



固溶工艺对3Al-310S耐热钢组织和力学性能的影响

张艳梅¹, 余海存^{2,3}, 仇秋玲¹

(1 上海电气集团股份有限公司中央研究院, 上海 200070; 2 兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050;

3 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

摘要:通过向普通310S不锈钢中添加3%Al制得3Al-310S耐热不锈钢, 试验钢经过不同固溶工艺处理后, 采用X射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)及室温拉伸性能测试, 研究固溶工艺对3Al-310S耐热钢显微组织和力学性能的影响规律。结果表明, 3Al-310S耐热钢基体组织为奥氏体, 随着固溶时间的增加和固溶温度的提高, 3Al-310S耐热钢的晶粒尺寸逐渐增大; 同时相对应的3Al-310S板材的硬度和抗拉强度逐渐降低, 伸长率逐渐提高, 当固溶温度为1000℃, 固溶时间为10 min时, 试验钢的抗拉强度达618.75 MPa, 伸长率为33.80%。

关键词:3Al-310S耐热钢; 固溶工艺; 显微组织; 力学性能

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00008 **中图分类号:**TG142.71

Effect of Solid Solution Process on the Organization and Mechanical Properties of 3Al-310S Heat-resistant Steel

Zhang Yanmei¹, Yu Haicun^{2,3}, Qiu Qiuling¹

(1 Central Academe, Shanghai Electric Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China; 2 School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China, 3 State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: This article prepares 3Al-310S heat-resistant stainless steel by adding 3% Al to ordinary 310S stainless steel. After different solid solution processes, the experimental steel is subjected to X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), and room temperature tensile performance testing to study the influence law of solid solution processes on the microstructure and mechanical properties of 3Al-310S heat-resistant steel. The research results indicate that the matrix structure of 3Al-310S heat-resistant steel is austenite. With the extension of solution time and the increase of solution temperature, the grain size of 3Al-310S heat-resistant steel gradually increases. With the increase of solution time and solution temperature, the hardness and tensile strength of 3Al-310S plate gradually decrease, and the elongation gradually increases. Among them, when the solution temperature is 1000℃ and the solution time is 10 minutes, the tensile strength of the experimental steel reaches 618.75 MPa, and the elongation is 33.80%.

Key Words: 3Al-310S Stainless; Solution Process; Microstructure; Mechanical Properties

在国家提出的“碳达峰”, “碳中和”政策指引下, 新能源材料的开发成为材料领域研究的热点。聚光式太阳能光热发电(Concentrating Solar Power, CSP), 由于其节能减排和输出连续可调等特点被认为未来最具发展潜力的清洁能源^[1-2]之一。然而, 在CSP系统中, 储热罐、换热器、管道等高温设备是其核心部件, 这些核心部件对材料的高温力学性能、高温冲击韧性及耐高温腐蚀性能都有较高的要求。国内大部分工厂使用的耐热钢是310S不锈钢, 通过向310S钢中添加一定Al含量, 在600~900℃下可以在外层生成Al₂O₃氧化膜, 与传统不锈钢表面形成的Cr₂O₃氧化膜相比, 具有更好的抗氧化和耐腐蚀性。

向310S钢中添加Al元素, 会使得钢中碳化物析出量增加, 组织中碳化物含量较高, 对力学性能会造成一定的影响。国内CSP系统使用的大部分材料是347H或316L不锈钢, 这些材料仅适用于温度在540℃左右的硝酸盐。为进一步提高CSP系统的发电效率, 碳酸盐或氯盐有望成为下一代最具竞争力的储能熔盐, 这种熔盐温度可达700℃, 国内能满足耐这种熔盐腐蚀的材料处于空缺状态, 因此, 开发一种既有较好的高温力学性能, 又具有较好的耐高温腐蚀性的耐热钢是下一代CSP发展的瓶颈^[3]。310S不锈钢属于Fe-Cr-Ni-Mn系不锈钢, 在较大的温度范围内表现出较好的综合力学性能^[4], 被广泛

