DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.07.009

奥氏体不锈钢仪表壳体抗裂纹性能改善研究

赵旭会,王　辉,蔡宗院
(嘉善鑫海精密铸件有限公司,浙江 嘉善 314105)

摘　要:不锈钢仪表壳体铸件,铁素体含量要求小于 1.0%,水压测试要求零泄漏,生产过程中经常产生裂纹缺陷而报废。铸件结构不允许做修改,通过化学成分调整,添加氮元素合金,替代部分镍合金,来改善裂纹缺陷,同时保证透磁率合格。实验结果表明,铸件铁素体含量、力学性能、金相组织指标合格,也无裂纹缺陷。

关键词:铁素体;镍当量;氮化铬;裂纹;热处理

中图分类号:TG269; TG245　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)07-0594-04

Cracking Resistance Improvement of Austenite Stainless Steel Instrument Housing

ZHAO Xuhui, WANG Hui, CAI Zongyuan
(Jiashan Xinhai Precision Castings Co., Ltd., Jiashan 314105, China)

Abstract: Stainless steel instrument shell casting, ferrite content is required to be less than 1.0%, water pressure test requires zero leakage, often produced in the production process crack defects and scrap. Casting structure is not allowed to be modified, through chemical composition adjustment, adding nitrogen alloy, replace part of the nickel alloy, to improve the crack defect, while ensuring the magnetic permeability qualified. The results show that the ferrite content, mechanical properties and metallographic structure of the casting are qualified, and there is no crack defect.

Key words: permeability; nickel equivalent; chromium nitride; crack; heat treatment

裂纹缺陷多发生在马氏体类或铁素类钢种,但奥氏体不锈钢发生裂纹的机率较小,但当镍含量较高时,由于镍当量影响,易使铸件产生裂纹缺陷。仪表壳体产品,材质为 SCS16 奥氏体不锈钢,相当于国标 ZG0Cr18Ni13Mo2, 要求铁素体含量小 1.0%,壳体经加工后,采用液氮进行压力测试,试验压力大于 3.0 MPa 保压 10 min 不允许泄漏。为了改善裂纹缺陷,在产品结构不允许更改的前提下,只有调整铸件化学元素来改善裂纹。作者通过验证,发现减少镍元素含量,寻找奥氏体替代合金,使用氮化铬铁,增加合金中残余氮元素可以提高合金奥氏体化,代替部分镍合金,从而降低镍元素含量,且铸件铁素体含量及力学性能均能满足技术要求,最终有效改善裂纹缺陷。

1　试验产品仪表壳体结构及技术要求

1.1　产品概况

产品单重 13 kg;最大壁厚:34 mm,加工后最薄壁厚 4.5 mm,平均壁厚:11.6 mm。铸件如图 1,最大轮廓尺寸 450 mm×280 mm×320 mm。

1.2　产品技术要求

产品主要技术要求为:①产品外观需符合 JIS G 5121 的要求,铸件不允许有气孔、夹砂、缩松、裂纹等降低强度缺陷; ②产品组织要求为铁素体大于 0.10%小于 1.02%, 铁素体含量有专用检测仪器检测,内置浮动块飘浮;③壳体粗加工后进行压力试验,试验压力大于 3.0 MPa,介质为液氮,历时保压 10 min,不得有渗漏现象,就要求产品严禁有裂纹缺陷。

金相组织要求铁素体含量大于 0.10%小于 1.02%,即奥氏体需至少达到 98%以上。在生产中,需要严格控制形成奥氏体的合金元素。

1.3　材质成分要求

材质为日标 SCS16 奥氏体不锈钢,相当于国标 ZG0Cr18Ni13Mo2,低碳:小于 0.03%,高铬:17.0%~20.0%,高镍:12.0%~16.0%。

