DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.03.013

铸造模具钢的焊后热处理及组织与性能研究

龚厚仙[1],卫　英[2]

(1. 滁州职业技术学院 汽车工程系,安徽 滁州 239000; 2. 合肥工业大学 材料科学与工程学院,安徽 合肥 230009)

摘　要:研究了焊接电流对淬回火态铸造模具钢焊接接头成形和力学性能的影响,并对比分析了焊态和回火态焊接接头的显微组织和力学性能。结果表明,焊接电流为 90~110 A 时,焊接过程中不会出现断弧或者飞溅现象,焊缝中也未见明显夹渣等缺陷存在,焊缝成形性较好;500 ℃/2 h 回火处理对焊接接头焊缝区和淬火区组织有明显改善,而对母材和回火区组织影响较小,回火态焊接接头淬火区组织为回火马氏体,焊缝区为回火马氏体+铁素体+少量残余奥氏体;焊后进行回火处理可以明显提高焊接接头的抗拉强度,但是断裂位置并不会发生改变;焊接电流为 90~110 A 时,焊态和回火态焊接接头的抗拉强度都要高于焊接电流为 110~140 A 时的焊接接头,且其回火态焊接接头的抗拉强度达到铸造模具钢母材的 81.4%。

关键词:铸造模具钢;焊接;热处理;显微组织;性能

中图分类号:TG243　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)03-0291-05

Study on Post Weld Heat Treatment and Microstructure & Properties of Cast Die Steel

GONG Houxian[1], WEI Ying[2]

(1. Department of Automotive Engineering, Chuzhou Vocational and Technical College, Chuzhou 239000, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The effect of welding current on the forming and mechanical properties of quenched and tempered cast die steel welded joint was studied, microstructure and mechanical properties of welded joint of welded and tempered state were compared analyzed. The results show that when the welding current is 90~110 A, there will be no interruption or splash in the welding process, and no obvious slag inclusion in the weld, and the weld joint has good welds formability. The tempering treatment at 500 ℃ for 2 h has a significant improvement on the microstructure of the welding zone and quenching zone, but little influence on the structure of the base material and the tempering zone. The quenching zone of tempered welded joint is tempered martensite, the welding zone is tempered martensite, ferrite and a small amount of retained austenite, and the tensile strength of the welded joint can be improved obviously after welding, but the fracture position will not change; When the welding current is 90~110 A, the tensile strength of welded joint and tempered welded joint is higher than that of welding current of 110~140 A. When the welding current is 90~110 A, the tensile strength of the tempered welded joint can reach 81.4% of the cast die steel.

Key words: cast die steel; welding; heat treatment; microstructure; properties

随着汽车、机械制造和航空航天等行业的快速发展,铸造产业也呈现出快速增长的模式,并带动了国内铸造模具以超过 15%以上的速度快速增长。虽然近年来我国通过自主研发以及引进国外铸造模具先进技术等,在铸造模具技术等方面已经取得了很大进步,但是在大型汽车覆盖模具的生产和焊接修复能力等方面的能力仍然较为薄弱[1]。尤其是在汽车覆盖模具钢以铸代锻(节省成本、周期短等优点),铸造模具钢容易出现铸造缺陷及使用过程中出现磨损失效的前提下,对铸造模具钢的焊接修复以及后续热处理行为的研究变得尤为重要,而目前国内在铸造模具钢焊接修复方面的研究报道相对较少[2,3]。本文对铸造模具钢进行了电弧焊接以及焊后热处理,研究结果有望解决铸造模具的加工缺陷和模具磨损失效等问题,为低成本铸造模具钢在汽车覆盖件模具中的应用奠定基础。

1　试验材料与方法

表 1 为试验用铸造模具钢和直径 3.2 mm 低氢型碱性焊条(S-700BB)的化学成分。根据碳当量 CE 计算公式[4]可计算得到铸造模具钢的碳当

收稿日期:2018-08-10

基金项目:安徽省教育厅人才项目(gxfx2017224)

作者简介:龚厚仙(1972-),女,安徽全椒人,硕士,副教授.研究方向:模具设计、模具失效研究.电话:13905505580,E-mail:thickimmortals7@sina.com

表1 铸造模具钢和焊条的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of cast die steel and welding rod

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Fe
模具钢	0.58	1.01	0.78	0.010	0.004	5.23	0.65	0.72	余量
焊条	0.31	0.51	0.58	0.008	0.003	5.01	3.86	-	余量

