

固溶处理对热轧 Inconel 601 合金组织与力学性能的影响

李吉东^{1,2} 王岩^{1,2} 谷宇^{1,2} 王斌^{1,2}

(1 太原钢铁(集团)有限公司先进不锈钢材料国家重点实验室,太原 030003;

2 山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心,太原 030003)

摘要 通过光学显微镜、扫描电镜、万能拉伸试验机和硬度计等研究了 1 080 ~ 1 200 °C 固溶温度对热轧态 Inconel 601 合金微观组织和力学性能的影响。结果表明:热轧态合金基体为沿轧制方向拉长的奥氏体晶粒组织,同时弥散有少量氮化物,沿晶界有大量碳化物析出。随着固溶温度的升高,再结晶晶粒逐渐长大,碳化物缓慢溶解,强度及硬度逐渐降低;当固溶温度提高到 1 160 °C 时,晶粒尺寸均匀,碳化物基本全部溶解,合金的 HRB 硬度值由 84 降至 71,伸长率由 52% 提升至 70%。获得最佳力学性能的固溶工艺为 1 140 ~ 1 160 °C 保温 50 min。

关键词 Inconel 601 合金 固溶处理 微观组织 力学性能

Effect of Solution Treatment on Structure and Mechanical Properties of Hot Rolled Inconel 601 Alloy

Li Jidong^{1,2}, Wang Yan^{1,2}, Gu Yu^{1,2} and Wang Bin^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel Materials, Taiyuan Iron & Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003;

2 Technology Center, Shanxi Taiyuan Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract Effect of 1 080 ~ 1 200 °C solution temperature on structure and mechanical properties of hot rolled Inconel 601 alloy is studied by means of optical microscope, scanning electron microscopy, hardness tester and tensile tester. The results show that the structure of the hot rolled alloy matrix is elongated austenite grain structure with less dispersed nitride, but the massive carbide precipitated along austenite grain boundary. With the increasing solution temperature, the recrystallization grain size increases gradually, the carbide dissolves slowly, the strength and hardness decreases gradually. When the solution temperature is 1 160 °C, the crystal grain size is uniform, the carbide dissolves completely, the HRB hardness value of alloy decreases from 84 to 71, and the elongation increases from 52% to 70%. The best mechanical properties of alloy can be obtained by solid-solution treated process at 1 140 ~ 1 160 °C for 50 min.

Material Index Inconel 601 Alloy, Solution Treatment, Microstructure, Mechanical Property

Inconel 601 合金具有优异的高温抗氧化性能、较好的高温力学性能和耐腐蚀性能,并且易于成形、加工和焊接,主要用于加热设备、化学工业、环境污染控制、航空、航天以及动力工业中。该合金可制作成板、管、丝、带、棒、锻件等各种产品^[1-4]。

本文以热轧 Inconel 601 合金为研究对象,采用光学显微镜、扫描电镜研究不同固溶温度对合金的微观组织和第二相变化的影响,并通过拉伸试验和硬度试验研究不同温度固溶后该合金的力学性能。

1 试验材料与方法

Inconel 601 合金采用 6t 真空感应炉冶炼,铸锭尺寸为 $\Phi 470$ mm \times 4 100 mm,铸锭经保护气氛电渣重熔后开坯,然后热轧成 20 mm 厚板材,其化学成分如表 1 所示。

对热轧板进行固溶处理,固溶温度分别为 1 080、1 100、1 120、1 140、1 160、1 180、1 200 °C,保温

表 1 Inconel 601 合金化学成分/%

Table 1 Chemical composition of Inconel 601 alloy/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe	Cu	Al
0.033	0.20	0.93	0.005	0.001	22.36	60.53	14.51	0.01	1.43

50 min 然后水冷。热轧态及不同温度固溶后的试料制成金相试样后,用 FeCl₃ (5 g) + HCl (30 mL) + H₂O (50 mL) 配制的腐蚀液腐蚀,采用光学显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)表征材料的微观组织和第二相;采用洛氏硬度计和电子万能拉伸机测试其力学性能。

