

固溶处理冷却工艺对铸造特超级双相不锈钢 CD3MWN 组织和性能的影响

郑 霏, 陈 伟, 陈亚涛, 王灵水

(中船双瑞(洛阳)特种装备股份有限公司, 河南 洛阳 471023)

摘要: 研究了不同固溶处理冷却工艺(直接水淬和炉冷后水淬)对特超级双相不锈钢 CD3MWN 的组织及性能的影响。结果表明: 在直接水淬的固溶冷却工艺下, 特超级双相不锈钢 CD3MWN 在 1 120 °C 以下热处理时, 随温度的降低, σ 相析出量增多, 材料具有高强度和高硬度; 在 1 120 °C 及以上热处理时, σ 相完全溶解, 此时 α 和 γ 两相比例是影响 CD3MWN 钢性能的决定因素; 与直接水淬相比, 在炉冷后水淬的固溶冷却工艺下, 组织中未析出 σ 相, 为 α 和 γ 两相组织, 两相比例趋近于 1:1, 具有较好的综合性能; CD3MWN 铸件产品生产工程中, 应优先选择炉冷后水淬的固溶冷却工艺, 此时既能保证较好的强度和塑韧性匹配, 也能减少高温水淬给铸件产品带来的风险。

关键词: 固溶处理; 冷却工艺; 特超级双相不锈钢; CD3MWN

双相不锈钢是由奥氏体与铁素体两相组成, 综合性能优异, 广泛应用于存在氯离子环境、海洋工程、石化及天然气、船舶、造纸、电力等行业。当前双相不锈钢的发展已经历 3 代, 自第 3 代超级双相不锈钢开发以来, 由于它们在兼具优良的力学性能和高耐蚀性的同时, 与相近性能的超级奥氏体不锈钢和镍基合金相比, 又具有成本优势, 因此在相关领域的工业应用迅速增长。CD3MWN 是美国 ASTM A890/A890M-12 标准首次提出的铸造特超级双相不锈钢, 属于第 4 代双相不锈钢, 耐点蚀当量 $PREN \geq 45$ 。与第 3 代双相不锈钢相比, CD3MWN 由于含有更高的 Cr、Mo 和 N, 其组织和性能对其热处理工艺更加敏感, 不当的热处理工艺会造成材料的塑韧性及耐蚀性的大幅下降, 影响其正常使用。标准中规定, 热处理温度应不低于 1 130 °C, 炉冷至不低于 1 060 °C 后进行快速冷却, 目前针对不同固溶温度对 CD3MWN 组织和性能的影响已有大量学者^[1-3]进行了研究, 但对标准中规定的固溶后进行炉冷, 然后再进行快速冷却这一冷却工艺鲜见研究, 其对 CD3MWN 组织和性能的影响规律并没有关注。本研究将探讨特超级双相不锈钢 CD3MWN 在进行 1 140 °C 保温处理后, 不同炉冷温度对组织和力学性能的影响规律, 力求掌握其组织和性能变化规律, 以期对特超级双相不锈钢的研究及生产提供一定的指导。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验选用 ASTM A890/A890M CD3MWN 特超级双相不锈钢作为试验材料, 采用纯铁、金属铬、氮化铬铁、电解镍、钼条、钨条、电解锰、硼铁、钨钼合金和硅钡合金等作为原料, 用中频感应炉熔炼, 然后浇注成 260 mm × 170 mm × 40 mm 单基尔试块。根据各项试验要求, 在中心区域采用线切割制备相应尺寸的试样, 使用电阻式热处理炉对试样进行热处理, 然后进行化学、金相和力学性能等各项检测。使用 QSN750-II 光电直读光谱仪、TCH600 气体分析仪对试块化学成分进行分析, 结果见表 1。

作者简介:

郑霏(1993-), 男, 硕士, 主要研究方向为铸造不锈钢。E-mail: cn.zhengfei@outlook.com

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)06-0732-06

收稿日期:

2024-06-03 收到初稿,
2024-07-28 收到修订稿。

表1 试验钢CD3MWN合金化学成分
Tab. 1 The chemical composition of test steel CD3MWN alloy

 $w_B/\%$

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	W	N	Cu	B	Ba	Ce+La
0.029	0.828	2.75	0.011	0.012	27.29	7.13	2.48	3.81	0.341	0.013	0.01	0.0005	0.02