量 >0.45%,焊接性较差。

图 1 为试验用模具钢的热处理工艺，包括退火、淬火(1 040 ℃/0.5 h 空冷)和回火(500 ℃/2 h 空冷)。随后,将回火后的模具钢加工成待焊试样,图 2 为其尺寸示意图。焊接前对焊接试样进行表面清理,并将待焊试样进行 385 ℃/2 h 的保温处理。使用电弧焊机对模具钢进行手工电弧焊接,主要考虑焊接电流对焊接接头显微组织与性能的影响,焊接电流分别为 70~90、90~110 和 110~140 A。手工电弧焊前后采用与淬火+回火工艺相同的回火工艺方案(500 ℃/2 h,空冷)对焊接接头进行回火处理。

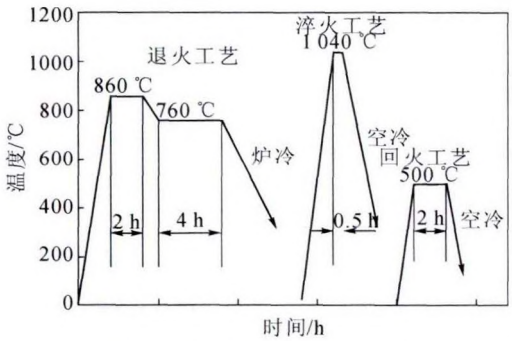


图 1 铸造模具钢的热处理工艺
Fig.1 Heat treatment process for cast die steel

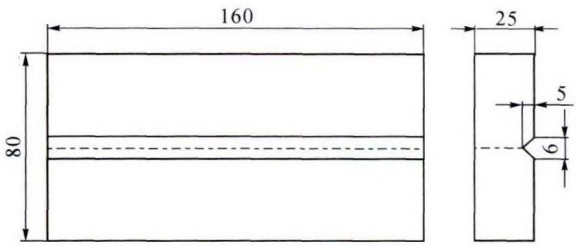


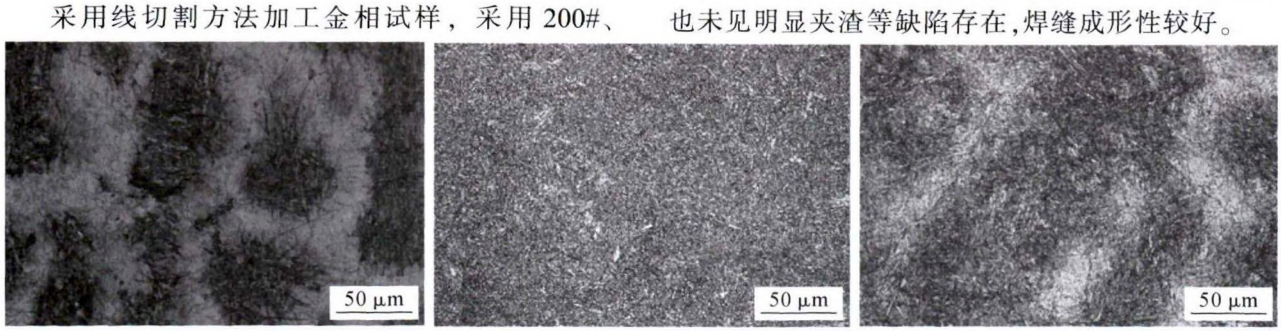
图 2 待焊铸造模具钢试样图
Fig.2 Schematic diagram of the size of the cast die steel

采用线切割方法加工金相试样，采用 200#、400#、600#、800# 和 1 000# 砂纸逐级打磨、机械抛光后,使用 5%硝酸酒精溶液进行腐蚀,置于光学显微镜上观察；焊接接头宏观形貌试样用相机进行拍摄;采用洛氏硬度计和 Bareiss 硬度计对基体和焊接接头不同区域的显微硬度进行测定，加载载荷为 200 g、保持载荷时间为 15 s;垂直于焊缝轴线截取拉伸试样,保证焊缝轴线位于拉伸试样中心,在电子万能材料试验机进行室温拉伸性能测试，拉伸速率为 2 mm/min。

