

白口铸铁/碳钢液-固复合铸造研究

姚三九, 刘卫华

(武汉理工大学, 湖北武汉 430070)

摘要: 利用只受内压的厚壁圆筒应力计算公式, 计算出液-固复合铸造时金属预制件被包覆部位的最大允许尺寸。白口铸铁/碳钢复合铸造试验及生产实践都表明, 计算结果对控制包覆层内表面裂纹的产生具有一定的实用价值。关于硅、磷含量对白口铸铁包覆层内表面裂纹的影响, 也作了一定的探讨。

关键词: 白口铸铁; 碳钢; 复合铸造; 裂纹

中图分类号: TG27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2001) 08-0485-04

Research on Liquid-Solid Composite Casting of White Cast Iron / Carbon Steel

YAO San-jiu, LIU Wei-hua

(Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: Utilizing stress calculating formula of thick-wall cylinder to which only inner pressure has been applied, allowable maximum size of metallic prefabricated piece enveloped location in liquid-solid composite casting has been calculated. By experiment on composite casting of white cast iron/carbon steel and production practice of the bimetal castings, the calculated result has been proved to have certain practical value for controlling the cracking tendency on the inner surface of the enveloping layer. Influence of Si, P contents on cracking tendency on the inner surface of the white cast iron enveloping layer has also been explored.

Keywords: white cast iron; carbon steel; composite casting; crack

用液-固复合铸造工艺生产的白口铸铁/碳钢双金属铸件(榨油机榨轴^[1]、破碎机反击锤^[2]等),能同时拥有高的抗磨性和冲击韧性,可以大幅度提高零部件的使用寿命。然而,生产实践却表明,如果白口铸铁包覆层的厚度控制不当,在包覆层的内表面就容易出现裂纹,从而导致铸件的使用寿命明显下降,甚至完全报废。关于包覆层厚度的控制至今仍处在简单凭借经验、基本无理论可循的状态,已严重地影响该项技术的推广使用。本文分析了白口铸铁包覆层在凝固和冷却过程中与碳钢预制件的相互作用,利用只受内压的厚壁圆筒的应力计算公式和第三强度理论,计算出碳钢预制件被包覆部位的最大允许尺寸;并对白口铸铁的化学成分对包覆层内表面裂纹形成的影响,也作了一定的探讨,为液-固复合铸造工艺设计提供了一定的理论依据。

1 包覆层与预制件的相互作用

当浇注完毕,液态金属在充满型腔的同时,也紧密包覆在固态预制件的周围。包覆层在随后的液态降温、凝固和固态冷却过程中,释放出大量的热($Q = Q_{液} + Q_{凝} + Q_{固}$)。这些热量,一部分被铸型吸收并通过铸型散失,另一部分则被预制件吸收并使之温度

升高。根据预制件吸收热量的多少,可以出现下列几种情况:①预制件被加热到固相线温度以上,表层熔化;②即使包覆层与预制件的温差已趋向于零,但预制件的温度仍距固相线甚远;③在大多数情况下,预制件将会被加热到接近固相线温度。由铸件成形理论可知,包覆层的液态收缩和凝固过程中的液-固收缩,可以通过金属液的流动进行补缩,而凝固过程中的固-液收缩和固态收缩,将对预制件产生包紧力,该力受到预制件的反作用,便会在包覆层内产生拉应力,且在内表面处达到最大值。最严重的情况是在包覆层收缩的同时,预制件仍在吸取热量而膨胀,这更加大了包覆层内表面上的拉应力。一旦该拉应力大于包覆层的强度极限,必然会在其内表面产生裂纹并扩展,形成热裂缺陷。

2 预制件包覆部位允许尺寸的理论计算

当材质一定时,包覆层内表面是否出现裂纹,取决于两种材质之间收缩量的差值。对铸件而言,则取决于固态预制件被包覆部位的尺寸和由它产生的反作用力是否超过包覆层材料的强度极限。

