

镍基耐蚀合金 Hastelloy G30 板材热处理

Heat Treatment Technology of Hastelloy G30 Plate

供稿|杨哲, 郑博龙, 郭盛祥, 程伟, 杨晗 / YANG Zhe, ZHENG Bolong, GUO Shengxiang, CHENG Wei, YANG Han

内
容
导
读

为了研究哈氏合金 G30 板材的热处理工艺和第二相 σ 相的析出敏感性, 采用光学显微镜、拉伸试验机等对经过不同热处理工艺后的 G30 板材的微观组织进行观察, 并对板材的力学性能进行测试, 分析了不同热处理温度的影响和不同服役温度下第二相 σ 相的析出规律。结果表明: G30 板材经过 1170 °C 保温 30 min 后水冷的热处理工艺, 微观组织均匀单一、 σ 相大量溶解, 表现出最优的综合性能, 可以满足标准 ASTM B582—07(2018) 对 G30 哈氏合金的性能要求。此外, 由于 G30 板材在高于 800 °C 的环境中长时间保温会析出第二相 σ 相, 实际服役温度一般应低于 800 °C。

哈氏合金 G30 是一种具有优异性能的镍基耐蚀合金, 按照标准 ASTM B582—07(2018) 规定, 其主要合金元素包括镍、铬、钼、铜和铁, 其中镍的质量分数大于 37%, 铬的质量分数大于 30%。由于哈氏合金 G30 的高铬含量以及钼、钨、铜、钴、铌等合金元素的加入, 使其具有极好的耐腐蚀性。尤其在高氧化性的混合酸性介质中, 如 $\text{H}_2\text{SO}_4+\text{HF}$ 、 H_3PO_4 、 HNO_3+HF 等环境, G30 相对于其它材料表现出了良好的耐腐蚀性能。因此, 被广泛应用于磷酸生产、硝酸+氢氟酸洗设备、部件以及核燃料和核废料处理领域^[1-4]。

G30 合金的应用以宽幅中厚板材为主, 主要用于制造化工装备、管道、复合板等, 市场需求量较

大。在实际应用中, 要求哈氏合金 G30 的化学成分、力学性能和耐腐蚀性能均需完全满足工程结构用板材的标准。

相对于其他牌号的哈氏合金, 如镍钼类的哈氏合金 B、镍铬钼的哈氏合金 276、哈氏合金 C22、哈氏合金 C2000 等, 哈氏合金 G30 的研究资料较少。国内生产哈氏 G30 产品时受制于设备能力, 产品一直以宽度小于 1200 mm 的窄幅板为主, 大单重的宽幅中厚板主要依赖进口。随着哈氏 G30 板材应用范围的扩大及需求量的增加, 宝钛集团以市场需求为背景在这一领域开展了大量工作, 目前具备了相应的生产设备和技术能力, 并对哈氏 G30 宽幅板材制备工艺进行了大量的研究。本文研究了哈氏 G30 宽

幅板材热处理工艺，旨在获得最适合的热处理工艺。同时，结合 G30 合金的实际服役条件，研究其有害第二相 α 相的析出规律，以便在实际加工和应用过程中进行规避和防控。

实验材料和方法

使用电解镍、金属铬、原料纯铁、熔炼铌、钼锭、钨条、电解铜等作为金属原料制造哈氏合金 G30。上述原料均经过精心设计和严格的品质控制，能够确保合金的化学成分和优良性能。采用真空感

应加电渣重熔双联法进行熔炼，可以显著提高熔炼质量，降低 O、N、H、S 含量，进一步减少有害间隙元素和非金属夹杂物的生成^[5-6]。

熔炼制备 $\phi 500$ mm 的哈氏 G30 铸锭，其化学成分（见表 1）完全满足标准 ASTM B582—07(2018) 的要求。铸锭在锯切冒口后，进入锻造工序。在 1300 kW 箱式电炉中加热至 1150 °C，保温 5 h，确保铸锭在锻造前达到适宜的温度且温度均匀。之后通过 6300 t 压机锻造板坯，制得的板坯规格为 150 mm×900 mm×2000 mm。