2 试验结果与讨论

图 3 为铸态、退火态和淬回火态铸造模具钢的金相组织。可以看出,铸态模具钢的基体组织中可见偏析较为严重，晶内由板条马氏体和残余奥氏体组成,而晶界上则分布着屈氏体;经过退火处理后,基体组织为铁素体基体上弥散分布颗粒状渗碳体的球状珠光体;经过淬回火处理后,模具钢基体组织为细小的板条状回火马氏体。洛氏硬度测试结果表明,铸态、退火态和淬回火态模具钢的硬度分别为 56、22 和 61 HRC。对铸造模具钢进行退火处理,铸态组织中的马氏体和屈氏体等会在加热过程中形成奥氏体,并在炉冷过程中转变为球状珠光体,硬度会有所减小;继续进行淬回火处理,淬火加热过程中球状珠光体完全转变为奥氏体,空冷后形成淬火马氏体,回火后,马氏体中碳化物以及含 Mo、V 的第二相粒子析出[5],形成细小回火马氏体。

采用不同档位的焊接电流对铸造模具钢进行电弧焊接,焊接接头宏观形貌如图 4。可以看出,当较低的焊接电流下,焊接过程中引弧较为困难,偶尔会出现断弧现象,焊缝中同时可见严重夹渣存在,焊缝成形性较差;在较高的焊接电流下,由于焊接热输入较大,焊接过程中电弧燃烧较为剧烈,并且伴随着飞溅现象,焊缝中未见明显夹渣,成形性相对焊接电流为 70~90 A 时有所改善。在焊接电流为 90~110 A 时,焊接过程中并未出现断弧或者飞溅现象,焊缝中也未见明显夹渣等缺陷存在,焊缝成形性较好。



(a)铸态　(b)退火态　(c)淬回火态

图 3 不同状态铸造模具钢的金相组织
Fig.3 Microstructure of cast die steel in different states

(a)70~90 A　　(b)90~110 A　　(c)110~140 A

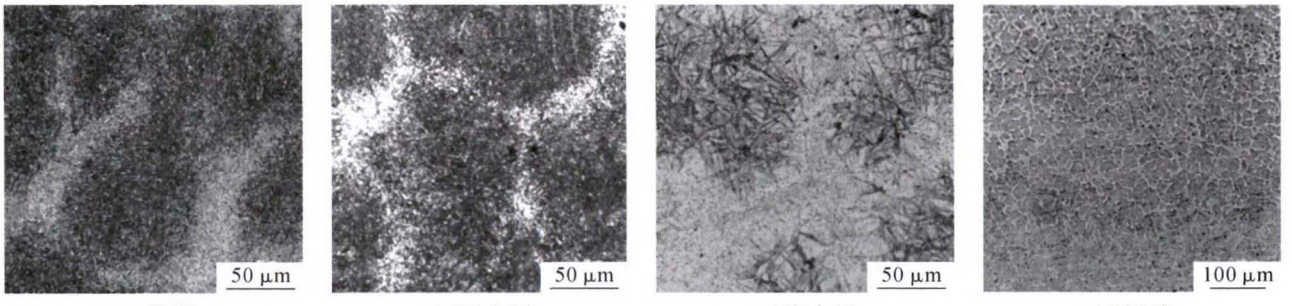
图 4 不同焊接电流下铸造模具钢焊接接头的宏观形貌

Fig.4 Macro morphology of welded joint of cast die steel under different welding current

图 5 为焊接电流 90~110 A 时，焊态下焊接接头的典型金相组织。可以看出，母材组织中可见树枝状铸造组织以及明显元素偏析，晶内可见细小板条马氏体和残余奥氏体；热影响区的回火区组织为回火屈氏体+索氏体+贝氏体；热影响区的淬火区同样存在明显的元素偏析，组织为高硬度针状淬火马氏体和残余奥氏体；焊缝中可见细小的等轴晶。

对焊态下铸造模具钢焊接接头进行回火处理，焊接接头不同区域的金相组织如图 6。从焊接接头母材至焊缝的金相组织中可见，回火对母材至焊缝的组织影响较小，并没有因为回火而发生显著改变；焊缝区组织相对回火前的焊态组织有明显差异，由于回火过程中不稳定的马氏体会出现过饱和碳析出，形成了回火马氏体、沿晶界分布的铁素体以及少量残余奥氏体；焊缝区与原淬火区之间存在熔合区，可见焊缝与母材熔合较好；原淬火区在回火作用下发生针状马氏体的碳化物分解以及残余奥氏体向回火马氏体转变[6]，形成了回火马氏体组织；原回火区组织与回火前相似，可见 500 ℃/2 h 回火处理并没有对热影响区的回火区组织造成明显影响，这与回火并没有造成母材组织改变相似。

