



热作模具钢铸件的合金成分控制与热裂纹缺陷

■ 许诺, 田涛

摘要: 通过对大尺寸、大壁厚热作模具钢铸件热裂纹缺陷的研究, 提出了通过合金成分控制与计算机数值模拟技术相结合来解决问题的新思路。结果表明, 热裂纹倾向得到了极大的降低, 所得到的数据结果可起到对生产实际的指导和参考作用。

关键词: 模具钢; 裂纹; 合金成分控制; 数值模拟

我厂核电大锻件的生产需要大量锻造辅具, 这些辅具多用铸造方法获得。常用的辅具钢种有碳素钢和热作模具钢, 碳素钢在高温锻造时寿命较短, 而热作模具钢由于其优良的高温性能及更长的使用寿命而备受青睐。热作模具钢主要用5CrMnMo、5CrNiMo两种材质, 这两种材质的锤头、棒子、砧子等辅具尺寸和壁厚大, 很容易出现热裂纹缺陷, 尤其是5CrMnMo钢出现裂纹的概率更高。这种缺陷往往要到铸后或热处理后才能发现, 从而导致辅具报废, 成本增加, 甚至拖延交货期。

1. 合金成分优化

辅具是根据锻件形状而专门设计的, 其结构无法更改, 因此只能寻求一种不改变结构而能够

消除或减少热裂纹的方法。最终我们选择了从铸造工艺性的角度出发, 通过合金成分控制与优化来进行研究。

从铸造工艺性的角度减小铸造过程中的热应力, 以降低热裂的倾向性。主要通过研究降低凝固温度区间, 增加液态金属流动性, 改善偏析倾向, 降低浇注温度, 以及降低体收缩性等能够减小铸造热应力的参数入手。

合金成分的调整优化如果直接采用浇注试验料的方式将费时费力, 且无法评价所设计成分是否能够有效降低热裂纹缺陷。采用材料计算分析软件则可很好地解决这一问题。根据所研究的内容, 我们比较了材料计算分析软件THERMOCALC及JMATPRO, 决定采用JMATPRO计算软件, 通过调整化学成分,

计算其相应的铸造相关数据, 并结合文献资料所得经验及所查阅铸造技术参数性能指标, 以期获得更加完善的铸造性能。

(1) 成分调整原则 表1为两种热作模具钢的化学成分。根据其化学成分, 我们制订了化学成分调整的原则: C元素含量每0.025%变化, Si元素含量每0.1%变化, Mn元素含量每0.1%变化, Cr元素含量每0.1%变化, Ni元素含量每0.1%变化, Mo元素含量每0.025%变化。

(2) 计算参数的选择 从铸造工艺性的角度出发选择了5个计算参数, 分别是: 凝固温度区间、黏度、热导率、热膨胀系数、体积变化。选择这5个参数的原因是: 合金凝固是在一个温度区间内凝固的, 凝固区间的大小会影响到浇注温度、缩孔、缩

表1 化学成分 (质量分数) (%)

材质	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
5CrMnMo	0.5~0.6	0.25~0.6	1.2~1.6	≤0.03	≤0.03	0.6~0.9		0.2~0.3	≤0.3	≤0.3
5CrNiMo	0.5~0.6	≤0.4	0.5~0.8	≤0.03	≤0.03	0.5~0.8	1.4~1.8	0.15~0.3	≤0.2	≤0.3

松、成分偏析等很多因素，是铸造合金的一个重要参数；黏度大小影响液态钢液的流动性及填充性；导热性影响其高温性能及使用寿命；膨胀及体积变化影响凝固收缩的大小及应力大小。

(3) 分析计算目标 获得具有小凝固区间，低液相线温度，低黏度，大热导率，小膨胀及小体积变化等参数的最优化学成分。

(4) 计算方法 根据化学成分及成分变动原则，按照如下的方式进行计算。

首先，确定C元素的影响规律，其他元素分别取上限、中限及下限，随C元素由0.5%开始，每0.025%作为一次变动进行正交计算，计算数量为15组，经分析15组数据，得出一个较优的C含量。

