

热处理制度对 Fe-28Al-5Cr-0.3B-0.003Mg 合金 显微组织和室温力学性能及断裂机理的影响^①

邢志强 陆永浩 张学昆 徐学东 周美玲

(北京工业大学近代力学研究室, 北京 100022)

摘 要 研究了在不同相区保温和控制冷却速率的 Fe-28Al-5Cr-0.3B-0.003Mg 合金的微观组织和室温拉伸性能, 发现热机械处理可提高该材料的强韧性, 而未再结晶并具有 B2 结构的试样的综合拉伸性能最佳; 微观组织、断裂特征和强韧性之间存在内在联系。

关键词 Fe₃Al 金属间化合物 力学性质 断裂机理

近年来 Fe₃Al 合金的合金化和强韧化研究已取得了很大进展^[1-4], 通过适当的合金化、热机械处理和控制再结晶已使 Fe₃Al 的断裂强度达到 800 MPa 以上^[2], 这说明 Fe₃Al 的工程应用已指日可待。

研究证明热机械处理能提高 Fe₃Al 的强韧性能。Visioanathan^[5]发现材料经 500~700℃ 温轧后拉伸性能最佳, McKamey^[6]研究了再结晶对变形 DO₃-Fe₃Al 拉伸性能的影响并证明材料在形变应力充分释放且在未发生再结晶的条件下综合性能最好, 孙祖庆等^[7]采用对温轧试样在 B2 相区淬火的方法来提高其性能也取得了很好的结果。虽然 Fe₃Al 的室温平衡相是 DO₃ 结构, 但由于 DO₃ 相变温度低, 常规加工状态下很难转变成全部 DO₃ 结构, 因此有必要研究 B2+DO₃ 混合结构及单一 B2 结构 Fe₃Al 的组织与性能。本文研究热处理工艺对 Fe₃Al 组织、力学性质及断裂机理的影响。

1 实验过程

采用 Fe-28Al-5Cr-0.3B-0.003Mg(原子分数, 下同)合金(以下简记为 Fe₃Al-CrBMg)。材

料经氩气保护真空感应熔炼, 得到 4 kg 铸锭。在 1 000℃ 经 20 h 均匀化退火后在 1 000~1 100℃ 轻锻成板, 然后在 900~1 000℃ 热轧至 4 mm, 最终在约 500℃ 温轧成 1.5 mm 板材。材料经钼丝切割成薄板拉伸试样。试样经 650℃ 保温 3 h 去应力退火, 随后进行热处理, 最终热处理温度分别选在 DO₃ 及 B2 相区, 并选用不同的冷却速度, 以得到未发生再结晶和已发生再结晶的 DO₃、B2+DO₃ 和 B2 等几种组织结构。处理工艺见表 1, 表 1 中的平均晶粒尺寸误差约为 ±3 μm。

拉伸试验在 10 kN 的 Instron 4302 电子拉伸试验机上完成, 试样有效尺寸为 15 mm×3 mm×1.5 mm, 拉伸方向平行于轧制方向, 应变速率为 3.3×10⁻³/s, 温度为室温。对金相样品分别进行了光学和透射电镜观察, 对拉伸断口进行了扫描电镜观察, 所用透射和扫描电镜型号分别为日立 H700-H 和 S-40。

2 实验结果及分析

显微组织分析结果见图, 可见铸态组织粗大, 平均晶粒尺寸约为 250 μm(图 1(a)), 经轧

① 北京市科技新星计划资助项目 收稿日期: 1995-03-27; 修回日期: 1995-04-26 邢志强, 男, 36 岁, 教授

制后组织明显变细, 并沿轧制方向伸长, 平均晶粒尺寸缩小为 $15\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$, 左右, 热处理后当保温温度低于 $650\ ^\circ\text{C}$ 时, 微观组织形态变化不大, 保持拉长细小晶粒形状(图1(b)); 但当在 $700\ ^\circ\text{C}$ 以上热处理时, 开始发生局部晶粒长大, 这说明发生了部分再结晶; 而在 $900\ ^\circ\text{C}$ 时则发生了完全再结晶, 如 $900\ ^\circ\text{C}$ 炉冷试样的显微组织形态已成为粗大等轴晶粒(图1(c))。McKamey^[5]发现温轧 Fe₃Al 的起始再结晶温度为 $750\ ^\circ\text{C}$, 与本研究的 $700\ ^\circ\text{C}$ 略有差异, 这可能与变形量、成分和保温时间的不同有关, 此外从金相照片上可以看到沉淀相, 这在透射电镜观察中得到了证明(图1(d)), 经衍射分析表明沉淀相是 Fe-B 化合物。