2 试验结果

2.1 热轧态 Inconel 601 合金微观组织

Inconel 601 合金热轧态的微观组织见图 1,从图 1 可以看到,热轧态基体组织为沿轧制方向拉长的奥氏体晶粒组织,同时弥散有少量氮化物,沿晶界有大量碳化物析出,经能谱分析析出的碳化物主要为 Cr₂₃C₆。

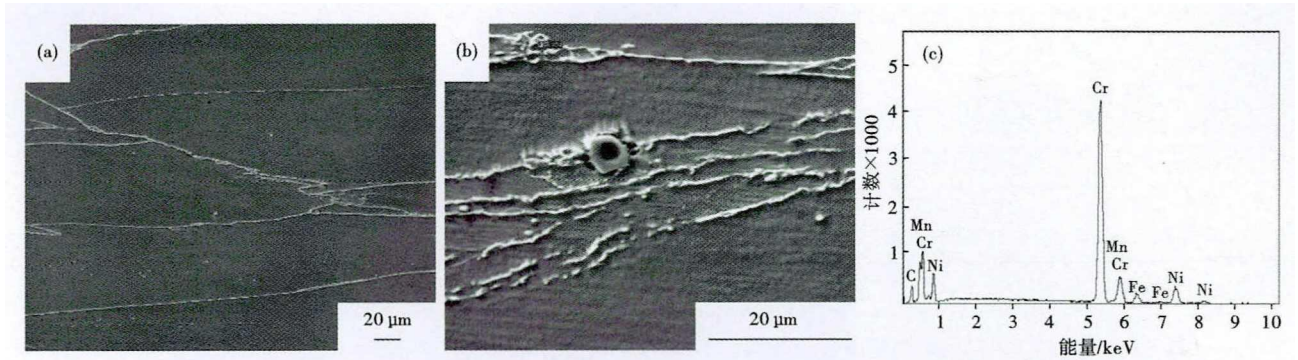


图 1 热轧态 Inconel 601 合金组织:(a)奥氏体;(b)析出碳化物;(c)能谱分析,SEM

Fig. 1 Microstructure of the hot rolled Inconel 601 alloy:(a) austenite;(b) precipitated carbide;(c) EDS analysis,SEM

2.2 固溶温度对合金微观组织的影响

热轧态 Inconel 合金固溶态金相组织照片如图 2 所示。固溶温度在 1 080 ~ 1 140 °C, 回复再结晶晶粒长大缓慢并且大小不均, 小晶粒尺寸约为 25 μm, 大晶粒尺寸约为 80 μm, 大晶粒中有少量孪晶。当固溶温度提高到 1 160 ~ 1 200 °C, 晶粒剧烈长大并且比较均匀, 尺寸由大约 150 μm 长大到 350 μm 左右, 晶粒内有大量孪晶。

从图 3 中可以看出, 随着固溶温度的升高, 碳化物逐渐溶解, 当固溶温度升高至 1 160 °C 时, 晶界上析出的碳化物几乎完全溶解, 如图 3(e) 所示, 没有了碳化物阻碍晶界的迁移, 晶粒急剧长大并且尺寸

均匀。可见, 当固溶温度在 1 160 °C 以下时, 碳化物溶解缓慢, 当固溶温度上升至 1 160 °C 时, 碳化物溶解速率增加, 合金中碳化物充分溶解。

2.3 固溶温度对合金力学性能的影响

由图 4 可以看出, 随着固溶温度的提高, 合金强度、硬度随之降低, 伸长率随之升高。在 1 080 ~ 1200°C 固溶区间, 屈服强度由 280 MPa 降低到 210 MPa; 抗拉强度由 690 MPa 降低到 570 MPa。伸长率随固溶温度升高由 52% 提升到达 70%, 1140 °C 和 1 160 °C 时伸长率提升幅度较大, 并且在 1 160 °C 时出现了峰值。随固溶温度升高 HRB 硬度值由 84 降低到 71, 在 1 140 °C 和 1 160 °C 时降低幅