应用于航空航天和化工等领域^[5]。CSP 系统中的储热罐、换热器、管道等高温部件,在服役过程中,不仅会受到高温重力载荷的作用,还受到高温熔盐的腐蚀和冲击,因此,制备既有良好的高温力学性能,又具有很好的耐高温熔盐腐蚀性能的耐热合金迫在眉睫。最近,国内外一些研究学者发现,在钢中添加较高的 Al 含量,会在钢表面形成 Al₂O₃ 保护膜,这种钢不仅具有较好的抗氧化性,其较好的耐腐蚀性和较低的成本引起了国内外许多学者的关注^[6-7]。国内外一些研究学者发现,通过向 310S 不锈钢中添加一定 Al 含量,在 600~900 °C 下可以在外层生成 Al₂O₃ 氧化膜,与传统不锈钢表面形成的 Cr₂O₃ 氧化膜相比具有更好的抗氧化和耐腐蚀性^[8-10]。侯东坡^[11]等研究了热轧态 310S 钢固溶处理。研究发现,试验钢经固溶处理后,钢中析出的碳化物在高温下可溶解于奥氏体中,从而减少晶内贫 Cr,提高钢的高温耐腐蚀性能。还有研究学者发现,将试验钢在热轧加工过程中产生的少量 σ 相,通过急冷固溶于奥氏体基体,以避免性能恶化,同时,减少钢中铁素体的生成。此外,研究人员发现,通过固溶工艺的调整,可控制试验钢的晶粒度,有利于板材质量的提升^[12]。侯美伶等^[13]研究发现,固溶温度对含有较高 Al 含量的 Fe-Mn-Al-C 钢中晶粒的生长和碳化物的形成有很大影响,随着固溶温度的升高,不同 Al 含量的 Fe-Mn-Al-C 钢中奥氏体晶粒长大程度不同,随着 Al 在基体中均匀分布,钢中的碳化物也在逐渐消失。高鹏等^[14]研究了固溶温度对 310S 耐热钢组织的影响机理,发现随着固溶温度的升高,第二相逐渐减少,说明较高的固溶温度能有效抑制第二相的析出。

310S 不锈钢具有很好的高温力学性能和耐腐蚀性能,其室温抗拉强度为 515 MPa,断后伸长率为 40%,为进一步提高 310S 钢的力学性能和耐腐蚀性。通过向 310S 钢中添加 3%Al 制备得到 3Al-310S 试验钢,试验钢经热轧后进行空冷,通过调整不同固溶温度和固溶时间,研究固溶工艺对 3Al-310S 试验钢组织和力学性能的影响规律。

1 试验材料及方法

1.1 3Al-310S 耐热钢成分设计及其制备

通过热力学模拟软件 Thermo-Calc 和铬镍当量比公式(铬和镍在钢中所占质量分数的比值,见式(1)和式(2))计算并设计了一种 3%Al 含量的 310S 耐热钢^[15],为确保试验钢基体组织为奥氏体,Al 含

量的增加,必然要降低 Cr 含量,因为 Al 和 Cr 均为铁素体形成元素,如果 Cr 含量不降低,机体组织很可能出现铁素体组织。本课题组已完成并证实向普通 310S 试验钢中添加 Al 元素可提高试验钢的力学性能,并已发表成果^[4]。试验钢采用真空感应炉进行熔炼,熔炼后的钢水浇铸成 2.5 kg 铸锭,在铸锭上使用线切割机切取厚度为 12 mm 的钢板进行轧制,试验钢轧制温度为 1 200 °C,在加热炉中保温 1.5 h 后开始轧制,最后将钢板轧制成厚度为 4 mm 的板材,随后在钢板上取拉伸样并进行固溶处理。试验钢成分见表 1。

$$\text{Cr}_{eq} = [\text{Cr}] + 2.0[\text{Si}] + 1.5[\text{Mo}] + 5.5[\text{Al}] + 1.75[\text{Nb}] + 1.5[\text{Ti}] + 0.75[\text{W}] \quad (1)$$

$$\text{Ni}_{eq} = [\text{Ni}] + [\text{Co}] + 0.5[\text{Mn}] + 30[\text{C}] + 0.3[\text{Cu}] + 25[\text{N}] \quad (2)$$

表 1 3Al-310S 耐热钢板材检测成分(质量分数)
Table 1 Test chemical composition of 3Al-310S heat-resistant steel plate %

Al	Cr	Ni	Mn	Si	C	Fe
3.00	9.46	18.75	1.93	1.42	0.025	余量

1.2 试验方法

试验钢的固溶处理试验在型号为 SX-G16103 的箱式电阻炉中进行,将试样放入箱式电阻加热炉中,试样随炉升温,待温度升高至 1 150 °C 后,分别保温 10、20、30 min 后水淬并取金相样品和拉伸样品,根据金相组织和力学性能探究不同固溶时间对试验钢组织和性能的影响;为研究不同固溶温度对试验钢组织和性能的影响,在轧制后的钢板上取样,并在 1 000、1 050、1 100、1 150 °C 下固溶 10 min 后进行水淬,通过金相组织和力学性能探究不同固溶温度对试验钢组织和性能的影响。采用 XRD(D/Max-2400 型)对试验钢的物相进行分析,仪器 2 θ 角范围为 20°~100°,扫描速度为 10°/min,加速电压为 40 kV,电流为 150 mA;使用光学显微镜(Axio Scope A1)对试样组织形貌进行观察,采用 SEM(FEG-450 型场发射扫描电子显微镜)对钢中第二相形貌及成分进行分析。试验钢硬度采用 WILSON-VH1102 型全自动显微硬度测试系统进行测试,每隔 0.3 mm 取一个测试点,共取 10 个测试点,计算其平均值,拉伸载荷为 300 g,加载时间为 12 s。试验钢力学性能使用电子万能试验机(AGS-X 300kN)进行测试,试样标距长度为 60 mm,试样拉伸速率为 3 mm/min,最后

