Microstructure evolutions and mechanical properties of a forged gamma titanium aluminium alloy[J]. J Acta Metall Mater, 1992, 40(6): 1121- 1134.
- [8] ZHANG W J, LORENZ U, APPEL F. Recovery, recrystallization and phase transformations during thermomechanical processing and treatment of TiAl-based alloys[J]. J Acta Mater, 2000, 48(11): 2803- 2813.

基金项目: 863 国防先进材料资助项目(2002AA305209); 科技部国际科技合作重点资助项目(2001AA301080)

收稿日期: 2005-01-10; 修订日期: 2005-07-08

作者简介: 袁志山(1975-), 男, 博士研究生, 材料学专业, 联系地址: 北京市 81 信箱 2 分箱(100095)。