DOI: 10.3969/j.issn.1000-6826.2023.09.0901

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

为了研究了哈氏合金 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 ℃ 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 ℃ 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 ℃。

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 H_2SO_4+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

作者单位：宝钛集团有限公司，陕西　宝鸡　721014

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 ϕ500 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 ℃，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为参考进行制定：热处理温度为 1050、1100、1150、1200 ℃，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 ℃ 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

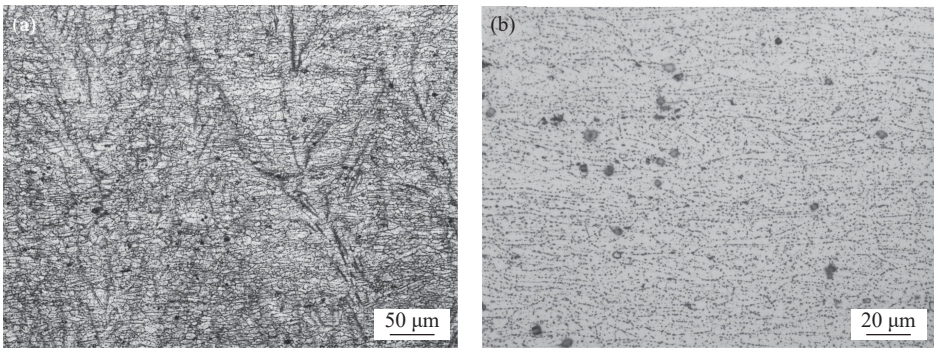

图 1　热轧态哈氏合金 G30 板材低倍 (a) 及高倍 (b) 微观组织

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 ℃ 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 ℃ 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 ℃ 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 ℃ 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 ℃ 时有所长大。为了全面评估 1150 和 1200 ℃ 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

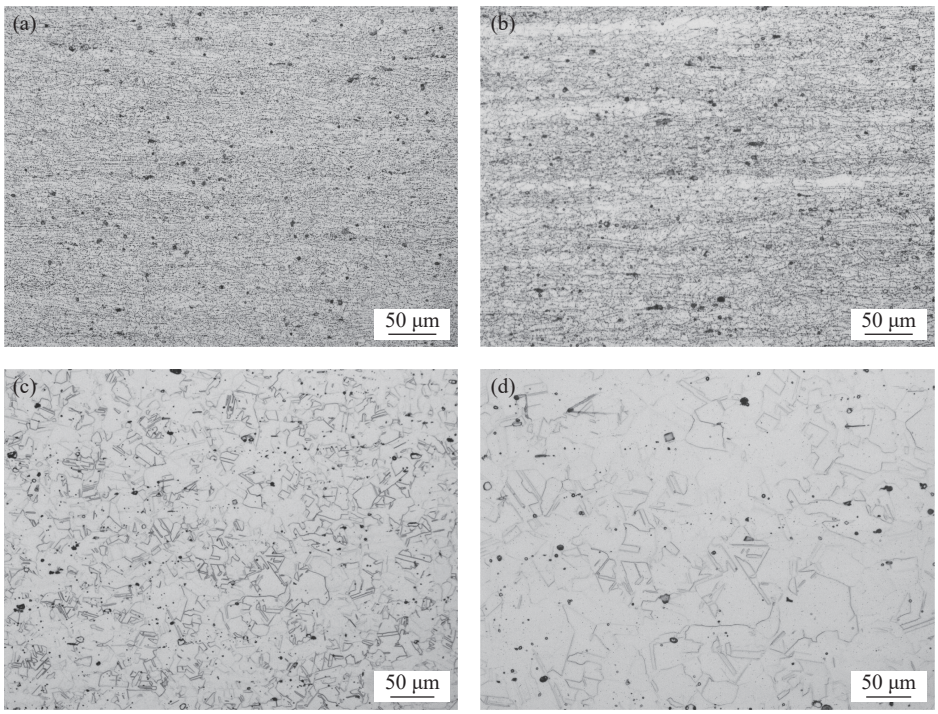

图 2　不同热处理温度下哈氏合金 G30 板材微观组织：(a) 1050 ℃；(b) 1100 ℃；(c) 1150 ℃；(d) 1200 ℃

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和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。

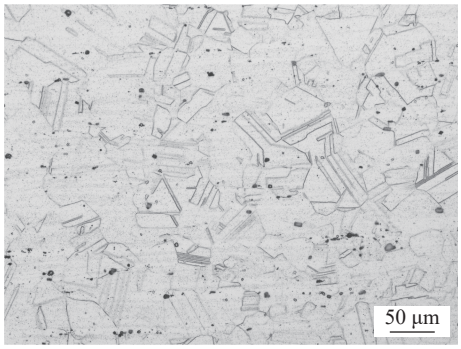

图 3　1170 ℃ 热处理后哈氏合金 G30 板的微观组织

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。

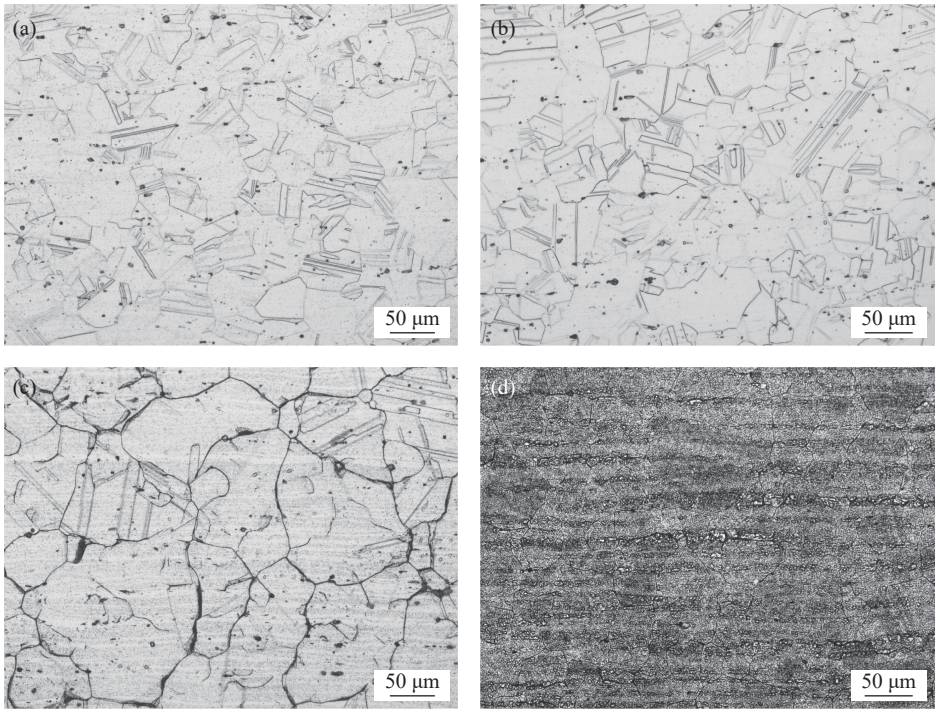

图 4　不同时效温度哈氏合金 G30 板微观组织：(a) 600 ℃；(b) 700 ℃；(c) 800 ℃；(d) 900 ℃

结束语

（1）随着热处理温度由 1050 增加至 1200 ℃，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 ℃，保温 30 min，水冷的热处理工艺后，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 ℃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。