对试验数据进行分析处理。

2 试验结果与讨论

2.1 XRD物相分析

为确定固溶温度和固溶时间对3Al-310S耐热钢的物相组成的影响,使用X射线衍射仪对样品进行物相分析。图1(a)为试验钢在1150℃,分别固溶10、20、30 min后进行水淬试样的XRD衍射图谱,图1(b)为试验钢分别在1000、1050、1100、1150℃下固溶10 min后进行水淬试样的XRD衍射图谱。从图1可以看出,在不同时间和不同固溶温度条件下,试验钢的基体组织均为单一的奥氏体相,根据Ni-Cr当量计算,在降低Cr的同时添加Al是可行的。这是由于Al和Cr都是铁素体形成元素,用部分价格较低的Al替代价格较贵的Cr是可行的,不会影响试验钢的基体组织。

2.2 光学显微组织分析

试验钢分别在不同固溶温度和固溶时间进行热处理后,试样的金相组织分别如图2和图3所示,从图2可以看出,在1150℃下保温10、20、30 min后,试验钢基体组织为单相奥氏体(A),并且在图2(b)~(d)中可明显看到在奥氏体基体中有大量退火

孪晶生成,这是因为试验钢在热轧过程中发生了再结晶,在晶界上有新的晶粒形核并长大。从图2(a)~(d)可以看出,随着固溶时间的增加,试验钢的再结晶晶粒逐渐长大。从图3(a)~(d)可以看出,随着固溶温度的提高,试验钢的奥氏体晶粒逐渐增大。其次,从图3中还可以看出,3Al-310S耐热钢经过热轧后,原本存在于铸态组织中的晶界碳化物组织被轧碎,再经过高温固溶处理后,大部分骨架状的碳化物在高温下分解形成C原子和金属原子,这些固溶原子通过固溶强化方式提高了试验钢的力学性能。

不同固溶工艺处理后试验钢的平均晶粒度尺寸统计数据如图4所示。从图4(a)可以看出,未进行固溶试验钢的晶粒尺寸为7.07 μm,经30 min固溶处理后,晶粒尺寸长大到135.44 μm。从图4(b)可以看出,随固溶温度的增加,试验钢的晶粒尺寸逐渐增大,这是因为高温会促使晶界迁移扩散,晶粒逐渐长大。

2.3 SEM显微组织分析

为了进一步观察不同固溶工艺处理后,固溶时间和固溶温度对试验钢晶粒尺寸及第二相析出的影响,对试验钢的微观组织进行扫描电镜观察。如

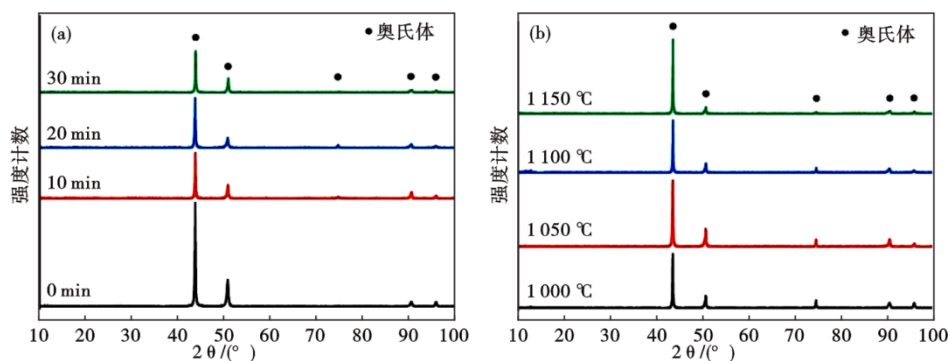


图1 不同固溶工艺3Al-310S耐热钢XRD图谱:(a)1150℃下固溶不同时间,(b)不同温度下固溶10 min

Fig. 1 XRD pattern of 3Al-310S heat resistant steel with different solid solution process : (a) solid solution at 1150 °C for different times, (b) solid solution at different temperatures for 10 min