其次，C含量固定不变，确定Si元素含量的影响规律，Si元素含量每0.1%变动，其他元素分别取上限、中限及下限值，由此得出一个较优的Si含量。

第三，依此类推，进行所有正交计算，得出较为合理的元素含量。

第四，考虑到各元素的最优组合起来可能不是最优，因此进行一些补充计算，例如C取最优值，部分元素取最次值，观察其变化规律，以补充计算来弥补一些可能的缺漏。

(5) 计算结果 根据上述计算规则，采用JMATPRO总共进行了170多组的计算，结合相关文献数据，通过分析比对，得到了一些规律，并得到了两种钢最优铸造工艺性的化学成分含量值。

5CrMnMo钢规律性：①对5CrMnMo钢，采用低C、Si，高Mn、Cr、Mo，是最合理选择，或者Mn含量大幅降低，Cr含量大幅增加（超出成分范围），均可使铸造性能提高，需综合考虑。②最优成分与最差成分相比凝固温度区间由102℃降低了36℃，膨胀量降低1.5%，导热有一定增强，黏度变化不大。

计算后综合分析得到5CrMnMo钢最优铸造工艺性的化学成分见表2。

5CrNiMo钢规律性：①对5CrNiMo钢，采用低C、Si，中Mn，高Cr，低Ni、Mo，是最合理选择，其中Ni含量的大幅减小（超出成分），对铸造性能影响不大，Cr含量大幅增加（超出成分），可改善铸造性能，需综合考虑。②最优成分与最差成分相比凝固区间由94℃降低了32℃，膨胀量降低1%，导热有很大增强，黏度变化不大。

计算后综合分析得到5CrNiMo钢最优铸造工艺性的化学成分见表3。

综合比较，这两种热作模具钢无论是最优成分的比较，还是最差成分的比较，5CrNiMo钢的铸造工艺性均要远优于5CrMnMo钢，5CrNiMo钢拥有更低的凝固区间，更大的导热性，更小的膨胀值。

2. 数值模拟分析

获得了铸造工艺性最好的最优成分，那么这种最优成分是否能够在棒子等大尺寸、大壁厚的辅具上取得消除或减小热裂纹倾向的作用呢？为了获得这个答案，我们选择了一件实际生产的铸件：核电常规岛低压转子辅具棒子，材质5CrMnMo，尺寸5050mm×2300mm×1525mm，最大壁厚1200mm，净重68 620kg。采用计算机数值模拟的方式进行验证。

计算机数值模拟软件采用MAGMA，根据以前我们所研究出的热裂倾向性判据：① HOT TEAR判据。② 高应变判据。③ 高应变速率和低冷却速率判据。

以上三者综合为热裂倾向性判据，当以上判据中两者或两者以上显示位置一致时可认为该处存在较大的热裂倾向。其中判据①是直接判据，判据②和③需要结合温度场才可以用来预测，其原理是热裂敏感区存在于高应变速率（低冷却速率）的区域，特别是那些垂直于凝固方向的地方。

实际生产中，我们在制造该棒子辅具时在冒口与铸件的接触面上产生了巨大的纵向热裂纹。数值模拟时，我们首先采用了生产所用的工艺参数和合金成分，

表2 5CrMnMo钢最优化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
0.50	0.25	1.50	0.01	0.005	0.85	—	0.20	0.05	0.05

表3 5CrNiMo钢最优化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
0.5	0.20	0.65	0.01	0.005	0.85	1.40	0.15	0.05	0.05

想看一看模拟结果是否准确。

摔子工艺建模如图1所示,采用单个冒口形式,浇注温度1560℃,内腔下满内冷铁。

数值模拟所得应变及应变速率情况如图2所示。

由图2可看出,高应变和高应变速率位于冒口与铸件表面的中心及长度方向的四个接近角部的位

置。

其热裂纹倾向如图3所示。观察热裂结果,发现不论是在冒口下1mm,还是冒口下250mm位置,均存在一定的热裂倾向,其中在1mm位置是最严重的,且最严重的位置正好是冒口根部铸件纵向的边缘处,这与实际生产中,在冒口与铸件接触表面出现纵向大裂纹完全相符。

