

镍基高温合金初始织构对电辅助拉伸 宏微观行为的影响

张昕^{1,2}, 李智军³, 李宏伟^{1,2}, 詹梅^{1,2}, 邵光大^{1,2}, 高佳^{1,2}

(1. 西北工业大学 材料学院, 西安 710072;

2. 陕西省高性能精确成形技术与装备重点实验室, 西安 710072;

3. 西安航天动力研究所, 西安 710100)

摘要: **目的** 研究织构对镍基高温合金电辅助成形的影响规律。**方法** 通过准静态拉伸与电辅助拉伸对比实验,研究了不同初始织构对镍基高温合金电辅助成形宏观力学行为以及微观组织演化的影响规律。**结果** 当初始织构为易变形织构时,拉伸后的纤维织构峰值较低,而电辅助拉伸过程中焦耳热使得试样温度升高,变形抗力得到下降,在一定程度上增大了纤维织构的强度。当初始织构为难变形织构时,材料变形抗力大,拉伸后纤维织构峰值较高,但材料变形过程晶粒细化程度高,缺陷的增多导致电辅助成形过程中焦耳热更为明显,焦耳热导致的高温使得难变形晶粒变形更为协调,最终的纤维织构强度有所下降。**结论** 不同的初始织构对电辅助成形宏微观行为有较大的影响,因此合理利用织构在电辅助成形过程中的影响以完善电辅助成形工艺十分重要。

关键词: 电辅助成形; 镍基高温合金; 织构; 变形抗力

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.05.004

中图分类号: TG115.5⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)05-0032-05

Effects of Initial Texture on Macro-micro Behaviors of Ni-based Superalloy during the Electrically-assisted Tensile

ZHANG Xin^{1,2}, LI Zhi-jun³, LI Hong-wei^{1,2}, ZHAN Mei^{1,2}, SHAO Guang-da^{1,2}, GAO Jia^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of High-Performance Precision Forming Technology and Equipment,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the effect rule of texture on electrically-assisted forming of Ni-based superalloy. Quasi-static tension and electrically-assisted tension were compared in experiment to study the effect of initial texture on macro mechanical behaviors and microstructure evolution of electrically-assisted forming of Ni-based superalloy. It was found that the fiber texture intensity was lower when the initial texture was easy-to-form texture after quasi-static tension. However, the flow stress of the sample was reduced because of the increasing Joule heat during the electrically-assisted tension, which increased the strength of fiber texture intensity. When the initial texture was difficult-to-form texture, the flow stress was higher and the fiber texture intensity after quasi-static tension was larger. However, the grain refinement

收稿日期: 2019-08-05

基金项目: 国家自然科学基金 (U1737212, U1637102)

作者简介: 张昕 (1991—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电辅助成形宏微观机理研究。

通讯作者: 李宏伟 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为基于多尺度建模仿真的形性协同调控。

degree was also higher under this condition. As a result, the increase of defects led to more obvious Joule heating effects during the electrically-assisted process. The extremely high temperature resulted in more harmonious deformation of difficult-to-form grains; therefore, the intensity of final fiber texture was weakened. Different initial textures have significant influences on the macroscopic/microscopic behaviors of electrically-assisted forming. Therefore, it is very important to make reasonable use of the influences of texture in electro-assisted forming so as to improve the process of electro-assisted forming.