1.2 试验方法

将试验钢CD3MWN分别在1 140 ℃、1 120 ℃、1 100 ℃、1 080 ℃和1 060 ℃下保温2 h后出炉水淬，另有一组选择在1 140 ℃保温后2 h后，分别炉冷至1 120 ℃、1 100 ℃、1 080 ℃、1 060 ℃后出炉水淬，然后采用偏重亚硫酸钠盐酸水溶液侵蚀，通过ZEISS Observer.Z1m金相显微镜观察显微组织，根据GB/T 13305—2008《不锈钢中- α 相面积含量金相测定法》规定，采用OLYCIA M3 LEXT图像处理软件对金相组织图片进行处理，每个温度下选取10个视场，取平均值，测量其铁素体含量和析出相含量；采用JEM-2100透射电镜观察析出相形貌和电子衍射光斑，并采用Genesis X-射线能谱仪对析出相的成分进行分析；采用SINTECH20/G 100 kN材料试验机检测屈服、抗拉强度，试样尺寸 $\Phi 16\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ，中间部位 $\Phi 8.75\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ ；采用HB-3000B布氏硬度计检测试样的布氏硬度，试样尺寸为 $20\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ；采用ZBC 2302-C摆锤式冲击试验机测定试验钢冲击韧性，试样尺寸为 $55\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ，开V型缺口；采用Quanta 650扫描电子显微镜观察冲击断口形貌。

2 试验结果及分析

2.1 固溶处理冷却工艺对 CD3MWN 钢显微组织的影响

特超级双相不锈钢CD3MWN与前3代双相不锈钢类似， α/γ 两相比比例主要取决于化学成分和热处理温度，其中化学成分起主导作用，热处理温度起辅助调节作用。试验钢的化学成分一定，热处理在两相比比例的调节上起到了关键作用。在标准ASTM A890/A890M中规定，CD3MWN钢的热处理温度应不低于1 130 ℃，并炉冷至不低于1 060 ℃后进行快速冷却，因此，探讨不同炉冷温度对CD3MWN钢显微组织的影响规律是很有意义的。

2.1.1 直接水淬

图1(a)-(e)为在不同温度下保温2 h直接水淬后的显微组织，其中深色区域为 α 相，浅灰色区域为 γ 相，在 γ 相界周围有亮白色析出相。从图1中可以看到，奥氏体呈长条状分布在铁素体基体上，随着热处理温度的升高，奥氏体的长宽比不断减少，奥氏体相数量减少并逐渐球形化。从图1(a)和图1(b)中可