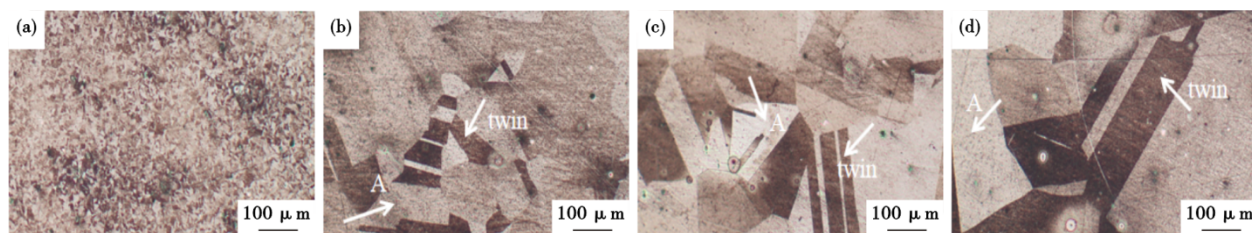


图2 1150℃下不同固溶时间3Al-310S耐热钢金相图:(a)未固溶,(b)10 min,(c)20 min,(d)30 min

Fig. 2 Metallographic diagram of 3Al-310S heat resistant steel with different solid solution time at 1150 °C : (a) un-solidified, (b) 10 min, (c) 20 min, (d) 30 min

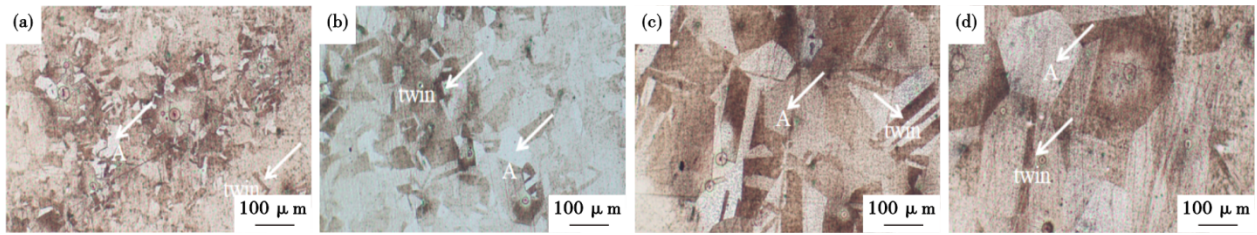


图 3 3Al-310S耐热钢不同温度下固溶 10 min 金相图:(a)1 000 °C,(b)1 050 °C,(c)1 100 °C,(d)1 150 °C

Fig. 3 Metallographic diagram of high alumina 3Al-310S heat resistant steel in solid solution at different temperatures for 10 min : (a)1 000 °C, (b)1 050 °C, (c)1 100 °C, (d)1 150 °C

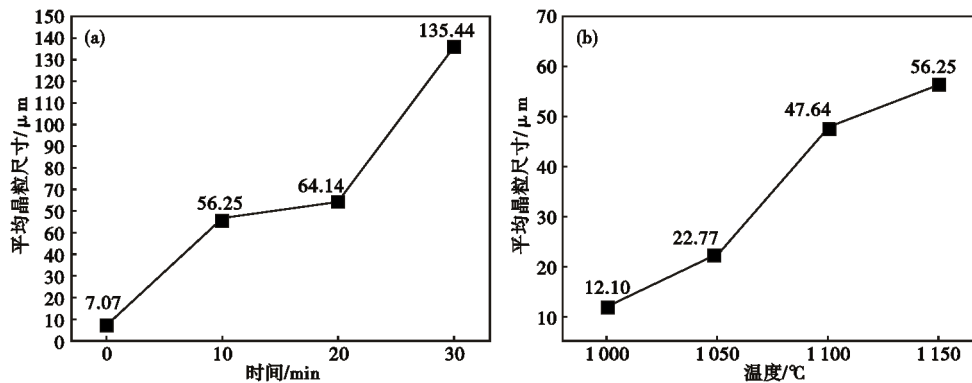


图 4 3Al-310S耐热钢不同固溶工艺条件下试样平均晶粒尺寸:(a)1 150 °C下固溶不同时间,(b)不同温度下固溶 10 min
Fig. 4 Average grain size of sample under different solid process conditions of 3Al-310S heat resistant steel : (a) solid solution at 1 150 °C for different times, (b) solid solution at different temperatures for 10 min

图5、图6所示,从图5、图6可以看出,SEM组织与金相组织一致,都是典型的奥氏体组织,部分退火孪晶在奥氏体晶界内分布,随着固溶时间的提高,奥氏体晶粒尺寸增大。

图7所示为不同固溶温度条件下,试验钢中碳化物SEM图及其EDS能谱分析。从图7可以看出,钢中析出的碳化物呈棒状和颗粒状,经EDS分析结果发现,这些碳化物的元素主要以Fe、Cr、Mn和C原子组成,且金属元素与碳原子的原子比约为7:3,因此,判断颗粒状析出物为M₇C₃型碳化物。