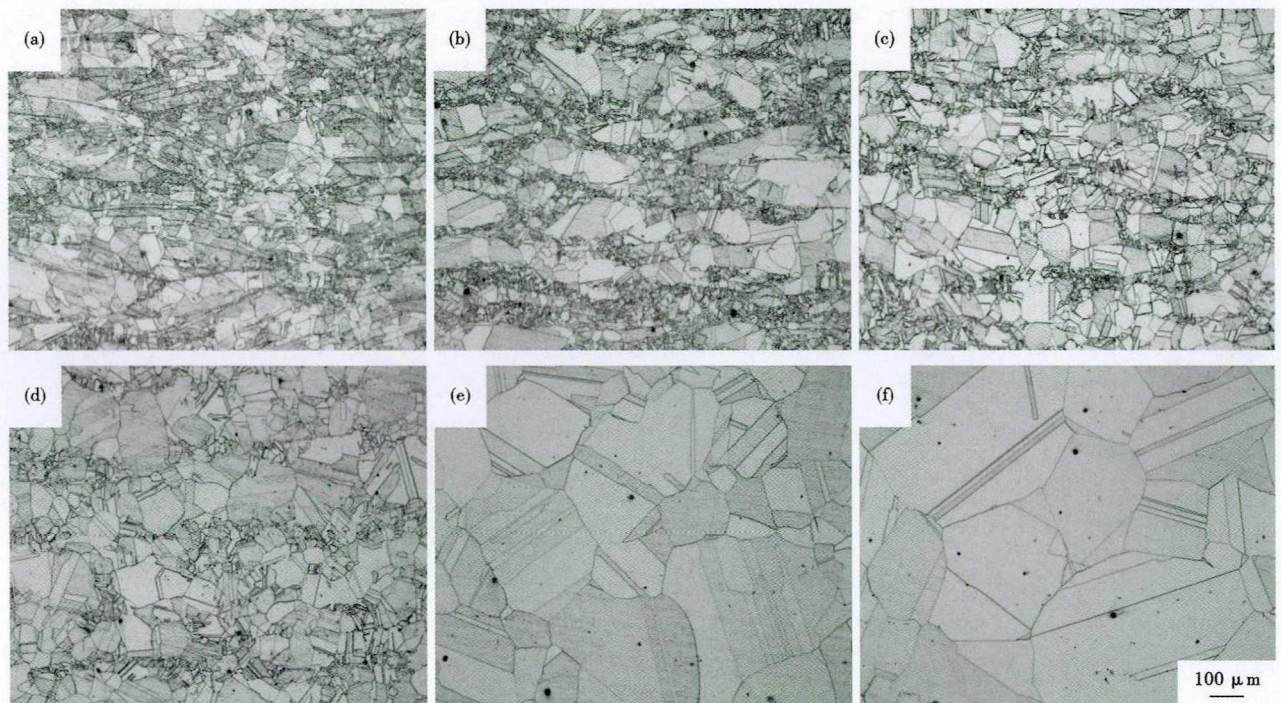


图 2 (a)1 080 °C;(b)1 100 °C;(c)1 120 °C;(d)1 140 °C;(e)1 160 °C;(f)1 200 °C 固溶处理后的 Inconel 601 合金相组织
 Fig. 2 Microstructure of Inconel 601 alloy after solid solution treatment at (a)1 080 °C;(b)1 100 °C;(c)1 120 °C;(d)1 140 °C;(e)1 160 °C and (f)1 200 °C