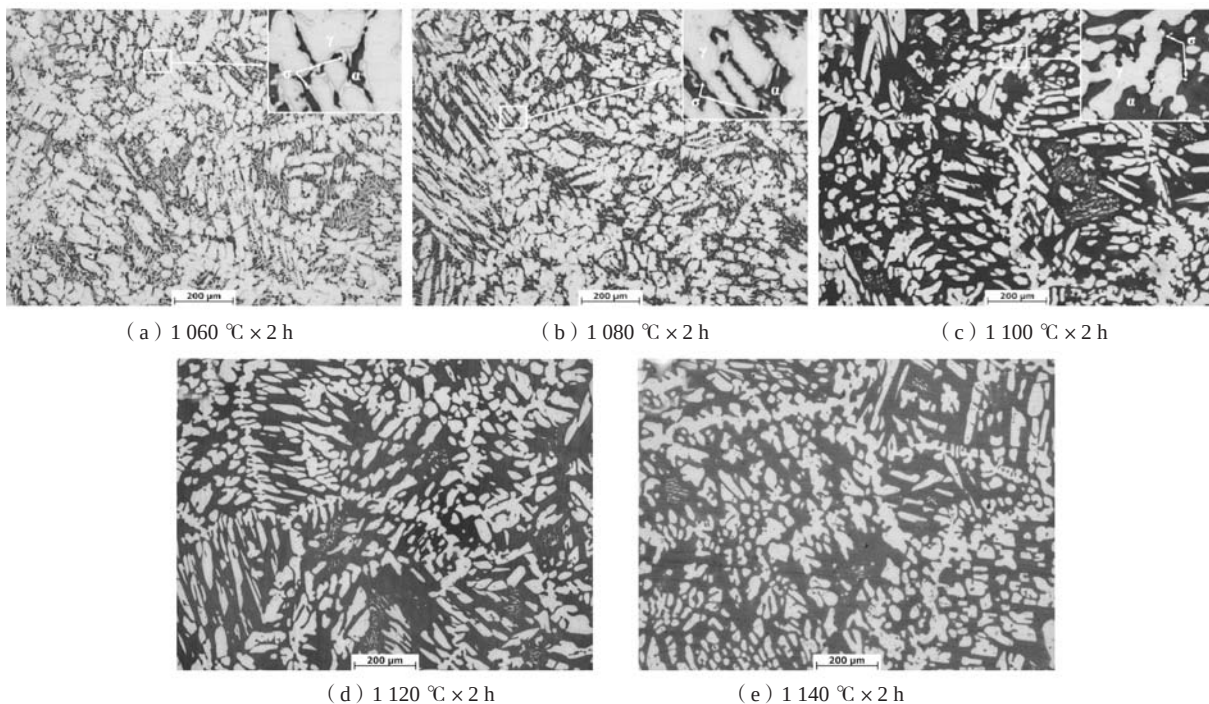


图1 不同热处理温度下CD3MWN试验钢的显微组织

Fig. 1 Microstructures of CD3MWN test steel at different heat treatment temperatures

以看出, 试验钢在1 060 ℃和1 080 ℃热处理后, 组织中有大量未溶解的亮白色析出相, 图1 (c) 中也含少量亮白色析出相, 为了明确析出相的结构和类型, 对试样进行透射电镜分析, 其形貌及电子衍射花样如图2、图3所示, 其为四方结构, 且析出位置均在铁素体和奥氏体的相界面处, 同时表2中的能谱结果显示析出相中富集了大量的铁素体形成元素Cr和Mo, 而 σ 相是一种富Cr和Mo的析出相, 该析出相符合 σ 相的析出规律, 因此断定该析出相为 σ 相。



图2 1 060 ℃热处理产生的析出相形貌

Fig. 2 Morphology of precipitated phase generated through heat treatment at 1 060 ℃ temperature

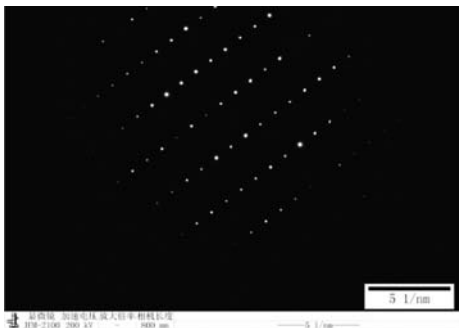


图3 析出相电子衍射花样

Fig. 3 The electron diffraction pattern of precipitation phase

表2 析出相的元素含量

Tab. 2 Element content of precipitated phase $w_B/\%$

Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	W
0.91	32.78	1.95	47.10	3.91	6.39	6.96

而在图1 (d) 和图1 (e) 中未观察到析出相, 说明析出相能够在1 120 ℃以上温度热处理时能够完全溶解。M.Rajkumar^[4]对CD3MWN钢的相图模拟结果显示在1 080 ℃附近钢中仍有 σ 相的存在, 由于计算结果描述了热力学平衡条件, 而在实际热处理和测试过程中, 试验钢处于近平衡状态, 导致试验结果与计算结果存在偏差, 因此试验钢在1 100 ℃热处理时, 组织中仍然有少量 σ 相未完全溶解, 而在1 120 ℃及1 140 ℃保温一段时间后, CD3MWN钢中 σ 相已经充分溶解。

表3为铁素体相含量和 σ 相含量检测结果, 随着热

表3 不同固溶处理温度下试验钢的 α 相和 σ 相含量

Tab. 3 The amount of α phase and σ phase at different temperatures

温度/℃	α 相含量/wt%	σ 相含量/wt%
1 060	22.12	13.96
1 080	36.64	8.41
1 100	51.95	0.95
1 120	54.61	0
1 140	58.34	0

处理温度的升高, 铁素体相含量升高, 在1 100 ℃时铁素体相与奥氏体相两相比例趋近于1 : 1。

2.1.2 炉冷后水淬

图4为1 140 ℃保温2 h后炉冷至不同温度后出炉水淬的组织形貌, 可以看到, 与直接水淬相比, 炉冷后水淬的组织中均未析出 σ 相, 呈现奥氏体和铁素体两相组织, 细长的奥氏体相区更少, 呈现出更加均匀圆滑的奥氏体组织, 奥氏体晶粒逐渐球化^[5-6]。铁素体含量检测结果如表4所示, 与直接水淬相比, 两相比比例更接近1 : 1, 随热处理温度的变化更小。

