

· 形变与相变 ·

## 变形量和加热温度对2205双相不锈钢冲击韧性的影响



刘军凯, 于一鹏, 张敬霖, 张建生, 张建福  
(钢铁研究总院有限公司功能材料研究院, 北京 100081)

**摘要:** 分析了20 t电弧炉和炉外精炼(EAF+AOD+LF)相结合的冶炼工艺制备的2205双相不锈钢( $w$ :0.03C, 1.00Si, 2.00Mn, 0.03P, 0.02S, 21.00~23.00Cr, 4.50~6.50Ni, 2.50~3.50Mo, 0.08~0.20N)不同热加工加热温度和变形量对其冲击韧性的影响。试验结果表明,在相同加热温度(950、1050、1120 °C),相同保温时间下(1.5 h),随着变形量的增大(25%、50%、75%),试验钢的晶粒得到较为充分的破碎,但是,过大的变形量造成两相分布不均匀(奥氏体和铁素体),钢中奥氏体含量逐渐降低,其冲击韧性呈现出先增加后减小的趋势;在相同变形量(25%、50%、75%),相同保温时间下(1.5 h),随着加热温度的升高(950、1050、1120 °C),试验钢的晶粒明显粗化,奥氏体含量降低(57.32%→43.07%),由于奥氏体含量在50%左右时的冲击韧性最佳,其冲击韧性也表现出先增加后减小的规律。当加热温度为1050 °C,保温时间为1.5 h,变形量50%时试验钢的冲击韧性最佳,其室温、-10、-46 °C的冲击功分别为299、132、85 J。

**关键词:** 2205双相不锈钢; 加热温度; 变形量; 冲击韧性

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2024-00065 **中图分类号:**TG314.3

## The Influence of Deformation and Heating Temperature on the Impact Toughness of 2205 Duplex Stainless Steel

Liu Junkai, Yu Yipeng, Zhang Jinglin, Zhang Jiansheng, Zhang Jianfu  
(Institute of Functional Materials, Central Iron and Steel Research Institute Limited, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The 2205 duplex stainless steel ( $w$ : 0.03C, 1.00Si, 2.00Mn, 0.03P, 0.02S, 21.00-23.00Cr, 4.50-6.50Ni, 2.50-3.50Mo, 0.08-0.20N) were prepared by a smelting process combining 20 t electric arc furnace and ladle refining (EAF+AOD+LF). Then 2205 duplex stainless steel was hot processed. In this paper, the influence of impact toughness of 2205 duplex stainless steel at different heating temperatures and deformation was studied in hot working process. The test results showed that: At the same heating temperature (950 °C, 1050 °C and 1120 °C) and holding time (1.5 h), with the increase of deformation (25%, 50% and 75%), the grain of test steel was broken more fully, but the excessive deformation of test steel caused uneven distribution of two phases (austenite and ferrite), and the austenite content of steel gradually decreased, the impact toughness showed a trend of increasing first and then decreasing; Under the same deformation amount (25%, 50% and 75%) and the same holding time (1.5 h), with the increase of heating temperature (950 °C, 1050 °C and 1120 °C), the grains size of test steel were obviously coarsened, the austenite content of steel decreased (57.32%→43.07%), because the impact thermal property was best when the austenite content was about 50%, therefore, the impact toughness of steel also showed the law of first increasing and then decreasing. When the heating temperature was 1050 °C, the holding time was 1.5 h and the deformation amount was 50%, the impact toughness of test steel was the best, The impact energy of test steel were 299 J, 132 J, 85 J at room temperature, -10 °C and -46 °C, respectively.

