

[文章编号] 1004-0609(2002)01-0061-04

CMSX-2 合金位错组态与凝固组织的关系^①

李金山, 张万明, 寇宏超, 李双明, 杜 炜, 刘 林, 傅恒志

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

[摘 要] 对 CMSX-2 合金粗枝晶、细枝晶以及超细枝晶单晶持久变形后的位错组态进行了研究。结果表明: 超细枝晶单晶持久变形过程中在 γ/γ' 相界上形成的位错网络比粗枝晶单晶的均匀; γ 相内部形成的位错密度减小, 分布也更加均匀, 多位错滑移程度降低; 切过 γ' 的位错明显减少, 反映出高温下合金抵抗蠕变变形的能力提高。

[关键词] 高温合金; 定向凝固; 持久性能; 位错; 凝固组织

[中图分类号] TG 113; TF 771

[文献标识码] A

在单晶高温合金的持久变形过程中, 位错的运动方式和位错组态对合金的蠕变行为和性能影响极大, 因此相关的研究开展得很普遍。但是凝固组织对单晶高温合金持久变形位错组态的影响还鲜有报道。郭喜平等人^[1~3]首先利用 NASAIR100 合金开展了相关研究, 结果显示: 在早期变形阶段, 位错以位错对的形式切过 γ' 相, 未发现位错绕过 γ' 运动, 平面和胞状界面单晶中出现穿过 γ' 和 γ 的不均匀变形带以及某些滑移面上的位错缠结, 粗枝晶和细枝晶单晶中, γ' 内的位错分布均匀, 且 γ' 较难被位错切过; 进入中期变形阶段后, γ' 内的位错密度增大, γ'/γ 相界上的位错网络密度也进一步增大。可见, 高温合金凝固组织变化确实影响着持久变形位错组态。为此, 作者将利用所获得的 CMSX-2 合金粗枝晶、细枝晶以及超细枝晶单晶持久变形组织来开展进一步的研究。

1 实验

采用的 CMSX-2 单晶高温合金的成分、定向凝固过程与前期研究工作^[4~7]相同。单晶试样的热处理规范为 1315 °C/4 h, AC+ 1080 °C/4 h, AC+ 870 °C/20 h, AC(AC: Air cooling)。持久性能测试在 1050 °C, 160 MPa 条件下进行。利用线切割在持久试样纵轴线位置附近纵剖出约 0.4 mm 厚的薄片两片, 先在金相砂纸上手工减薄至 50 μm , 然后在薄片上截取约 0.3 mm \times 0.4 mm 大小的小片进行双喷电化学减薄, 不同凝固组织试样间的截取位置是

相互对应的, 减薄液为 10% HClO₄+ 90% C₂H₅OH。在 TEM 下选取不同凝固组织单晶多区域内的位错组态进行了观察, 并选取有代表性的观察结果加以说明。

2 结果与分析

2.1 不同凝固组织单晶中典型的位错组态特征

持久测试显示, 粗枝晶单晶(初次枝晶臂间距 $d = 245 \mu\text{m}$) 的平均持久寿命为 67 h, 细枝晶单晶($d = 82 \mu\text{m}$) 的为 108 h, 超细枝晶单晶($d = 45 \mu\text{m}$) 的为 131 h。可见随着凝固组织的细化, 合金的持久性能显著提高。

粗枝晶单晶中的典型位错组态特征如图 1 所示, 4 个视场中位错组态相差很大, 从柏氏矢量分析和位错线方向判断, 有大量的三类 $(a/2) \langle 110 \rangle$ 位错参与 γ 的变形。图 1(a) 和(b) 中显示筏形组织层片较规则的区域位错密度小, 图 1(c) 和(d) 中则显示筏型组织不规则的区域位错密度大, 变形比较集中, 而且局部区域中有平直的位错滑移条带穿过多个 γ 和 γ' 。无论是位错密集区还是稀疏区, 在粗枝晶单晶的 γ' 内都存在位错, 并且在合金位错密集区 γ' 内位错较多, 说明有大量的位错切过 γ' 。此外, 粗枝晶单晶中 γ'/γ 相界上的位错网络局部缠结比较明显, 与此相邻的 γ' 内往往有位错存在。