KEY WORDS: electrically-assisted forming; Ni-based superalloy; texture; flow stress

脉冲电流辅助成形可以显著降低材料变形的流动应力，并可以提高材料伸长率^[1—5]，同时电辅助成形也能改善材料的微观组织以改善性能^[6—9]。近些年来，电辅助成形由于其在成形过程中高效、便捷的特点已经吸引了广泛的关注。

镍基高温合金普遍应用于航空航天发动机关键零部件上，但其变形抗力大^[10—12]，室温下难以成形，而高温成形工艺复杂且微观组织调控十分困难，因此将电辅助成形技术应用于高温合金等难变形合金的成形有很大的应用前景。现在已有的研究大多数针对于不同电参数对电辅助成形宏微观行为的影响^[13—15]，研究结果均表明随着电流密度或通电时间的增加，材料的宏观变形抗力下降愈加明显，且微观组织也能得到较大的

改善，比如脉冲电流能使材料在较短时间内发生充分再结晶，也能高效地促进材料强化相的充分析出。然而目前的研究忽略了材料本身各向异性对电辅助成形的影响，尤其是在板材成形中材料的各向异性更加不能忽略，因此，文中以镍基高温合金板材为研究对象，研究了不同初始织构对电辅助成形的影响规律，此研究为后续高温合金电辅助滚压、轧制等工艺研究奠定基础。

1 实验

采用厚度为 1 mm 的镍基高温合金板材，其实验检测成分如表 1 所示。

表 1 镍基高温合金板材的化学成分
Fig.1 Chemical composition of the Ni-based superalloy sheet

元素	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Co	Al	Si	Fe
质量分数/%	53	17.79	5.11	3.13	0.94	0.54	0.46	0.34	余量

图 1 为同一板材 3 个不同方向的晶粒形貌与 ODF 图，其中图 1a 和 d 为板材轧向（RD），图 1b 和 e 为板材偏轧向 45°方向（45°RD），图 1c 和 f 为板材横向（TD）。可知同一板材的 3 个方向平均晶粒尺寸基本相同，而织构明显不同。轧向织构为(001) 100，偏轧向 45°方向织构为(111) 112，而横向织构则为(111) 110。电辅助拉伸实验过程中采用的是型号为 CMT4000 多功能试验机以及型号为 GMCW-F20 V-1000 A 的变向脉冲电源，拉伸过程中准静态和电辅助拉伸速率均为 0.156 min⁻¹，且总应变均为 0.43，其中电辅助拉伸电流密度设置为 36 A/mm²，频率设定为 100 Hz，试样从拉伸开始到结束持续通有脉冲电流。选取拉伸后的样品进行 EBSD 检测分析，研究镍基高温合金初始织构对电辅助成形过程宏微观行为的影响规律。

2 结果与分析

图 2 分别为不同初始织构试样在准静态和电辅助拉伸条件下的应力-应变曲线。结果表明，在准静

态拉伸条件下，轧向的变形抗力最小，而横向的变形抗力最大。而在电辅助拉伸条件下，横向的变形抗力最小，轧向和偏轧向 45°方向的变形抗力几乎相同。分别计算不同取向试样在不同条件下变形抗力的下降程度，可知脉冲电流导致的横向变形抗力下降程度最为明显（21.3%），而偏轧向 45°方向（15.7%）以及轧向（11.8%）次之。

图 3 为不同取向试样分别在准静态拉伸和电辅助拉伸条件下变形后的 ODF 演化图，可知所有试样经过拉伸变形后织构类型基本上都为(111)纤维织构，但不同条件下的织构强度有所区别。在准静态条件下，初始织构为(001) 100 的轧向试样拉伸后(111)纤维织构峰值最低，仅为 3.892，而初始织构为(111) 110 的横向试样拉伸后(111)纤维织构峰值最高，达到了 6.687。但值得注意的是，在电辅助条件下，轧向试样拉伸后(111)纤维织构峰值相比于准静态拉伸条件得到了较为明显的加强，达到了 5.799。而横向试样拉伸后(111)纤维织构峰值却降低了，其峰值为 4.551。偏轧向 45°方向试样的织构演变情况介于横向和轧向织构变化程度之间。

通常镍基高温合金拉伸后的变形织构主要为(111)纤维织构,对于本项研究中的3个初始织构,可发现(001) 100 织构为易变形织构,而(111) 110 织构为难变形织构,因此,轧向试样的变形抗力相对较低于其他两个方向的变形抗力(见图2a),且变形后