**Key Words:** 2205 Duplex Stainless Steel; Heating Temperature; Deformation; Impact Toughness

2205双相不锈钢是由奥氏体和铁素体两相组成,一般情况下,含量较少的相也要大于30%<sup>[1-3]</sup>。在C含量较低的情况下, $w$ [Cr]为18%~28%, $w$ [Ni]也为3%~10%。有些钢还含有Mo、Cu、Nb、Ti等合金元素,以使钢材具有更加优异的性能。其中,铁素体作为强化相,奥氏体作为韧性相。这类合金同时具备奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的特点<sup>[4-10]</sup>。与铁素体不锈钢<sup>[9-11]</sup>比,塑性、韧性更高,而且不存在

室温脆性,耐晶间腐蚀和焊接性能均得到明显的提高,同时还具有导热系数高等特点;与奥氏体不锈钢相比,其强度和耐氯化物应力腐蚀显著提高<sup>[12-13]</sup>。所以双相不锈钢广泛的应用于石油、化工、海洋和能源环保等领域。

2205双相不锈钢优异的性能主要取决于其化学成分、析出相和组织分布。通过热加工工艺参数的调整,2205双相不锈钢的组织结构会发生变化,

从而改变钢中析出相、铁素体和奥氏体的分布及数量,最终影响 2205 双相不锈钢的力学性能。目前为止,析出相和热处理制度对双相不锈钢力学性能的影响均有研究<sup>[14-17]</sup>,但热加工加热温度和变形量作为其影响因素的研究较少。本文通过大量实验,研究了变形量和加热温度对双相不锈钢冲击韧性的影响,为工厂的规模化生产提供相应的参考依据。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

实验材料采用 20 t 电弧炉+炉外精炼的冶炼工艺(EAF+AOD+LF),浇铸为 19 英寸(482.6 mm)的钢锭(锭重 2 t),将钢锭锻造为  $\phi 200$  mm 的坯料,其化学成分见表 1。

### 1.2 实验与检测方法

取上述  $\phi 200$  mm 高度为 160 mm 的 2205 双相不锈钢作为实验用钢,总共 9 块试样。随后通过 30MN 的快锻机将试验钢在不同加热温度下压至不同高度,空冷至室温,取横向冲击试样,随及对冲击试样进行 1 050 °C×1 h 的固溶处理,具体实验方案见表 2。按照 GB/T229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》开 V 口进行试验。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 变形量和加热温度对显微组织的影响

众所周知,影响金属材料微观组织的因素主要是材料的成分、热加工方式和热处理制度。不同加热温度和不同变形量的 2205 双相不锈钢进行热处理之后的微观组织如图 1 所示,其中,白色区域为奥氏体相,黄色部分为铁素体相。图 1 中的试样经过热处理之后析出相基本回溶于基体组织之中<sup>[14]</sup>,所以析出相对其微观组织和力学性能的影响较小。不同加热温度和变形量试验钢的奥氏体含量和冲击韧性见表 3。

对于同一加热温度,不同变形量而言,当加热温度为 950 °C 时,随着变形量的增加,晶粒细化显著,当变形量达到 75% 时,组织存在大量的奥氏体细小晶粒,但是铁素体和奥氏体分布较不均匀,如图 1(a)(b)(c)所示,其中,图 1(b)的组织最优,此时双相不锈钢的奥氏体含量为 55.04%。同样地,当加

热温度达到 1 050 °C 时,双相不锈钢的锻造塑性得到改善,试验钢的晶粒得到较为充分的破碎,此时终锻温度较高,试验钢进行了较为充分的回复再结晶,且当变形量为 50% 时,双相分布较为均匀,微观组织最佳,此时的奥氏体含量为 50.07%,如图 1(d)(e)(f)所示。由图 1(g)(h)(i)可知,在 1 120 °C 的加热温度下,随着变形量的增大,晶粒破碎充分,经过大变形的 2205 双相不锈钢的微观组织晶粒明显细化;但随着变形量的增加,钢中奥氏体相减少,这是由于随着变形量的增加,双相不锈钢内部温度会有所提高,导致钢中的铁素体相占比增加,换言之,此时,双相不锈钢中的奥氏体含量小于 50%,钢中铁素体较多。

对于同一变形量,不同加热温度而言,如图 1(b)(e)(h)所示,随着加热温度升高,钢中奥氏体相减少,铁素体相增加,但奥氏体晶粒长大;当加热温度过高,钢中晶粒过分粗大,钢中铁素体的含量较高。因为加热温度的升高,钢中奥氏体晶粒的晶界外移,晶粒逐渐长大,而且高温有利于奥氏体转变为铁素体<sup>[14]</sup>。当加热温度较低时,钢中的奥氏体小颗粒较多,但两相分布不均匀。当加热温度为 1 050 °C,保温 1.5 h,变形量为 50% 时,晶粒破碎充分,晶粒大小适中,而且奥氏体相和铁素体相的比例接近 1:1。