表4 不同炉冷温度下试验钢的 α 相含量

Tab. 4 The amount of α phase at different furnace cooling temperatures

炉冷温度/℃	α 相含量/wt%
1 060	52.09
1 080	51.99
1 100	52.3
1 120	53.76

有研究表明CD3MWN钢 σ 相析出的最敏感温度约为950 ℃^[7], 因此 σ 相在CD3MWN的等温转变曲线的鼻尖温度约为950 ℃, 而1 060 ℃、1 080 ℃接近于 σ 相的析出温度上限, 需要保温较长时间才会析出 σ 相。在炉冷后水淬时, 在1 140 ℃加热保温2 h后, 铸态CD3MWN钢中的各种析出相已经完全溶解, Cr、Mo、Ni等元素在 α 相和 γ 相中的分配趋于均匀, 两相成分更加相近^[8], 在炉冷过程中, 炉冷到设定温度即取出水淬, 在该温度保持时间不长, Cr、Mo等元素扩散不充分, 不能形成Cr、Mo元素聚集, 影响了 σ 相的析出。

2.2 热处理对力学性能的影响

2.2.1 冲击韧性

图5是CD3MWN钢在不同热处理工艺下室温冲击韧性的变化规律, 由图可知, 当采用直接水淬的工艺时, σ 相对CD3MWN钢的冲击韧性影响显著, 当 σ 相

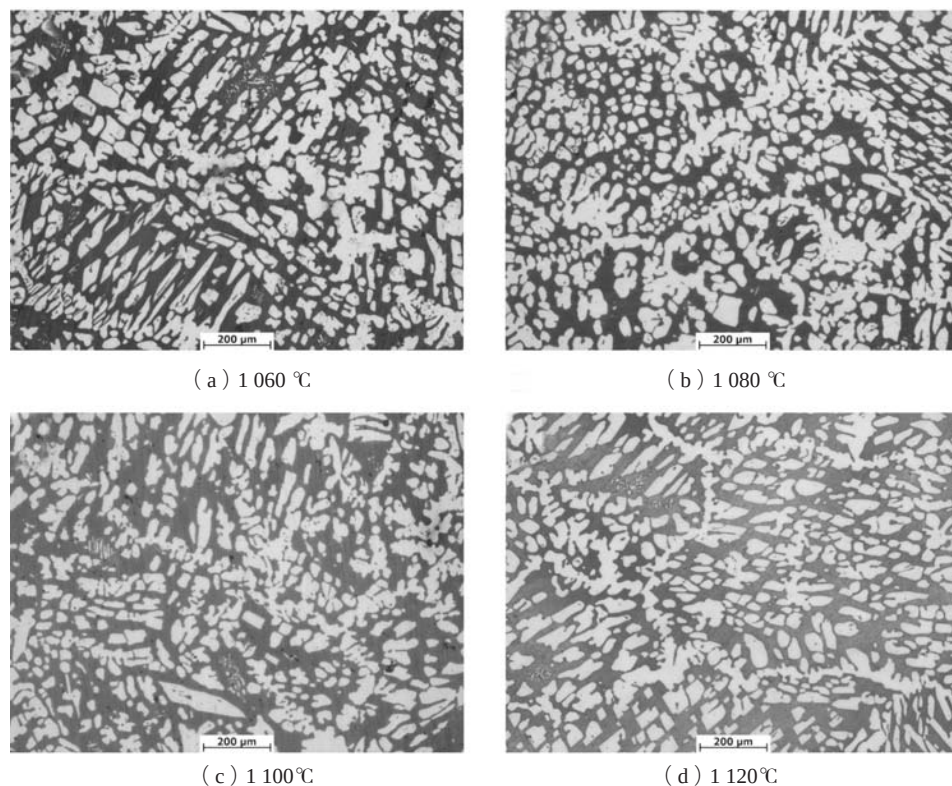


图4 不同炉冷温度下CD3MWN试验钢的显微组织

Fig. 4 Microstructures of CD3MWN test steel at different furnace cooling temperatures