的(111)纤维织构峰值较低,由于晶粒破碎程度较低所以平均晶粒尺寸较大。横向试样变形过程晶粒破碎程度更高,平均晶粒尺寸仅为 $16.34\text{ }\mu\text{m}$,晶粒细化很明显,且变形后(111)纤维织构峰值较高。但在电辅助条件下,由于焦耳热导致试样温度升高,较高温度下材

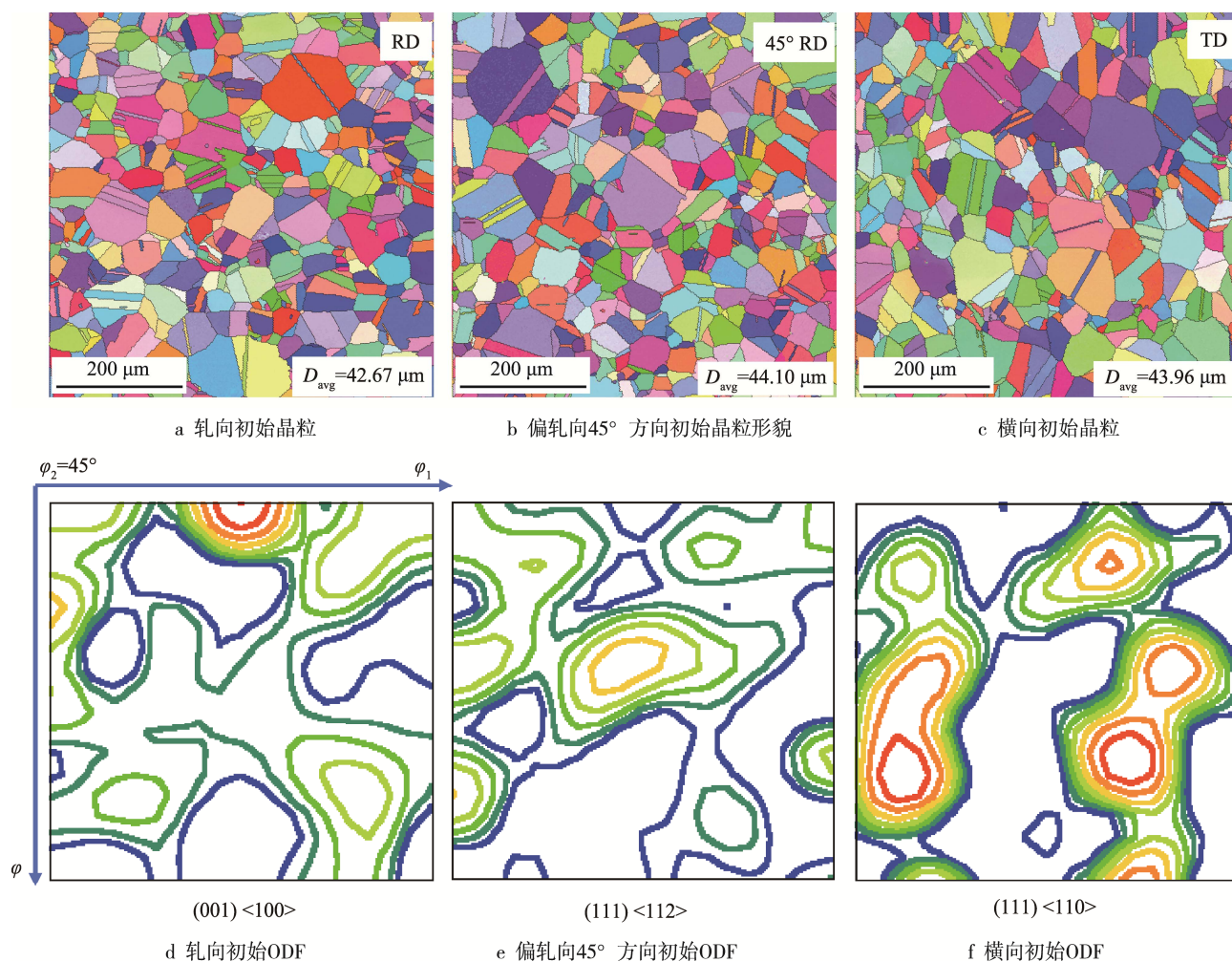


图1 镍基高温合金板材不同方向的晶粒形貌与 ODF 图

Fig.1 Grain morphology and ODF figure of the Ni-based superalloy in different directions

