DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.11.008

冒口模数定量计算法在铸钢工艺设计上的应用

赫振梅[1],李卿卿[2],李晓东[1]

(1. 河北省高强度耐磨铸钢技术创新中心,河北 张家口 075132; 2. 河北北方铸业有限公司,河北 张家口 075132)

摘　要:铸钢冒口模数定量计算法是一种铸钢冒口设计新方法,该方法以铸件和冒口的模数为基础,导出了"冒口最小安全高度计算公式"、"冒口富余钢液相对半径计算公式"、"冒口富余钢液相对高度计算公式"和"冒口富余钢液体积比计算公式"等4个冒口计算公式。用这4个公式可以设计铸钢冒口最小安全高度、铸件凝固后冒口中富余钢液合理体积比,其冒口最小安全高度计算值与MAGMA模拟结果很接近。结果表明,用该方法设计的冒口铸件未出现缩孔缺陷,保证了铸钢件的质量。对比传统的铸钢冒口经验公式计算方法,铸钢冒口模数定量计算法降低了对铸造工艺人员设计经验的要求,在铸钢工艺开发中得到了普遍应用,提高了工艺开发质量和效率。

关键词:冒口;模数;定量计算;最小安全高度;钢液富余体积比

中图分类号:TG269　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)11-1037-05

Application of Quantitative Calculation Method of Riser Modulus in Process Design for Steel Castings

HE Zhenmei[1], LI Qingqing[2], LI Xiaodong[1]

(1. Hebei Province High Strength Wear Resistant Steel Technology Innovation Center, Zhangjiakou 075132, China; 2. Hebei North Casting Industry Co., Ltd., Zhangjiakou 075132, China)

Abstract: The quantitative calculation method of casting steel riser modulus was a new method for casting steel riser design. Based on the modulus of casting and riser, the formula for calculating the minimum safe height of riser, formula for calculating the liquid phase to radius of riser surplus steel, formula for calculating the liquid phase to height of riser surplus steel and formula for calculating the liquid product ratio of riser surplus steel were derived. These four formulas can be used to design the minimum safe height of casting riser and reasonable volume ratio of surplus molten steel in casting riser after solidification. The calculation value of the minimum safe height of riser was close to the MAGMA simulation result. The results show that the riser castings designed by this method have no shrinkage cavity defects and the quality of the steel castings is guaranteed. Compared with the traditional empirical formula for casting riser, the quantitative calculation method for casting riser modulus reduces the requirement for casting technician's design experience and is widely used in casting process development, which improves the quality and efficiency of casting process development.

Key words: riser; modulus; quantitative calculation; minimum safety height; surplus volume ratio of molten steel

中低碳合金调质钢铸件的质量要求高,一般需做RT、MT、PT检测方法。采用MAGMA软件凝固模拟及优化,铸钢冒口设计的合理性、准确性较高。同时,部分工艺人员不再做冒口计算,而是根据已有的经验先给出冒口尺寸,再进行模拟,以核对冒口中的缩孔是否深入铸件,如果有问题,再修改冒口尺寸,然后再模拟,直至模拟无缺陷为止。因此,一个铸钢冒口设计需要反复多次模拟,周期长,效率低,并造成工艺人员对模拟软件的过度依赖,拖延了开发进度,这影响了新产品的开模和投产。

采用黄晋研究的"铸钢冒口模数定量计算法"[1],用于冒口的设计计算,大量应用表明采用这种方法设计的冒口可以通过MAGMA凝固模拟验证。冒口计算的最小安全高度值和模拟结果很接近,可以有效地提高冒口设计效率,该方法现已纳入本公司冒口设计计算必做的技术规范,降低了对工艺人员设计经验的要求。

1　冒口模数定量计算

传统的冒口计算方法简单,包括模数法、补缩液量法和比例法,但需要丰富的经验,否则仍会出现缩孔。用"铸钢冒口模数定量计算法"设计冒口,其顺序是:首先确定冒口几何模数$M_{冒}$与铸件几何模数$M_{件}$的比值α,计算铸件几何模数、并通过比值α计

收稿日期:2020-10-13

作者简介:赫振梅(1982-),女,河北张家口人,技术副总.主要从事铸钢件树脂砂工艺、壳型工艺、高强度耐磨材料等方面的工作.电话:18932733466,
E-mail:hezhenmei@163.com

算出冒口模数 $M_{冒}$、冒口直径 D 和体积 $V_{冒}$；计算冒口富余钢水相对半径 e 和相对高度 n；最后计算出冒口最小安全高度 Y_{min} 和冒口富余钢液体积比 θ，并与设定的安全值来比较，校核冒口尺寸是否合理。参考冒口补缩示意图如图 1 所示，具体计算公式如下：