2　试验产品裂纹缺陷位置

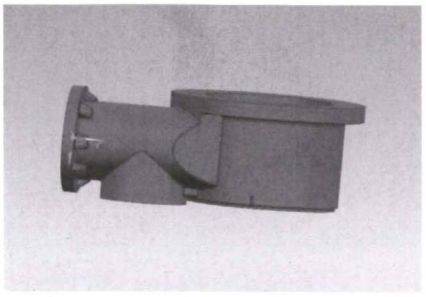
实际生产过程中,为确保铁素体含量在 1.0%以内, 将镍含量标准下线 12.0% 调整到 14.0%以上 。而生产出来的铸件裂纹比例在 60%以上,严重影响订单交期和生产成本。

铁素体含量检测相片如图 2。

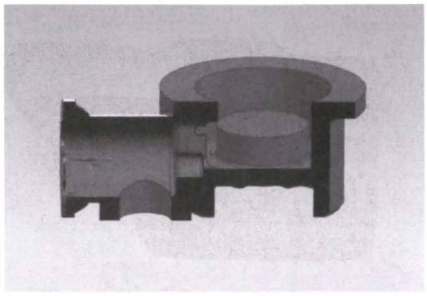
裂纹位置显示,铸件裂纹深度达 10 mm,长度达

收稿日期:2021-03-05

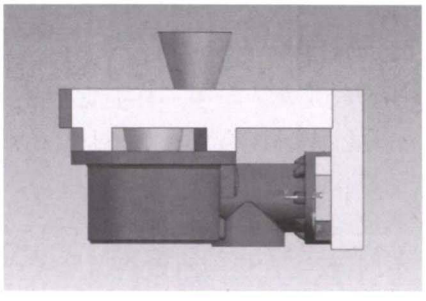
作者简介:赵旭会(1971—),女,四川西充人,工程师.主要从事不锈钢精密铸造工艺方面的工作.
电话:18268426299,Email:xuhui.zhao@sinhai.com.cn



(a)产品三维截图



(b)产品三维剖视图



(c)组树工艺三维示意图



(d)产品实物组树工艺

图 1 不锈钢仪表壳三维结构示意图及熔模铸造蜡模树

Fig.1 Schematic stainless steel instrument housing and the wax patter tree

表 1 SCS16 奥氏体不锈钢铸件化学成分 w(%)

Tab.1 Chemical composition of SCS16 austenitic stainless steel castings

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
≤0.03	≤1.50	≤2.00	≤0.040	≤0.040	17.00～20.00	12.00～16.00	2.00~3.00

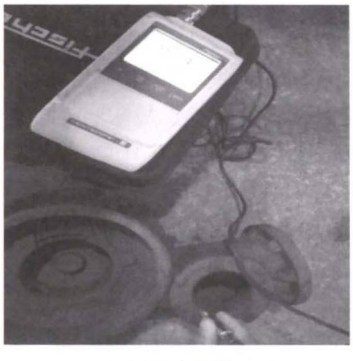
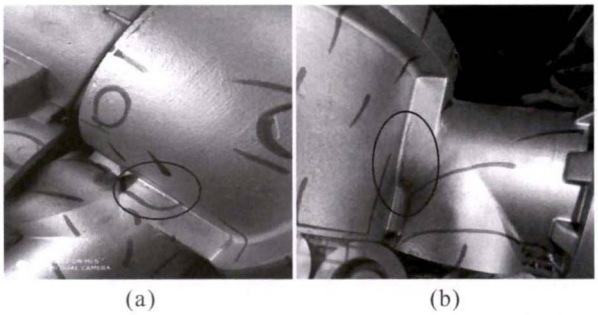


图 2 检测铁素体含量

Fig.2 Detection of ferrite content



(a)　　(b)

