● 材料改性 Material Propertiest ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.09.028

含硅合金钢的热处理参数模拟

刘 劼[1],成小乐[1],屈银虎[1],符寒光[1],郑守东[2]

(1. 西安工程大学 机电工程学院,陕西 西安 710048; 2. 辽宁忠旺机械设备制造有限公司,辽宁 辽阳 111000)

摘 要:对 0.8Cr-2.2Mn-0.3Mo-1.0Si-0.004B-0.45C(1%Si 钢)和 0.8Cr-2.2Mn-0.3Mo-2.0Si-0.004B-0.45C(2%Si 钢)两种含硅耐磨合金钢进行金相分析和硬度测试,利用材料性能 JMatPro 模拟软件,对含硅合金钢进行相转变和力学性能计算,得到了合金钢的平衡相组成、连续转变曲线(CCT)和淬透性曲线(Jominy)。结果表明,1%Si 钢的奥氏体临界温度为 A_{C3}=754 ℃,A_{C1}=695 ℃。2%Si 钢的奥氏体化的临界转变温度为 A_{C3}=780 ℃,A_{C1}=717 ℃。淬火冷却速度在 1 ℃/s 及以上时,合金钢的淬火组织和力学性能趋于稳定,主要以马氏体组织和残余奥氏体为主,其力学性能较佳。端淬性随距离淬火端面距离的增大,马氏体数量逐渐减少,屈服强度,抗拉强度和硬度明显递减。在距离淬火端面 0～2 cm 时减幅趋于平缓,在距离 2～10 cm 时减幅最大。

关键词:合金钢;平衡相;硅合金化;CCT 曲线;淬透性

中图分类号:TG156.3 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)09-0991-05

Parameters of Simulated of Heat Treatment of Alloy Steel Containing Silicon

LIU Jie[1], CHENG Xiaole[1], QU Yinhu[1], FU Hanguang[1], ZHENG Shoudong[2]

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 2. Liaoning Zhongwang Machinery Equipment Manufacturing Co., Ltd., Liaoyang 111000, China)

Abstract: Metallographic analysis and hardness test were performed on two kinds of silicon-containing wear-resistant alloy steels, namely, 0.8 cr-2.2 mn-0.3 mo-1.0 si-0.004 b-0.45c (1%Si steel) and 0.8 cr-2.2 mn-0.3 mo-2.0 si-0.004 b-0.45c (2% Si steel). Phase transformation and mechanical properties of silicon containing alloy steel were calculated by using JMatPro simulation software of materials properties, and the equilibrium phase composition, continuous transformation curve (CCT) and hardenability curve (Jominy) of alloy steel were obtained. The results show that the critical austenitic temperature of 1%Si steel is A_{C3}=754 ℃ and A_{C1}=695 ℃. The critical transition temperature of austenitization of 2%Si steel is A_{C3}=780 ℃ and A_{C1}=717 ℃. When quenching cooling rate is 1 ℃/s or above, the quenching structure and mechanical properties of alloy steel tend to be stable, mainly martensite structure and residual austenite, and its mechanical properties are better. The martensite quantity decreases with the increase of the distance from quenching end face, the yield strength, tensile strength and hardness decrease obviously. At 0~2 cm away from the quenching end, the reduction tends to be flat, and at 2~10 cm away from the maximum reduction.

Key words: alloy steel; equilibrium phase; Si alloying; CCT curve; harden ability

近年来,我国对高强度和高硬度耐磨钢的需求日益剧增,而高强度耐磨铸钢[1]的应用领域也越来越广泛,其中包括重型机械,航海船舶,航空航天,轨道交通,工程机械等[2]。现阶段主要通过对耐磨钢加入不同含量的元素来提高耐磨铸钢的整体综合性能。而硅作为耐磨铸钢的主要元素之一,一直是材料研究的热点。本文采用两种含硅耐磨合金钢试样进行金相组织观察后,利用材料性能模拟软件 JMatPro,对含硅贝氏体合金钢进行相转变和力学性能计算,得到合金钢的平衡相组成、连续转变曲线(CCT)和淬透性曲线(Jominy)[3]。研究其性能参数及不同硅含量下的性能差异,从而给后续实际热处理工艺制订提高参考和理论依据。