2.4 力学性能

图8(a)为3Al-310S耐热钢在1 150 °C下不同固溶时间后的硬度值,由图8(a)可知,未经固溶处理的试验钢硬度为232.62HV0.3,固溶 10 min时耐热钢的硬度为151.51HV0.3,固溶 20 min时耐热钢的硬度为167.47HV0.3,固溶 30 min时耐热钢的硬度为144.36HV0.3,可以看出,随着固溶温度的增加,试样的硬度总体在下降,当固溶时间增加到30 min时,硬度下降了88.3HV0.3。

图8(b)为不同固溶温度处理后,试验钢的硬度

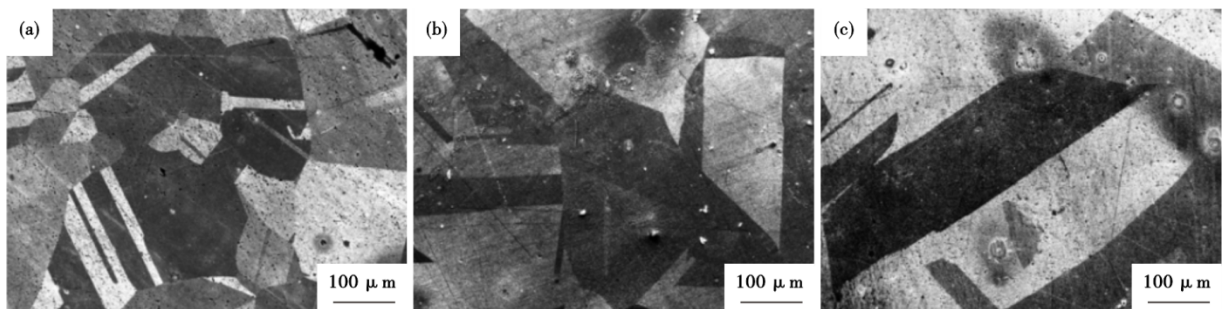


图 5 1 150 °C下固溶不同时间 3Al-310S耐热钢 SEM 组织形貌图:(a)10 min,(b)20 min,(c)30 min

Fig. 5 SEM morphology of 3Al-310S heat-resistant steel in solid solution at 1 150 °C for different times : (a)10 min, (b)20 min, (c)30 min

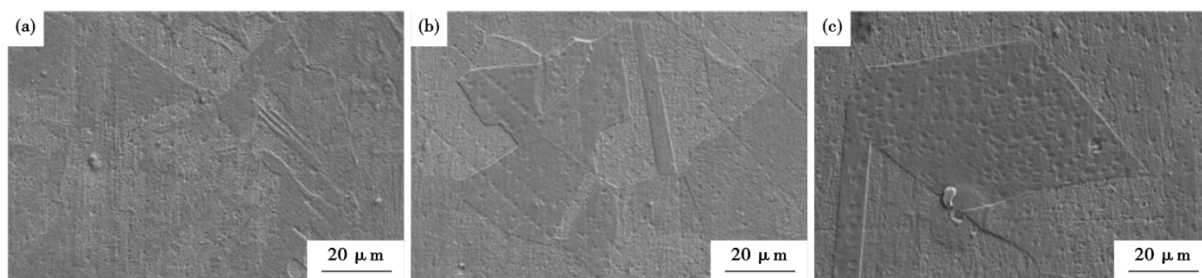


图 6 3Al-310S 耐热钢不同温度下固溶 10 min SEM 组织形貌图:(a)1 000 °C,(b)1 050 °C,(c)1 100 °C

Fig. 6 SEM morphology of 3Al-310S heat-resistant steel in solid solution for 10 min at different temperatures : (a) 1 000 °C, (b) 1 050 °C, (c) 1 100 °C

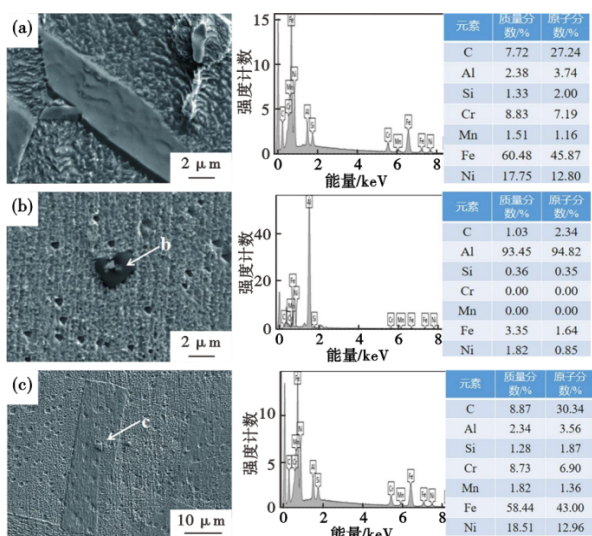


图 7 3Al-310S 耐热钢在不同固溶温度条件下,固溶 10 min 后的 SEM 高倍显微组织及 EDS:(a) 1 000 °C 固溶 10 min,(b) 1 050 °C 固溶 10 min,(c) 1 150 °C 固溶 10 min