这一结果得到验证后,我们采用了以上所研究出的铸造工艺性最好的合金成分作为模拟材料,因为凝固区间的改变,调整浇注温度为1535℃,其余工艺参数仍与实际生产时一致,均不改变,按照这样条件再次进行了数值模拟计算。

模拟所得应力和应变速率分布如图4所示。

观察图4可知,高应变和高应变速率位于冒口与铸件表面的中心及长度方向的4个接近角部的位

置,这一分布与实际工艺模拟的结果是大体一致的,但是相同位置的应变速率要比实际工艺低很多。

热裂纹倾向结果如图5所示。热裂倾向的结果显示,发现不论是在冒口下1mm,还是冒口下250mm位置,其热裂倾向都不严重。与采用实际工艺的结

果相比,我们可以得出如下结论:对于该摔子辅具,冒口根部与铸件接触表面是热裂纹的敏感区域,当采用最优合金成分时,其热裂倾向得到了极大的降低。

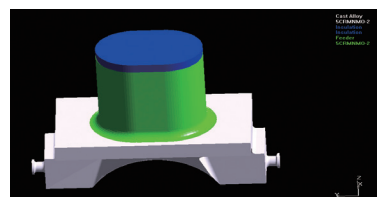


图1 摔子工艺建模

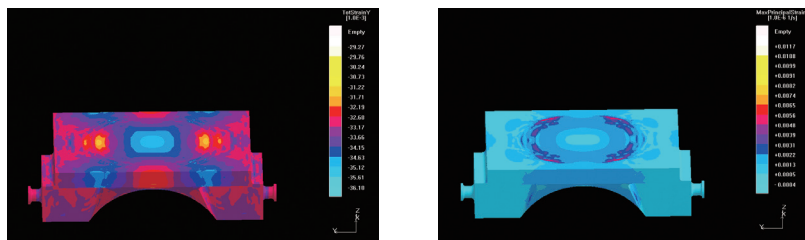
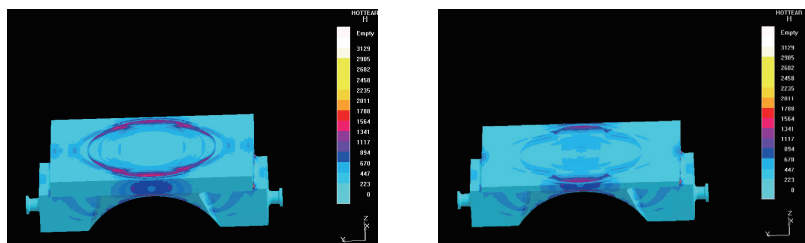


图2 摔子应变及应变速率分布(实际工艺)



(a) 冒口下1mm

(b) 冒口下250mm

图3 摔子热裂纹倾向(实际工艺)

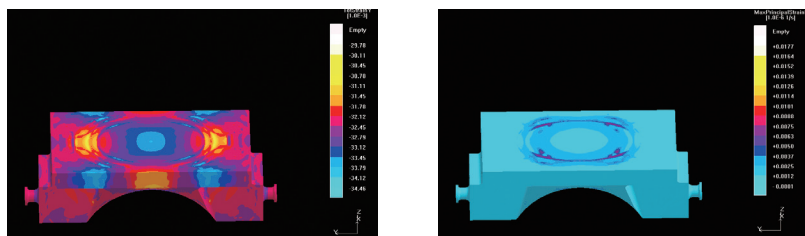
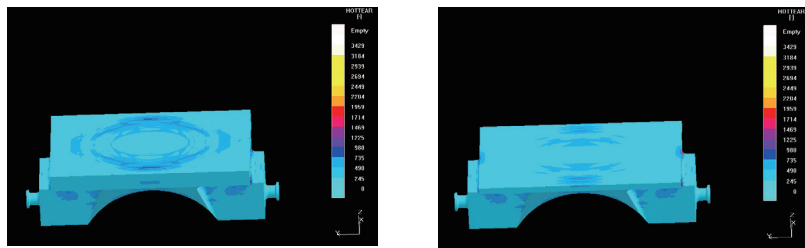


