● 工艺技术 Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.11.006

铸造隔断冷铁的设计与实践

张吉雁[1],刘仲礼[2],张 彬[1]

(1.烟台台海玛努尔核电设备股份有限公司,山东 烟台 264000;2 烟台大学 核装备与核工程学院,山东 烟台 264000)

摘 要:在铸造生产中,隔断冷铁放置于两冒口之间,控制凝固方向,延长补缩距离,提高工艺出品率,但如果使用不当,易引起缩松和裂纹等缺陷。从铸件等效壁厚、冷铁影响区、冷铁吸热能力等方面考虑,制定出一套隔断冷铁的设计方法,可以计算出冷铁的长度、宽度、厚度和间距的尺寸参数值。在实践中,从减轻缺陷产生的角度,提出一些冷铁的应用变化形式和防止缺陷产生的措施。

关键词:隔断冷铁;缩松;热裂纹;等效壁厚

中图分类号:TG242 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)11-1030-04

Design and Practice of Partition Chillers in Casting

ZHANG JIyan[1], LIU Zhongli[2], ZHANG Bin[1]

(1. Yantai Taihai Manoir Nuclear Equipment Co., Ltd., Yantai 264000, China; 2. School of Nuclear Equipment and Nuclear Engineering, Yantai University. Yantai 264000, China)

Abstract: In casting production, the partition chiller is placed between two risers to control the solidification direction, extend the filling and shrinking distance and improve the process yield. However, if it was not used properly, it is easy to cause shrinkage and cracks and other defects. Considering the equivalent wall thickness of the casting, the influence zone of the chill and the heat absorption capacity of the chill, a set of design method for separating the chill was worked out, and the dimension parameters of the length, width, thickness and spacing of the chill could be calculated. In practice, from the point of view of reducing the occurrence of defects, some application changes of chiller and measures to prevent the occurrence of defects are put forward.

Key words: Drag Chill; shrinkage porosity; hot crack; equivalent thickness

在铸造工艺设计时,根据冷铁放置位置及主要作用的不同,可分为两种:加快整体冷却效果,减少凝固时间,降低铸件模数的冷铁;控制局部快速冷却,延长补缩距离的隔断冷铁[1]。在铸造生产中,隔断冷铁常放置于两处热节或两冒口之间,用于控制凝固开始的位置和凝固方向,延长补缩距离,可以减少冒口的数量。在钢液凝固过程中,通过冷铁的激冷作用,使铸件局部先于周围凝固,并使凝固由此点逐渐向外延展,产生顺序凝固的效果,并使凝固向着冒口方向进行,使最终的缩孔集中于冒口内部,从而对铸件进行有效的补缩,消除缩松缺陷,提高铸造内在质量。使用隔断冷铁可以提高钢液工艺出品率,降低成本。

1 隔断冷铁的作用与形式

引用文献[3]中隔断冷铁延长补缩距离的效果如图1。铸件材料为中碳钢,板形结构。

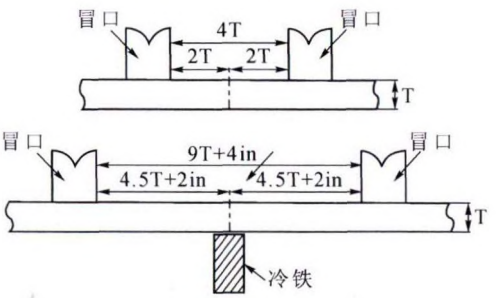

图1 采用中间冷铁延长补缩距离

Fig.1 Increase feeding distance by using drag chill

在图1中,无冷铁时,两冒口之间能够补缩的距离为两倍冒口热影响区4T,而通过在两冒口中间增加隔断冷铁(相当于末端激冷效果),补缩距离可达到9T+4in,从而达到延长补缩距离的作用。

当铸件结构为长宽比例较小的杆状结构时,隔断冷铁可采用独立单块,当铸件结构为板形结构时,为防止过长冷铁引起的裂纹缺陷和操作不易,一般采用排列的多块冷铁组合。结构上采用形式见图2。

收稿日期:2020-08-26

作者简介:张吉雁(1973-),山东烟台人,高级工程师.主要从事铸造工艺设计研究方面的工作.电话:0535-3726552,E-mail:zhangjiyan08@163.com