Fig. 7 SEM high magnification microstructure and EDS analysis of 3Al-310S heat resistant steel with different solid solution process : (a) solid solution at 1 000 °C for 10 min, (b) solid solution at 1 050 °C for 10 min, (c) solid solution at 1 150 °C for 10 min

变化,试样分别在 1 000、1 050、1 100、1 150 °C 固溶

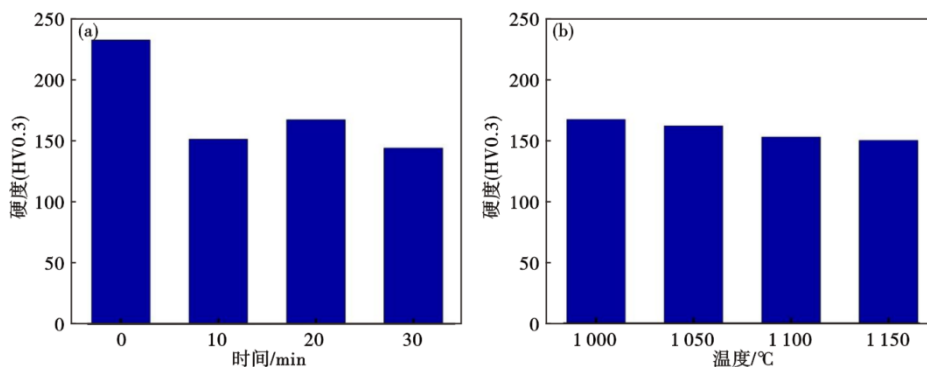


图 8 3Al-310S 耐热钢不同固溶工艺显微硬度:(a) 1 150 °C 下固溶不同时间,(b) 不同温度下固溶 10 min

Fig. 8 Microhardness of 3Al-310S heat-resistant steel under different solid solution processes : (a) solid solution at 1 150 °C for different times, (b) solid solution at different temperatures for 10 min

10 min 后的硬度分别为 166.91HV0.3、161.63HV0.3、155.57HV0.3、152.57HV0.3,可以看出,试验钢的硬度随着固溶温度的提高而缓慢降低。

图 9 为试验钢在不同固溶温度和固溶时间下的应力-应变曲线,图 10 为其相对应试验钢的抗拉强度与伸长率。从图 9(a)应力-应变曲线可以看出,试验钢在拉伸过程中表现为塑性变形。在 1 150 °C 下分别固溶 10、20、30 min 后,试验钢抗拉强度分别为 470.89、463.04、449.86 MPa,伸长率为 51.46%、55.31%、57.68%,由此可知,在同一固溶温度下,随固溶时间的延长,3Al-310S 耐热钢的抗拉强度逐渐降低而伸长率提高。为了进一步探究固溶温度对试验钢力学性能的影响,分别在 1 000、1 050、1 100、1 150 °C 下固溶处理 10 min 后得到试验钢的力学性能如图 9(b)所示的应力-应变曲线。从图 10(b)可知,试验钢的抗拉强度分别为 618.75、590.25、551.73、549.24 MPa,对应的伸长率分别为 33.80%、40.62%、44.70%、50.25%,所以,随着固溶温度的提高,3Al-310S 耐热钢的抗拉强度降低,伸长率提高。

图 11 和图 12 是固溶处理后 3Al-310S 耐热钢的室温拉伸断口形貌图,从图 11、图 12 中可以看出,拉

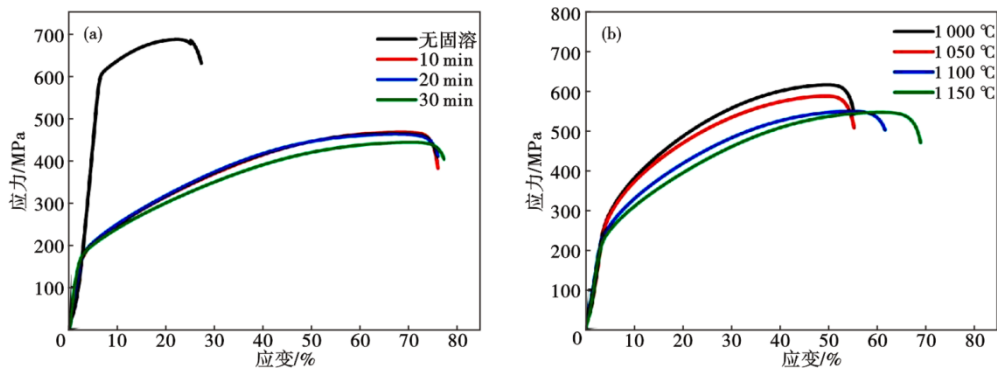


图 9 3Al-310S 耐热钢不同固溶工艺下室温拉伸应力应变曲线:(a)1150 °C 下固溶不同时间,(b)不同温度下固溶 10 min
 Fig. 9 Room temperature tensile stress-strain curve of 3Al-310S heat-resistant steel with different solid solution processes : (a) solid solution at 1150 °C for different times, (b) solid solution at different temperatures for 10 min