### 2.2 变形量和加热温度对双相不锈钢冲击性能的影响

对试样进行冲击性能检验,结果见表 3。由表 3 可见,加热温度为 1 050 °C,保温时间 1.5 h,变形量为 50% 时双相不锈钢的冲击韧性最佳。当加热温度和保温时间不变的情况下,由表 3 d, e, f 可见,双相不锈钢加热温度 1 050 °C,保温时间 1.5 h,变形量分别为 25%、50%、75% 所对应的室温冲击功为 271、299、267 J; -10 °C 的冲击功为 109、132、110 J; -46 °C 的冲击功为 77、85、75 J。随着变形量的增加,双相不锈钢的冲击韧性先升高后降低,造成这种现象出现的原因是变形量较小时,钢中晶粒得不到充分的破碎,造成两相大小分布不均匀,使得双相不锈钢无法充分的发挥细晶强化的作用,从而造成双相不锈钢力学性能较差<sup>[18]</sup>。但是当变形量过大,其晶粒

表 1 2205 双相不锈钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 2205 duplex stainless steel

Table 1 Chemical composition of 2205 duplex stainless steel															%	
C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	V	Mo	Al	Cu	Co	H	O	N	Sn	Fe
0.016	1.09	0.44	0.001	0.028	4.93	22.23	0.12	3.10	0.028	0.10	0.11	0.000 5	0.001 8	0.168	0.002	余

表 2 2205 双相不锈钢实验方案

Table 2 The experimental scheme of 2205 duplex stainless steel

加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	保温时间/h	变形量/%
950	1.5	25
950	1.5	50
950	1.5	75
1 050	1.5	25
1 050	1.5	50
1 050	1.5	75
1 120	1.5	25
1 120	1.5	50
1 120	1.5	75

得到充分破碎,过大的变形量,导致双相不锈钢内部产热过多,提高了双相不锈钢的内部温度,高温会增加钢中铁素体含量,铁素体的塑性弱于奥氏体,双相不锈钢中奥氏体的含量越接近 50%,其力学性能越佳<sup>[18]</sup>,从而会恶化双相不锈钢的冲击

韧性。

当变形量和加热时间不变时,从表 3 b, e, h 可知,双相不锈钢在保温时间 1.5 h,变形量 50%,加热温度为 950、1 050、1 120  $^{\circ}\text{C}$  的室温冲击功为 246、299、275 J; -10  $^{\circ}\text{C}$  的冲击功为 99、132、95 J; -46  $^{\circ}\text{C}$  的冲击功为 44、85、57 J。由此可见,随着加热温度的升高,双相不锈钢的冲击性能同样存在着先升高后降低的规律。因为加热温度的升高,双相不锈钢的锻造塑性得到相应的改善,晶粒得到较为充分的细化,双相不锈钢可以较为充分的回复再结晶。适当高的加热温度也可以使得钢中奥氏体和铁素体相比例和分布更加均衡,从而提高双相不锈钢的冲击韧性,但是当加热温度过高,会导致钢中晶粒过分粗大,细晶强化的效果会大打折扣,且铁素体含量过高,都会恶化双相不锈钢的冲击韧性。