图 3 裂纹缺陷位置

Fig.3 Location of crack defects

60 mm，图 3 为实物裂纹缺陷。

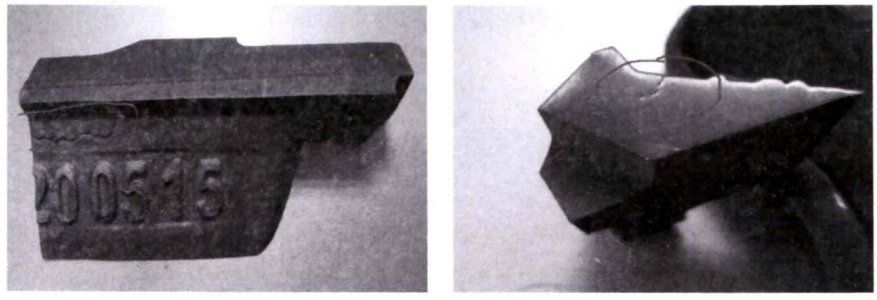
3 裂纹分析及改善对策

3.1 实物裂纹剖切分析

对裂纹缺陷位置进行线切割，发现裂纹深度达 15 mm，见图 4。

由图 4 铸件裂纹切割后状态看出，裂纹表面呈氧化色 (铸钢件裂纹表面近似黑色，铝合金呈暗灰色)，不光滑，可以看到树枝晶。裂纹是沿晶界产生和发展的，外形曲折。确定铸件裂纹为热裂。铸件的凝固方式和凝固时期铸件的热应力和收缩应力。

铸件产生热裂的原因有：①合金性质的影响，主要决定于合金在热裂形成温度范围内的绝对收缩量和强度。所有能够扩大有效结晶温度范围的元素，都将增大热裂倾向。凡是能够减少合金在有效结晶温度范围内绝对收缩量的元素和相变，都将减小热裂倾向；②铸型阻力的影响，铸型的阻力大小主要取决于铸型或型壳的退让性。铸型退让性好，铸件受到的阻力小，形成热裂的可能性也愈小。值得注意的是，铸型退让性对产生热裂的影响不仅与其退让性大小有关，更重要的还与其退让的时间有关。如果型壳受热而引起抗压强度升高达到最大值的时间恰好与铸件凝固即将结束的时间相吻合，则产生热裂的可能性最大；③浇、冒口系统分布的影响：铸件在靠近浇口和冒口的部位，其凝固和冷却都较慢，温度较高，当铸件收缩受阻时，该部位易形成热裂。因此为保证顺序凝固防止铸件产生缩孔而采取的浇、冒口



(a) (b)

图 4 断面解剖显示裂纹深度达 15 mm

Fig.4 Section shows crack reaching 15 mm depth

布置方案会有造成热裂的危险。所以,在确定采用顺序凝固或同时凝固原则时,对于防止缩孔和热裂之间往往存在着矛盾。浇注系统结构不当,阻碍铸件的收缩,可能导致铸件热裂。同样,铸件的披缝太多,亦可能阻碍铸件收缩,引起铸件热裂;④浇注工艺的影响,浇注工艺的选择视铸件的厚薄而定。对于薄壁铸件要求较高的浇注温度和快的浇注速度。除了为保证流动性的要求外,还可以减缓铸件的凝固速度,延长高温对铸型的作用时间,从而增加铸型的退让性,有利于防止铸件外热裂。至于厚铸件,则应采用较低的浇注温度和较慢的浇注速度,以免因缩孔体积增大、初晶粗化及偏析等原因促使铸件产生内热裂;⑤铸件结构的影响,铸件结构设计不合理,使局部造成过厚的热节或引起应力集中现象,则热裂易在这些部位形成。在铸件厚薄不均的厚实部分和铸件壁十字交接处都易形成热裂。

因产品为精密铸造生产,且裂纹位置在转角位置,铸型及型壳阻力影响基本可以排除。而裂纹产生部位是在内浇道下部转角处,该部位是明显的热节区,其内浇道不可以取消。产品生工艺是硅溶胶精密铸造,也适合在此部位采用冒口方式改善,所以浇注工艺不能改变。由以上分析可知,产生铸件结构是造成裂纹的一个重要原因,经与研发人员分析讨论,产品结构不允许做任何修改。综上分析,本文铸件产生热裂的的改善措施只能从化学成分这一途径进行改善。