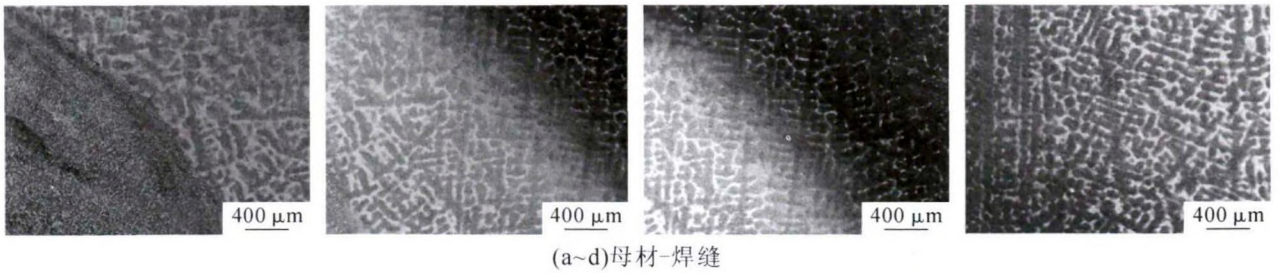
对不同焊接电流下焊态和回火态焊接接头从母



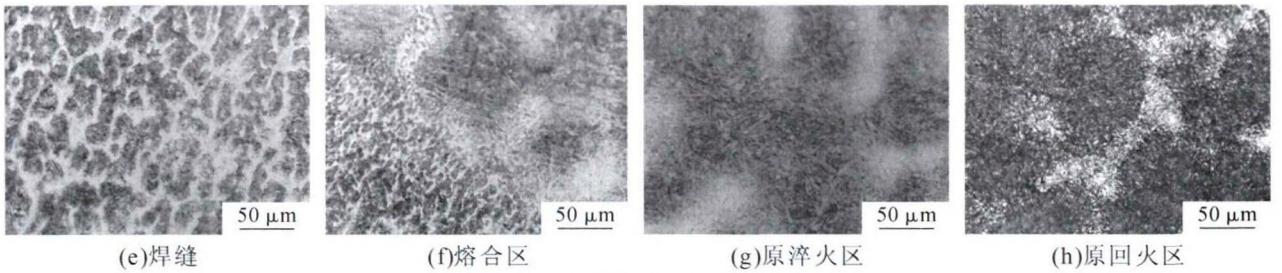
(a)母材　　(b)回火区　　(c)淬火区　　(d)焊缝

图 5 焊态下焊接接头的金相组织

Fig.5 Microstructure of welded joint under welding state



(a~d)母材-焊缝



(e)焊缝　　(f)熔合区　　(g)原淬火区　　(h)原回火区

图 6 回火态焊接接头的金相组织

Fig.6 Microstructure of tempered welded joint

材至焊缝的显微硬度进行测试,结果如图 7。其中,位置 1 处表示母材,位置 2 表示熔合区,位置 3 表示回火区、位置 4 表示淬火区、位置 5 表示焊缝。对比分析可见,焊接电流为 70~90、90~110 和 110~140 A 时,焊态和回火态焊接接头从母材至焊缝的显微硬度分布特征相似,表明回火处理并不会改变焊接接头从母材至焊缝的硬度分布规律。3 种焊接电流下回火区的硬度都为最低,而焊接电流为 70~90 A 和 110~140 A 时淬火区硬度最高,且都明显高于母材;焊接电流为 90~110 A 时,焊接接头硬度最大值位于焊缝区,而焊态淬火区硬度高于母材,回火态淬火区硬度略低于母材。回火区硬度明显低于母材的原因在于,焊态和回火态焊接接头回火区组织为回火屈氏体+回火索氏体+贝氏体,硬度要低于母材的回火马氏体;淬火区硬度一般会高于母材的原因在于,这主要与淬火区的淬火马氏体硬度高于回火马氏体和残余奥氏体有关[7]。此外,相较而言,回火态焊接接头的淬火区和焊缝区硬度高低于焊态焊接接头,这主要与回火过程中发生了碳化物分解形成了回火产物有关[8];而不同焊接电流下相同区域的硬度存在差异主要与焊接热输入以及形成的组织有关[9]。