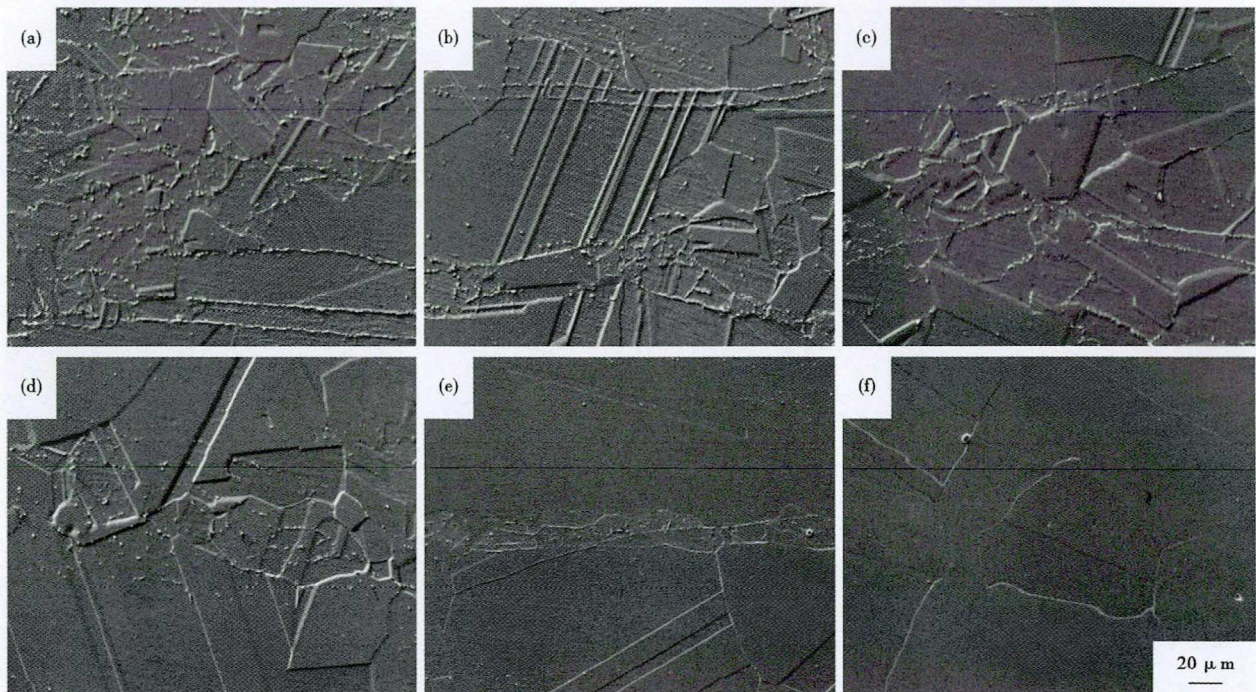


图3 (a)1 080 ℃;(b)1 100 ℃;(c)1 120 ℃;(d)1 140 ℃;(e)1 160 ℃;(f)1 200 ℃固溶处理后的 Inconel 601 合金 SEM 组织
Fig.3 SEM microstructure of Inconel 601 alloy after solid solution treatment at (a) 1 080 ℃;(b) 1 100 ℃;(c) 1 120 ℃;(d) 1 140 ℃;(e) 1 160 ℃ and (f) 1 200 ℃

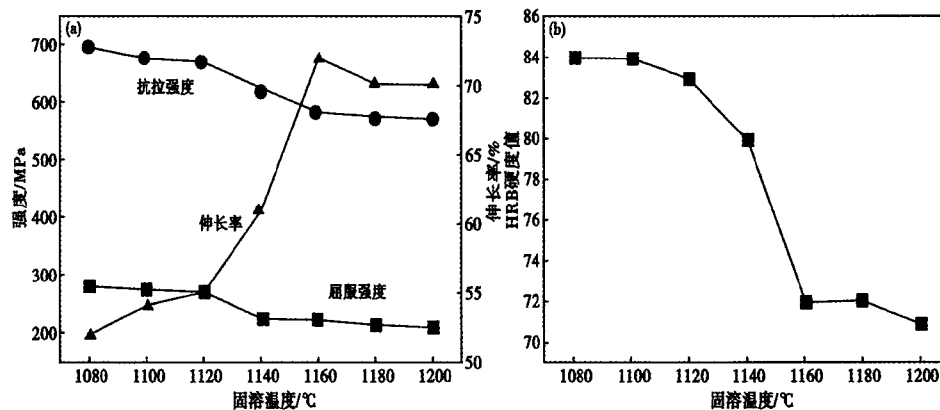


图4 固溶温度对 Inconel 601 合金(a)抗拉强度、屈服强度、伸长率和(b)硬度的影响
Fig.4 Effect of solid-solution temperature on tensile strength, yield strength and elongation (a) and hardness (b) of Inconel 601 alloy

度较大。

图5可见,随固溶温度升高,韧窝尺寸增大,韧窝深度增加。通过对合金断面收缩率统计发现,其规律与伸长率相似,在1 160 ℃时出现了峰值达到75%。

3 结果分析

固溶温度在1 080 ~ 1140 ℃,随着固溶温度的升高,晶界及晶内的碳化物逐渐溶解,作为第二相的碳化物提高了晶界扩散激活能,具有钉扎晶界、抑制晶粒长大的作用,因此,晶界处未溶解的碳化物的存在阻碍晶界迁移,使晶粒的尺寸长大比较缓慢,而且

