引用格式：卢俊，杨春雷，沈海军，等. 固溶处理对Inconel 617合金棒材晶界组织的影响[J]. 材料工程，2026，54(4)：229-236.
LU Jun，YANG Chunlei，SHEN Haijun，et al. Effect of solution treatment on grain boundary structure of Inconel 617 alloy bar [J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(4)：229-236.

固溶处理对Inconel 617合金棒材晶界组织的影响

卢　俊[1]，杨春雷[1*]，沈海军[1,2]，王资兴[1,2]
（1 苏州集萃高合材料科技有限公司，江苏 苏州 215558；
2 江苏省产业技术研究院 先进金属材料及应用技术研究所，江苏 苏州 215506）

摘要：利用电子背散射衍射技术研究了Inconel 617合金热轧棒在冷拉和固溶处理过程中的晶界组织变化。结果表明：热轧棒组织中含有大量的CSL晶界，主要以$\Sigma 3$晶界为主。经过冷拉变形后CSL晶界含量降低，小角度晶界含量急剧增加。1120 ℃固溶处理后，小角度晶界基本被大角度晶界和CSL晶界取代。随着固溶温度的升高，$\Sigma 3$晶界含量增加，$\Sigma 9$和$\Sigma 27$晶界含量降低。在一定晶粒尺寸范围内，$\Sigma 3$晶界含量随晶粒尺寸的增大而增加。固溶处理过程中出现了“团簇”状和“孤岛”状退火孪晶界，且相邻晶粒之间具有$\Sigma 3^n$的位向关系。

关键词：Inconel 617合金；冷拉；固溶处理；CSL晶界；退火孪晶界
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000121　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000121
中图分类号：TG156.21；TG356.3^{+}1　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)04-0229-08

Effect of solution treatment on grain boundary structure of Inconel 617 alloy bar

LU Jun[1]，YANG Chunlei[1*]，SHEN Haijun[1,2]，WANG Zixing[1,2]
（1 Suzhou Jicui Gaohe Material Technology Co.，Ltd.，Suzhou 215558，Jiangsu，China；2 Institute of Novel Metals and Applied Technologies，Jiangsu Industrial Technology Research Institute，Suzhou 215506，Jiangsu，China）

Abstract：The grain-boundary microstructure of Inconel 617 alloy hot-rolled rods during cold drawing and subsequent solution treatment is investigated using the electron backscattering diffraction (EBSD) technique. The results reveal that the microstructure of the hot-rolled rods contains a substantial number of coincidence site lattice (CSL) grain boundaries, predominantly $\Sigma 3$ grain boundaries. Following cold drawing, the proportion of CSL grain boundaries decreases significantly, while the proportion of low-angle grain boundaries experiences a sharp increase. After solution treatment at 1120 ℃, low-angle grain boundaries are almost entirely replaced by high-angle and CSL grain boundaries. As the solution temperature rises, the proportion of $\Sigma 3$ grain boundaries increases, whereas the proportions of $\Sigma 9$ and $\Sigma 27$ grain boundaries decline. Within a specific grain-size range, the proportion of $\Sigma 3$ grain boundaries rises with an increase in grain size. During the solution treatment process, annealing twin boundaries with “cluster” and “island” morphologies emerge, and there exists a $\Sigma 3^n$ orientation relationship between adjacent grains.

Key words：Inconel 617 alloy; cold drawing; solution treatment; CSL grain boundary; annealing twin boundary

Inconel 617合金作为第四代核能系统关键热端构件的优选材料，是一种采用固溶强化及碳化物强化机理设计的镍基高温合金。该合金组织中的碳化物主要是M_6C和$M_{23}C_6$，$M_{23}C_6$在1190 ℃时全部回溶到基体，M_6C型碳化物在固溶温度高于1190 ℃时，才开始逐渐回溶到基体。该合金在700～750 ℃条件下具有卓越的高温力学稳定性、优异的抗氧化特性以及持久耐热腐蚀能力。目前不仅在航空航天推进系统、石油

化工高温反应装置等工业场景实现规模化应用，而且被国际核能界列为第四代核反应堆蒸汽发生器、中间换热器等核心部件的重点候选材料[1-3]。

晶界作为晶体结构相同，但晶格取向各异的晶粒间界面，其微观特征对材料的物理化学性能具有显著调控作用。通过系统调控晶界的微观结构、化学特性与空间分布特征，可定向优化材料的宏观力学性能（如强度、韧度及抗疲劳特性），从而为高性能材料设计提供关键调控路径。Watanabe[4]在 1984 年基于形变热处理工艺提出的“晶界设计”理念以实现合金耐蚀性优化，后面逐步发展为现代晶界工程（grain boundary engineering，GBE）。其核心机制在于利用退火孪晶界（$\Sigma3$）的界面反应动力学，通过 $\Sigma3^n$ 与 $\Sigma3^{n+1}$ 的迭代重组（反应式：$\Sigma3+\Sigma3^n\rightarrow\Sigma3^{n+1}$，$\Sigma3^n+\Sigma3^{n+1}\rightarrow\Sigma3$），定向构筑高比例低 Σ 值晶界（$\Sigma<29$），为开发耐蚀合金提供材料基因组层面的解决方案[5-6]。GBE 技术能够打断普通晶界的连续性，优化晶界分布，从而改善材料与晶界有关的多种性能，如抗腐蚀、抗晶界退化以及力学性能等。Pande 等[7]揭示了退火孪晶界在室温条件下诱导的晶粒细化效应，通过孪晶界面分割母晶粒形成亚结构，有效晶粒尺寸的减小显著提升了合金的室温屈服强度，为晶界工程调控金属材料强度提供了关键实验支撑。研究者们发现，纳米金属铜中的退火孪晶界作为强化相界，通过晶界钉扎效应可以提高铜的室温强度，而孪晶界面的共格特性维持了位错滑移通道，使其伸长率也保持在较高的水平[8-10]。Boehlert 等[11]在 In 718 合金中基于形变热处理调控工艺获得不同含量的退火孪晶界，研究表明，In 718 合金中退火孪晶界密度与力学性能呈正相关，能同时提高该合金的室温性能和高温性能。