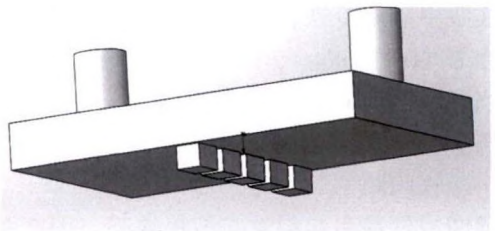

图 2 隔断冷铁的布置图
Fig.2 Layout of partition chillers

2 隔断冷铁设计和生产中常见的问题

从冷铁的加快冷却角度看，冷铁的尺寸越大效果越好，但实际生产中，太大的冷铁带来一系列问题：液态金属在冷铁激冷区温度下降太快，引起皱皮、冷隔等缺陷；凝固过程中，冷铁激冷层与砂型激冷层厚度差别太大，凝固收缩应力易引起热裂纹缺陷；当冷铁尺寸与铸件尺寸不匹配时，冷铁周围易产生显微缩松缺陷。另外，在生产中，冷铁摆放位置易发生错位和偏移，冷铁表面涂料层厚度不均匀，钢液流动过程中局部过热等因素也会导致设计与实际效果相差很大。当隔断冷铁条形布置时，由于冷铁相互影响，更易形成裂纹缺陷和内部缩松缺陷。

冷铁引起的缺陷根本原因是冷铁和砂型的吸热能力不同，钢液在冷铁区和周围砂型区形成较大的的温度差，冷铁区钢液快速凝固，凝固的不均衡导致一系列的缺陷产生。因此，冷铁的尺寸设计既要满足隔断要求，保证一定的激冷效果，又不希望过大的激冷带来负面的影响。

3 隔断冷铁的工艺尺寸设计

冷铁设计的主要参数有长度、宽度、厚度及冷铁布置间距。本文以铸件结构的等效模数为基础，采用模数对比方法，按照冷铁吸热能力来计算和设计冷铁的尺寸参数。

3.1 以等效壁厚为基础进行计算

以铸件实际壁厚为基础计算的冷铁尺寸往往较大，其原因是铸件的截面的形状不同，当截面宽度与厚度比例较小时，铸件属于杆形结构，只有当宽厚比大于 10 倍以上时，才相当于板形结构。等效壁厚计算公式如下，对应模数为等效壁厚的一半，所以等效壁厚与凝固时间的比值较稳定，可以更好地反映实际的凝固时间。

$$E=\frac{AB}{A+B}$$

$$M=\frac{E}{2}=0.5\frac{AB}{A+B}$$

式中，E 为等效壁厚；M 为铸件截面部位模数；A 为截面宽度；B 为截面厚度

3.2 激冷区模数计算

根据《铸造手册》[5]介绍，几何模数相同的铸件，用金属型铸造时的模数仅为砂型铸造时模数的 1/2。实际生产时，冷铁难以布满铸件表面，冷铁之间存在间距，因此，放置隔断冷铁后的模数公式不能完全采用公式 $M_r=M_o/2$（无气隙）和 $M_r=2M_o/3$（有气隙）。M_o 为铸件模数，M_r 为放置冷铁后铸件模数。

隔断冷铁作用的影响区见图 3。铸件等效壁厚 E，冷铁尺寸：长×宽×厚 $=a\times b\times c$，间距 s（当只有单块冷铁时，s 取 c 计算）。

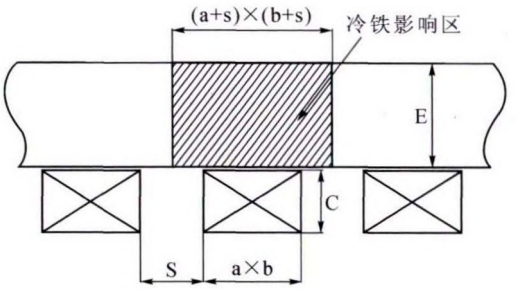

图 3 冷铁影响区
Fig.3 The influence area of chills

当两冷铁之间区域钢液凝固时，可以认为隔断开始起作用，因此，把体积 $(a+s)\times(b+s)\times E$ 作为每块冷铁的影响，进行模数计算。根据《铸造手册》中计算冷铁重量的公式(1)，对铸钢件，假设钢液充型温度为 1 550 ℃，冷铁影响区凝固结束时冷铁平均温度为 600 ℃，可换算公式(2)。