细枝晶单晶各视场 γ 内的位错分布较均匀, 位错密度较粗枝晶单晶的小, 但局部也存在集中位错滑移形成的位错排, 如图 2 所示。图 2(a) 和(c) 中 γ

① [基金项目] 陕西省自然科学基金资助项目; 国家重点实验室访问学者基金资助项目

[收稿日期] 2001-06-08; [修订日期] 2001-11-02

[作者简介] 李金山(1965-), 男, 副教授, 博士。

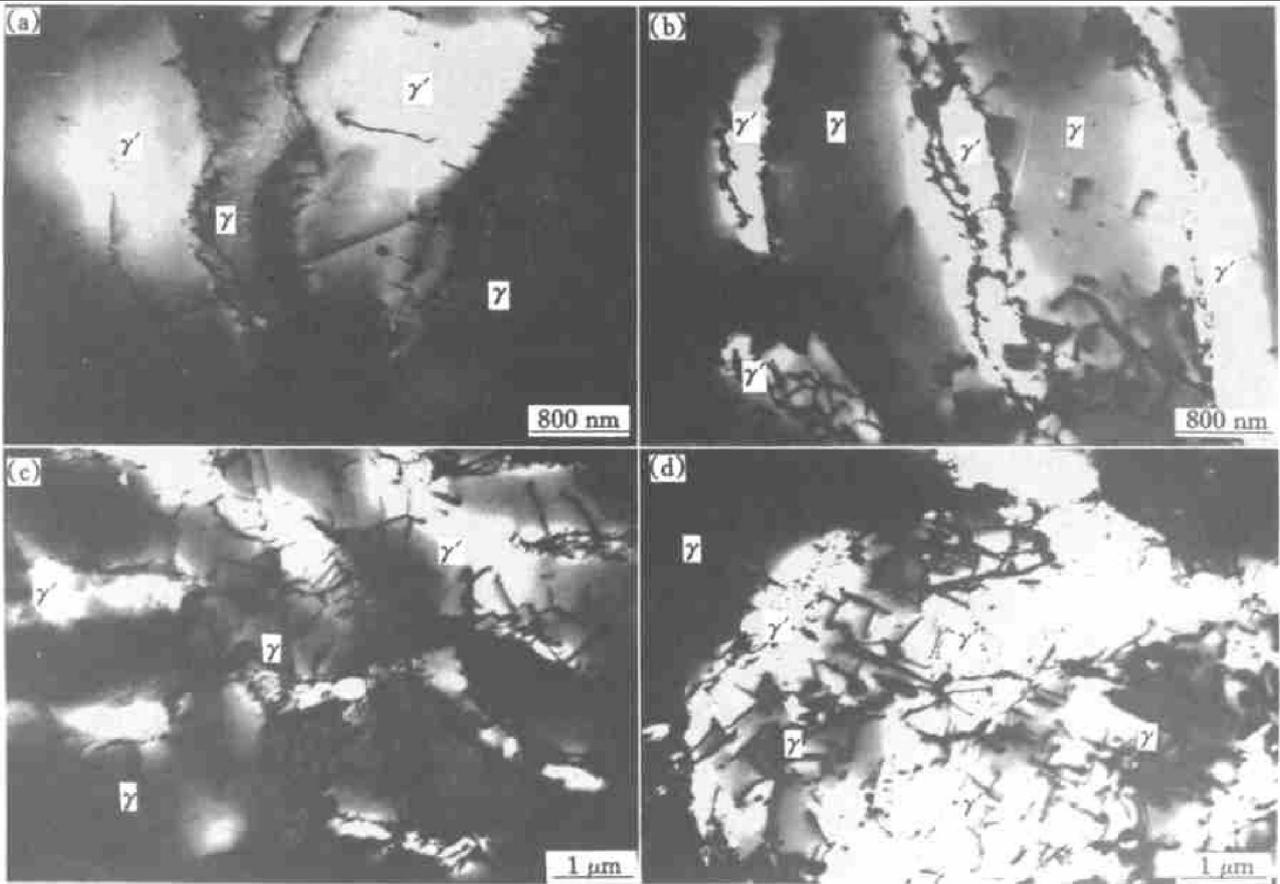


图 1 粗枝晶单晶中的位错组态

Fig. 1 Configuration of dislocations in single crystal with coarse dendrite structures