Inconel 617 合金冷拉棒是加工核反应堆用螺栓等紧固件的重要材料，与常用的热轧棒材和锻制棒材相比，冷拉棒的表面粗糙小，尺寸精度高等。目前大量的研究集中在 Inconel 617 镍基高温合金热变形过程中的力学行为和再结晶机制等方面[12-13]，对于冷变形及后续热处理过程中晶界演变的研究较少。刘昱君等[14]研究发现 Inconel 617 合金管随着固溶温度的升高，晶粒的平均尺寸增大，并且晶粒内部出现较多的孪晶。Bhuyan 等[15]研究发现低 ΣCSL 晶界在抗晶间腐蚀、抑制沿晶裂纹萌生与扩展等方面均表现出优于随机晶界的特性。夏爽等[16]通过研究 Inconel 690 合金晶界特征分布及其对晶界腐蚀的影响，发现低 ΣCSL 晶界比例高的样品比低 ΣCSL 晶界比例低的样品明显耐晶间腐蚀。材料的组织决定性能，而组织的演变又与晶界密切相关，因此研究 Inconel 617 合金在固溶及冷变形过程中的晶界组织演变具有重要的理论意义。

1 实验材料与方法

实验用 Inconel 617 合金棒材的主要化学成分见表 1。首先，将 Φ14 mm 热轧棒材通过双链式拉拔机冷拉至 Φ12.5 mm，冷拉变形量约为 20%，然后将冷拉后的棒材进行固溶处理，固溶工艺分别为 1120 ℃/20 min、1150 ℃/20 min 和 1160 ℃/20 min，空冷。将冷拉前、冷拉后以及固溶处理后的棒材沿径向剖开，随后对样品纵截面进行机械研磨抛光，最后高氯酸酒精溶液进行电解抛光，高氯酸和酒精的体积比为 1∶9，抛光电压 20 V，抛光时间 10～15 s。抛光完成后用装配有电子背散射衍射（electron backscatter diffraction，EBSD）系统的 Gemini500 型场发射扫描电镜（SEM），分析该合金在冷拉和固溶过程中的晶界组织演变规律。在 EBSD 测试中，样品需以 70°倾角放置在专用样品台上，加速电压设置为 20 kV，工作距离约为 15 mm。扫描步长根据晶粒尺寸动态调整，通常设置为平均晶粒尺寸的 1/10～1/5。

表 1 Inconel 617 合金的主要化学成分（质量分数/%）

Table 1 Main chemical composition of the Inconel 617 alloy (mass fraction/%)

C	Cr	Mo	Co	Al	Ti	Si	Fe	Mn	Ni
0.10	22.04	8.94	12.53	1.08	0.42	0.056	0.22	0.014	Bal.

2 结果与分析

2.1 热轧态和冷拉态棒材不同位置的晶界组织

图 1 为热轧态和冷拉态棒材不同位置的低 Σ 重位点阵（coincidence site lattice，低 ΣCSL，$<\Sigma29$）晶界分布图，图中红色线条代表 $\Sigma3$ 晶界、绿色线条代表 $\Sigma9$ 晶界、蓝色线条代表 $\Sigma27$ 晶界、图中灰色线条代表小角度晶界（通常指 2°～15°）。由图 1 可知热轧态棒材不同位置的组织都是均匀细小的等轴晶，经统计得到边部、0.5R 和中心的平均晶粒尺寸分别为 8.6、9.7 μm 和 10.4 μm，对于该晶粒尺寸的差异因为在热轧过程中轧棒表面与轧辊接触，温降从表面至中心逐渐减小，所以平均晶粒尺寸从表面至中心逐渐增大。由图 1(a-1)～(c-1)可知，热轧态棒材中含有大量的 $\Sigma3$ 晶界，$\Sigma9$ 晶界含量相对较少，而 $\Sigma27$ 晶界的含量非常低。