对于回转型复合铸件的包覆层,可以把它看作是只受内压的厚壁圆筒,其径向压应力 σ_r 和环向拉应

收稿日期: 2001-01-20 收到初稿, 2001-02-26 收到修订稿。

作者简介: 姚三九(1951-),男,湖北武汉人,副教授,主要从事金属耐磨材料、特种铸造、轻合金方面的教学和科研工作。

力 σ_b 沿筒壁厚度的分布情况如图 1 所示。

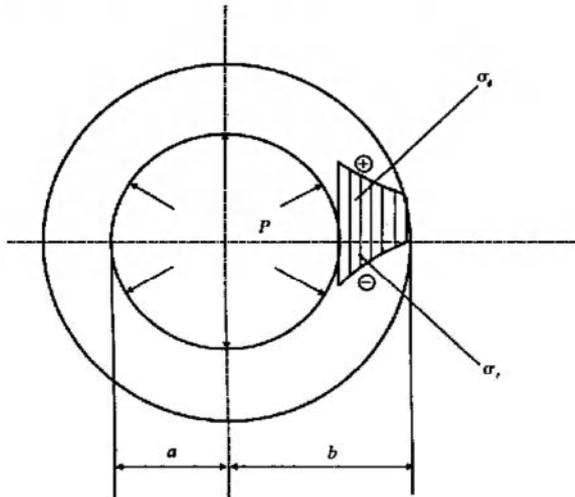


图 1 铸件包覆层的受力分析

Fig. 1 Analysis of the force on the enveloping layer of the casting

该状态下的应力计算公式为:

$$\sigma_r = -pa^2(b^2/r^2 - 1) / (b^2 - a^2) \quad (1)$$

$$\sigma_b = pa^2(b^2/r^2 + 1) / (b^2 - a^2) \quad (2)$$

式中 p ——包紧力

b ——圆筒外壁半径

a ——圆筒内壁半径

r ——半径, $a \leq r \leq b$

考虑到处在固相线温度附近的白口铸铁也能拥有良好的塑性, 因而可按第三强度理论计算, 得到包覆层内表面不出现裂纹的强度条件为:

$$2pb^2 / (b^2 - a^2) \leq [\sigma] \quad (3)$$

式中 $[\sigma]$ ——包覆层金属的高温许用应力

所以预制件被包覆部位的允许尺寸为:

$$a \leq b \sqrt{1 - 2p / [\sigma]} \quad (4)$$

对于非回转型复合铸件, 也可以采用上述计算公式, 但 a 和 b 都必须使用当量半径。

3 白口铸铁/碳钢液-固复合铸造试验

3.1 碳钢预制件直径对白口铸铁内表面裂纹的影响

白口铸铁试样外形尺寸为 $\Phi 40\text{mm} \times 50\text{mm}$, 化学成分 2.7% C, 0.76% Si, 0.3% Mn, $P < 0.07\%$, $S < 0.05\%$; 钢芯直径分别为 14mm、16mm、18mm 和 20mm, 材质为 A3 钢 (见图 2)。用磷酸洗净表面的油污。湿砂型, 钢芯未经预热, 上部侧浇口。铁水在 10kg 中频感应炉中熔炼, 浇注温度均为 1360℃ 左右。由于白口铸铁的包紧力和高温许用应力至今尚无标准, 故类比压铸铜合金、铝硅合金的自由收缩率和包紧力^[3], 推算出白口铸铁的包紧力 $p = 13 \sim 15\text{MPa}$, (取 $p = 15\text{MPa}$)。实测试棒的室温抗拉强度 $\sigma_b = 125 \sim 150\text{MPa}$, 根据白口铸铁的硬度随温度变化的规律^[4], 以及 $\sigma_b \approx 0.3 \sim 0.4\text{HB}$, 白口铸铁的高

温强度 $\sigma_b \approx 35 \sim 40\text{MPa}$, 取 $[\sigma] = 37\text{MPa}$ 。将 $[\sigma]$ 和 p 代入式 (4) 中, 计算出对于外径 $2b = 40\text{mm}$ 试样, 当白口铸铁包覆层内径 $2a \leq 17.4\text{mm}$ 时, 不会产生裂纹, 即当钢芯直径 $2a > 17.4\text{mm}$ 时, 白口铸铁包覆层的内表面上会出现裂纹。实际试验结果见表 1。结合部位显微组织见图 3。