1 合金成分和金相组织

实际材料样品为含硅耐磨合金铸钢[4],该耐磨合金铸钢分为硅含量为 1%和 2%两种,其余合金元素含量相同。样品的元素含量见表 1。将含硅贝氏体耐磨铸钢试块用线切割机加工成尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的样件,然后采用不同目数的砂纸打磨(目数为 120、360、600、1 000 和 1 500)和金相实

收稿日期:2019-05-22

作者简介:刘 劼(1987-),陕西西安人,硕士生.研究方向:先进材料研究.电话:17719503762,
E-mail:liujiemfc@126.com

通讯作者:符寒光(1964-),湖南桃江人,博士,研究员,博导.主要从事耐磨材料研究.电话:13911572237,
E-mail:wuzw1960@126.com, fhg64@263.net

表 1 试验样品的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of the testing Samples

试样	C	Cr	Mo	B	Si	Mn	Fe
1%Si 钢	0.45	0.8	0.3	0.004	1.0	2.2	余量
2%Si 钢	0.45	0.8	0.3	0.004	2.0	2.2	余量

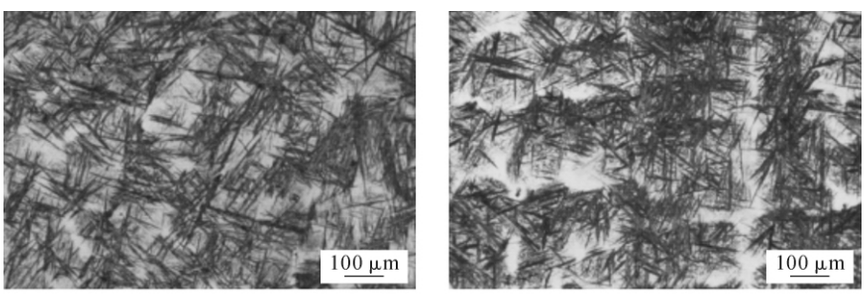
验磨抛机(型号 MP-2B)镜面抛光,然后用清水冲洗镜面,再用 4%的硝酸酒精进行镜面腐蚀,待表面稍有颜色变化后,立刻用清水和酒精冲洗,并且立刻吹干,观察金相组织。其金相组织图见图 1 (a)和(b)。根据金相组织显示,图 1(a)和(b)均有大量的由铁素体和渗碳体构成,沿晶轴呈现 55~60°夹角的晶面析出断续条状渗碳体黑色针状,即下贝氏体。图中 1(b)相比(a)中,黑色针状渗碳体减少,组织中白色或浅色区域渐多,但是差异不大,即可能是增多的 Si 含量溶入铁素体所致。随后用洛氏硬度计(型号为 HR-150A)对样品进行硬度测试,测试面选 5 个点,然后计算其平均硬度值。结果为 1% Si 的样品硬度为 47.9 HRC, 2%Si 的样品硬度为 44.6 HRC。