$$G_{ch}=7.4V_0\frac{M_0-M_r}{M_0} \tag{1}$$

$$7.8abc=7.4(a+s)(b+s)E\frac{M_0-M_r}{M_0}$$

$$M_r=\frac{7.4(a+s)(b+s)E-7.8abc}{7.4(a+s)(b+s)E}M_o \tag{2}$$

以上计算并没有区别冷铁是否存在气隙，仅考虑冷铁的吸热能力的对凝固的影响。

激冷区模数与相邻模数的之比选择原则：$M_r=(0.7\sim0.9)M_o$。凝固时间之比约为 $T_r=(0.5\sim0.8)T_o$。

3.3 隔断冷铁尺寸

3.3.1 冷铁厚度

冷铁影响区的凝固过程，在凝固初期，快速形成激冷层，随着时间进行，激冷层厚度变化程度减少，激冷效果下降。从作用时间上看，薄壁结构采用冷铁时激冷效果快速完成，厚壁铸件的冷铁效果不能快速完成，为保证最终结果，需要把冷铁厚度比例增加。图 4 为随着等效壁厚增加，厚度系数 x 相应增加。

实践中常选择比例 $x=0.66$，计算后取整。

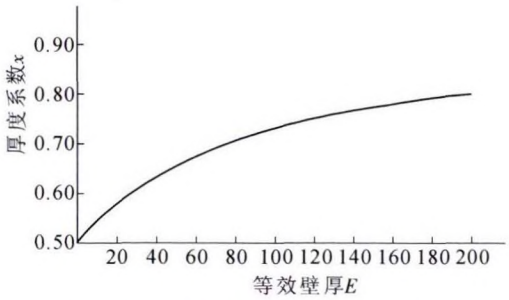

图 4 与等效壁厚相关的冷铁厚度系数 x

Fig.4 Coefficient x of chill thickness affected by the equivalent wall

冷铁厚度选择还受到隔断区截面形状的影响，设截面宽度为 A，厚度为 B，形状系数 y 与截面比的关系见图 5。截面比大于 10~12 时，当成板形结构，系数为 1。

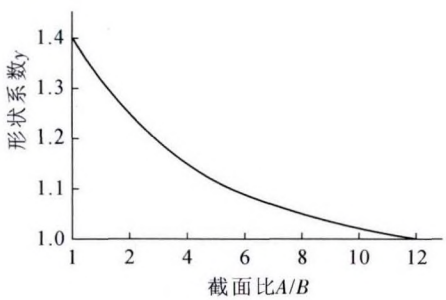

图 5 与铸件截面形状相关的冷铁厚度系数 y

Fig.5 Coefficient y of chill thickness affected by the casting section shape

冷铁设计厚度：$c=xyE$

当铸件厚度 E 超过 150~200 mm 时，易采用双面冷铁。

3.3.2 冷铁长度和宽度

放置冷铁的部位在凝固时，冷铁中心正对位置是凝固起点，易产生缩松缺陷，随着长度或宽度增加，缩松区加大；随着冷铁厚度尺寸变大，激冷区与周围区温度差加大，裂纹倾向加大。所以，冷铁长度和宽度随着冷铁厚度增加应逐渐减少，长度、宽度与厚度的比例关系见图 6。随着铸件壁厚增加，冷铁尺寸也相应变大，当冷铁长与宽度超过 150 mm 时，易选用双面冷铁，防止过大尺寸引起裂纹。