Fe₃Al-CrBMg 合金热处理后的力学性能见表1。分析表1的试验结果可得到这样三个规律: (1) DO_3 结构($500\ ^\circ\text{C}$ 保温100 h 后随炉冷却)的拉伸强度低于所有热处理工艺下得到的 $B2$ 结构而高于已发生再结晶的 $B2 + DO_3$ 混合

组织结构的拉伸强度, 但其断裂延伸率在所有组织结构中是最低的。(2) 对同一热处理温度, 冷却速率影响材料的拉伸性能。随炉冷却时强度和韧性最差, 其抗张强度和延伸率的最低值分别为 $443\ \text{MPa}$ 和 4.8% ; 而油淬综合性能最好, 冷却速率进一步增加时, 拉伸性能反而略有下降。(3) 当采用相同的冷却速率(油淬)时, 随保温温度的增加, 强度和韧性出现峰值, 这一规律在图2中表现得更加明显: 在 $520\ ^\circ\text{C}$ (DO_3 相区) 保温后油淬, 塑性较差, 强度也不很高, 而在 $560\ ^\circ\text{C}$ ($B2$ 相区) 保温淬火强韧性均有明显提高, 在 $600\ ^\circ\text{C}$ 保温淬火后室温强度和塑性达到峰值, 其抗张强度、断裂强度和延伸率分别达到 $749\ \text{MPa}$ 、 $827\ \text{MPa}$ 和 10.4% , 已接近普通中强结构钢的水平; 强度和韧性在 $700\ ^\circ\text{C}$ 左右又开始下降, 并随保温温度的增加进一步下降。前面的金相分析表明, 在 $700\ ^\circ\text{C}$ 保温时开始发生部分再结晶和局部晶粒长大, 说明强度、韧性与微观组织密切相关。

图1 Fe₃Al-CrBMg 合金的微观组织
(a), (b), (c) — 光学显微镜像; (d) — TEM 像

表1 热处理对试验材料室温
拉伸性能的影响

热处理工艺 ($^{\circ}\text{C} \times \text{h}$)	平均晶粒 尺寸/ μm	σ_s /MPa	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
500× 100 FC 60× 15		470.1	596.5	614.6	3.1
520× 2 OQ 60× 15		517.6	707.3	766.7	8.4
560× 2 OQ 60× 15			747.7	822.5	10.0
560× 2 FC 60× 15			623.5	653.2	4.8
600× 2 OQ 60× 15			748.7	826.6	10.4
650× 2 OQ 60× 15		534.8	741.5	814.2	9.8
650× 2 FC 60× 15			570.0	604.4	6.0
650× 2 IQ 60× 15			669.7	717.2	7.1
700× 2 OQ 60× 25			683.5	741.6	8.5
750× 2 OQ		637.3	687.0	7.8	
750× 2 FC		528.7	559.9	5.9	
900× 2 OQ 80× 80		486.0	664.7	714.6	7.5
900× 2 FC 120× 120			443.0	466.6	5.3

* OQ—油淬; FC—炉冷; IQ—冰盐水淬

图2 不同热处理温度下 Fe_3Al -CrBMg
的室温拉伸性质

断口分析表明,在 520°C (DO_3 相区) 保温后油淬试样的断口特征主要是沿晶断裂(图3(a)),而 560°C ($B2$ 相区) 油淬试样则以解理开裂为主并含少量沿晶开裂的混合特征(图3(b)),在 $560\sim 700^{\circ}\text{C}$ 内保温温度进一步升高,断口特征变化不大,而在 750°C 以上淬火时,断裂几乎全部沿解理面发生(图3(c))。值得注意的是,当冷却方式为随炉冷却时,在各热处理温度下的断口特征都是沿晶开裂(图3(d),(e)),同图3(a)相比,断口特征几乎相同。 DO_3 结构的断裂方式为解理+ 沿晶混合开裂(图3(f)),这与 McKamey 等的研究结果相同^[8]。

3 讨论

Fe_3Al 金属间化合物的强韧性取决于合金元素的选择及添加量、制备工艺及热处理制度等诸多因素,其作用机理十分复杂。

本研究证明,热机械处理和 $B2$ 相区淬火确实使得被研究材料的室温力学性能有明显提高。关于热机械处理提高金属间化合物强韧性的原理,孙祖庆等^[7] 已作了很好的阐述。至于 $B2$ 相区淬火对 Fe_3Al 强韧性的影响,作者认为与下面两个因素有关: (1) $B2$ 结构作为一种高温相结构,其有序度低于 DO_3 ; (2) 对于 Fe_3Al 合金来说,由于 Fe 原子含量大大高于 $B2$ 相的平衡含量,多余的 Fe 原子占据 Al 亚点阵位置^[9],使其有序度进一步下降。上述两个因素都非常有利于位错滑移,因而使研究材料的解理开裂强度和韧性都有了相应提高。另外,与孙祖庆等^[7] 的研究相比,经最终热处理后本研所得材料的抗拉强度明显高于前者,但断裂应力和延伸率则有所不及,经分析可能是由于本工作硼的添加量高于前者、因而析出的第二相弥散硼化物较多,从而导致抗拉强度的提高和延伸率的下降。