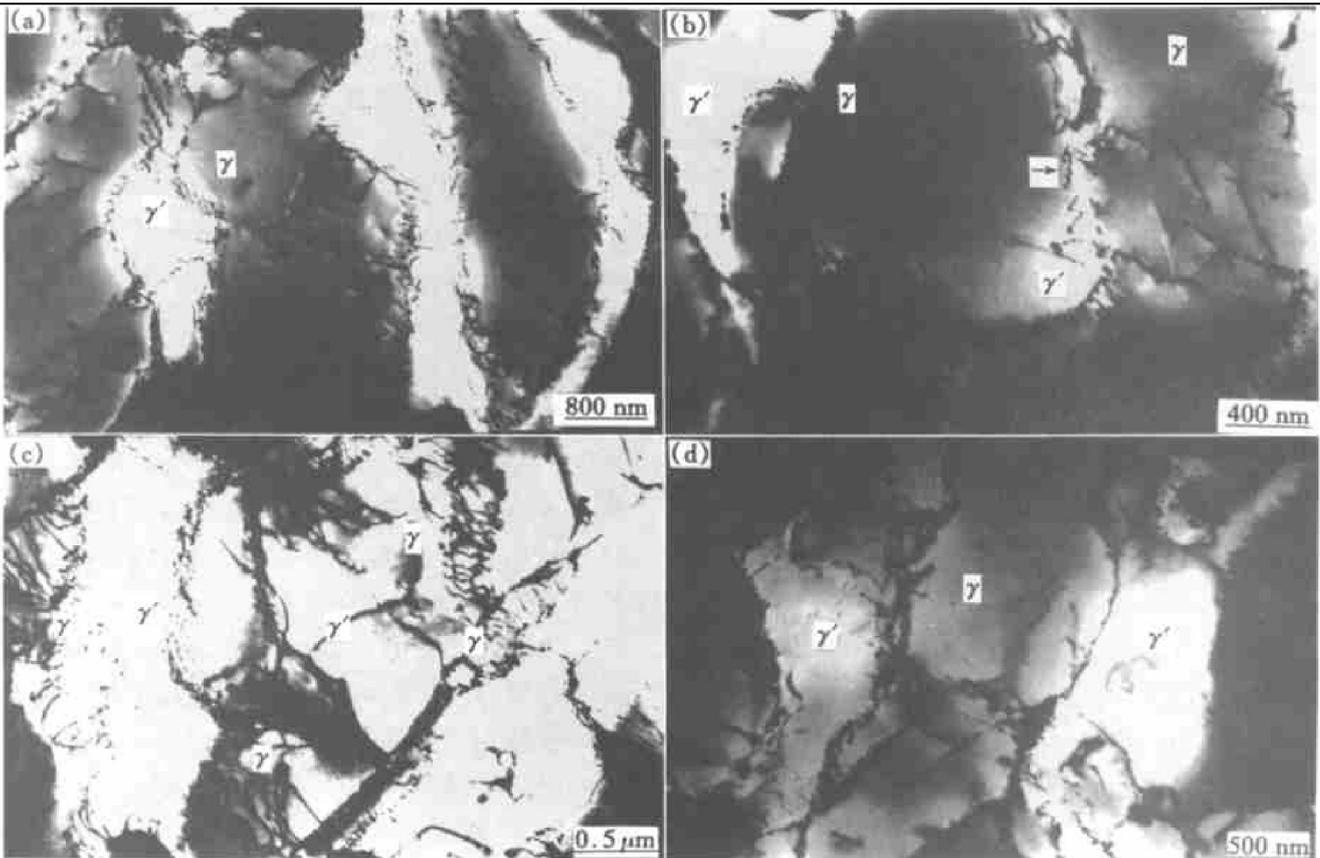


图 2 细枝晶单晶中的位错组态

Fig. 2 Configuration of dislocations in single crystal with fine dendrite structures

内有位错滑移带从 γ 延伸穿过 γ' , 带内因位错密度很高而呈黑色衬度, 这种现象在郭喜平的研究^[1, 2]中也比较典型。图 2(b) 还显示, γ 内某一滑移面上的位错排延伸至 γ' 内, 从而向 γ' 内引入位错。 γ'/γ 相界上的位错网络分布比较均匀, 没有明显的位错缠结出现。 γ' 内的位错不多, 位错线方向说明有三类 $(a/2)\langle 110\rangle$ 位错参与 γ 的变形, 但某一类方向的位错较多, 说明参与程度不太一致。

图 3 显示超细枝晶单晶中 γ 内位错密度较低, 并且明显有一类 $(a/2)\langle 110\rangle$ 位错参与 γ 变形的程度很高。 γ'/γ 相界上的位错网络分布均匀, 缠结较少。图 3(b) 显示有滑移带穿过 γ 和 γ' 相。 γ' 内位错很少。图 3(d) 显示 γ' 内的位错方向与 γ 内主要位错方向一致, 表明这些位错可能来自于 γ 内。

总的看来, 随着枝晶的细化, γ 内的位错密度降低, 分布均匀性增加, 参与合金变形的多位错滑移程度降低; 切过 γ' 的位错减少; γ'/γ 相界上的位错网络分布更均匀, 缠结减少。