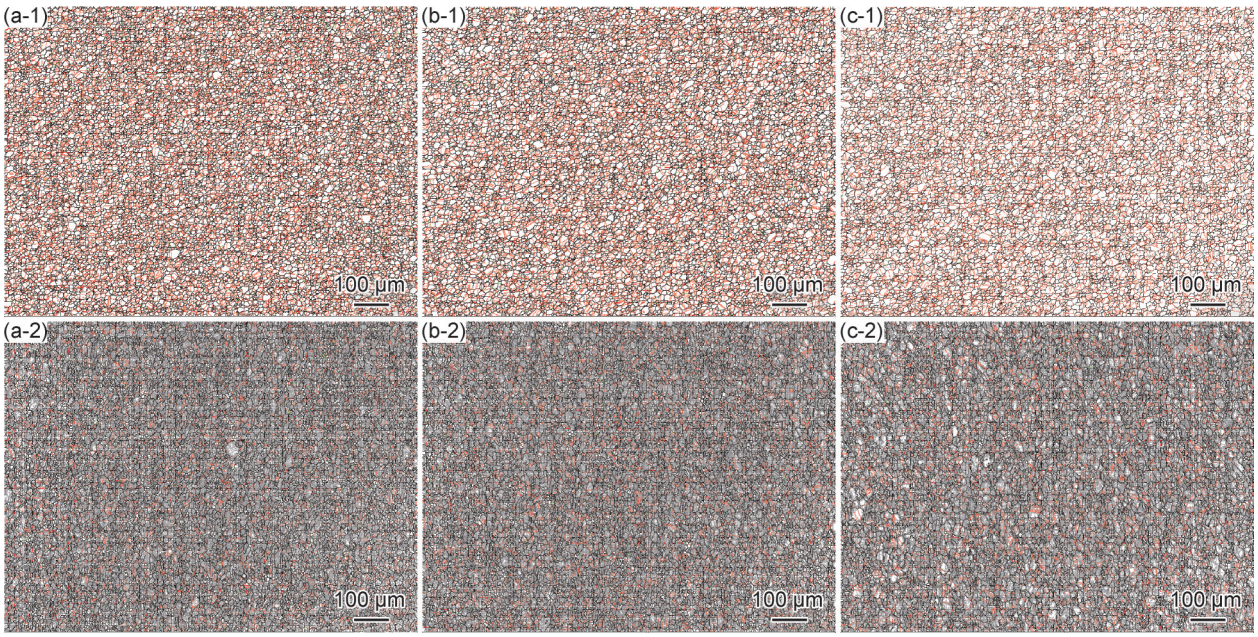


图 1　热轧态(1)和冷拉态(2)棒材不同位置的 CSL 图

(a)边缘;(b)0.5R;(c)中心

Fig. 1　CSL diagram of hot-rolled(1) and cold-drawn(2) bars at different positions

(a)edge;(b)0.5R;(c)center

图 2 为热轧态和冷拉态棒材不同位置,CSL 晶界的含量及大小角度晶界含量。经过图 2(a-1)统计得到热轧态 Σ3 晶界含量从边部到中心逐渐增加,分别为 34.83%、36.67% 和 39.83%,而 Σ9 晶界含量与之相反,分别为 1.89%、1.71% 和 1.54%,Σ27 晶界的含量基本保持在 0.34% 左右。在热轧变形过程中的低 Σ 重位点阵具有 Σ3 晶界的特征,说明 Σ3、Σ9 和 Σ27 晶界之间相互作用的发生具有偶然性,与其他牌号的镍基合金相似[17]。

经过冷拉变形后,CSL 晶界的含量急剧减少,由图 2(b-1)可知,冷拉态 Σ3 晶界含量从边缘部到中心逐渐增加,分别为 5.04%、5.54% 和 5.99%,而不同位置的 Σ9 晶界含量基本一致,保持在 0.18% 左右,Σ27 晶界的含量保持在 0.06% 左右,与轧态相比均大量减少。由图 2(a-2),(b-2)可知,热轧态棒材不同位置主要以大角度晶界为主,达到了 95% 以上,经过冷拉变形后小角度晶界急剧增加,大角度晶界减少。

小角度晶界基本上都是由位错构成,如刃型位错和螺型位错。在冷拉变形过程中,位向最有利的晶粒最先开始发生塑性变形,此时该晶粒滑移面上的位错源开动,不断沿着滑移面进行运动,但由于周围的晶粒位向不同,滑移系也不同,因此运动的位错并不能越过晶界发展到另一个晶粒中,位错在运动过程中遭遇晶界阻碍,从而在晶界前沿聚集,形成平面塞积群,所以经过冷拉变形后组织中会形成大量的小角度晶界。从图中还可以看出,边部的变形最大,因此,小角度晶界最多,从边部到中心变形量逐渐减小,小角度晶界也逐渐减少。

2.2　冷拉态棒材经固溶处理后不同位置的晶界组织分布特征

图 3 为冷拉态棒材经不同温度固溶处理后不同位置的 CSL 晶界分布图(红色线条代表 Σ3 晶界、绿色线条代表 Σ9 晶界、蓝色线条代表 Σ27 晶界),固溶温度分别为 1120、1150 ℃和 1160 ℃,保温时间均为 20 min。由图 3(a-1)～(a-3)可知,经过 1120 ℃固溶处理后冷拉组织中的小角度晶界基本被大角度晶界和 CSL 晶界取代,说明在该温度固溶处理时完成了再结晶,再结晶后的晶粒大小与热轧态基本一致。随着固溶温度升高,晶粒逐渐发生粗化现象,当固溶温度为 1150 ℃时,组织中出现了晶粒的异常长大,即二次再结晶。固溶温度升高到 1160 ℃,边部的晶粒均匀长大,0.5R 和中心出现了双重晶粒,且中心的晶粒级差最大。

再结晶可理解为冷变形金属在热作用下经历的一种组织重构过程,其核心机制是小角度晶界逐渐演化为大角度晶界,并通过晶界迁移消除变形过程中形成的缺陷结构。檀校等[18]研究表明,再结晶过程是通过新的大角度晶界的形成和迁移进行的,储存能的降低提供了再结晶的驱动力。