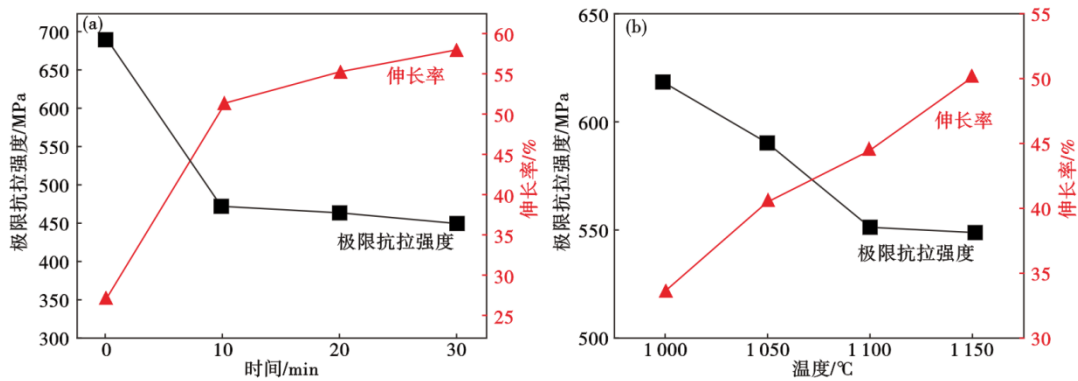


图 10 3Al-310S 耐热钢不同固溶工艺下室温拉伸抗拉强度和伸长率变化图:(a)1150 °C 下固溶不同时间,(b)不同温度下固溶 10 min
 Fig. 10 Room temperature tensile strength and elongation change graph 3Al-310S heat resistant steel under different solid solution processes : (a) solid solution at 1150 °C for different times, (b) solid solution at different temperatures for 10 min

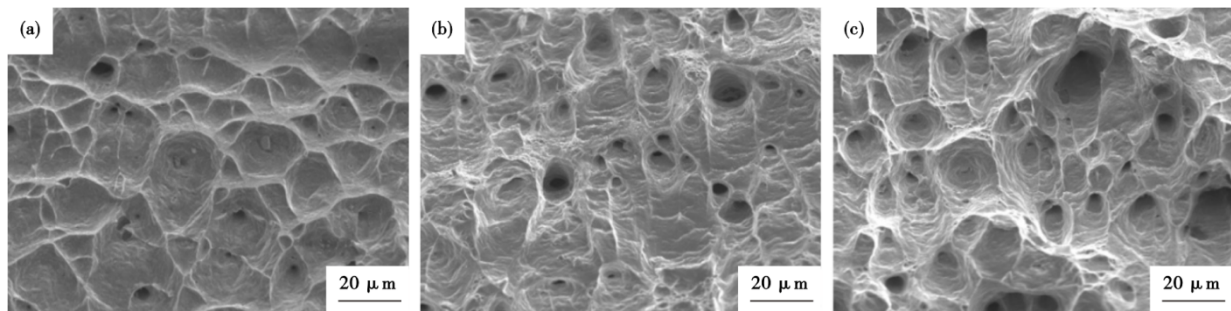


图 11 1150 °C 下不同固溶时间 3Al-310S 耐热钢室温拉伸断口形貌图:(a)10 min,(b)20 min,(c)30 min
 Fig. 11 Room temperature tensile fracture of 3Al-310S heat resistant steel with different solid solution time at 1150 °C : (a) 10 min, (b) 20 min, (c) 30 min

伸断口为韧窝相连形成的纤维状组织,是典型的韧性断裂。并且其韧窝大小与固溶处理的时间有关,固溶时间越长,韧窝尺寸越大、越深;韧窝大小也与固溶温度有关,固溶温度越高,韧窝尺寸越大、越深,这是因为 3Al-310S 耐热钢在固溶处理后,其晶粒尺寸发生变化。通常,韧窝的尺寸越大、越深,试