表 1 哈氏合金 G30 铸锭化学成分（质量分数）

项目	Ni	Cr	Fe	C	Si	Cu	W	Mo	Co	Nb	Mn
本文样品	余量	30.0	16	0.01	0.02	2.0	2.8	5	3	1.0	1.0
标准成分*	余量	28.0~31.5	13~17	≤0.03	≤0.80	1.0~2.4	1.5~4.0	4~6	≤5	0.3~1.5	≤1.5

注：*采用 ASTM B582—07(2018) 标准。

板坯经过刨铣修磨之后，在 3300 mm 四辊可逆式热轧机进行热轧。热轧采用二火轧制的方式，一火轧至厚度 40 mm，扒皮下料。再经过二火轧制，得到厚度为 6 mm，宽度为 2000 mm 的中厚板材。对制得的中厚板材取样进行热处理实验，试样横向规格均为 40 mm×300 mm。热处理工艺以镍铬钼和镍铬铁相图作为参考进行制定：热处理温度为 1050、1100、1150、1200 °C，保温时间 30 min，冷却方式为水冷。

热处理实验完成后，采用光学显微镜观察板材的微观组织，并对热处理后的板材试样进行力学性能测试。根据实验结果分析研究不同热处理方案对组织和性能的影响，结合 ASTM B582—07(2018) 规定的力学性能标准确定最合理的热处理工艺。同时

为了研究合金第二相 σ 相析出敏感性，对热处理后的试样分别在 600、700、800 和 900 °C 进行中温时效处理，时效处理时间为 2 h。通过该实验能够更好地了解合金在第二相 σ 相析出过程中的行为和规律，对于优化热处理工艺和提高合金性能具有重要的意义，同时也为进一步的理论研究提供了可靠的依据。

结果与讨论

热轧态组织

哈氏合金 G30 板材热轧态微观组织如图 1 所示，呈现出一种典型的加工变形组织。可以观察到大量的变形带和变形晶粒。同时，在晶界和晶内存

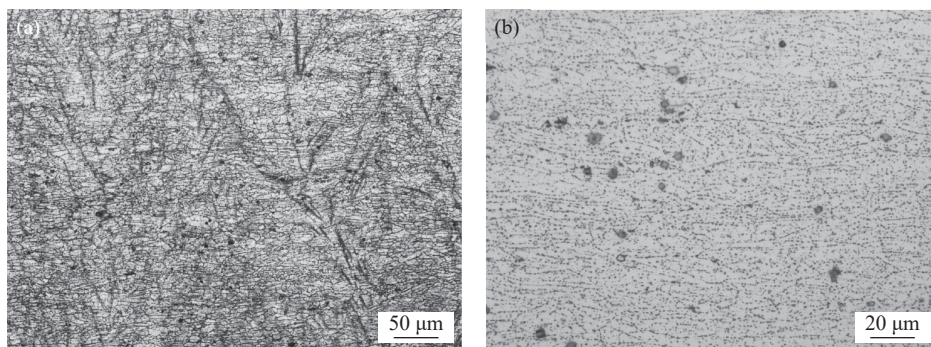


图 1 热轧态哈氏合金 G30 板材低倍 (a) 及高倍 (b) 微观组织

在着大量的第二相。哈氏合金含有大量 Fe、Mo 等合金元素，在合金制备过程中各元素结合产生第二相。

哈氏合金 G30 是一种超低碳的高铬合金，铌元素的添加有效地抑制了碳与铬结合生成金属间化合物 CrC。因此，合金内的第二相主要为 σ 相， σ 相容易富集 Mo、W 等元素。当 σ 相沿晶界析出时，会导致晶界周围 Mo、W 的贫化，从而降低合金晶界的耐蚀性，在一些腐蚀环境中会导致晶间腐蚀的产生^[7]。

此外， σ 相是一种脆性相，晶粒中大量出现 σ 相会严重影响材料的韧性，甚至可能导致板材发生脆性断裂。而通过适当的热处理工艺，可以使这些第二相完全固溶。因此，为了确保材料的使用性能和寿命，必须采用合理的热处理工艺来消除这些脆性相，进一步消除它们对材料性能带来的不利影响。