图 4 为冷拉态棒材经不同温度固溶处理后不同位置的 CSL 晶界含量。与冷拉态相比,经过 1120 ℃处理

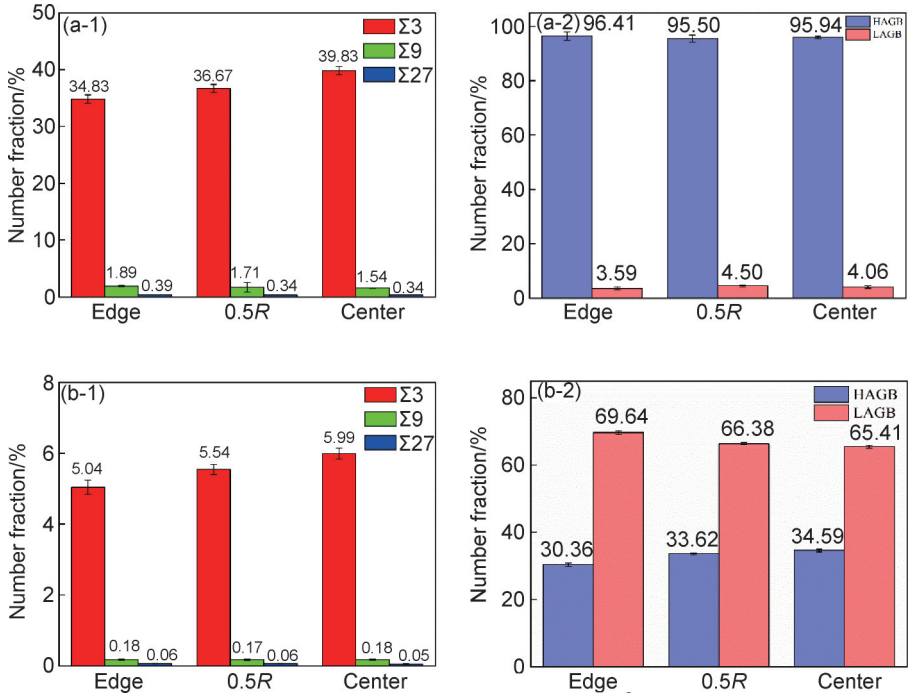


图2 不同位置CSL晶界含量(1)及大小角度晶界含量(2)

(a)热轧棒;(b)冷拉棒

Fig.2 Grain boundary content(1) and misorientation angle grain boundary content(2) at different locations

(a)hot-rolled bars;(b)cold-drawn bars

后,组织中的CSL晶界含量大量增加,且从边部到中心逐渐增加。随着固溶温度的升高,Σ3晶界含量增加,而Σ9和Σ27晶界含量降低,说明在固溶过程中发生了$\Sigma3^n+\Sigma3^{n+1}=\Sigma3$的界面反应。由图4(b)发现,当固溶温度为1150 ℃时,Σ3晶界含量从边部到中心出现了先减少再增加的现象,结合图3(b-1)~(b-3)可知,Σ3晶界含量与晶粒大小密切相关,经过统计得到边缘、0.5R和中心的平均晶粒尺寸分别为12.3、12.4 μm和14.3 μm。由于中心的平均晶粒尺寸最大,因此Σ3晶界含量最高,边部和0.5R的平均晶粒尺寸虽然相差不大,但由于边部出现了较多的异常长大的晶粒,所以Σ3晶界含量比0.5R位置的高。固溶温度为1160 ℃时,Σ3晶界含量继续增加,而Σ9和Σ27晶界含量则继续降低,说明$\Sigma3^n+\Sigma3^{n+1}=\Sigma3$的界面反应在继续进行。由图4(c)发现,1160 ℃固溶时,Σ3晶界含量从边部到中心逐渐降低,结合图3(c-1)~(c-3)进一步证明了Σ3晶界含量与晶粒大小有关。

根据Frank标准极图分析,退火孪晶与母体晶粒间呈现典型的〈111〉/60°取向差,这种关系符合Σ3重位点阵的晶体学特征,这种特殊取向关系源于面心立方结构中{111}密排面的镜面对称操作。Grube等[19]研究指出,退火孪晶界的形核机制与晶粒粗化过程密切相关,其典型特征表现为在三叉晶界交汇区域,通过能量驱动的晶界迁移作用形成孪晶界面结构。Randle等[20]针对金属镍的晶体学研究表明,其退火孪晶界表现出独特的迁移动力学特性。作为典型的Σ3晶界结构,这类孪晶界的迁移具有自主性,其动力学过程独立于常规晶界迁移机制。晶粒长大的本质是通过减小体系内界面总面积以降低系统自由能、提升热力学稳定性的自组织过程,其热力学驱动力来源于总界面能的降低。图5为固溶过程中晶粒长大的示意图。在固溶过程中,由于孪晶界的界面能显著低于常规高角度晶界,在热力学驱动力主导下,高角度晶界A、B倾向于沿曲率驱动力方向(即向曲率中心迁移,对应绿色箭头方向)发生择优迁移。而低能孪晶界因迁移势垒较高,表现出相对稳定性,最终导致高能晶界主导的晶粒粗化。在晶界A、B的曲率驱动迁移过程中,其邻近的孪晶界T1和T2因几何约束效应逐渐收缩,而位于晶粒合并前缘的孪晶界T3和T4则通过界面重组机制延伸扩展,此消彼长的动态演化最终有可能导致孪晶界T1和T2的湮灭。在晶界A、B的迁移过程中,受剪切应力场作用,晶界前沿发生局部原子堆垛次序的剪切失配,形成面缺陷型层错。随着晶界持续迁移,层错区域通过位错分解机制沿{111}滑移系扩展,最终形成具有镜面对称性的共格孪晶界T5和T6。