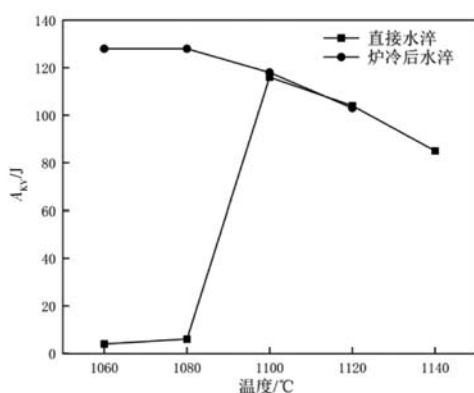


图5 不同热处理温度下的冲击性能

Fig. 5 Impact properties at different heat treatment temperatures

含量较多时,在1 060 °C时仅有4 J,在1 080 °C时也仅有6 J,这是由于 σ 相硬度高,脆性大,具有四方晶格结构,常在铁素体和奥氏体相界面、铁素体晶界处析出,对位错滑移起钉扎作用,阻碍了位错运动,产生平面塞积群,使位错运动困难,同时位错滑移的距离变短,产生了一定的强化效应,同时塑性降低,如图6 (a)所示,可以看到明显的解理断面,几乎没有吸收冲击的能力;相比于低温冲击韧性, σ 相含量较少时对双相不锈钢的室温冲击韧性的影响更小^[9],在1 100 °C时,由于 σ 相含量极少,冲击性能主要受两相比例的影响,其室温冲击韧性依然能够达到117 J;在1 120 °C

及以上时, σ 相完全溶解,随着热处理温度的提高,强硬相 α 相含量升高,软韧相 γ 相含量下降,试验钢呈现出冲击功下降的趋势,如图6 (b)所示为1 120 °C热处理时,试验钢的冲击断面形貌,断面上分布着大小不等的韧窝,图中点状黑色区域是试验钢中的夹杂物,在断裂时这些部位最先从基体脱落,成为韧窝的中心部位。

而当采用炉冷后水淬工艺时,CD3MWN钢的冲击性能主要受到两相比例的影响,随着两相比例的变化,冲击韧性呈现缓慢下降的趋势。

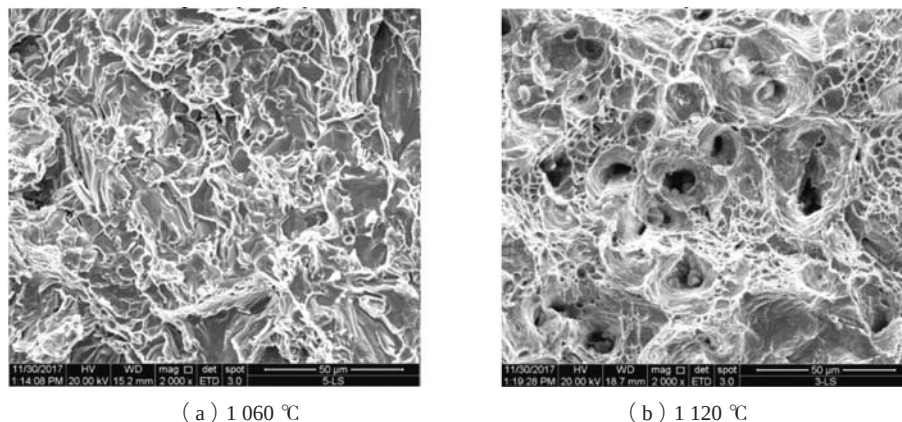
2.2.2 表面硬度

图7所示为CD3MWN钢在不同热处理工艺下表面硬度的变化规律,当直接水淬时,CD3MWN钢在1 060 °C和1 080 °C热处理时硬度较高,随固溶温度的升高,硬度值趋于平稳,这与上述的 σ 相析出温度的规律吻合。