总结本研究所有拉伸试样的断口特征,可以发现不管是在 DO_3 相区保温还是在 $B2$ 相区缓冷所得到的 $B2 + DO_3$ 混合组织,其断口都是以沿晶开裂为主;而未发生再结晶的 $B2$ 组织则呈解理开裂为主的解理+ 沿晶混合开裂,发生再结晶的 $B2$ 组织表现为纯解理断裂,其中又以未再结晶的 $B2$ 组织综合拉伸性能最佳、发生完全再结晶的 $B2 + DO_3$ 混合组织综合拉伸性能最差。这说明拉伸性能和显微组织与断裂微观特征之间存在着某种内在联系。McKamey 等^[8] 在分析 Cr 对 $\text{Fe}-28\text{Al}$ 合金室温性能和断裂模式的影响时,曾发现添加适量的 Cr 可使 DO_3 - Fe_3Al 的断裂方式由纯解理开裂转变为解理+ 沿晶混合开裂,并认为这是由于 Cr 的添加提高了材料的解理强度、使之与晶界强度相当,从而使材料韧性大幅度提高。同

图3 Fe₃Al-CrBMg 合金的微观断裂特征

(a) — 520℃ 油淬; (b) — 560℃ 油淬; (c) — 750℃ 油淬; (d) — 560℃ 油淬; (e) — 900℃ 油淬; (f) — DO₃处理

样对本文的研究来说, 可以认为 $B2 + DO_3$ 混合组织的晶界强度远低于其解理强度, 因而其断裂特征为沿晶开裂; $B2$ 结构的晶界强度有所提高, 因而材料的抗拉强度明显上升, 断裂方式也变为解理+ 沿晶混合开裂。Fe₃Al-CrB-Mg 合金断裂强度、断裂方式与组织结构的关系见图4。

4 结论

(1) 热处理工艺对 Fe₃Al 的室温强韧性都

图4 Fe₃Al-CrBMg 合金断裂强度与
微观组织的关系示意图

有很大影响。对经热机械处理的 Fe₃Al 来说, 具有 $B2$ 结构并且未发生再结晶的材料强度和韧性最佳。

(2) $B2$ 结构 Fe₃Al 在室温拉伸时发生解

理+ 沿晶混合断裂, 而 $B2 + DO_3$ 结构则发生沿晶断裂。

参考文献

- 1 Liu C T, George E P. *Scr Metall Mater.* 1990, 24: 1285.
- 2 McKamey C G, Maziasz P J, Goodwin G M. *Mater Sci Engng*, 1994, A174: 59.
- 3 孙扬善, 郭军, 张力宁, 张谨平. 金属学报, 1991, 28: A481.
- 4 孙超, 郭建亭, 谭明辉等. 金属学报, 1992, 28: A481.
- 5 Viswanathan S, Shelton B R, Wright J K *et al.* *Scr Metall mater*, 1993, 29: 589.
- 6 McKamey C G, Pierce D H. *Scr Metall Mater*, 1993, 28: 1173.
- 7 孙祖庆, 黄原定, 杨王月等. 金属学报, 1993, 29: 354.
- 8 McKamey C G, Horton J A, Liu C T. *Scr Metall*, 1988, 22: 1679.
- 9 Neumann J P. *Acta metall*, 1976, 24: 701.

INFLUENCES OF HEAT TREATMENT SYSTEM ON MICRO-STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES AT ROOM-TEMPERATURE AS WELL AS FRACTURE MECHANISM OF Fe-28Al-5Cr-0.3B-0.003Mg ALLOY

Xing Zhiqiang, Lu Yonghao, Zhang Xuekun, Xu Xuedong, Zhou Meiling

Research Division of Modern Mechanics,

Beijing University of Technology, Beijing 100022

ABSTRACT The micro-structures and the tensile properties at room temperature of the Fe-28Al-5Cr-0.3B-0.003Mg alloy have been examined with various holding temperatures in several phase zones and at different cooling rates. It was found that, thermally mechanical treatments can improve the alloy's strength and toughness and the comprehensive tensile behaviours of the samples with $B2$ structure and with no re-crystallization structure possess optimum tensile behaviours. In addition there is an intrinsic relationship existing between microstructure, fracture characteristics, strength and toughness of the alloy tested.

Key words Fe₃Al metallic composite mechanical behaviour fracture mechanism

(编辑 吴家泉)