综上所述,加热温度为 1 050  $^{\circ}\text{C}$ ,保温时间 1.5 h,变形量为 50% 时双相不锈钢的冲击韧性最佳。此

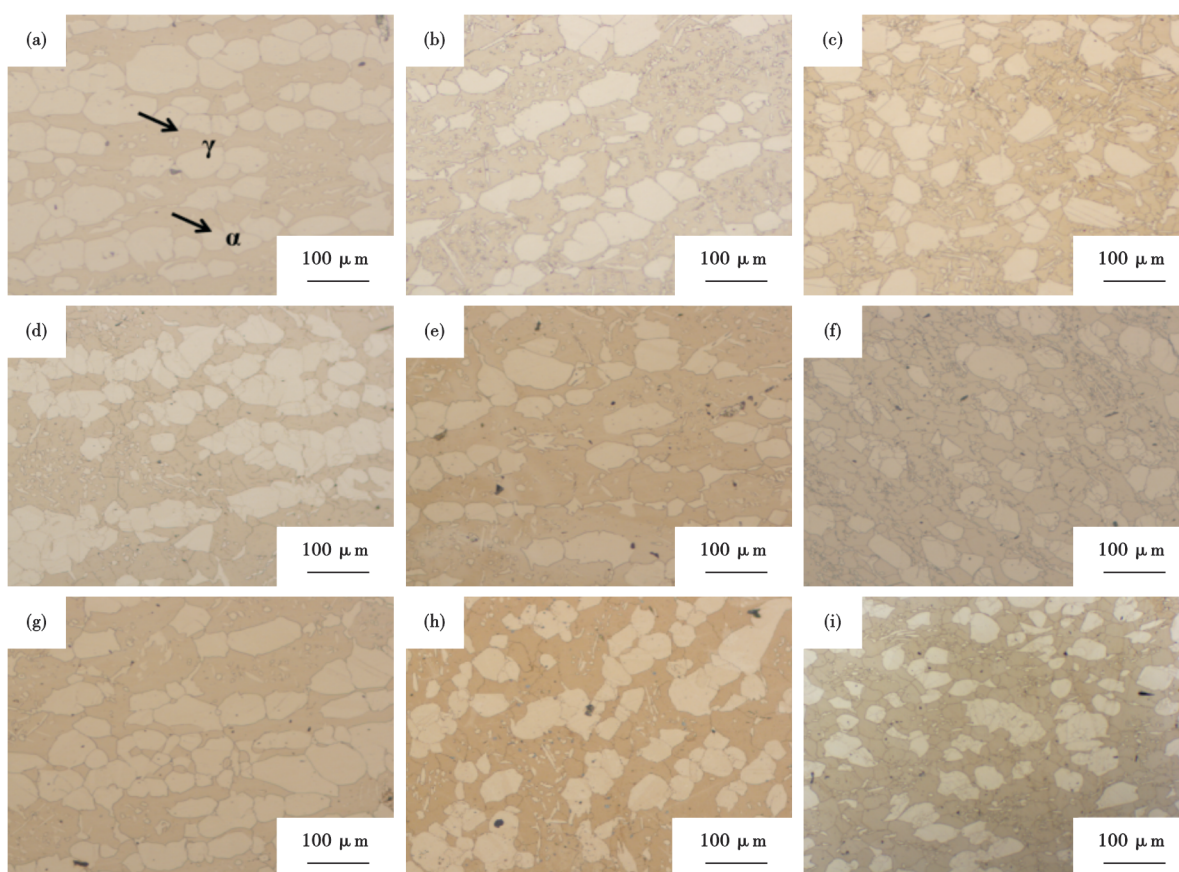


图 1 不同加热温度、时间和变形量的 2205 双相不锈钢的组织:(a) 950  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-25%, (b) 950  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-50%, (c) 950  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-75%, (d) 1 050  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-25%, (e) 1 050  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-50%, (f) 1 050  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-75%, (g) 1 120  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-25%, (h) 1 120  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-50%, (i) 1 120  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-75%

Fig. 1 The microstructure of 2205 duplex stainless steel at different heating temperature, time and deformation : (a) 950  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-25%, (b) 950  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-50%, (c) 950  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-75%, (d) 1 050  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-25%, (e) 1 050  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-50%, (f) 1 050  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-75%, (g) 1 120  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-25%, (h) 1 120  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-50%, (i) 1 120  $^{\circ}\text{C}$ -1.5 h-75%

表 3 不同变形量和不同加热温度下 2205 双相不锈钢的奥氏体含量和冲击韧性

Table 3 The austenite content and impact toughness of 2205 duplex stainless steel at different deformation and heating temperature

序号	加热温度/℃	保温时间/h	变形比/%	奥氏体含量/%	室温冲击功/J	-10℃冲击功/J	-46℃冲击功/J
a	950	1.5	25	57.32	241	96	46
b	950	1.5	50	55.04	246	99	44
c	950	1.5	75	54.33	245	89	46
d	1 050	1.5	25	52.57	271	109	77
e	1 050	1.5	50	50.07	299	132	85
f	1 050	1.5	75	48.79	267	110	75
g	1 120	1.5	25	47.28	246	90	52
h	1 120	1.5	50	45.74	275	95	57
i	1 120	1.5	75	43.07	268	81	53