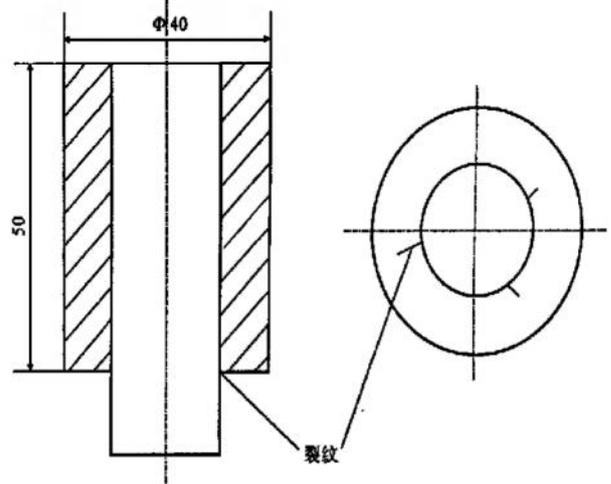


图 2 复合铸造试样

Fig. 2 Composite casting specimen

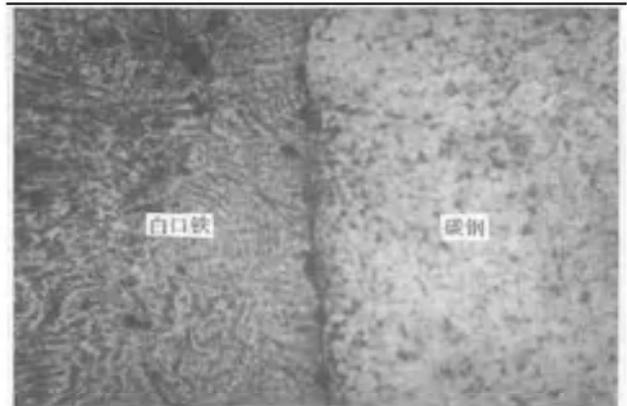


图 3 结合部位的显微组织 250×

Fig. 3 Microstructure of joint place

表 1 钢芯直径对裂纹形成的影响

Table 1 Influence of diameter of the steel core on cracking formation

钢芯直径/mm	14	16	18	20
裂 纹	无	无	6mm	穿透包覆层

由表 1 数据可知: 钢芯直径为 14mm、16mm 的试样上无裂纹, 而钢芯直径为 18mm、20mm 试样的端面上出现裂纹, 且裂纹的长度及宽度随钢芯直径的增大而增加。该结果与前面的理论计算相符合。由图 3 可知, 包覆层与钢芯之间主要为“机械包紧”。

3.2 化学成分对白口铸铁裂纹倾向的影响

化学成分中的 Si、P 含量对白口铸铁的凝固特性

和力学性能影响较大，直接关系到白口铸铁内表面裂纹的形成，找出它们的合适含量很有必要。

(1) Si 含量对裂纹形成的影响。试验全部使用 $\Phi 20\text{mm}$ 的钢芯，将铁水中的 Si 含量分别控制在 1.1%、1.4% 和 1.7%，其它化学成分和生产工艺同前。试验结果见图 4。



图 4 Si 对试样裂纹的影响

Fig.4 Influence of Si on crack of the specimen

由试验可知，随着 Si 含量的增加，裂纹倾向减小，但当 Si 含量超过 1.4% 时，裂纹倾向又有所增加。

(2) P 含量对裂纹形成的影响。将铁水中的 Si 含量固定在 1.0%，而 P 含量分别取 0.07%、0.15%、0.30%、0.45% 和 0.75%。仍浇注钢芯直径为 20mm 的试样。试验结果显示，除 P 含量为 0.07% 的试样上出现集中裂纹、P 含量为 0.75% 试样上出现多条分散细裂纹外，其他试样上均未发现裂纹。但金相观察却发现，当 P 含量超过 0.3% 后，白口铸铁显微组织中有石墨质点出现，尤其在 P 含量为 0.75% 试样上，两种金属的结合部位有明显的显微空洞和夹杂物存在（见图 5）。



图 5 P 对结合部位显微组织的影响 250 \times

Fig.5 Influence of P on microstructure of joint place

Si、P 含量影响裂纹形成的原因可归纳为：①随着 Si、P 含量的增加，铁水的碳当量增大，白口铸铁

的有效结晶温度区间减小，则凝固收缩量减小，进而包紧力减小；②Si 的固溶强化作用有利于提高白口铸铁的强度；③P 能与某些元素形成低熔点共晶产物，从而减小固-液态收缩，以及“弥合”铸件在凝固收缩时所产生的微裂纹；④含 Si、P 过高（Si $\geq 1.4\%$ ，P $\geq 0.3\%$ ），会导致石墨质点出现，虽然析出石墨所产生的反膨胀可抵消一部分白口铸铁的收缩，但会使白口铸铁的强度降低，而且石墨会成为裂纹源。

3.3 钢芯形状对裂纹形成的影响

在试样的端部，钢芯伸出部分无金属液包裹，因而两种材质交界处的温差最大，则收缩量的差值也最大，所以易产生裂纹，并沿试样的径向向外和沿法向向内扩展。为了避免在此处产生裂纹，特采用空心钢芯和两头小中间大的台阶式钢芯（见图 6）进行试验，其余操作工艺同前。