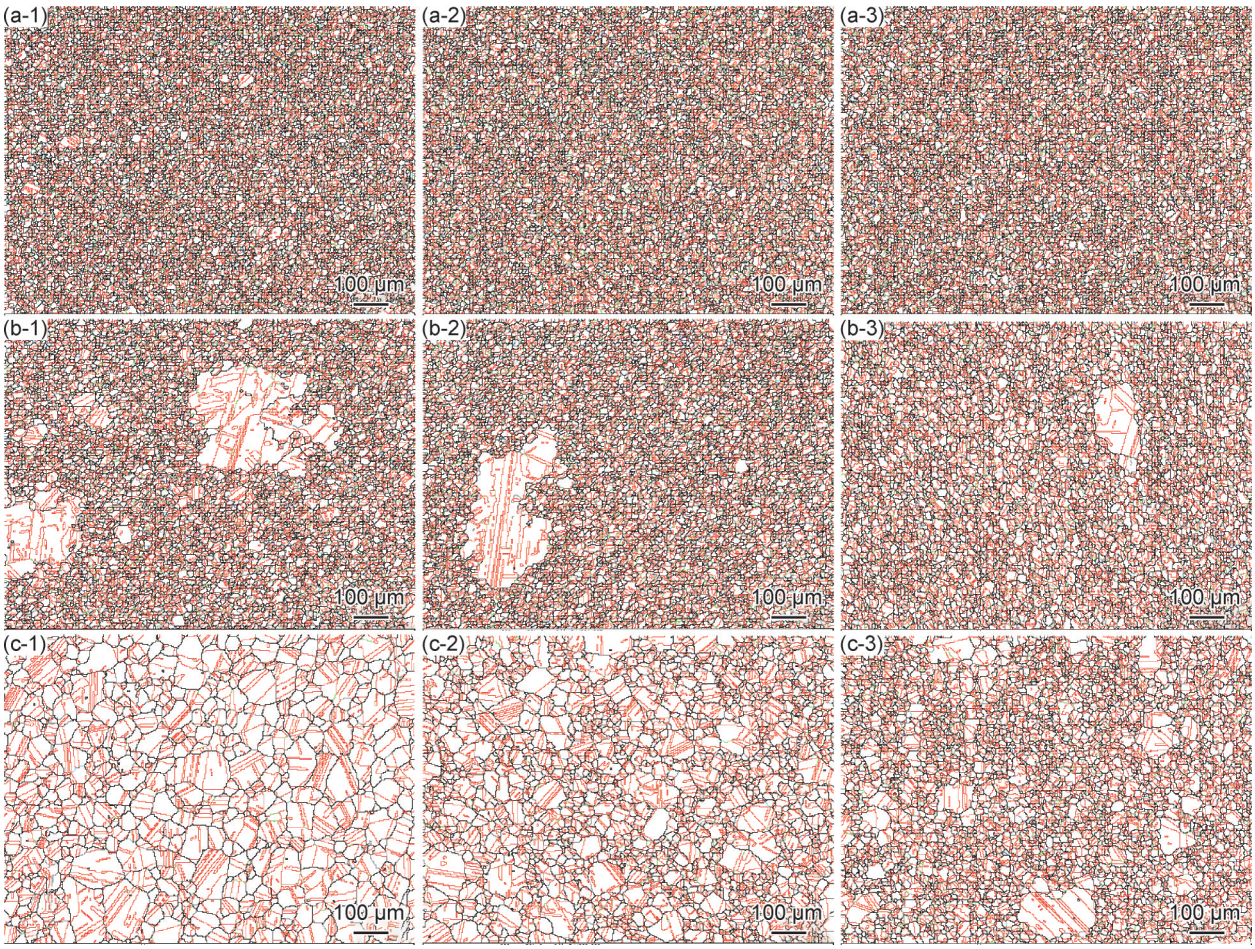


图 3　冷拉态棒材经不同温度固溶处理后不同位置的 CSL 图

(a)1120 ℃;(b)1150 ℃;(c)1160 ℃;(1)边缘;(2)0.5*R*;(3)中心

Fig.3　CSL diagram of cold-drawn bar at different positions after different solution treatment processes

(a)1120 ℃;(b)1150 ℃;(c)1160 ℃;(1)edge;(2)0.5*R*;(3)center

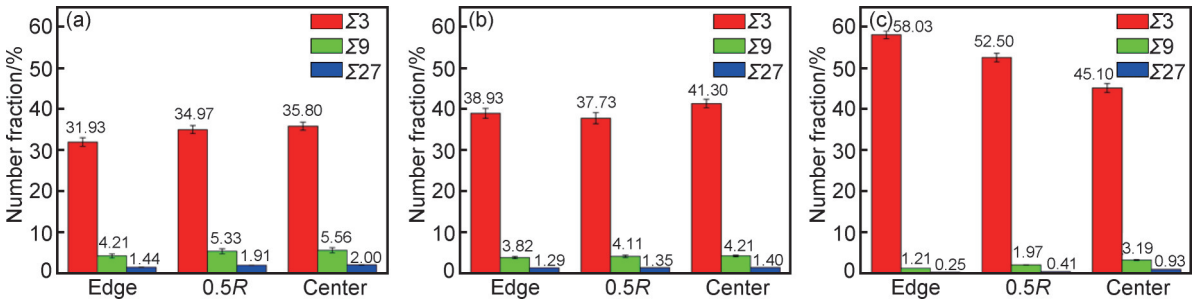


图 4　冷拉态棒材经不同温度固溶处理后不同位置的 CSL 晶界含量

(a)1120 ℃;(b)1150 ℃;(c)1160 ℃

Fig. 4　Content of CSL grain boundaries of cold-drawn bar at different positions after different solution treatment processes

(a)1120 ℃;(b)1150 ℃;(c)1160 ℃

退火孪晶作为面心立方金属中具有 Σ3 重位点阵特征的典型界面结构,其形成密度与材料层错能呈负相关。在低层错能体系中,基于不全位错滑移的孪生机制与再结晶过程中晶界迁移的协同作用,促使退火孪晶得以大量形成并稳定存在,其本质上属于亚结构的一种,会影响材料的组织和性能。由于镍基高温合金的层错能较低,再结晶过程中会产生大量层错,导致合金的固溶组织中形成退火孪晶[21]。有研究[22]发现 GH4080A 合金经过不同温度固溶处理后也会产生大量的退火孪晶。