图4 摔子应变及应变速率分布(最优成分)



(a) 冒口下1mm

(b) 冒口下250mm

图5 摔子热裂纹倾向(最优成分)

3. 结语

一般来说,铸件结构复杂,壁厚变化大,容易产生各类缺陷,

当设计结构无法更改时,通过合金成分的控制与计算机数值模拟技术的结合来解决问题,是



水轮机叶片模样玻璃钢力学性能改进的研究

■ 王世滨, 李鹏

大型水轮机叶片模样的制作是水轮机叶片铸件生产的第一道工序, 其表面质量与型线的准确程度直接影响到了大型水轮机叶片生产的最终质量, 且大型水轮机模样表面的玻璃钢质量直接影响到了整体模样的力学性能。

1. 现存问题

由于不饱和聚酯固化时收缩应力大, 在固化时会放热并产生很大的残余应力, 所以叶片在使用过程中往往在其结构薄弱的区域会发生一定的变形, 如叶片突出尖角的末端区域。

2. 解决措施

通过添加无机刚性材料实心玻璃微珠, 既可降低不饱和聚酯

玻璃钢反应过程的放热程度, 消除不饱和聚酯玻璃钢的残余应力, 还可降低玻璃钢使用成本。

增强机理: 通过添加适量填料可以达到增量填充和补强填充两种作用, 其中增量填充是为了降低制品的成本, 补强填充可以改善制品的力学性能。其中球状无机刚性材料填料玻璃微珠具有加工流动性好, 制品表面光泽度高, 可增加制品刚度、耐热性, 以及内部应力小等特点, 是玻璃钢制品首选的添加材料。

无机刚性填料 (RIF) 增强机理首先是由于复合树脂材料受力变形时, 在RIF周围产生应力集中效应, 引发其周围基体屈服 (如空穴、银纹、剪切带等),

这种基体屈服将吸收大量的变形能量, 起到增韧的作用, 并且当裂纹RIF时, 会产生钉孔-攀越或者钉孔-裂纹二次引发效应, 使裂纹扩展的阻力增大, 消耗变形能量, 从而阻碍裂纹的扩展。

3. 材料与方法

试验首先将密度为 1.15g/cm^3 不饱和聚酯树脂与比例为2%的固化剂、3%的促进剂进行混合, 搅拌均匀后向其中添加一定比例, 密度为 1.48g/cm^3 的600目活性硅微粉与密度为 1.37g/cm^3 的325目玻璃微珠, 搅拌均匀后迅速涂刷单层 0.4mm 厚的无碱玻璃纤维布, 共涂刷16层, 待1h固化后制成厚度为 6.5mm 填

一种新的思路, 也许会取得意想不到的效果。

通过本文的研究, 可以得到以下结论:

(1) 对5CrMnMo钢, 采用低C、Si, 高Mn、Cr、Mo的合金成分, 或者Mn含量大幅降低, Cr含量大幅增加, 均可使铸件的铸造工艺性增强。

(2) 对5CrNiMo钢, 采用低C、Si、Ni、Mo, 中Mn, 高

Cr的合金成分可以极大地改善铸造工艺性能。

(3) 对于极其重要且多次使用的辅具, 建议使用5CrNiMo钢种, 其铸造工艺性要优于5CrMnMo钢。

(4) 对于该两种材质的铸件, 内控成分可按推荐值进行控制, 可以改善其铸造性能, 同时浇注温度控制在 $1530\sim 1540^\circ\text{C}$ 为宜。

(5) 通过5CrMnMo钢实际生产铸件工艺与最优成分工艺的比较, 发现当采用最优成分工艺时, 其热裂纹倾向得到了极大的降低。

作者简介: 许诺、田涛, 天津重型装备工程研究有限公司。

MW 20160602