2 JMatPro 软件计算

2.1 平衡相组成分析

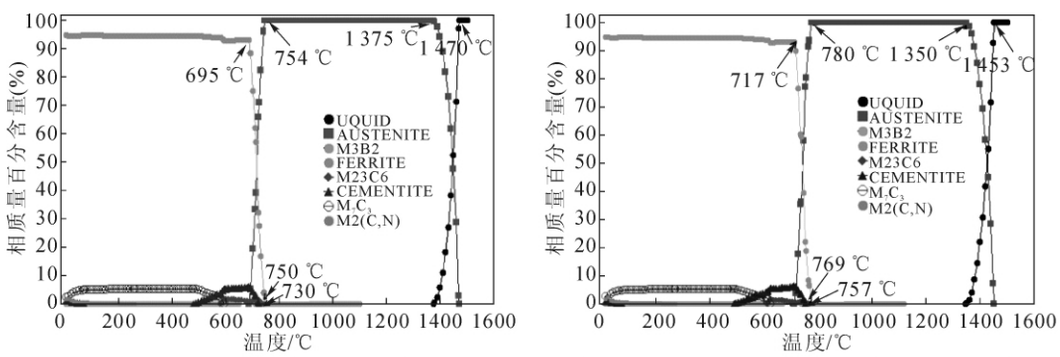
利用 JMatPro 软件对两种含硅耐磨合金耐磨铸钢样件进行平衡相[5]组成的计算,在常温状态下,1% Si 钢的平衡相图占比中,主要有 94.66%的铁素体,1.06%的渗碳体,2.38%的 M_7C_3,1.86%的 M2(C,N)及其余微量 0.04%的 M3B2 相组成。2%Si 钢的平衡相图占比中,主要有 94.66%的铁素体,1.0%的渗碳体,2.52%的 M_7C_3,1.78%的 M2(C, N)及其余微量 0.04%的 M3B2 相组成[6,7]。可见两种成分在常温下平衡相占比接近相同。

在对常温状态下两种含硅耐磨铸钢的平衡相图占比分析计算后[8],通过不同温度下平衡相图组成看出,在图 2(a)中其合金钢的液相温度为 1 470 ℃,在该温度时高温铁素体析出,当合金温度达到固相线温度 1 375 ℃时,合金开始向奥氏体转变,其奥氏体化的临界转变温度为 A_{C3}=754 ℃,A_{C1}=695 ℃。渗碳体在 730 ℃时完全溶解,同时在 750 ℃时强化相 M3B2 也溶解入奥氏体中。在图 2(b)中其合金钢的液相温度为 1 453 ℃,在该温度时高温铁素体析出,当合金温度达到固相线温度 1 350 ℃时,合金开始向奥氏体转变,其奥氏体化的临界转变温度为 A_{C3}=780 ℃,A_{C1}=717 ℃。渗碳体在 757 ℃时完全溶解,而在 769 ℃时强化相 M3B2 溶解入奥氏体中。通过相变温度对比,发现 2%Si 的合金钢比 1%Si 的合金钢的奥氏体化区间更短,而 A_{C3} 和 A_{C1} 的临界转变温度也有提高,说明硅可提高钢在加热时的临界转变温度,增加热滞后作用。



(a)1%Si (b)2%Si

图 1 含硅合金钢显微组织
Fig.1 Microstructure of alloy steel containing Si



(a)0.8Cr-2.2Mn-0.3Mo-1.0Si- 0.004B-0.45C的平衡相组成及相转变温度

(b)0.8Cr-2.2Mn-0.3Mo-2.0Si- 0.004B-0.45C的平衡相组成及相转变温度

图 2 平衡相组成及相转变温度
Fig.2 Equilibrium phase composition and phase inversion temperature

2.2　CCT 曲线分析

通过 JMatPro 软件计算两种合金钢的的 CCT 曲线，图 3(a)和(b)为 CCT 分析曲线[9]。表 2 和表 3 为不同冷却速度对合金组织的影响对照表。表 4 和表 5 为不同冷却速度下，其力学性能的计算数值。

由曲线计算得出图 3(a)中的珠光体的转变温度为 737.6 ℃，贝氏体的转变温度为 474 ℃，铁素体的转变温度为 754.6 ℃，马氏体的转变温度为 246.1 ℃。而图 3（b）中的珠光体的转变温度为 762 ℃，贝氏体的转变温度为为 453 ℃，铁素体的转变温度为 779.7 ℃，马氏体的转变温度为 232.4 ℃，所以在不同冷却速度下的淬火，其力学性能和合金组织影响很大[10]。