热处理工艺对微观组织的影响

图 2 所示为不同温度热处理后 G30 板材试样沿轧制方向的微观组织。当热处理温度为 1050 °C 时，仍以变形组织为主，如图 2(a) 所示，说明该温度下

再结晶尚未开始。此时第二相析出较多，且尺寸较大无法溶解，导致板材微观组织并不均匀，不能满足实际需求。当热处理温度提升至 1100 °C 时，微观组织如图 2(b) 所示，组织中开始出现少量再结晶晶粒。由于该温度偏低，大部分组织仍然以纤维状为主，没有实现完全再结晶，并且仍然能观察到析出的第二相颗粒。该温度下的组织仍存在一定缺陷，不能满足实际需求。当热处理温度进一步提升至 1150 °C 时，板材完成了完全再结晶，轧制变形的纤维状晶粒得以消除。此时晶粒尺寸较小，晶界和晶内存在一定的 σ 相，如图 2(c) 所示，这可能会对材料的力学性能产生一定的影响，需要进一步验证。最后，当热处理温度达到 1200 °C 时，如图 2(d) 所示，板材展现出完全再结晶的组织状态，基体组织均匀，晶界处的 σ 相大量减少，晶粒相对于热处理温度为 1150 °C 时有所长大。为了全面评估 1150 和 1200 °C 热处理工艺的效果，需要结合力学性能测试结果进行进一步的比较验证。

热处理工艺对力学性能的影响

表 2 所示为经不同热处理工艺制备的板材力学性能。通过力学性能的对比可以得出，当板材试样

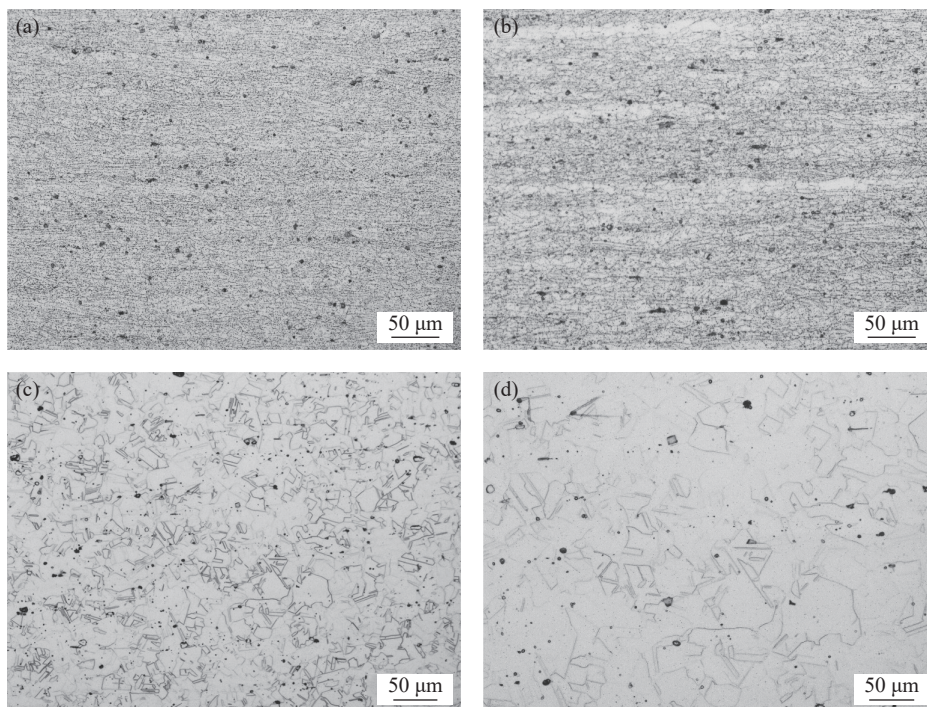


图 2 不同热处理温度下哈氏合金 G30 板材微观组织: (a) 1050 °C; (b) 1100 °C; (c) 1150 °C; (d) 1200 °C

在相对较低温度（1050℃）热处理后，其抗拉强度和屈服强度最高，但塑性较差，断后伸长率值仅为23%，低于 ASTM B582—07(2018) 标准中对 G30 板材塑性的要求。板材试样经过 1100℃ 热处理后，断后伸长率达到 37%，虽然达到了标准要求，但断后伸长率仍然较低，在实际应用中并不一定能完全满足使用要求。结合微观组织分析，通过这 2 种热处理工艺制备的试样的微观组织均未完成再结晶，说明加热温度为 1050 和 1100℃ 的热处理工艺均不可取。