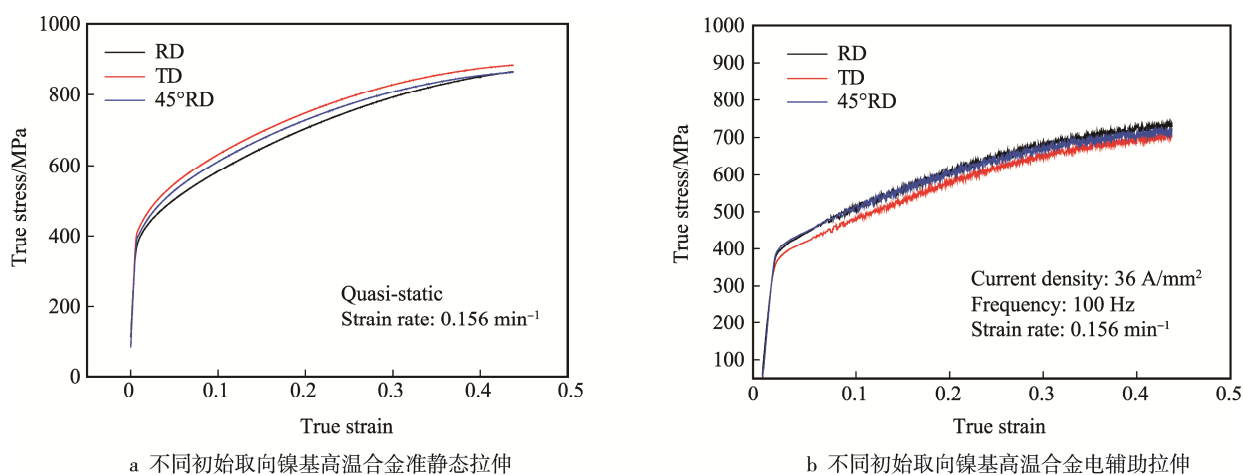


图2 拉伸过程中的应力应变曲线

Fig.2 Strain-stress curves obtained in the tension process

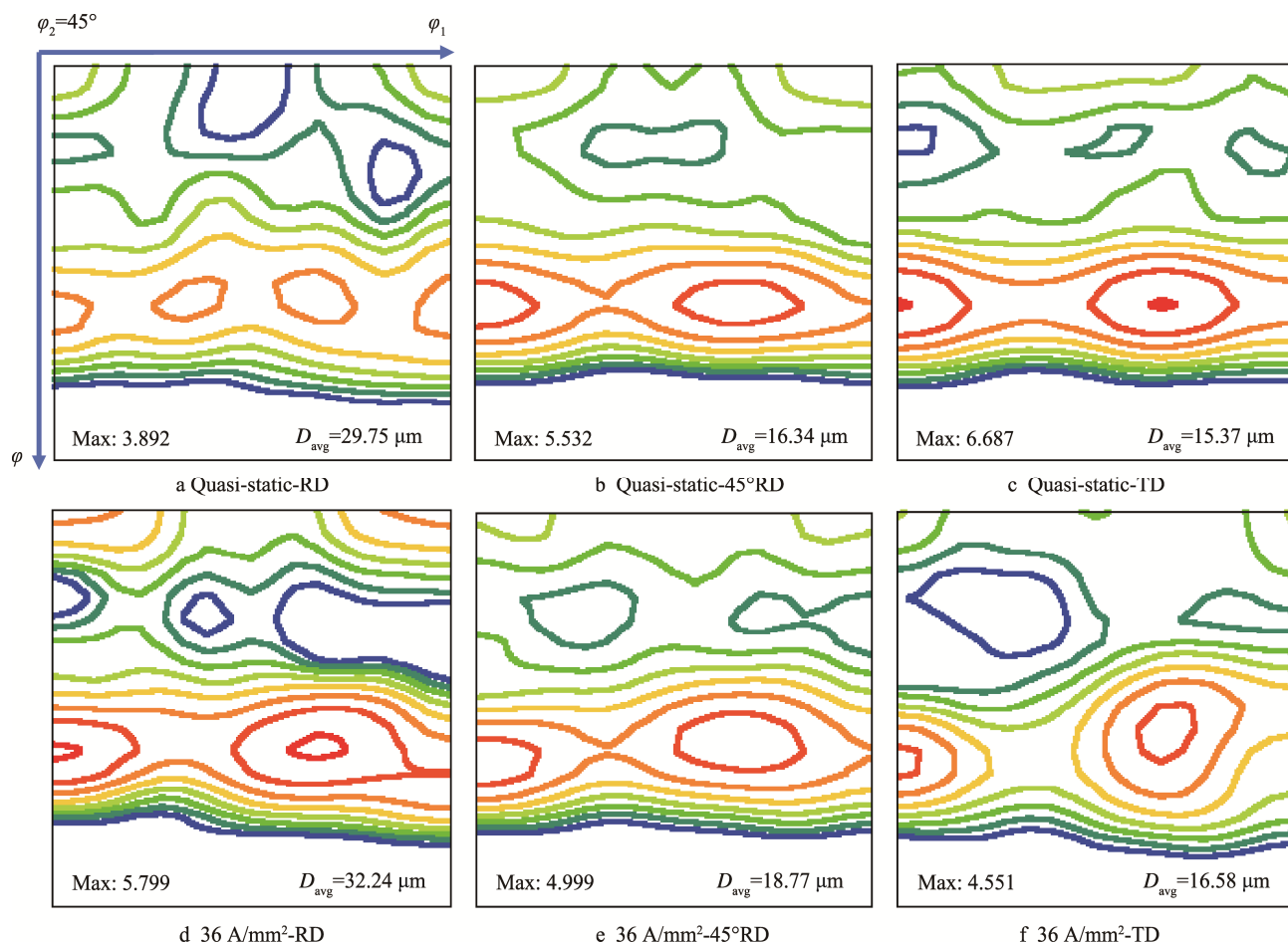


图 3 不同电参数作用下镍基高温合金的组织演化 ODF 图

Fig.3 ODF diagram for texture variation of Ni-based superalloy with different electrical current parameters

料的变形抗力下降,材料变形更为容易,因此轧向试样电辅助成形后变形组织峰值增大。而对于横向试样,由于横向试样变形过程晶粒细化十分明显,位错、晶界等缺陷数量增大,根据文献[5—6]报道,材料内部缺陷越多,电辅助导致的焦耳热越明显,横向试样拉伸过程中的温升比轧向试样的温升更显著,进一步降低材料的变形抗力,晶粒变形更为协调,因而变形组织峰值有所降低。偏轧向 45°方向的试样变形行为介于两者之间。