由表 2 和表 3 的数据可知，冷却速度在 0.01 ℃·s^{-1} 及以下时侯，合金钢的淬火[11]后组织只有珠光体组织，而冷却速度在 1 ℃·s^{-1} 及以上时侯，合金钢的淬火后组织主要以马氏体为主[12]，并且有少量残留奥氏体存在。只有冷却速度 0.1 ℃·s^{-1} 左右的时间，有主要有马氏体和珠光体为主的组织，并且残留有贝氏体和奥氏体成分。而 1%Si 钢在此冷却速度下的贝氏体含量远高于 2%Si 钢，说明在此冷却速度下合金钢的硅含量过高抑制贝氏体的形成。

表 2　1%Si 钢在不同冷却速度对淬火组织的影响
Tab.2 The effect of 1% Si steel on quench structure of the different cooling rate

冷却速度 /℃·s^{-1}	1%Si 钢的淬火组织的含量(%)				
	P	B	Fe	M	A
0.01	100	0	0	0	0
0.1	12.28	29.45	0	57.24	1.03
1	0.03	0.1	0	98.1	1.77
10	0	0	0	98.22	1.78

通过表 4 和表 5 可得，冷却速度在 0.01 ℃·s^{-1} 及以下时，合金钢的力学性能极差，主要组织均为珠光体无马氏体组织。而冷却速度在 1 ℃·s^{-1} 及以上时，合金钢的力学性能趋于稳定，也反映了主要以马氏体组织为主的合金钢力学性能是最佳的。1%Si 钢在硬度、屈服强度及抗拉强度均要好于 2% Si 钢。

表 3 2%Si钢在不同冷却速度对淬火组织的影响
Tab.3 The effect of 2% Si steel on quench structure of the different cooling rate

冷却速度 /℃·s^{-1}	2%Si 钢的淬火组织的含量(%)				
	P	B	Fe	M	A
0.01	100	0	0	0	0
0.1	38.1	4.44	0	56.07	1.38
1	0.06	0.03	0	97.51	2.4
10	0	0	0	97.6	2.4

表 4　1%Si 在不同冷却速度下合金力学性能的计算值
Tab.4 Calculated mechanical properties of 1% Si steel at different cooling rate

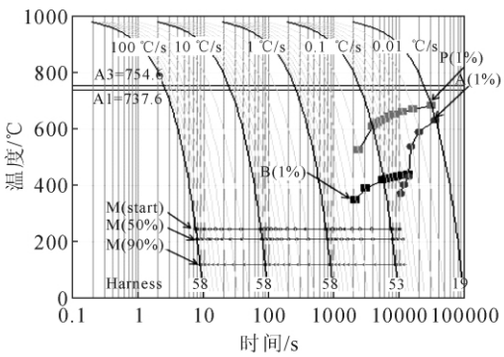
冷却速度 /℃·s^{-1}	1%Si 钢的淬火组织的含量(%)			
	0.01	0.1	1	10
硬度(HRC)	18.9	53.4	57.8	57.8
屈服强度 /MPa	526.9	1 547.4	1 845.5	1 846.4
抗拉强度 /MPa	756.2	1 770.4	2 038.4	2 039.1

表 5 2%Si钢在不同冷却速度下合金力学性能的计算值
Tab.5 Calculated mechanical properties of 2% Si steel at different cooling rate

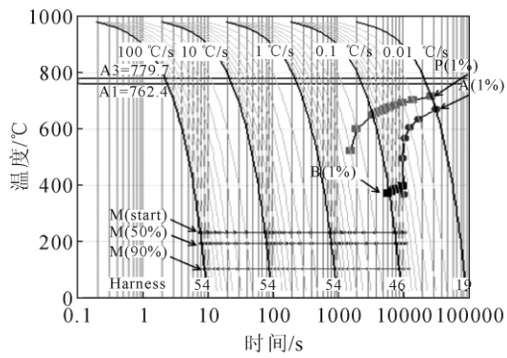
冷却速度 /℃·s^{-1}	2%Si 钢的淬火组织的含量(%)			
	0.01	0.1	1	10
硬度(HRC)	18.9	46.5	54.2	54.2
屈服强度 /MPa	526.9	1 196.9	1 596.1	1 596.8
抗拉强度 /MPa	756.2	1 447.9	1 814.3	1 814.9