3.2 化学成分分析

SCS16 是奥氏体不锈钢,相当于国标 ZG0Cr18Ni13Mo2,其铸态组织为奥氏体+少量铁素体+少量碳化物。要使不锈钢铁素体含量低于 1.0%,奥氏体含量必需达 98%以上。

奥氏体不锈钢金相组织中的铁素体含量,与铬镍比(CrE / NiE)密切相关。

不锈钢的各元素都有各自的组织倾向,其中镍是最主要的奥氏体形成元素,而铬是最主要的铁素体形成元素。与镍一样能促使奥氏体形成的元素还有:锰,铝,氮,碳等,只不过其影响力大小不同,其综合作用叫做镍当量(NiE);与铬一样能促使铁素体形成的元素还有硅,钼,铌等,只不过其影响力大小不同,其综合作用叫做铬当量(CrE)。

镍当量和铬当量是一个矛盾的统一体,必须达到最佳配合,才能使钢形成单一奥氏体组织。也就是说,必须使其配合向着有利于形成奥氏体的方向倾斜才行。从下列经验公式可以计算出来:

镍当量 NiE = Ni+30C+0.5Mn+26(N-0.02)+2.77

铬当量 CrE = Cr+1.5Si+Mo+Nb-4.99

铬当量与镍当量的比值叫做铬镍比。只有铬镍比小于或等于 0.9 时,才能从理论上形成单一奥氏体组织。这在实际生产中是很难完全达到的。因为即使所有元素的含量都在标准要求的合格范围之内,如果奥氏体形成元素含量居于中下限,而铁素体形成元素含量居于中上限,则铬镍比仍会大于 0.9。当铬镍比接近 1 时,不锈钢中铁素体含量就会达到 1.0%。而且由于精密铸造是热壳浇注(浇注时型壳温度 1 100 ℃以上),所以浇注后铸件冷却非常缓慢,铁素体就更容易析出。所以应尽量将铬镍比控制到 0.9 以下。而我们的炉前实际化学成分如表 2。

表2 实际炉前分析化学成分 w(%)

Tab.2 Furnace chemical composition

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.027	0.720	1.861	0.023	0.009	17.680	14.130	2.060

利用上述经验公式,代入上表中的实际化学成分计算,实际镍当量 NiE=16.74,实际铬当量 CrE=15.83,则铬镍比 CrE / NiE=0.946。这样高的铬镍比,再加上浇注后冷却缓慢,所以铁素体含量超过 1.0%在所难免。为此,我们决定将镍含量控制到 14.0%以上,同时将铬含量控制到中下限,这样铬镍比就会降低到 0.9 以下。

对比常规产品材质后发现,产生裂纹缺陷的原因,就是镍含量提高造成。

3.3 裂纹缺陷改善对策

经过分析得出产品有两处位置有裂纹倾向。但该产品终端客户为日本客户，客户不同意对铸件结构有任何改动。

铸件结构不允许修改，且裂纹缺陷是发生在调整镍当量后产生，综合原因得出，是否可以通过替代镍元素的元素，降低镍元素，又能满足镍元素的作用，保证铁素体含量合格。

该材质的化学成分标准中没有明确规定氮元素含量，所以允许加入微量的氮。氮在不锈钢中是强烈形成奥氏体的元素，根据上述经验公式，一个单位的氮，其促进奥氏体形成的作用相当于近26倍的镍。而且氮可以对基体起到固溶强化作用，而不损害钢的塑性和韧性；但是氮不能加入太多，因为氮超过一定数量时，在钢中就会达到过饱和，由于氮的析出和氮能促进氢的析出，使铸件容易出现气孔和疏松。所以我们决定采用氮化铬合金加入微量的氮，来代替部分镍，在降低铬镍比、减少铁素体析出、满足铸件透磁率要求的同时，改善裂纹缺陷。