2.3　固溶处理过程中的团簇状退火孪晶界

退火孪晶界的形成机制之一是再结晶过程中发生的“生长事故”[23]。在这个过程中,由于某些意外的原因,造成在迁移的晶界某些位置上堆垛次序错误累

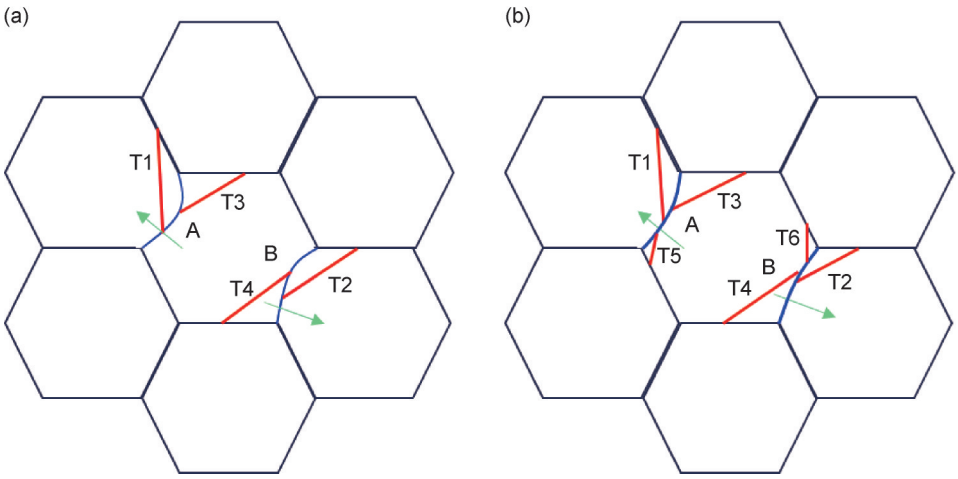


图5 晶粒长大和孪晶变化示意图

(a)长大前;(b)长大后(红线和黑线分别代表孪晶界和普通晶界,绿色箭头代表晶界迁移方向)

Fig.5 Schematic diagram of grain growth and twinning changes

(a)before growth;(b)after growth (the red line and the black line respectively represent the twinning boundary and the common grain boundary,and the green arrow indicates the direction of grain boundary migration)

积,使该晶界被分解成孪晶界。按照该理论可知,面心立方金属中的退火孪晶通常呈现$\Sigma3\{111\}$共格界面主导的平直或平行对生特征,然而该合金在1150 ℃固溶过程中形成了具有多重拓扑形貌特征的“团簇”状孪晶网络。图6是图3(b-1)的局部放大图,由图可知,经过固溶处理后,大部分的退火孪晶界是直线或直线对状,如图6中黑色箭头所示,但还有一小部分“团簇”状和“孤岛”状孪晶界,如图6中黑色圆圈所示。

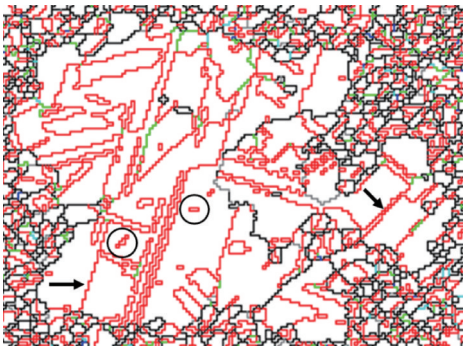


图6 固溶处理后退火孪晶界的形态与分布

Fig.6 Morphology and distribution of annealing twin boundary after solution treatment

对于该“团簇”状和“孤岛”状退火孪晶界的形成,有学者认为[5]低层错能面心立方结构的金属再结晶完成后,在共享$\Sigma3$取向关系的相邻晶粒体系中,当两个晶粒均含有高迁移率的$\Sigma3$共格孪晶界时,其晶粒粗化过程中的交互作用将触发晶界反应机制。依据重位点阵理论,两个$\Sigma3$晶界的拓扑重构形成具有$\Sigma3$-$\Sigma3$-$\Sigma9$特征的三叉晶界构型,该过程受界面能各向异性与几何必要位错密度梯度的双重调控。基于晶界反应动力学理论,高迁移率的$\Sigma9$晶界在扩展过程中与相邻$\Sigma3$共格孪晶界相遇时,会触发符合Brandon准则的界面拓扑重构机制,形成另一个$\Sigma3$-$\Sigma3$-$\Sigma9$三岔界面。该三岔界面中有一个$\Sigma3$界面为非共格界面,在迁移过程中与$\Sigma9$界面相遇时生成新的$\Sigma3$界面,即$\Sigma3+\Sigma3^n=\Sigma3^{n+1}$,$\Sigma3^n+\Sigma3^{n+1}=\Sigma3$晶界反应。

图7为1150 ℃固溶处理后,边部位置的晶粒取向分布图、晶界特征分布图以及图7(b)中黑色方框区域内不同类型晶界图。由图可知,晶粒团簇内有许多$\Sigma3^n$晶界,构成$\Sigma3$-$\Sigma3$-$\Sigma9$或$\Sigma3$-$\Sigma9$-$\Sigma27$晶界。表2为

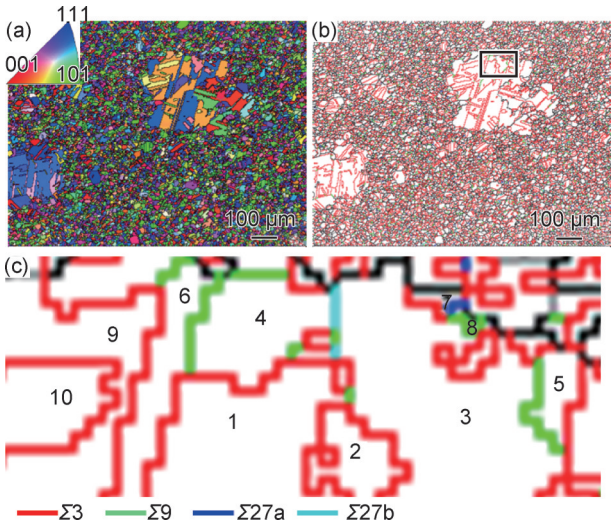


图7 晶粒取向分布图(a)、晶界特征分布图(b)及晶粒团簇不同类型晶界图(c)

Fig.7 Distribution of grain orientation(a),grain boundary characteristics(b),and grain boundary of different types of grain clusters(c)