而当采用炉冷后水淬工艺时,CD3MWN钢的硬度值都趋于平稳,随着炉冷温度的提高,铁素体相的比例上升,硬度值呈现略微上升的趋势。

2.2.3 拉伸性能

图8为实测的CD3MWN钢在两种不同热处理工艺下强度值变化规律。由图中可以看出,直接水淬时,



(a) 1060 °C

(b) 1120 °C

图6 试验钢冲击断口形貌

Fig. 6 Morphologies of impact fracture of test steel alloys

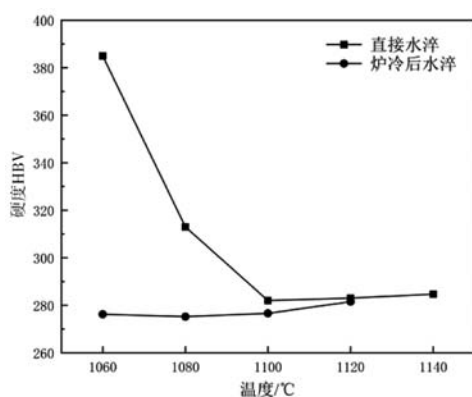


图7 不同热处理温度下的硬度

Fig. 7 Hardnesses at different heat treatment temperatures

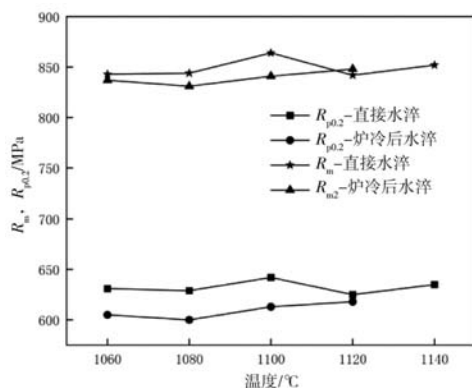


图8 不同热处理温度下CD3MWN钢的抗拉强度与屈服强度

Fig. 8 The tensile strengths and yield strengths of CD3MWN steel at different heat treatment temperatures

试验钢的屈服强度和抗拉强度在1 100 °C达到最高值, 在1 120 °C强度略微下降后又在1 140 °C时升高。

铁素体+奥氏体相比比例的变化以及 σ 相的析出均会对双相不锈钢力学性能产生一定的影响。由于 σ 相通常在铁素体和奥氏体相界面、铁素体晶界处析出, 大大损害了材料的塑韧性, 由图5可知 σ 相的存在对材料的塑韧性影响显著, 但同时 σ 相硬且脆, 具有远

高于铁素体和奥氏体的硬度, 同时对位错具有钉扎作用, 同样能够有效提高合金的强度。

从图8可以看出, 在1 100 °C及以下直接水淬时, σ 相的存在提高了材料的抗拉强度和屈服强度, 在1 100 °C直接水淬时, 由于受到体心立方结构的铁素体相强化和 σ 相强化的双重作用, 抗拉强度和屈服强度达到了最高值; 在1 120 °C直接水淬时, σ 相的强化作用消失, 铁素体增加带来的强化作用不足以抵消由于 σ 相溶解损失的强度, 因此抗拉强度和屈服强度有一个下降趋势, 在1 140 °C直接水淬时, 铁素体含量进一步升高, 抗拉强度和屈服强度也进一步上升。

而在炉冷后水淬时, 材料的显微组织主要是铁素体和奥氏体两相组织, 铁素体含量从51.99%增加到53.76%, 导致屈服强度和抗拉强度有一个缓慢的提升。在1 120 °C热处理时, 直接水淬处理时试验钢中铁素体含量为54.61%, 炉冷后水淬处理时铁素体含量为53.76%, 两种热处理工艺下试验钢的铁素体含量仅相差0.85%, 由于没有 σ 相的存在, 两相比比例决定了试验钢的拉伸强度和屈服强度, 两者抗拉强度和屈服强度达到了同一水平。

2.3 热处理工艺对铸件生产的影响

由于双相不锈钢在高温下非常软, 铸件如果没有足够的支撑, 很容易发生扭曲和变形, 特别是对于大型薄壁铸件, 是一个非常重要的问题。通过缩短热处理保温时间、降低升温速度或采用低于推荐值的热处理温度使变形最小, 但这些处理有可能会使得析出相不会溶解或者导致额外的析出相形成, 从而降低铸件的腐蚀性和韧性。如果铸件的壁厚厚薄不均, 过高的热处理温度使得铸件在快速冷却过程中, 薄壁位置比厚大位置冷得更快, 不同部位存在温度梯度和收缩差异, 往往在铸件内部产生极大的热应力, 进而导致铸件出现变形, 甚至出现裂纹。

综上分析,在生产和加工制造过程中,为了使双相不锈钢具有满意的工程性能,应该优先选择炉冷后水淬的固溶冷却工艺,炉冷温度优先选择1 080 ℃,这样既能保证较好的强度和塑韧性匹配,也能减少高温水淬给铸件产品带来的风险,同时应避免在析出相敏感的温度范围内长时间停留。生产现场对CD3MWN钢铸件固溶处理时,要严格控制固溶后的快冷,尽快通过脆性区间(750~1 080 ℃),冷却池水温应该保持在25 ℃以下,针对薄壁复杂件,还应该进行防变形处理和高温抗氧化处理。