经过研究分析，决定将镍含量控制在下限12.2%~12.3%，再提高标准中没有规定的氮元素，采用添加氮化铬铁合金，将氮含量控制在0.10%~0.12%，来确保铁素体含量在标准1.0%以内，同时改善裂纹缺陷。

4 调整化学成分后铸件生产、热处理后力学性能验证

4.1 调整成分验证

经过生产验证，将镍含量控制在标准下线：12.2%~12.3%，氮含量控制在0.10%~0.15%，铸件检测铁素体含量符合技术要求1.0%以内，铸件检验无裂纹缺陷。表3为调整后的光谱实测化学成分。

表3 调整成分后实际炉前分析化学成分 w(%)

Tab.3 Actual analysis of chemical composition before furnace after composition adjustment

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
0.026	0.650	1.840	0.027	0.008	17.760	12.280	2.050	0.105

4.2 力学性能

本产品热处理工艺选择固溶热处理，固溶工艺为：入炉温度不高于300 ℃，升温速率150~200 ℃，温度升至1 080±10 ℃，保温3.5 h出炉。出炉后，在15 h内淬水冷却，水温在30 ℃以下，冷却到常温后吊出。

热处理后，试棒及试块测试机械性能合格。表4为实测力学性能。

表4 力学性能

Tab.4 Mechanical property; mechanical capacity

抗拉强度	σ_b/MPa	伸长率 δ_5(%)	断面收缩 ψ(%)	硬度(HB)
标准	≥520	≥40	≥50	≤187
实测	630	63	67	179

4.3 材料金相图

热处理后，对试块进行金相组织检测，试块金相检测显示合格。此铸件金相组织为：奥氏体+少量游离铁素体+微量碳化物(见图5)。

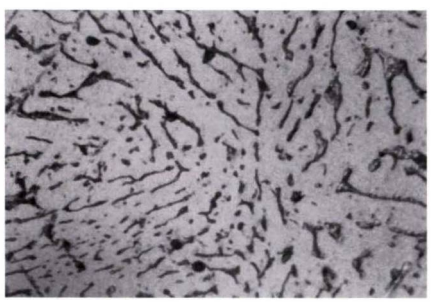


图5 加入氮化铬铁后金相检测照片

Fig.5 Metallograph of the stainless steel after adding ferrochrome nitride

5 结论

(1)SCS16奥氏体不锈钢，铁素体含量要求低于1.0%，镍含量需按标准中上线进行控制。在产品不允许做结构修改的前提下，铸件铸造后产生高比例裂纹缺陷而报废。

(2)经过分析验证，调整合金成分，通过加入氮化铬合金，提高氮元素，从而提高金属奥氏体含量，降低镍当量，保证铁素体含量低于1.0%而力学性能合格，同时也解决了裂纹缺陷。

参考文献：

[1] 范修谦. 铸造奥氏体不锈钢的铬镍当量比和相对磁导率 [J]. 特种铸造及有色合金，2011，31(5):439-441.

[2] 郭平. 一种改善奥氏体不锈钢锻件表面裂纹缺陷的加工工艺：CN111471919A[P]. 2020.7.31.

[3] 王强. 2Cr12NiMWoVNb钢的δ—铁素体含量的控制[J]. 特钢技术9.2(2001):16-20.2001.

[4] 钟政烨，盛光敏. 200系奥氏体不锈钢热轧裂纹的产生原因及其工艺改进[J]. 机械工程材料，2010(4):79-83.

[5] 石锋，崔文芳，王立军，等. 高氮奥氏体不锈钢研究进展[J]. 上海金属，2006(05):45-50.

[6] 袁志钟，戴起勋，程晓农，等. 氮在奥氏体不锈钢中的作用[J]. 江苏大学学报(自然科学版)，2002(3):72-75.