2.3　淬透性计算

淬透性是指钢在一定条件下淬火时获得马氏体组织深度的能力，顶端淬火试验或称 Jominy 试验，是一种测定淬透性的简便方法，经常用来评定钢铁材料的淬透性[13,14]。在图 4(a)、(b)和图 5(a)、(b)分别为 1%和 2%Si 钢的相组成随淬火端面距离变化曲线图和力学性能随不同淬火端距离的变化曲

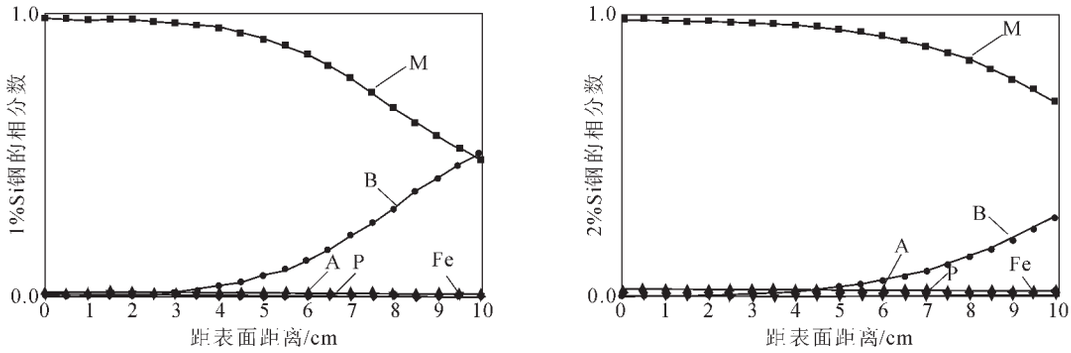


(a)0.8Cr-2.2Mn-0.3Mo-1.0Si-0.004B-0.45C的合金CCT曲线



(b)0.8Cr-2.2Mn-0.3Mo-2.0Si-0.004B-0.45C的合金CCT曲线

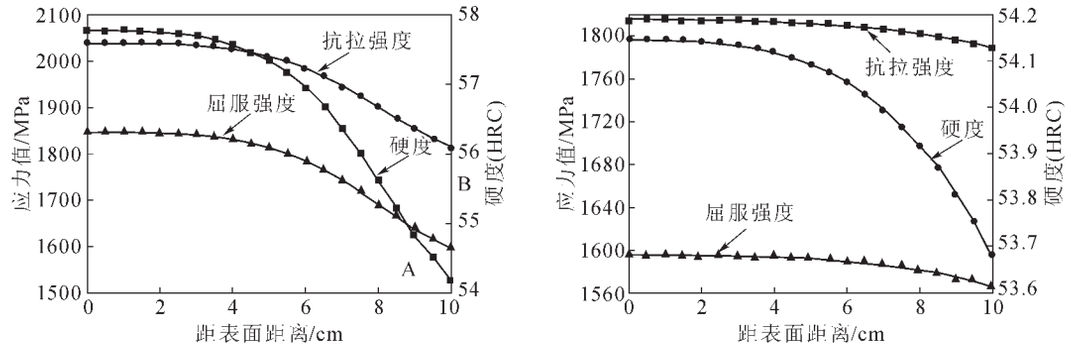
图 3　合金 CCT 曲线
Fig.3　CCT curve of alloys



(a)1%Si钢的相分数　　(b)2%Si钢的相分数

图 4 相组成随淬火端面距离变化曲线图

Fig.4 Curve of phase composition changes with quenching end face distance



(a)1%Si钢的应力值　　(b)%Si钢的应力值

图 5 力学性能随不同淬火端距离的化曲线图

Fig.5 Curve of mechanical properties with different quenching end distances

线图。

在图 4(a)和(b)中是不同的淬火端距离时，合金钢相的成分变化的曲线图，由图可知，随着淬火端距离的增大，马氏体数量在 0~2 cm 基本上无变化，大于 2 cm 的距离后加速减少，同时贝氏体数量则反之，在相同距离内无变化或加速增多。而 1%Si 钢的马氏体和贝氏体的转变速度要快于 2%Si 钢。

在图 5(a)和(b)中主要是力学性能随淬火端距离改变而产生的影响，由图可知，硬度，抗拉强度及屈服强度随着火端距离的增大而逐渐减小。其 1%Si 钢最大硬度为 57.8 HRC，抗拉强度为 2 039.1 MPa，屈服强度为 1 846.4 MPa。2%Si 钢最大硬度为 54.2 HRC，抗拉强度为 1 814.9 MPa，屈服强度为 1 596.8 MPa。而在 0~2 cm 内，力学性能变化微弱，大于 2 cm 的距离后加速减少，和相组成变化特性基本一致。而 1%Si 钢的力学性能的减小速度要明显快于 2%Si 钢。