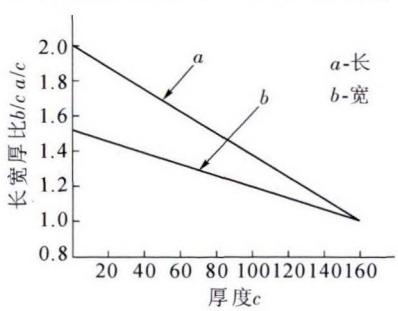

图 6 冷铁长度、宽度与厚度比例

Fig.6 The ratio of chill length and width to thickness

实践中隔断冷铁长宽厚比例常选用以下几种：

当 $E<60$ 时，$a:b:c=2:1.5:1$

当 $60<E<150$ 时，$a:b:c=1.5:1.2:1$

当 $E>150$ 时，$a:b:c=1:1:1$

3.3.3 冷铁间距

隔断冷铁易引起裂纹与缩松缺陷。图 7 是在板形铸件上放置一排不同间距冷铁的模拟结果，可以分析缺陷产生的规律性。模拟主要参数：铸板壁厚 $E=100$ mm，冷铁尺寸 $a\times b\times c=120$ mm×90 mm×60 mm，材料中碳钢，树脂砂型，间距分别为：20,40,60,80,100,120 mm。模拟结果显示：热裂纹倾向，间距 40 mm 时最严重，间距 100 mm 以上时，基本无影响；缩松倾向，冷铁正对的铸件中心及冷铁之间均存在缩松，缩松程度很低。

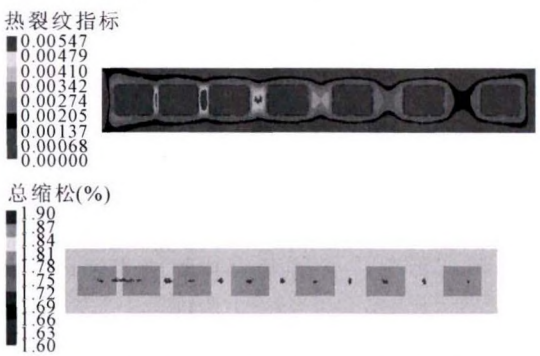

图 7 不同间距下，隔断冷铁的缩松和裂纹倾向

Fig.7 The shrinkage and crack tendency at different intervals

文献[2]介绍了冷铁周围热裂纹产生的原因：钢液在凝固过程中，冷铁激冷层快速形成，与周围砂型激冷层形成较大的厚度差，冷铁激冷层的收缩力大于周围凝固层强度，产生热裂纹。模拟结果显示：间距较小时凝固层强度高，裂纹倾向小；间隔较大时，随着激冷层区域扩大，时间延长，作用在冷铁之间的收缩应力减少，裂纹倾向小；当间距在其之间时，凝固层强度低而收缩应力大，热裂纹产生倾向变大。

隔断冷铁在两冷铁中间和冷铁正对面出现缩松，产生原因：这些部位是两个凝固前沿相交的起始位置，但其缩松程度一般较低，不会超出检测要求。如果冷铁尺寸较大时，凝固前沿的梯度不足，也会产生较严重缩松。当缩松与应力相互相作用时，易形成内部的缩裂缺陷。

综合以上的分析：隔断冷铁缩松不可避免，但可以通过减少冷铁长宽度来降低缩松级别，缩松受冷铁间距影响较小；在间距较小或较大时裂纹倾向较小，但间距较小时现场不易操作，故选择较大冷铁间距。随着间距 s 的增加，Mr 也增大，当 Mr/Mo 大于 0.9，隔断不充分。因此，间隙选择既要考虑防止缺陷，也要防止隔断不充分。冷铁间距选择与冷铁厚度关系如图 8。

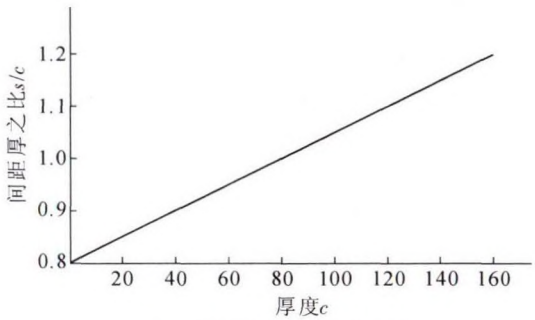

图 8 冷铁间距与厚度比例

Fig.8 The ratio of interval to thickness of chills

3.4 隔断冷铁增加厚度设计

当冷铁影响区模数 $Mr=(0.7\sim0.9)Mo$，主要起到隔断作用，不能等同于末端激冷区，因此两冒口之间的可补缩距离小于两倍末端区情况。为了延长补给距离，需要加厚冷铁，使隔断区相当于末端冷却区，选择 $Mr<0.5Mo$。当然，加厚冷铁会加重裂纹缺陷风险，故一般不采用加厚冷铁的方法，而多采用冷铁加补贴方法来延长补给距离。