2.2 分析与讨论

凝固组织造成位错组态特征差异的内在原因是组织的均匀性。研究表明, 粗枝晶单晶组织均匀性

差, 筏型组织完善程度在不同区域相差很大。在完善度高的区域, 位错能在 γ 内比较均匀的开动滑移并聚集在 γ'/γ 相界上形成位错网络; 在完善程度低的区域, γ' 层片较短以及排列方向与外应力方向夹角减小, 从而增加了 γ 垂直通道数量, 因此位错受 γ' 阻挡作用降低^[8, 9], 合金变形程度增加, 导致局部内应力增大, 促使 γ 内发生多位错滑移, 位错滑移程度提高并通过相界向 γ' 延伸, 同时局部位错网络缠结增大造成相界应力集中, 将位错引入 γ' 相。当大量位错切过 γ' 后变形进一步加剧, 合金的抗蠕变能力下降, 所以粗枝晶单晶中存在着局部位错密度大, 变形集中的位错组态特征。

枝晶组织细化后组织均匀性提高, 筏型组织的完善程度和均匀程度增加, 因此合金中各区域的变形程度更加接近, 均匀分布的变形使各 γ 间以及内部的应力分布均匀, 导致位错滑移得以在 γ 内较均匀地进行, 同时应力的均匀分布也使 γ 内的变形主要由有利取向的滑移系开动来参与, 所以多位错滑移程度开始减小。集中滑移减少后, 向 γ' 内引入的位错减少, 位错主要在相界上形成均匀分布的位错网络, 并进一步阻碍位错切入 γ' , 从而提高了抗蠕变能力^[5]。