3 结论

(1) CD3MWN特超级双相不锈钢在1 120 ℃以下

直接水淬时,随温度的降低, σ 相析出量增多,材料具有高强度和高硬度;在1 120 ℃以上直接水淬时, σ 相完全溶解,此时铁素体相和奥氏体两相比比例是影响CD3MWN钢性能的决定因素。

(2) CD3MWN特超级双相不锈钢在炉冷后水淬时,组织中未析出 σ 相,为铁素体相和奥氏体相两相组织,两相比比例趋近于1:1,条状奥氏体减少,随炉冷温度的升高,试验钢的冲击韧性呈下降趋势,表面硬度缓慢上升,强度缓慢增强。

(3) CD3MWN钢的最佳热处理方式应优先选择炉冷后水淬的固溶冷却工艺,炉冷温度选择为1 080 ℃,此时既能保证较好的强度和塑韧性匹配,也能减少高温水淬给铸件产品带来的风险。

参考文献:

- [1] BARUNDEB R. Study on properties of hyper-duplex stainless steel 7A of ASTM A890 (CD3MWN) [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2020, 73 (1): 127-134.
- [2] 陈亚涛,郑霏,寇成. 特超级双相不锈钢CD3MWN的组织与性能研究 [J]. 材料开发与应用, 2020, 35 (6): 1-5.
- [3] 黄盛,宋志刚,郑文杰,等. 固溶处理对00Cr27Ni7Mo5N不锈钢的组织及力学性能的影响 [J]. 钢铁, 2011, 46 (12): 71-75.
- [4] RAJKUMAR M, KUMARESH BABU S P, VALLIMANALAN A, et al. Room-temperature erosion behaviour of Nb-stabilized 27Cr-7Ni-Mo-W-N cast hyper-duplex stainless steel (Nb+CD3MWN-7A) [J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series D, 2019, 100: 83-90.
- [5] HAGHDADI N, CIZEK P, HODGSON P D, et al. Microstructure dependence of impact toughness in duplex stainless steels [J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 745: 369-378.
- [6] NITHIN RAJ P, RAHA B. Study on step-annealing heat treatment on properties of grade 6A duplex stainless steels of ASTM A890 [J]. Journal of Institution of Engineers (India): Series D, 2021, 102 (1): 185-193.
- [7] 沈国雄,徐见平,吴汉民,等. 典型Cr-Ni-Mo-N高合金双相不锈钢热加工性能研究 [J]. 特殊钢, 2020, 41 (1): 68-74.
- [8] 吴玖. 双相不锈钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [9] 宋志刚,丰涵,吴晓涵,等. 中国双相不锈钢的发展及研究进展 [J]. 中国冶金, 2022, 32 (6): 2-14.

Influence of Solution Heat Treatment Cooling Process on Microstructure and Properties of Cast Hyper Duplex Stainless Steel CD3MWN

ZHENG Fei, CHEN Wei, CHEN Ya-tao, WANG Ling-shui
(CSSC Sunrui (Luoyang) Special Equipment Co., Ltd., Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract:

The effects of different solution heat treatment cooling processes (direct water quenching and water quenching after furnace cooling) on microstructure and properties of hyper duplex stainless steel CD3MWN were studied. The results show that during direct water quenching solution cooling, when CD3MWN is heat-treated below 1 120 ℃ the amount of σ phase precipitation increases as the temperature decreases, giving the material has high strength and hardness. When heat-treated at 1 120 ℃ and above, the σ phase is completely dissolved, the ratio of the α and γ two phases is the determining factor affecting the properties of CD3MWN steel. Compared to direct water quenching, in the solution cooling process of water quenching after furnace cooling no σ phase precipitates in the microstructure; instead, it's an α and γ phase microstructure with a ratio approaching 1:1, resulting in better comprehensive properties. In the production engineering of CD3MWN casting products, water quenching after furnace cooling is preferred as it ensures good strength-ductility balance and reduces risks associated with high-temperature water quenching.

Key words:

solution treatment; cooling process; hyper-duplex stainless steel; CD3MWN