加厚冷铁的额外增加的厚度一般可选择(0.5~1.0)c。

4 隔断冷铁在实践中的应用及变化

4.1 冷铁放置位置影响

实际生产中，隔断冷铁应放置在不易产生收缩气隙的部位，防止冷铁激冷效果降低。冷铁的水平隔断钢液与垂直隔断钢液的细小区别：垂直隔断易出现间隙，且更易受到钢液流动过热影响，故冷铁厚度可适当增加但不超过 E。

4.2 钢液流动引起局部过热影响

在充型过程中，钢液流动并不均衡，造成局部过热。隔断冷铁也会受到同样的影响，过热区的冷铁隔断效果下降。因此，过热区的冷铁厚度应适当增加。

4.3 铸件材料的影响

不同金属材料的冷却特征不同：易产生糊状凝固的金属，冷铁激冷层与周围凝固层厚度相差较小，产生裂纹倾向小，可采用较大冷铁尺寸；随着铸件壁厚增大，凝固温度梯度下降，同样时间激冷层厚度比周围砂型凝固层厚度更大，热裂纹倾向大，所以大壁厚铸件的冷铁相对尺寸较小；不同材料的高温强度不同，当冷铁的周围形成较大的应力变化时，凝固层抗拉能力不足，产生裂纹，因此，一般高温强度较低的材料，冷铁尺寸不易过大。实际生产中，应综合考虑材料的各项性能影响，选择适当的冷铁尺寸。

4.4 涂料层作用

在实际生产中，冷铁表面常涂挂一薄层耐火涂料，防止冷铁表面生锈并减少激冷引起皱皮等缺陷。涂料层对于减轻热裂纹也有显著作用。在实际生产中，表面涂料层应随着冷铁厚度增加而加厚，以使较大冷铁的激冷作用缓慢释放。

4.5 特殊结构的隔断冷铁形式

常见的特殊结构设计有：双面冷铁结构设计、多排冷铁结构设计、过渡冷铁设计、错位分布结构等等。

随着时间的进行，冷铁吸热效率下降，激冷能力下降。所以，对于大壁厚铸件的隔断冷铁，易采用双面冷铁结构并适当加厚比例。

为了延长补给距离，但不易采用较大冷铁时，可以采用多排冷铁结构，冷铁尺寸逐渐变小，在冷铁区，自隔断中心向冒口方向形成适当的逐层凝固，可以人为增加补给距离。

当采用长条形冷铁组合时，可以适当把冷铁错位布置，也可以降低冷铁间裂纹倾向。

4.6 实践中冷铁选择

冷铁可以重复使用，故各生产厂一般都会形成自己的冷铁尺寸系列。铸件结构厚度不同，工艺设计计算的冷铁尺寸与现场冷铁不会完全相符，一般选用相近更大规格冷铁。

5 结论

(1)隔断冷铁尺寸选择与铸件等效壁厚、截面形状等相关，不能简单采用壁厚进行计算。

(2)隔断冷铁尺寸设计上要考虑防止缩松和冷隔等缺陷产生。

(3)隔断冷铁影响区模数：$Mr=(0.7\sim0.9)Mo$，仅适用于隔断条件；$Mr=(0.4\sim0.6)Mo$，适用延长距离。

(4)铸件壁厚超过 200 mm 时，易采用双面冷铁。

(5)隔断冷铁尺寸受到钢液材料凝固特性、钢液的流动过热、涂料层厚度等因素的影响。

参考文献：

[1] Ruddle R W, 党刚译. 铸件的凝固[M]. 北京：中国工业出版社，1963.

[2] 李弘英. 铸钢件的凝固和致密度的控制[M]. 北京：机械工业出版社，1985.

[3] 陈国桢. 铸造缺陷和对策手册[M]. 北京：机械工业出版社，1996.

[4] Peter Beeley. Foundry Technology [M]. England: Reed Educational and Professional Publishing Ltd. 2001.

[5] 王君卿，朱文高，魏兵，等. 铸造手册第 5 卷铸造工艺[M]. 北京：机械工业出版社，2010.