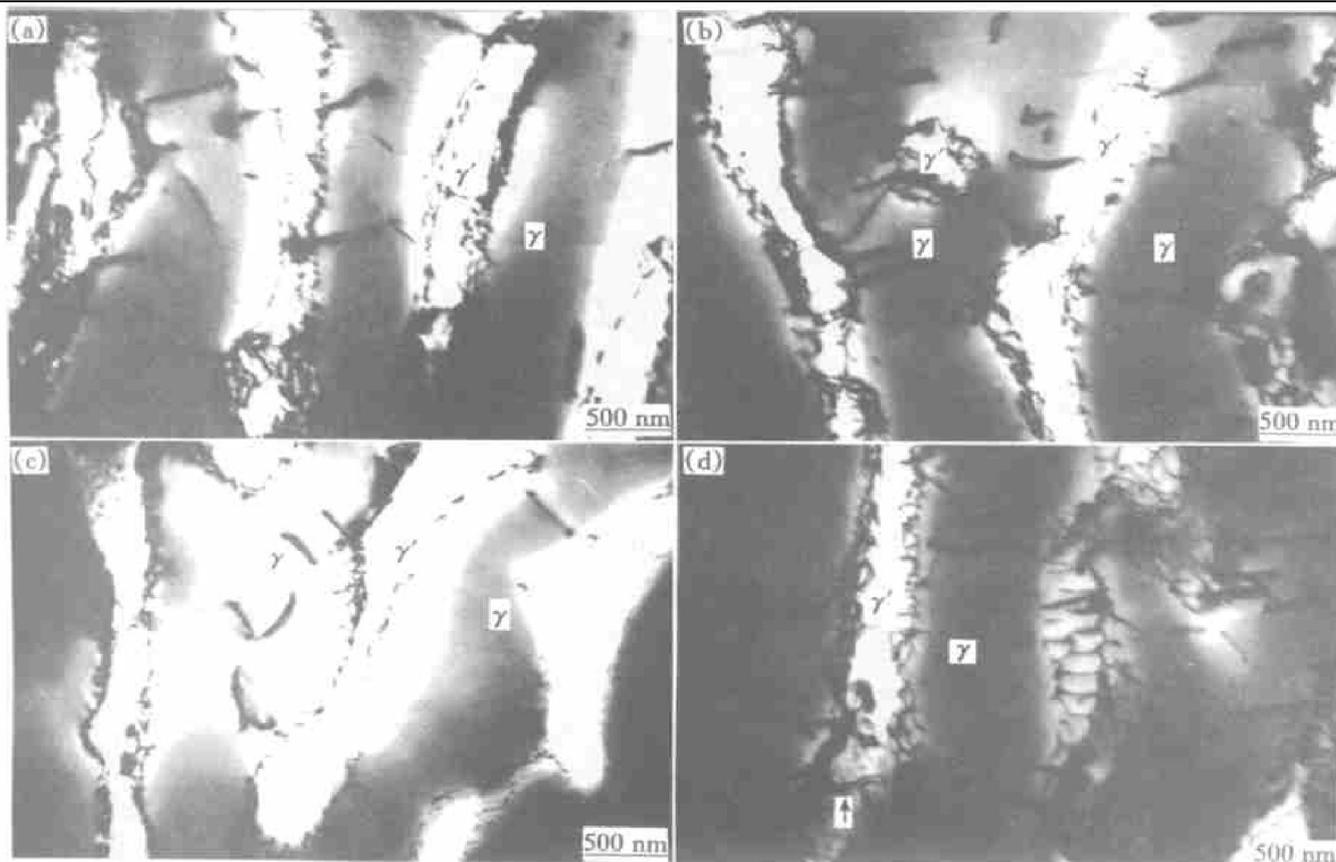


图 3 超细枝晶单晶中的位错组态

Fig. 3 Configuration of dislocations in single crystal with superfine dendrite structures

当然, 由于 γ' 相与 γ 存在共格关系, 所以 γ' 与 γ 之间在适当的局部应力集中作用下易发生共面滑移, 形成长的位错滑移带穿过多个 γ 和 γ' 相, 这种情况在任何凝固组织单晶中均出现而且难以避免, 但随着组织均匀性的提高, 合金内局部应力集中程度减小, 因此 γ'/γ 界面间的共面滑移趋势有所降低。