3 结论

(1)1%Si 的贝氏体合金钢在常温下的平衡相主要组成为 94.66%F+1.06%C+2.38%M_7C_3+1.86M2 (C,N)，其奥氏体化的临界转变温度为 A_{C3}=754 ℃，A_{C1}=695 ℃。2%Si 的贝氏体合金钢在常温下的平衡相主要组成为 94.66% F+1.0% C+2.52% M_7C_3+1.78M2 (C,N)，其奥氏体化的临界转变温度为 A_{C3}=754 ℃，A_{C1}=695 ℃。其奥氏体化的临界转变温度为 A_{C3}=780 ℃，A_{C1}=717 ℃。说明硅可提高钢在加热时的临界转变温度，增加热滞后作用。

(2)淬火时不同的冷却速度对淬火组织和力学性能影响很大，冷却速度越快，马氏体析出越多，合金钢的力学性能越好。当而冷却速度在 1 ℃·s^{-1} 及以上时，合金钢的淬火组织和力学性能趋于稳定，主要以马氏体组织和残余奥氏体为主，其力学性能是最佳的。1%Si 钢在硬度、屈服强度及抗拉强度均要好于 2%Si 钢，且残余奥氏体成分从 1.78%增长到 2.4%，说明含量过高的硅可溶于奥氏体，扩大了 A相。

(3)通过端淬性计算得出随距离淬火端面距离的增大，马氏体数量逐渐减少，屈服强度、抗拉强度和硬度明显递减。在淬火端面有最大值；在距离淬火端面 0～2 cm 缓慢递减，而在 2～10 cm 减幅最大。

参考文献：

[1] 吴峥强，来克娴. 工程机械用高碳低合金耐磨钢的淬透性研究[J]. 铸造技术，2016，37(12):2571-2573.

[2] 陈付红，丁伟，黄维，等. 国外先进公司工程机械用高强钢发展现状[J]. 上海金属，2015，37(1):47-51.

[3] 蔺虹宾，吴代建，彭显平. 利用 JMatPro 软件对低合金耐磨钢热处理参数的计算[J]. 热加工工艺，2015，44(4):76-78，82.

[4] 王桂林.高硅铸钢热处理显微组织和力学性能的实验研究[J].铸造技术，2011，32(4):474-477.

[5] Wu, J. -S. Bishnoi, P. R. (1986). An algorithm for three-phase equilibrium Calculations[J]. Computers and Chemical Engineering, 10(3), 269-276.