经过统计图 7(c)得到的相邻晶粒之间的位向关系。由表 2 可知,在同一个晶粒团簇内,相邻晶粒之间均具有 $\Sigma 3^n$ 的位向关系,并且主要以 $\Sigma 3$ 晶界为主。Inconel 617 合金是中低层错能面心立方镍基高温合金,在固溶处理时会产生大角度晶界的新晶粒,在这个过程中易形成退火孪晶界($\Sigma 3$ 晶界),并且不同类型的晶界在迁移过程中也会发生交互作用,形成新的 $\Sigma 3$ 晶界。

表 2　晶粒团簇内相邻晶粒的位向关系

Table 2　Orientation relationship of adjacent grains in grain clusters

Grain number	Axis-angle pair	CSL type	Angle deviation	Grain number	Axis-angle pair	CSL type	Angle deviation
1/2	59.82°/[$\bar{1}1\bar{1}$]	$\Sigma 3$	0.41°	3/7	59.80°/[$1\bar{1}1$]	$\Sigma 3$	0.28°
1/4	59.88°/[$1\bar{1}1$]	$\Sigma 3$	0.39°	3/8	38.59°/[110]	$\Sigma 9$	0.88°
1/6	59.97°/[$\bar{1}\bar{1}1$]	$\Sigma 3$	0.42°	4/6	38.97°/[101]	$\Sigma 9$	0.24°
2/3	59.95°/[111]	$\Sigma 3$	0.30°	6/9	59.96°/[$1\bar{1}1$]	$\Sigma 3$	0.21°
3/4	35.11°/[210]	$\Sigma 27b$	0.68°	7/8	32.13°/[$\bar{1}\bar{1}0$]	$\Sigma 27a$	0.85°
3/5	39.02°/[$1\bar{1}0$]	$\Sigma 9$	0.11°	9/10	59.37°/[$1\bar{1}1$]	$\Sigma 3$	0.56°

2.4　固溶处理过程中退火孪晶界的演变

图 8 为经过 1150 ℃固溶处理后边部的 IPF 图以及红色方框内选区的极图和反极图,在低层错能镍基高温合金体系中,退火孪晶界严格遵循 $\Sigma 3$ 重位点阵(CSL)的晶体学规律,其几何构型可通过 Brandon 判据精确定义为〈111〉/60°轴角对体系。此外,共格孪晶界与理论的 $\Sigma 3$ 晶界(〈111〉/60°)取向差角的畸变通常小于 1.7°[24],而非共格 $\Sigma 3$ 晶界会有更大的取向差角的畸变。图中选区内的两个晶粒的取向分别为 1[$1\bar{2}1$]//DD 和 2[$\bar{6}5\bar{2}$]//DD,DD 代表冷拉拔方向,两个晶粒以[$\bar{1}\bar{1}1$]晶向为轴,通过旋转 59.96°后两者可以重合,与轴角对〈111〉/60°的取向差角的畸变为 0.04°,满足 Brandon 标准[25],说明该孪晶界是共格孪晶界。共格孪晶界作为一种无结构畸变的孪晶界类型,其界面能显著低于常规晶界,仅为普通晶界能的 1/10。这种低能态特性使其具备优异的稳定性,因而成为材料中普遍存在的孪晶界形式。

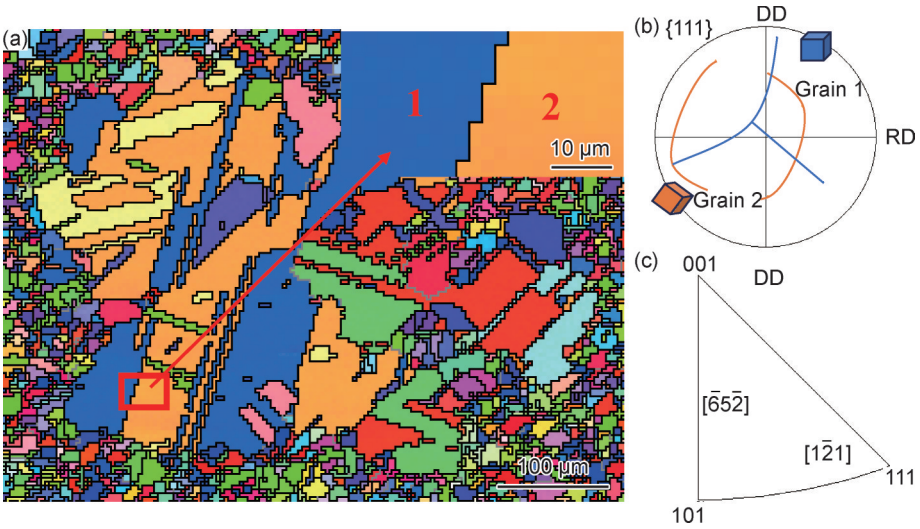


图 8　1150 ℃固溶处理后的 IPF 图以及选区的晶粒在极图和反极图中的取向信息分布图

(a)IPF 图及选区;(b)晶粒 1 和 2 在极图中的取向分布图;(c) 晶粒 1 和 2 在反极图中的取向分布图

Fig.8　IPF map after solution treatment at 1150 ℃ and orientation information distribution map of the selected grains in the electrode map and inverse electrode map

(a)IPF map and selection area; (b)orientation distribution map of grain 1 and 2 in the polar diagram; (c)orientation distribution map of grain 1 and 2 in the reverse polarity diagram

3　结论

(1)热轧态棒材中含有大量的 CSL 晶界,其中 $\Sigma 3$ 晶界含量最多,且从边部到中心含量逐渐增加,$\Sigma 9$ 含量次之,$\Sigma 27$ 含量最低。经过冷拉变形后,CSL 晶界含量急剧减少,而小角度晶界大量增加。

(2)冷拉棒经过1120 ℃固溶处理后,小角度晶界含量减少,大角度和CSL晶界含量增加。随着固溶温度的升高 ,Σ3晶界含量增加,而Σ9和Σ27晶界含量降低,说明发生了$\Sigma3^n+\Sigma3^{n+1}=\Sigma3$的界面反应。Σ3晶界含量与晶粒大小有关,在一定范围内,Σ3晶界含量随晶粒尺寸的增大而增加。

(3)固溶处理过程中出现了“团簇”状和“孤岛”状退火孪晶界,在同一个晶粒团簇内,相邻晶粒之间均具有$\Sigma3^n$的位向关系,主要以Σ3晶界为主。

参考文献

[1] YANG S, XUE L, LU W, et al. Experimental study on the mechanical strength and dynamic strain aging of Inconel 617 using small punch test[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 815: 152447.