存在混晶现象^[5-6]。当固溶温度达到1 160 ℃时,碳化物得到充分溶解,晶粒尺寸迅速长大,得到均匀的大尺寸晶粒。

Inconel 601 合金在1 080 ~ 1 200 ℃固溶后其屈服强度和抗拉强度随固溶温度的升高逐渐降低,这是合金的晶粒尺寸增大、碳化物溶解共同作用的结果。伸长率随固溶温度的升高而增加,在

1 140 ℃和1 160 ℃时伸长率提升幅度较大,并且在1 160 ℃时出现了峰值达到72%,这是由于碳化物在此温度全部溶解,降低了晶界碳化物对晶界的弱化作用,同时大量孪晶界弥补了晶粒长大、晶界迁移的不利影响,使塑性达到最高,固溶温度再提高,只是使晶粒尺寸增大,所以塑性稍有降低^[7-10]。随着固溶温度的升高硬度随之降低,在1 140 ℃和1 160 ℃时降低幅度较大,是因为此温度的碳化物溶解速度增加,在1 160 ℃固溶时碳化物全部溶解,固溶温度再升高,硬度变化不大^[11-13]。

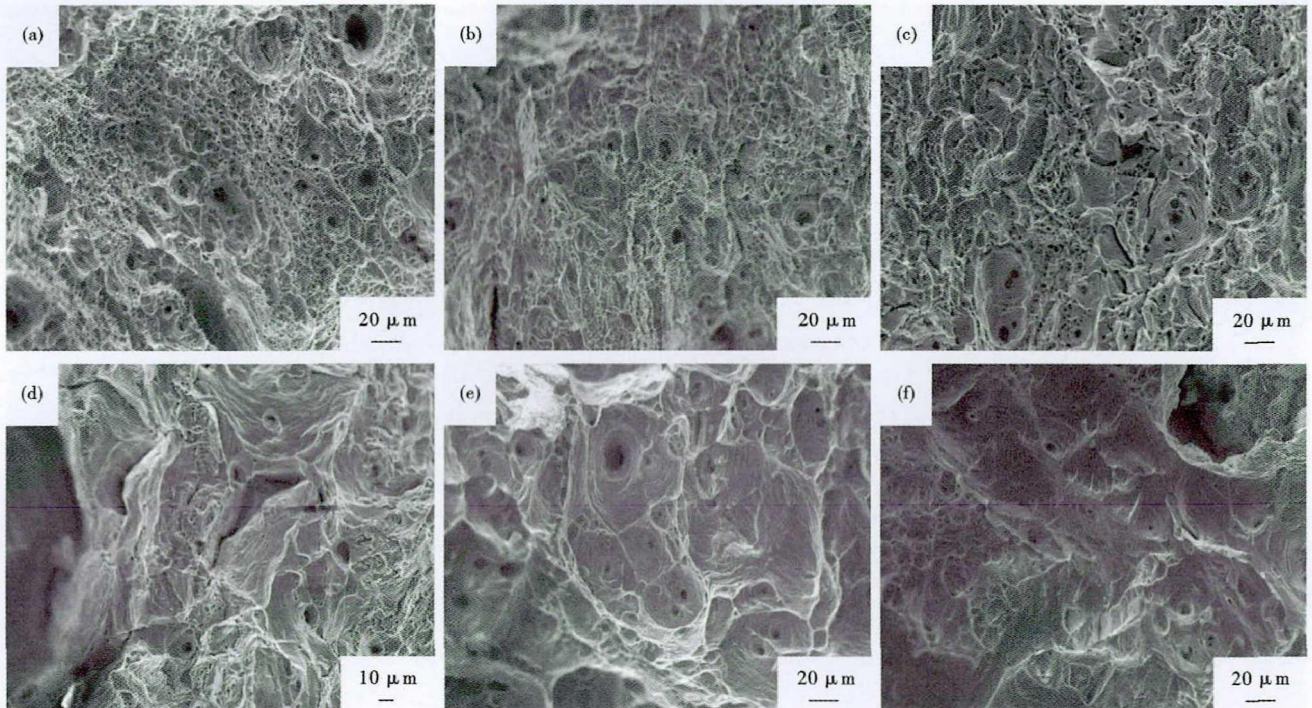


图5 (a)1 080 ℃;(b)1 100 ℃;(c)1 120 ℃;(d)1 140 ℃;(e)1 160 ℃;(f)1 200 ℃固溶处理后的 Inconel 601 合金拉伸断口 SEM 形貌