[6] Jean-Philippe Schillé , Zhanli Guo, Nigel Saunder. Modeling Phase Transformations and Material Properties Critical to Processing Simulation of Steels[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2011, 26(1).

[7] Vahid Javaheri, Tuomo Nyyssönen, Bjφrnar Grande. Computational Design of a Novel Medium-Carbon, Low-Alloy Steel Microalloyed with Niobium[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(6).

[8] 徐仰涛，夏荣里，沙岐振，等. 基于 JMatPro 软件 TIG 堆焊层 Co-8.8Al-9.8W -0.2B 合金的相组成及开裂行为[J]. 稀有金属材料与工程，2017，46(9):2459-2464.

[9] 张鹏飞，杨柱，赵正阳，等. 采用 CCT 和 TTT 曲线预测感应淬火硬化层组织和硬度[J]. 金属热处理，2018，43(3):76-81.

[10] 郑晓宇，魏晓伟，黄红键，等. 热处理对 Cr-Si-Mn-Mo 系中碳低合金铸钢组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺，2016，45(10):219-221.

[11] 夏雨. 中低碳铬硅锰马氏体铸钢热处理工艺研究 [J]. 铸造，2013，62(10):1015-1017.

[12] 乔梁. 经验模型和 JMatPro 软件计算马氏体开始转变温度的研究[J]. 热加工工艺，2017，46(8):94-96，103.

[13] 曹燕光，徐乐，时捷，等. SAE8620H 齿轮钢的淬透性及其预测模型[J]. 金属热处理，2016，41(2):188-192.

[14] Liang Zhou, Kanghua Chen, Songyi Chen. Comparison of harden ability and over-aging precipitation behaviour of three 7xxx aluminium alloys[J]. Materials Science and Technology, 2019, 35(6).

（上接第 990 页）

后，进行机加工；然后焊接在机架上进行装配。

3　讨论与结论

（1）采用了“借用型腔做浇道”的工艺生产出合格铸件。

（2）借用型腔做浇道工艺的借用原则是：相对通畅的型腔、相对较高的位置、相对居中的一点或几点。本案例借用浇道的切入点安放在翼板的中上段，即能保证冒口钢液处于高温状态，利于补缩，提高铸件出品率，又可有效防止反喷，使浇注平稳顺利。

（3）折弯型缓冲直浇道的设计颇具特色，有创新。是为了消除惯性力，缓冲钢液对型壁底部的冲击，更有利于钢液上升平稳；钢液的冲击力减小，还可以防止钢液破坏涂层，发生垮箱或进砂缺陷。

（4）为了更好的给铸件补缩，本案例使用了发热保温冒口套。发热冒口套可有效延缓钢液的凝固冷却时间，使冒口成为名附其实的补缩液池堤。

（5）在修改工艺前，一直使用陶瓷浇道，陶瓷浇道在箱内组装十分麻烦，浪费工时，组合效率非常低，其价格也远远高于白模浇道。为了解决以上问题本方案大胆使用了白模浇道，取得良好效果，提高了装箱效率又节省了材料成本。这一改进成功，用事实验证了只要涂料性能好，涂层厚度足够，用泡沫作浇道可以取代陶瓷管。

（6）借用型腔做浇道工艺改造前，各种缺陷不断发生，钢液平均利用率不到 70%；接受借用型腔作浇道理念进行工艺改进后，进入型腔内钢液温度得到提高，热场也趋合理，泡沫引起的碳缺陷得到克服，机加后无缺陷，焊接性能也非常好，各型号钢液利用率超过 80%。经济效益明显。

（7）消失模铸造生产铸钢件的工艺已经成熟，特别是大型铸钢件采用消失模铸造工艺是明智的选择。

参考文献：

[1] 刘立中，刘宁. 消失模铸造工艺学[M]. 北京：化学工业出版社，2019.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 **2019** 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号：52–64　　国外发行号：M855　　国内定价：18 元/本　　海外定价：18 美元/本