时 2205 双相不锈钢的室温、-10、-46℃的冲击功分别为 299、132、85 J。

### 3 结论

(1)在加热温度和加热时间不变的情况下,2205 双相不锈钢随着变形量的增加,晶粒逐渐细化,过大变形量导致钢中铁素体和奥氏体两相分布不均匀,钢中奥氏体含量显著降低,造成其冲击韧性先升高后降低。

(2)在变形量和加热时间不变的情况下,2205 双相不锈钢随着加热温度的升高,晶粒逐渐粗化,钢中奥氏体含量降低(57.32%→43.07%),由于奥氏体含量在 50% 性能最佳,从而使得其冲击韧性先升高后降低。

(3)当加热温度为 1 050℃,保温时间 1.5 h,变形量为 50% 时,2205 双相不锈钢的冲击韧性最佳,室温冲击功、-10℃冲击功和-46℃冲击功分别达到 299、132、85 J。

### 参考文献

- [1] 杨宏. 固溶处理对 2205 双相不锈钢组织及性能的影响规律研究[J]. 宽厚板, 2015, 21(6): 1-5.
- [2] 陆世英. 不锈钢概论[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
- [3] 吴 玖. 双相不锈钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [4] 邹 勇, 李建春, 王立新. 时效处理对 SUS445 J2 铁素体不锈钢组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(2): 149-151+156.
- [5] 范游元. 铁素体不锈钢焊接的研究和发展现状[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2014(2): 9-13.
- [6] 朱 琪, 孙 磊, 庞 兵. 奥氏体不锈钢小径管相控阵超声检测方法探究[J]. 电力勘测设计, 2019(3): 49-54.
- [7] 尹士科, 刘奇凡, 贾冬玲. 超级奥氏体不锈钢的焊缝组织和性能概述[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2014(5): 24-29.
- [8] Maetz J Y, Cazottes S, Verdu C, et al. Precipitation and phase transformations in 2101 lean duplex stainless steel during isothermal aging[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(1): 239-253.
- [9] Jiang M K, Han Y, Zu G Q, et al. Effect of Al addition on Nb-rich phase precipitation behavior in ferritic stainless steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 782-788.
- [10] Xing Z Z, Lu H H, Han J S, et al. Tailoring the brittle phase precipitation and mechanical properties in developing ultra-super ferritic stainless steels by Al modification[J]. Materials Design, 2023, 236.
- [11] Spotorno R, Piccardo P. Effect of pressure on high-temperature oxidation of ferritic stainless steels[J]. Materials Science Forum, 2023, 1105: 135-139.
- [12] 李 欣, 吴华杰, 刘颖辉, 等. 固溶处理对铸态 2101 双相钢腐蚀性能的影响[J]. 特殊钢, 2022, 43(5): 86-91.
- [13] 苗华军. 时效处理对超级双相不锈钢 00Cr29Ni6Mo<sub>2</sub>N 组织和耐点蚀性的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(5): 81-84.
- [14] 王 良, 彭荟宁, 赵 攀, 等.  $\sigma$  相对 S32205 双相不锈钢力学性能和耐蚀性的影响[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(4): 113-121.
- [15] 王 良, 杨茗凯, 胡议文, 等. 热处理对 2205 双相不锈钢显微组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(2): 120-128.
- [16] 王 良, 张梦瑶, 何晓晗, 等. 时效处理对 S31803 双相不锈钢  $\sigma$  相析出及性能的影响[J]. 压力容器, 2023, 40(11): 18-25+32.
- [17] 赵 博, 臧 伟, 郜 飞, 等. 时效热处理对新型节镍双相不锈钢组织及性能的影响[J]. 钢管, 2023, 52(1): 25-29.
- [18] 夏 磊. 超级双相不锈钢 00Cr25Ni7Mo4N 组织及冲击韧性研究[D]. 昆明: 云南大学, 2017.