试验结果表明，尽管所用钢芯的外径或最大外径已达到 20mm，但所获试样上均未出现裂纹。该试验结果不仅验证了上述分析的合理性，而且对生产实际也有重要指导意义。

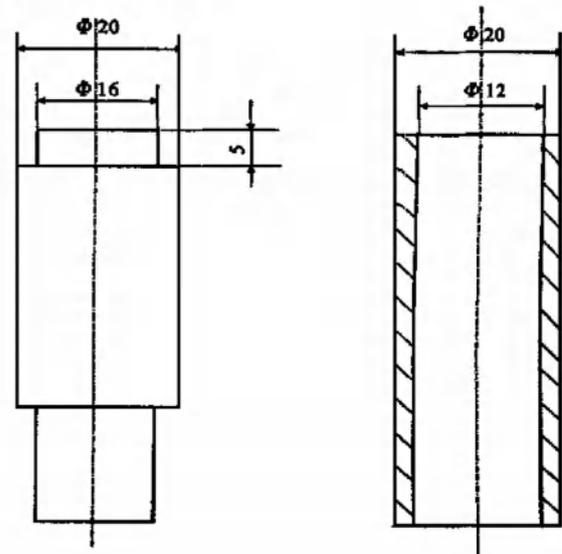


图 6 特殊钢芯示意图

Fig.6 Scheme of especial steel core

4 白口铸铁/碳钢液-固复合铸造的应用

4.1 榨油机双金属榨轴

榨轴是螺旋式榨油机上的关键部件，白口铸铁榨螺包覆在碳钢芯轴上，属典型的回转件。68 型榨油机榨轴轮廓尺寸为 $\Phi 68\text{mm} \times 600\text{mm}$ ，螺旋根部的直径为 48mm。由式（4）计算出碳钢芯轴的最大允许直径为 20mm。

采用水玻璃砂型，白口铸铁的化学成分为：2.8% ~ 3.2% C, 0.8% ~ 1.0% Si, 0.5% ~ 1.2% Mn,

0.5%~1.2% Cr, 并适当地提高 P 含量, 熔炼时用 RE-B 进行复合变质处理。所生产出的双金属榨轴, 不仅抗磨性比原同类型产品提高了 5%~10%, 而且铸件的废品率也由 10% 下降到 5% 左右^[1]。

4.2 破碎机反击锤

鉴于锤式破碎机生产工况的特殊性, 要求反击锤既抗磨又有较高的冲击韧性。传统材质为高锰钢, 平均使用寿命仅 180h。采用高铬铸铁锤头+低合金钢锤柄的双金属复合锤, 其使用寿命比高锰钢提高 4~6 倍。

某厂使用的反击锤, 锤头断面尺寸 130mm × 80mm, 锤柄断面尺寸 80mm × 40mm。由于锤头和锤柄均为矩形截面, 在使用式 (4) 计算时, 必须换算成当量半径。经计算后得知, 锤柄的断面尺寸必须 ≤ 65mm × 32mm, 否则将会在锤头内表面上出现裂纹。将锤柄的被包覆部位加工到计算尺寸并圆角, 锤柄预热到 150℃ 左右, 水玻璃砂型, 高铬铸铁锤头的化学成分控制在: 2.8%~3.4% C, 15%~18% Cr, 并加入少量 Mo、Cu、V、Ti 等合金元素。生产出的复合锤不仅消除了铸态锤头内表面上的裂纹, 而且经过热处理后, 也无裂纹产生。其使用寿命一般都超过一个月。

5 结论

(1) 液-固复合铸造过程中, 两种金属收缩量之间的差值, 是导致包覆层内表面上出现裂纹的主要原因。利用只受内压厚壁圆筒的应力计算公式和第三强度理论, 可以计算出金属预制件被包覆部位的最大允许尺寸。

(2) 适当提高铁水中的 Si、P 含量, 可减小白口铸铁的包紧力并提高其强度, 能有效地抑制包覆层内表面裂纹的产生。倘若含量过高 ($Si \geq 1.4\%$, $P \geq 0.3\%$), 仍会有裂纹产生。双金属铸件榨轴、反击锤的生产实践, 进一步证实了上述结论。

参考文献:

- [1] 姚三九, 崔庆喜. 复合铸造榨油机榨油 [J]. 热加工工艺, 1997, (4): 29~30
- [2] 葛升平, 王振廷. 高铬铸铁复合锤头的试制及应用 [J]. 热加工工艺, 1999, (4): 51~52
- [3] 潘宪曾, 等. 压铸模设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [4] 崔庆喜, 姚三九. 白口铸铁榨螺的抗磨性 [J]. 现代铸铁, 1994, (4): 41~62

(编辑: 范琦)

(选自《铸造》2001 年第 8 期)