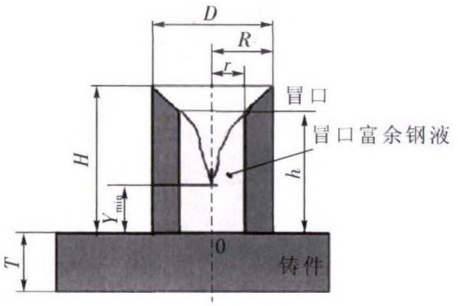


图 1 冒口补缩铸钢件示意图
Fig.1 Schematic of feeding process of riser for a steel casting

(1)冒口最小安全高度 Y_{min}，是冒口中缩孔最低点距冒口与铸件接触面的距离。

$$Y_{min}=R\left(k\alpha-\frac{1}{k\alpha}\right)-\frac{T}{2}$$

式中，R 冒口半径；k 冒口相对凝固系数，砂冒口取 1，保温发热冒口取 1.1~1.3；α 冒口几何模数与铸件几何模数之比，$\alpha=M_{冒}/M_{件}$，T- 冒口下面铸件壁厚或热节圆直径。

(2)冒口富余钢液相对半径 e，是冒口富余钢液半径 r 与冒口半径 R 之比。即：

$$e=\frac{r}{R}=1-\frac{1}{(k\alpha)^2}$$

(3)冒口富余钢水相对高度 n，是冒口富余钢液高度 h 与冒口高度 H 之比，即：

$$n=\frac{h}{H}=1-\frac{3\varepsilon}{(e^2+e+1)}\left[\frac{V_{件}\times1.06}{V_{冒}}+0.5\right]$$

式中，ε 为铸钢的凝固体收缩率，一般取 4%~5%；$V_{件}$为铸件体积；$V_{冒}$为冒口体积。

(4)冒口富余钢液体积比 θ，是指铸件凝固时，冒口中富余钢液体积 $V_{余}$与冒口体积 $V_{冒}$之比，即：

圆柱明冒口：

$$\theta=\frac{V_{余}}{V_{冒}}\times100\%=\frac{\pi r^2h}{\pi R^2H}\times10\%=e^2n\times100\%$$

腰圆柱明冒口：

$$\theta=1.18\frac{V_{余}}{V_{冒}}\times100\%=1.18\frac{\pi r^2h}{\pi R^2H}\times100\%$$
$$=1.18e^2n\times100\%$$

应用表明，计算出的铸钢冒口最小安全高度大于铸件壁厚或热节圆直径的 30~50%、冒口富余钢液体积比大于 20%，同时满足这二个条件，铸件不会产生缩孔缺陷。冒口的补缩效率不受 12~15%的限制，但不是越高越好，也不是越低越好，应该存在一个合理的值。当铸件凝固后，冒口中富余钢液量应保持一定比例，用于集渣集气，防止铸件渗碳等。

2 开发应用实例之一

用铸钢冒口模数定量计算法，可以定量分析铸钢件缩孔缺陷的产生原因。生产的重型矿车用左右法兰铸钢件，冒口下产生了很深的缩孔缺陷，无法焊补，导致产品报废。用铸钢冒口模数定量计算法对其原工艺设计做了校核计算，探讨了铸件产生缩孔的原因。

2.1 原铸造工艺设计

左右法兰铸钢件，材料为 EEMS 11008，净重 2 453.6 kg，外轮廓尺寸为 ϕ1 600 mm×500 mm。该铸钢件结构及铸造工艺如图 2 所示。

左右法兰铸钢件，原铸造工艺设计是按传统经验公式方法计算冒口，铸件毛重 2 753.4 kg，铸件体积 $V_{件}$为 353 dm^3，铸件外圈缩尺 2.2%，内圈 1.2%。原铸造工艺设置 140 mm×300 mm×250 mm 腰圆发热明保温冒口 9 个，单个冒口体积 $V_{冒}$=9.45 dm^3，9 个冒口体积共 85 dm^3，补贴体积 $V_{补}$=21 dm^3，最大热节圆直径 T=176 mm，浇注系统体积 $V_{浇}$=20 dm^3，浇注钢水总质量 3 501 kg，铸造工艺出品率 78.6%，理论上属于发热冒口合理的铸造工艺出品率范围，通过 MAGMA 模拟，未发现问题，左右法兰铸造工艺三维图和 MAGMA 模拟图，见图 3 所示。