表 2 不同热处理温度哈氏合金 G30 板力学性能

热处理温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%
1050	974	611	23
1100	850	540	37
1150	771	375	49
1200	680	335	56
标准力学性能*	≥586	≥241	≥30

注：*采用 ASTM B582—07(2018) 标准。

当板材试样经过 1150 和 1200℃ 热处理后，其抗拉强度和屈服强度均满足标准 ASTM B582—07(2018) 要求，同时具有更好的塑性变形能力，断后伸长率分别达到了 49% 和 56%。当板材经过 1200℃ 热处理时，因为加热温度更高，导致其延伸率相对较高，但抗拉强度和屈服强度值反而较 1150℃ 热处理时有所下降。

结合微观组织分析，经过 1150℃ 热处理后试样有少量的 σ 相残留，经过 1200℃ 热处理试样中的 σ 相大量减少。同时，经过 1200℃ 热处理后试样的晶粒偏大，也可能对其力学性能产生影响。为了进一步获取更均匀的组织 and 更优异的综合力学性能，热处理温度为 1170℃ 进行了热处理实验，以期能够找到一个既可以满足力学性能要求，又能够优化微观组织的热处理参数。

1170℃ 热处理结果

经过 1170℃ 热处理的板材试样微观组织见图 3，呈现出一种均匀的组织结构，晶界处几乎没有 σ 相的存在，晶粒大小适中，微观组织的均匀性更好。

经过 1170℃ 处理后，板材的抗拉强度和屈服强

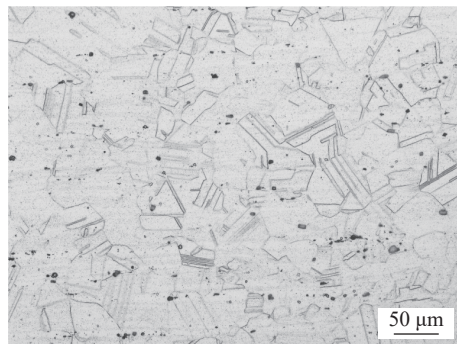


图 3 1170℃ 热处理后哈氏合金 G30 板的微观组织

度分别达到了 730 和 360 MPa，同时断后伸长率为 50%，展示出了良好的强度和塑性。该力学性能远远高于 ASTM B582—07(2018) 标准要求。

综合以上实验结果可知，热处理温度为 1170℃ 时哈氏合金 G30 板材具有更加优秀的综合性能。该工艺不仅可以提高材料的力学性能和耐腐蚀性能，还能够保证材料具有良好的组织形态和晶粒大小。

材料中温敏感性 σ 相析出的研究

哈氏合金 G30 板材在实际应用中，通常需要经过焊接、再加热变形等加工过程。例如，当 G30 合金与钢板复合应用时，需要在复合板制备完成后进行退火处理。为了保证板材性能不受后续加工工艺产生的不利影响，对 G30 合金在使用温度范围内（600~900℃）第二相析出的敏感性展开研究，避免在使用过程中因为工艺不当，导致第二相再次大量析出，从而影响材料的应用性能及使用寿命。

对经过 1170℃ 热处理后的哈氏合金 G30 板材分别在 600、700、800、900℃ 下保温 2 h，进行时效处理。时效处理后板材的微观组织如图 4 所示。可以看出，当时效温度为 600 和 700℃ 时，基体组织没有发生明显的变化。当时效温度升至 800℃ 时，晶界开始大量析出第二相，并且晶粒有明显的长大倾向。随着温度进一步升高至 900℃，晶粒和晶界处析出了更多的 σ 相，甚至引起了基体晶粒组织的变化。因此，为了避免长期使用中哈氏合金 G30 板材中析出第二相影响材料使用性能和寿命，要求该合金一般在低于 800℃ 的环境中服役。