[2] GRIERSON D S, CAO G, BROOKS P, et al. Creep crack growth behavior of alloys 617 and 800H in air and impure helium environments at high temperatures[J]. Metallurgical and Materials Transactions E, 2017, 4(1): 13-21.

[3] KIM W G, PARK J Y, EKAPUTRA I M W, et al. Analysis of creep behavior of alloy 617 for use of VHTR system[J]. Procedia Materials Science, 2014, 3: 1285-1290.

[4] WATANABE T. An approach to grain boundary design for strong and ductile polycrystals[J]. Res Mechanica, 1984, 11(3):47-84.

[5] RANDLE V. Mechanism of twinning-induced grain boundary engineering in low stacking-fault energy materials[J]. Acta Materialia, 1999, 47(15/16): 4187-4196.

[6] RANDLE V, OWEN G. Mechanisms of grain boundary engineering[J]. Acta Materialia, 2006, 54(7): 1777-1783.

[7] PANDE C S, RATH B B, IMAM M A. Effect of annealing twins on Hall-Petch relation in polycrystalline materials[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 367(1/2): 171-175.

[8] LU K, LU L, SURESH S. Strengthening materials by engineering coherent internal boundaries at the nanoscale[J]. Science, 2009, 324(5925): 349-352.

[9] SHEN Y F, LU L, LU Q H, et al. Tensile properties of copper with nano-scale twins[J]. Scripta Materialia, 2005, 52(10): 989-994.

[10] LU L, SHEN Y, CHEN X, et al. Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper[J]. Science, 2004, 304(5669): 422-426.

[11] BOEHLERT C J, DICKMANN D S, EISINGER N N C. The effect of sheet processing on the microstructure, tensile, and creep behavior of Inconel alloy 718[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(1): 27-40.

[12] JIA Z, YU L D, WEI B L, et al. High-temperature thermal deformation behavior and microstructural evolution of Inconel 617 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(2): 461-468.

[13] 罗 锐, 崔树刚, 陈乐利, 等. 核电用高温合金 Inconel 617B 高温变形本构模型[J]. 机械工程学报, 2021, 57(22): 218-225.
LUO R, CUI S G, CHEN L L, et al. High temperature deformation constitutive model of superalloy Inconel 617B for nuclear power[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(22): 218-225.

[14] 刘昱君, 程晓农, 罗锐, 等. 热处理工艺对Inconel 617合金管组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(2): 173-177.
LIU Y J, CHENG X N, LUO R, et al. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of Inconel 617 alloy tube [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(2): 173-177.

[15] BHUYAN P, PALIWAL M, SARMA V S, et al. Precipitate evolution during aging and its individual role on high-temperature hot corrosion response in alloy 617[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 871: 159499.

[16] 夏爽, 周邦新, 陈文觉, 等. 形变及热处理对690合金晶界特征分布的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(6): 999-1003.
XIA S, ZHOU B X, CHEN W J, et al. Effect of deformation and heat treatment on grain boundary characteristic distribution of 690 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(6): 999-1003.

[17] JIANG H, DONG J, ZHANG M, et al. Evolution of twins and substructures during low strain rate hot deformation and contribution to dynamic recrystallization in alloy 617B[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 649: 369-381.

[18] 檀 校, 郝玉朋, 于晓东, 等. 退火温度对冷轧气相沉积高纯钨再结晶行为的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(3):33-38.
TAN X, HAO Y P, YU X D, et al. Effect of annealing temperature on recrystallization behaviors of cold-rolled high-purity CVD tungsten[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(3):33-38.

[19] GRUBE W L, ROUZE S R. The origin, growth and annihilation of annealing twins in austenite[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1963, 2(1): 31-52.

[20] RANDLE V, RIOS P R, HU Y. Grain growth and twinning in nickel[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(2): 130-133.

[21] 王蓬书,李琴敏,韦贤毅,等. 固溶对GH4169合金晶粒尺寸与力学性能的影响[J]. 热加工工艺,2018,47(4):245-249.
WANG P S, LI Q M, WEI X Y, et al. Effect of solid solution on grain size and mechanical properties of GH4169 alloy [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(4): 245-249.

[22] 连轶博, 杨春雷, 王国栋, 等. 固溶处理对GH4080A高温合金微观组织的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(4): 46-52.
LIAN Y B, YANG C L, WANG G D, et al. Effect of solution treatment on microstructure of GH4080A superalloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(4): 46-52.

[23] MAHAJAN S, PANDE C S, IMAM M A, et al. Formation of annealing twins in f.c.c. crystals[J]. Acta Materialia, 1997, 45(6): 2633-2638.

[24] MANDAL S, BHADURI A K, SUBRAMANYA S V. Role of twinning on dynamic recrystallization and microstructure during moderate to high strain rate hot deformation of a Ti-modified austenitic stainless steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(6): 2056-2068.

[25] RANDLE V. The role of the conincidence site lattice in grain boundary engineering[M]. UK: Cambridge University Press , 1996.

收稿日期:2025-03-04;**录用日期**:2025-05-09

通讯作者:杨春雷(1991—),男,工程师,硕士,研究方向为变形高温合金及特殊钢,联系地址:江苏省苏州市常熟金门路2号集萃金属研发厂房(215558),E-mail:1096879368@qq.com

(本文责编:张宝玲)