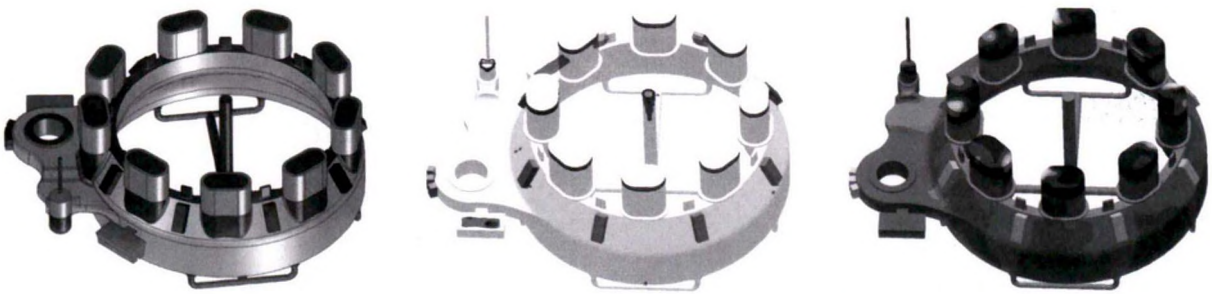


图 2 左右法兰铸钢件铸造工艺三维图，MAGMA 模拟图
Fig.2 3Ddiagram of casting process ofLeft and right flange steel casting, MAGMA simulation diagram

2.2 浇注结果

铸件浇注后，打箱清理、切割冒口，发现 9 个发热冒口下铸件部分都有很深的缩孔缺陷，左右法兰铸钢件及缩孔缺陷见图 4，其冒口缩孔见图 5。由于缩孔缺陷太大，无法焊补，铸件只能报废处理，经济损失极大。

2.3 缩孔缺陷产生原因分析

为了分析左右法兰铸钢件产生缩孔缺陷的原因，用铸钢冒口模数定量计算法对其原工艺设计进行了校核计算，以期发现缩孔在哪里产生，其计算过程如下：

2.3.1 冒口安全高度 Y_{min} 的核算

(1)计算冒口几何模数 $M_{冒}$

$$M_{冒}=\frac{V_{冒}}{S_{散}}$$

$$=\frac{\frac{\pi}{4}\times1.4^2\times2.5+1.4\times1.6\times2.5}{\pi\times1.4\times2.5+1.4\times1.6\times2.5+\frac{\pi}{4}\times1.4^2\times\frac{1}{2}}$$

$$=\frac{9.45}{20.88}=4.5\ \text{cm}$$

(2)计算冒口和铸件几何模数的比值 α

$$\alpha=\frac{M_{冒}}{M_{件}}=\frac{4.5}{4.5}=1.0$$

(3)计算冒口最小安全高度 Y_{min}

$$Y_{min}=R\left(k\alpha-\frac{1}{k\alpha}\right)-\frac{T}{2}$$

$$=70\times\left(1.2\times1.0-\frac{1}{1.2\times1.0}\right)-\frac{176}{2}$$

$$=-62\ \text{mm}$$

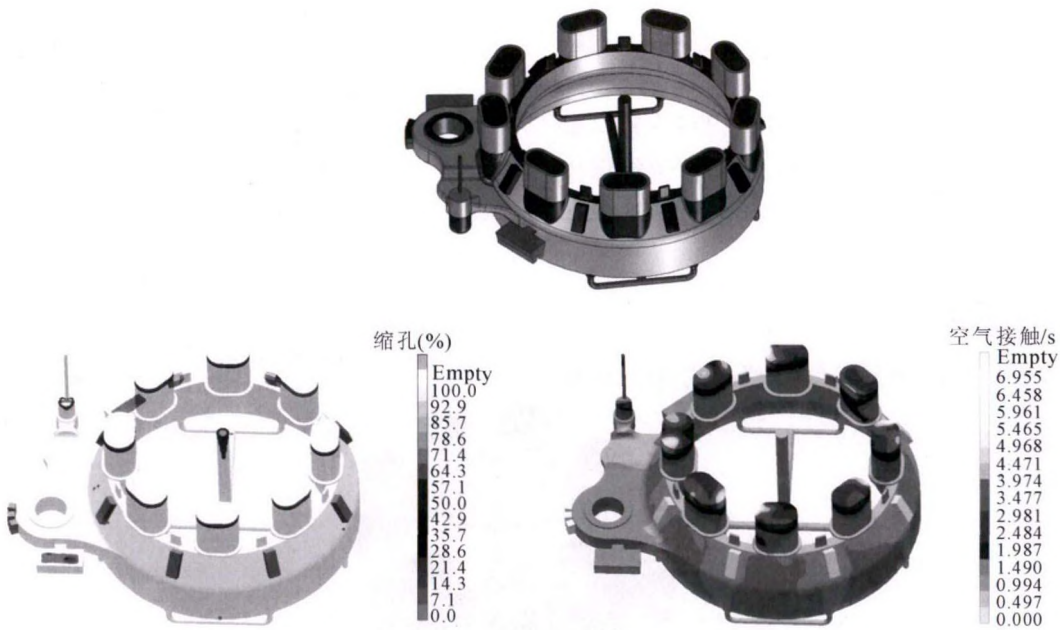
发热冒口 k 值取 1.2，计算表明，冒口安全高度不低于 62 mm，负值表明冒口缩孔深入了铸件，铸钢件产生缩孔缺陷是必然的。