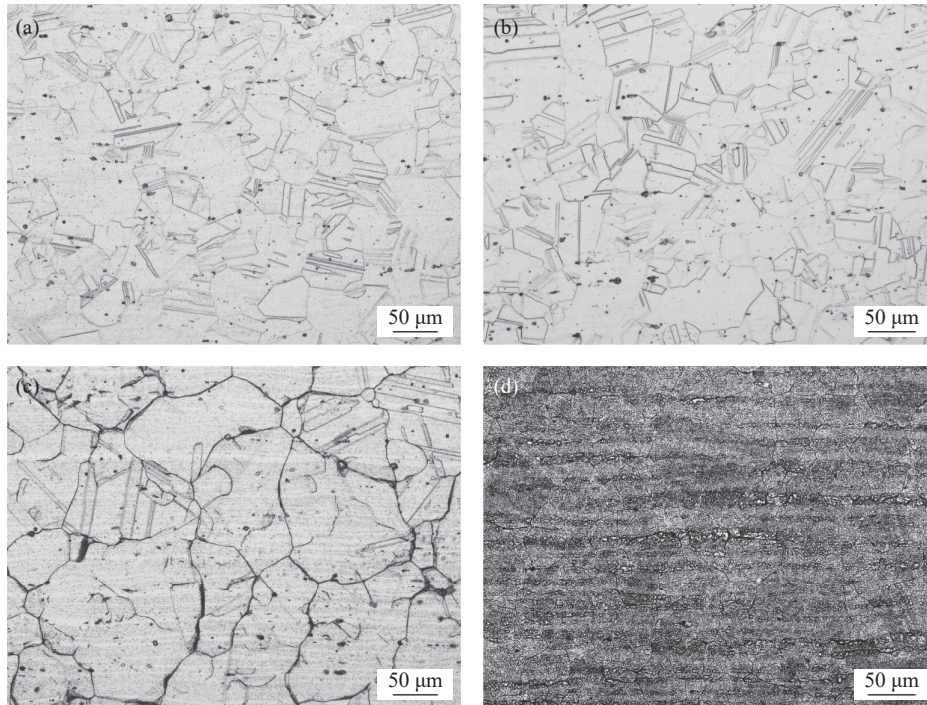


图4 不同时效温度哈氏合金 G30 板微观组织: (a) 600 °C; (b) 700 °C; (c) 800 °C; (d) 900 °C

结束语

(1) 随着热处理温度由 1050 增加至 1200 °C, G30 板材变形组织逐渐减少, 再结晶晶粒逐渐增加直至完全再结晶; 强度随着温度的升高先增大后变小, 断后伸长率则单调增加。

(2) 哈氏合金 G30 板材经过 1170 °C, 保温 30 min, 水冷热处理工艺后, 合金微观组织均匀单一、第二相大量溶解, 具有最优的综合力学性能。

(3) 哈氏合金 G30 板材在实际应用中要合理控制工作温度, 长时间服役温度应低于 800 °C 以避免 σ 相大量析出从而对合金的使用性能带来不利影响。

参考文献

[1] 康喜范. 镍及其耐蚀合金. 北京: 冶金工业出版社, 2016

[2] 《重有色金属材料加工手册》编写组. 重有色金属材料加工手册. 北京: 冶金工业出版社, 1979

[3] 余历军, 淡勇, 郭笃信. 高耐蚀哈氏合金 G-30 的性能及应用. 化工机械, 1998(5): 50

[4] 东娟, 罗耿波, 席金花. 哈氏 G-30 合金的基本特性及容器的设计制造特点. 化工装备技术, 2014, 35(5): 36

[5] 崔雅茹, 王超. 特种冶炼与金属功能材料. 北京: 冶金工业出版社, 2010

[6] 王振东. 感应炉冶炼工艺技术. 北京: 机械工业出版社, 2012

[7] 陆世英. 超级不锈钢和高镍耐蚀合金. 北京: 化学工业出版社, 2012

作者简介: 杨哲 (1986—), 男, 山西五台人, 高级工程师, 学士, 宝钛集团有限公司。研究方向: 钛、镍及其合金、复合材料加工技术。通信地址: 陕西省宝鸡市宝钛集团老区镍材料公司, 邮编: 721014; E-mail: baotailangzi@163.com。