3 结论

1) CMSX-2 合金持久变形过程中, γ' 内的位错来自于 γ 内位错集中滑移带向 γ' 的延伸, 或 γ'/γ 相界局部位错网络高度缠结引发相界应力集中。

2) 随着凝固组织的细化, γ 内的位错密度降低, 分布均匀性增加, 参与合金变形的多位错滑移程度降低; 切过 γ' 的位错减少; γ'/γ 相界上的位错网络分布更加均匀, 缠结减少, 阻碍位错运动的能力增加, 因此合金的高温持久性能得以提高。

3) 凝固组织对合金位错组态影响的内在原因是组织均匀性对合金均匀变形产生作用。

[REFERENCES]

[1] 郭喜平. 单晶高温合金的凝固界面形态与组织性能及蠕变断裂的关系 [D]. 西安: 西北工业大学, 1992.
GUO Xi ping. Relationships between solid-liquid interface morphologies and the microstructure, mechanical properties and creep fracture mechanisms of a nickel-base single crystal superalloy NASAIR100 [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1992.

[2] Guo X P, Fu H Z, Sun J H, et al. Deformed microstructure of the single crystal superalloy NASAIR100 at 1 050 °C [J]. Metall Trans, 1999, 30A: 2843.
[3] Harris K, Erickson G L, Schewer R E. High Temperature Alloys for Gas Turbine and other Application [M]. Holland. D Reider Publishing Company, 1986. 709.
[4] 杜 炜, 魏朋义, 李建国, 等. 镍基单晶高温合金 DD2 高梯度定向凝固行为 [J]. 航空材料学报, 1997, 17: 1.
DU Wei, WEI Peng-yi, LI Jian-guo, et al. High gradient and directional solidification behaviour of a nickel-base single crystal superalloy DD2 [J]. J of Aviation Materials, 1997, 17: 1.
[5] 杜 炜, 魏朋义, 李建国, 等. 中速生长条件下单晶高温合金组织及偏析研究 [J]. 金属学报, 1998, 34: 356.
DU Wei, WEI Peng-yi, LI Jian-guo, et al. Microstructure and microsegregation of Ni-base single crystal superalloy solidified at medium cooling rate [J]. Acta Metall Sinica, 1998, 34: 356.
[6] Du W, Li J G, Fu H Z. Solidification and microstructure behaviors of nickel-base single crystal superalloy solidified at medium cooling rate [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1998, 8(1): 83.
[7] Du W, Li J S, Li J G, et al. Dendrite refining and eutectic transformation behavior of nickel-base single crystal superalloy [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 1998, 11 (1): 61.
[8] Reed R C, Matan, N, Cox D C, et al. Creep of CMSX-4 superalloy single crystals: effects of rafting at high temperature [J]. Acta Metall Mater, 1999, 47: 3367.
[9] Nabarro F R N. Rafting in superalloys [J]. Metall Trans, 1996, 27A: 513.

Relationship between solidified structure and dislocation configuration in CMSX-2 superalloy

LI Jir-shan, ZHANG Wan-ming, KOU Hong-chao, LI Shuang-ming, DU Wei, LIU Lin, FU Heng-zhi
(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an 710072, China)

[Abstract] The dislocation configuration in coarse dendrite and fine dendrite as well as superfine dendrite single crystals of CMSX-2 superalloy after rupture deformation was investigated. The results show that the dislocation nets formed at γ'/γ phase interface are more integrated in superfine dendrite single crystals than those in coarse dendrite single crystals. In addition, the distribution of dislocations in γ' phase of superfine dendrite single crystals is more uniform and the number of dislocations cutting γ' phase is fewer than that in coarse dendrite single crystals. This reveals that superfine superalloy has higher ability in resisting creep deformation than coarse dendrite superalloy does.

[Key words] CMSX-2 superalloy; directional solidification; solidified structure; rupture properties; dislocation

(编辑 杨 兵)