2.3.2 冒口富余钢液体积比计算

(1)计算冒口富余钢液相对半径 e

$$e=\frac{r}{R}=1-\frac{1}{(k\alpha)^2}=1-\frac{1}{(1.2\times1.0)^2}=0.31$$

(2)计算冒口富余钢液相对高度 n(ε 取 4.5%)



(a)铸造工艺三维图　　(b)MAGMA模拟图

图 3 左右法兰铸钢件铸造工艺三维图，MAGMA 模拟图

Fig.3 3D diagram of casting process of left and right flange casting steel, MAGMA simulation diagram

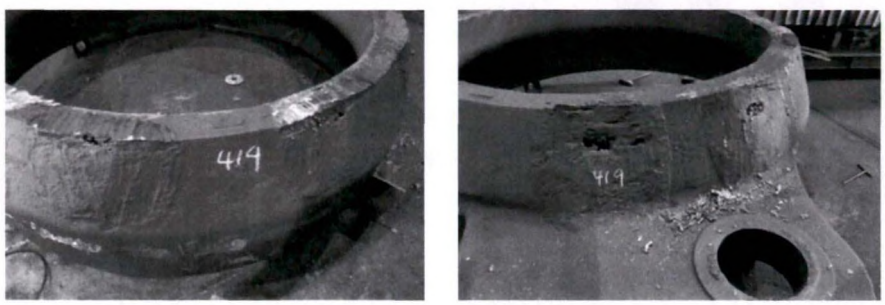


图 4 左右法兰铸钢件及缩孔缺陷

Fig.4 Left and Right Cast Steel Flanges and Their Shrinkage Defects

图 5 左右法兰铸钢件冒口缩孔

Fig.5 Shrinkage cavities at riser bottom of left and right cast steel flanges

$$n=\frac{h}{H}=1-\frac{3\times\varepsilon}{e^2+e+1}\left(\frac{V_{件}\times1.06+V_{补}+V_{浇}}{V_{冒}}+0.5\right)$$

$$=1-\frac{3\times0.045}{0.31^2+0.31+1}\times\left(\frac{353\times1.06+21+20}{9\times9.45}+0.5\right)$$

$$=0.48$$

(3)计算冒口富余钢液体积比 θ

$$\theta=\frac{V_{余}}{V_{冒}}\times100\%=1.18e^2n\times100\%$$

$$=1.18\times0.31^2\times0.48\times100\%=5.45\%$$

计算发现,铸件凝固时,冒口中富余钢液体积比只有 5.45%,不够 20%的安全值,铸钢件有缩孔缺陷是必然的。

通过铸钢冒口模数定量计算法的验算,冒口最小安全高度已经在铸钢件内部了,冒口富余钢液体积比只有 5%左右,这就是左右法兰铸钢件产生缩孔问题的原因。

3 开发应用实例二

用铸钢冒口模数定量计算法对左右法兰铸钢件的冒口进行了重新设计计算,铸件浇注后切割冒口,无缩孔缺陷,取得了很好的效果。

3.1 工艺设计计算

通过计算,确定左右法兰铸钢件采用 ϕ300 mm×300 mm 圆柱发热保温明冒口 9 个,具体计算过程如下:

(1)冒口最小安全高度 Y_{min} 计算

$$M_{冒}=\frac{V_{冒}}{S_{散}}=\frac{\frac{\pi}{4}\times3.0^2\,3.0}{\pi\times3.0\times3.0+\frac{\pi}{4}\times3.0^2\times\frac{1}{2}}$$

$$=\frac{21.2}{31.8}=6.7(\text{cm})$$

$$\alpha=\frac{M_{冒}}{M_{件}}=\frac{6.7}{4.5}1.49$$

$$Y_{min}=R\left(k\alpha-\frac{1}{k\alpha}\right)-\frac{T}{2}$$

$$=150\times\left(1.2\times1.49-\frac{1}{1.2\times1.49}\right)-\frac{176}{2}=96(\text{mm})$$