3 结论

通过研究不同初始结构对镍基高温合金电辅助成形宏观力学行为以及微观组织演化的影响规律,得到以下结论。

1) 当初始结构为易变形组织时,拉伸后的纤维组织峰值较低,而电辅助拉伸过程中焦耳热使得试样温度升高,变形抗力得到下降,在一定程度上增大纤维组织的强度。

2) 当初始结构为难变形组织时,材料变形抗力大,拉伸后纤维组织峰值较高,但材料变形过程晶粒细化程度高,缺陷的增多导致电辅助成形过程中焦耳

热更为明显,焦耳热导致的高温使得难变形晶粒变形更为协调,最终的纤维组织强度有所下降。

由此可知不同的初始结构对电辅助成形宏观行为有较大的影响,因此合理利用组织在电辅助成形过程中的影响从而完善电辅助成形工艺十分重要。

参考文献:

- [1] NGUYEN-TRANHD, OHHS, HONGST, et al. A Review of Electrically-Assisted Manufacturing[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2015(4): 365—376.
- [2] XU Q, GUAN L, JIANG Y B, et al. Improved Plasticity of Mg-Al-Zn Alloy by Electropulsing Tension[J]. Materials Letters, 2010(64): 1085—1087.
- [3] ZHU R F, TANG G Y, SHI S Q, et al. Effect of Electroplastic Rolling on the Ductility and Superelasticity of TiNi Shape Memory Alloy[J]. Materials & Design, 2013(44): 606—611.
- [4] ZHAO Y G, MA B D, GUO H C, et al. Electropulsing Strengthened 2 GPa Boron Steel with Good Ductility[J]. Materials & design, 2013(43): 195—199.
- [5] ROH J H, SEO J J, HONG S T, et al. The Mechanical

- Behavior of 5052-H32 Aluminum Alloys under a Pulsed Electric Current[J]. *International Journal of Plasticity*, 2014(58): 84—99.
- [6] CAO F R, XIA F, HOU H L, et al. Effects of High-density Pulse Current on Mechanical Properties and Microstructure in a Rolled Mg-9.3Li-1.79Al-1.61Zn Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015(637): 89—97.
- [7] WANG X W, XU J, SHAN D B, et al. Effects of Specimen and Grain Size on Electrically-induced Softening Behavior in Uniaxial Micro-tension of AZ31 Magnesium Alloy: Experiment and Modeling[J]. *Materials & Design*, 2017(127): 134—143.
- [8] JIANG Y B, TANG G Y, SHEK C H, et al. Mechanism of Electropulsing Induced Recrystallization in a Cold-rolled Mg-9Al-1Zn Alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012(536): 94—105.
- [9] CAO F R, XIA F, HOU H L, et al. Effects of High-density Pulse Current on Mechanical Properties and Microstructure in a Rolled Mg-9.3Li-1.79Al-1.61Zn Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015(637): 89—97.
- [10] JOHANSSON J, PERSSON C, LAI H P, et al. Microstructural Examination of Shear Localization during High Strain Rate Deformation of Alloy 718[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016(662): 363—372.
- [11] LI K K, CHEN M S, LIN Y C, et al. Microstructural Evolution of an Aged Ni-based Superalloy under Two-stage Hot Compression with Different Strain Rates[J]. *Materials & Design*, 2016(111): 344—352.
- [12] ZOUARI M, BOZZOLO N, LOGE R. Mean Field Modelling of Dynamic and Post-dynamic Recrystallization during Hot Deformation of Inconel 718 in the Absence of δ Phase particles[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016(665): 408—424.
- [13] ZHANG X, LI H W, ZHAN M. Mechanism for the Macro and Micro Behaviors of the Ni-based Superalloy during Electrically-assisted Tension: Local Joule Heating Effect[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, (742): 480—489.
- [14] ZHANG X, LI H W, ZHAN M, et al. Extraordinary Effect of the δ Phase on the Electrically-assisted Deformation Responses of a Ni-based Superalloy[J]. *Materials Characterization*, 2018(144): 597—604.
- [15] ZHANG X, LI H W, ZHAN M, et al. Electron-force-induced Dislocations Annihilation and Regeneration of a Superalloy Through Electrical in-situ Transmission Electron Microscopy Observations[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019.