验钢的塑性就越好,但相对应强度会降低,韧窝形貌随固溶时间的变化与图 10(a)的抗拉强度及伸长率变化相对应。

3 结论

(1)3Al-310S 耐热钢经热轧后,在 1150 °C 分别固溶 10、20、30 min 后,试验钢的抗拉强度分别为

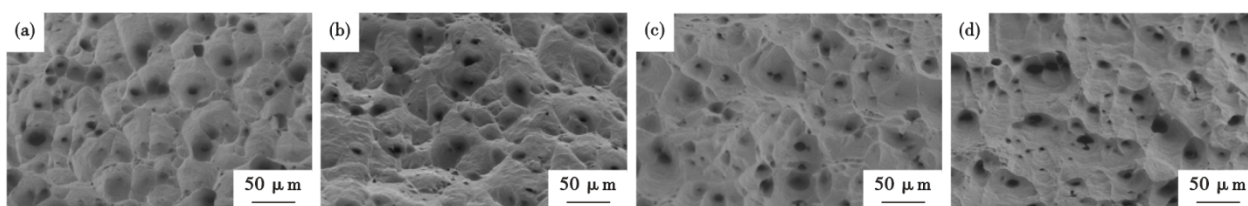


图 12 3Al-310S耐热钢不同温度下固溶 10 min 室温拉伸形貌图:(a)1 000 °C,(b)1 050 °C,(c)1 100 °C,(d)1 150 °C

Fig. 12 Room temperature tensile morphology of high alumina 3Al-310S heat resistant steel in solid solution for 10 min at different temperatures : (a)1 000 °C, (b)1 050 °C, (c)1 100 °C, (d)1 150 °C

470.89、463.04、449.86 MPa, 伸长率为 51.46%、55.31%、57.68%。随着固溶时间的增加,抗拉强度逐渐降低,而伸长率逐渐增加,通过对比试验钢的综合力学性能,3Al-310S耐热钢最佳固溶时间为 30 min。

(2)3Al-310S耐热钢经热轧后,在 1 000、1 050、1 100、1 150 °C固溶 10 min 后,试验钢的抗拉强度分别为 618.75、590.25、551.73、549.24 MPa,对应的伸长率分别为 33.80%、40.62%、44.70%、50.25%。随

着固溶温度的提高,抗拉强度逐渐降低,而伸长率逐渐增加,通过对比试验钢的综合力学性能,3Al-310S耐热钢最佳固溶温度为 1 150 °C。

(3)随着固溶时间的增加和固溶温度的提高,3Al-310S耐热钢的晶粒尺寸总体呈增大趋势,在基体和晶界上有部分碳化物形成,这些碳化物主要是 M_7C_3 型碳化物,且呈颗粒状和骨架状存在,随着固溶温度的提高和固溶时间的增加,碳化物逐渐减少。

参考文献

- [1] 胡叶广,张成,周超英,等. 太阳能光热发电的集热技术现状及前景分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3421-3427.
- [2] 黎建锋,牛安勇. 太阳能光热发电技术应用环节存在的问题及改进[J]. 低碳世界, 2021, 11(2): 62-63+143.
- [3] Mathivanan A, Senthilkumar A, Devakumaran K. Pulsed current and dual pulse gas metal arc welding of grade AISI: 310S austenitic stainless steel [J]. Defence Technology, 2015, 11(3): 269-274.
- [4] 金静. 铝含量对 310S 和 Incoloy 800H 板材组织和力学性能的影响及作用机制[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [5] 车昌盛. 高铬镍不锈钢焊条性能及结晶模式研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [6] Jozaghi T, Wang C, Arroyave R, et al. Design of alumina-forming austenitic stainless steel using genetic algorithms [J]. Materials & Design, 2020, 186: 108198.
- [7] Muralidharan G, Yamamoto Y, Brady M P, et al. Development of cast alumina-forming austenitic stainless steels [J]. JOM, 2016, 68(11): 2803-2810.
- [8] Ramakrishnan V, McGurty J A, Jayaraman N. Oxidation of high-aluminum austenitic stainless steels [J]. Oxidation of Metals, 1988, 30(3): 185-200.
- [9] Fujioka T, Kinugasa M, Iizumi S, et al. Heat-resisting austenitic stainless steel: US3989514 [P]. 1976-11-02.
- [10] Pivin J C, Delaunay D, Roques-Carnes C, et al. Oxidation mechanism of Fe-Ni-20-25Cr-5Al alloys-influence of small amounts of yttrium on oxidation kinetics and oxide adherence [J]. Corrosion Science, 1980, 20(3): 351-373.
- [11] 侯东坡,宋仁伯,项建英,等. 固溶处理对 316 L 不锈钢组织和性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2010, 31(12): 61-65.
- [12] 薛忍让,宋志刚,郑文杰,等. 固溶温度对 316 LN 不锈钢组织及力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2013, 38(4): 88-91.
- [13] 侯美伶,李晨潇,孔祥伟,等. 热处理工艺对 Fe-Mn-Al-C 钢组织和性能的影响 [J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 96-100.
- [14] 高鹏,刘天增,张有余. 热处理工艺对 310S 不锈钢显微组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2018, 47(22): 217-220.
- [15] Yamamoto Y, Brady M P, Lu Z P, et al. Creep-resistant, Al_2O_3 -forming austenitic stainless steels [J]. Science, 2007, 316(5823): 433-436.