计算的冒口最小安全高度值是 96 mm,用 MAGMA 软件模拟的冒口高度为 110 mm,计算安全高度与模拟结果很吻合,这就保证了冒口中的缩孔不会深入铸件内部。

(2)冒口富余钢液体积比 θ 的计算

$$e=\frac{r}{R}=1-\frac{1}{(k\alpha)^2}=1-\frac{1}{(1.2\times1.49)^2}=0.69$$

$$n=\frac{h}{H}=1-\frac{3\times\varepsilon}{e^2+e+1}\left(\frac{V_{件}\times1.06+V_{补}+V_{浇}}{V_{冒}}+0.5\right)$$

$$=1-\frac{3\times0.045}{0.69^2+0.69+1}\times\left(\frac{353\times1.06+21+20}{9\times9.45}+0.5\right)$$

(a)铸造工艺三维图　　(b)MAGMA 模拟图

图 6 用铸钢冒口模数定量计算法设计的左右法兰铸钢件铸造工艺三维图及 MAGMA 模拟图

Fig.6 3D diagram of casting process for the left and right cast steel flanges designed by quantitative calculation method of riser modulus and Magma simulation result

$=0.83$

$\theta=e^2n\times100\%=0.69^2\times0.83\times100\%=39.5\%$

计算结果表明，铸件凝固后，每个发热保温冒口里还有39.5%的钢液没有凝固，这就保证了铸钢件的致密。

(3)冒口补缩效率 η 和铸造工艺出品率计算

$V_{总}=V_{件}\times1.06+9V_{冒}+V_{补}+V_{浇}$

$=353\times1.06+21.2\times9+21+20=605.98\ dm^3$

$V_{孔}=V_{总}\times0.045=605.98\times0.045=27.3\ dm^3$

$\eta=V_{孔}/V_{冒}\times100\%=[27.3/(9\times21.2)]\times100\%=14.3\%$

铸造工艺出品率 $=V_{件}/V_{总}\times100\%$

$=[(353\times7.8)/(605.98\times7)]\times100\%$

$=64.9\%$

注：钢水密度取 7 kg/dm³；$V_{总}$浇注钢水总体积；$V_{孔}$冒口缩孔总体积。

用铸钢冒口模数定量计算法设计的左右法兰铸钢件铸造工艺三维图、MAGMA 模拟图，如图 6 所示。

3.2 浇注结果

铸件浇注后，见图 7 所示，切割冒口，铸件致密、无缩孔缺陷，解剖冒口，实际测量冒口安全高度为 120 mm，冒口解剖及安全高度测量见图 7 所示，与冒口最小安全高度计算值和 MAGMA 模拟软件结果十分吻合。

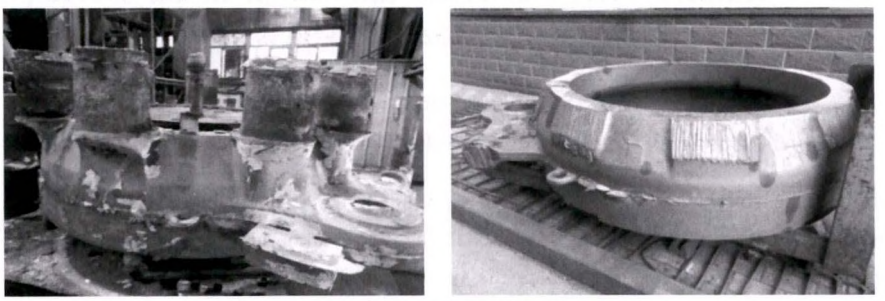


图 7 左右法兰铸件，冒口及补贴切割痕迹

Fig.7 Left and right cast steel flanges, risers and the pad cutmarks

图 8 冒口刨面和安全高度测量

Fig.8 Riser section and safety high measurement

4 结论

(1)铸钢冒口模数定量计算法，能计算出铸钢冒口最小安全高度和冒口富余钢液体积比，应用表明，只要设计的冒口有一定的最小安全高度和足够的冒口富余钢液体积比，铸件就能确保不出缩孔缺陷，降低了工艺人员设计铸钢冒口时对经验和凝固模拟软件的依赖。

(2)用冒口模数定量计算新方法设计的铸钢冒口合理、安全有效，已在铸钢冒口设计计算中的到了普遍应用。

参考文献：

[1] 黄晋，张友寿，夏露，等. 铸钢冒口最小安全高度及富余钢液体积比的计算[J]. 铸造 2008，57(11): 1211-1216.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 280 元。

邮购咨询：李巧凤 029-83222071，技术咨询：13609155628