Fig.5 SEM morphology of tensile fracture surface of Inconel 601 alloy after solid solution treatment at (a)1 080 ℃;(b)1 100 ℃;(c)1 120 ℃;(d)1 140 ℃;(e)1 160 ℃ and (f)1 200 ℃

4 结论

(1) 热轧态 Inconel 601 合金基体为沿轧制方向拉长的奥氏体晶粒组织,同时弥散有少量氮化物,沿晶界有大量碳化物析出。

(2) 随着固溶温度的提高,晶粒逐渐长大,碳化物逐渐溶解。当固溶温度在 1 160 ℃ 以下时,碳化物溶解缓慢,晶粒长大缓慢并且大小不均,当固溶温度升高至 1 160 ℃ 时,碳化物溶解速率增加,合金中碳化物充分溶解,没有了碳化物阻碍晶界的迁移,晶粒急剧长大并且尺寸均匀。

(3) 在 1 080 ~ 1 200 ℃ 固溶处理,屈服强度由

280 MPa 降低到 210 MPa,抗拉强度由 690 MPa 降低到 570 MPa。伸长率随固溶温度升高由 52% 提升到 70%,1 140 ℃ 和 1 160 ℃ 时伸长率提升幅度较大,并且在 1 160 ℃ 时出现了峰值。随固溶温度升高 HRB 硬度值由 84 降低到 71,在 1 140 ℃ 和 1 160 ℃ 时降低幅度较大。

(4) 获得最佳力学性能的固溶制度为 1 140 ~ 1 160 ℃ 保温 50 min。

山西省应用基础研究项目 201801D121077;山西省应用基础研究计划 201901D111460;山西省关键核心技术和共性技术研发攻关专项 20201102017 资助

参考文献

- [1] 陆世英. 超级不锈钢和高镍耐蚀合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [2] 康喜范. 镍及其耐蚀合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016.
- [3] 黄乾尧, 李汉康. 高温合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [4] 杨悦民, 徐振高. Inconel 601 合金热加工性能的研究[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(5): 62-66.
- [5] 胡显军, 孙丹丹, 张珂, 等. 固溶温度对热轧 Inconel 625 合金组织与力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(9): 64-69.
- [6] 敖三三, 罗震, 单平, 等. Inconel 601 镍基高温合金激光焊缝的显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(8): 2099-2107.
- [7] 李小兵, 李伟. 固溶温度对高温合金 GH3600 微观组织和硬度的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(6): 51-53.
- [8] 胡伟华, 康永林, 唐兴昌. 321 奥氏体不锈钢动态再结晶的研究[J]. 特殊钢, 2012, 33(6): 59-62.
- [9] 郭岩, 周荣灿, 侯淑芳, 等. 镍基合金的析出相及强化机制[J]. 金属热处理, 2011, 36(7): 46-50.
- [10] 全中伟. 硼对 S31254 不锈钢固溶处理过程第二相溶解行为的影响[J]. 特殊钢, 2020, 41(4): 71-74.
- [11] 张胜全, 王玉慧. Inconel 600 合金元素偏聚及对组织影响的研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(12): 167-169.
- [12] 米大为. 固溶温度对 GH5605 高温合金组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(12): 191-194.
- [13] 李国平, 李俊, 张威, 等. 固溶温度对超级双相不锈钢 S32750 板材组织和耐蚀性的影响[J]. 特殊钢, 2009, 30(2): 61-62.

李吉东(1982-), 男, 硕士(2018年太原理工大学), 工程师, 2008年东北大学(本科)毕业, 镍基合金研发。

E-mail: Lijd@tisco.com.cn

收稿日期: 2020-09-29