表 2 为焊接电流为 90~110 A 和 110~140 A 时焊态和回火态焊接接头的室温拉伸性能测试结果。焊接电流为 70~90 A 时焊接接头成形性较差,焊缝中夹渣等缺陷较为严重,因此并未对其进行取样。焊接电流为 90~110 A 和 110~140 A 时焊态焊接接头的抗拉强度分别为 533 和 475 MPa,而相应地回火态焊接接头的抗拉强度分别为 715 和 575 MPa,焊接接头的抗拉强度较回火前分别提高了 34.15%和 21.05%,但是焊态和回火态焊接接头的断裂位置都处于熔合线附近。由此可见,焊后进行回火处理可以明显提高焊接接头的抗拉强度,但是断裂位置并不会发生改变,这主要与回火过程中焊接接头各区域的组织转变有关[7]。此外,焊接电流为 90~110 A 时焊态和回火态焊接接头的抗拉强度都要高于焊接电流为 110~140 A 时的焊接接头,且都低于铸造模具钢母材的抗拉强度(878 MPa),但是焊接电流为 90~110 A 时回火态焊接接头的抗拉强度已达到铸造模具钢母材的 81.4%。

表 2 不同焊接电流下焊态和回火态焊接接头的拉伸性能

Tab. 2 Tensile properties of welded and tempered welded joints under different welding current

焊接电流	焊态		回火态	
	抗拉强度 /MPa	断裂位置	抗拉强度 /MPa	断裂位置
90~110 A	533	熔合线附近	715	熔合线附近
110~140 A	475	熔合线附近	575	熔合线附近

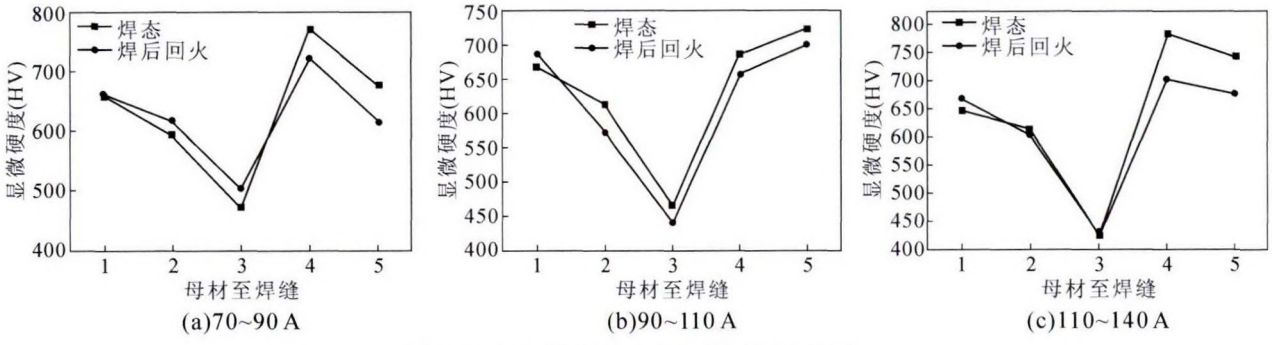


图 7 回火前后焊接接头的显微硬度测试结果

Fig.7 Microhardness test results of welded joints before and after tempering

3 结论

(1)当较低的焊接电流下(70~90 A),焊接过程中引弧较为困难且存在断弧现象,焊缝中可见严重夹渣,焊缝成形性较差;在较高的焊接电流下(110~140 A),电弧燃烧较为剧烈并且伴随着飞溅现象,焊缝中未见明显夹渣,成形性较好;在焊接电流为 90~110 A 时,焊接过程中并未出现断弧或者飞溅现象,焊缝中也未见明显夹渣等缺陷存在,焊缝成形性好。

(2)铸态模具钢组织为板条马氏体+残余奥氏体+屈氏体,退火态模具钢组织为球状珠光体,淬回火态模具钢组织为细小板条状回火马氏体。500 ℃/2 h 回火处理对焊接接头焊缝区和淬火区组织有明显改善,而对母材和回火区组织影响较小;回火态焊接接头淬火区组织为回火马氏体,焊缝区为回火马氏体+铁素体+少量残余奥氏体。

(3)焊接电流为 70~90、90~110 和 110~140 A 时,焊态和回火态焊接接头回火区的硬度都为最低,而焊接电流为 70~90 A 和 110~140 A 时淬火区硬度最高,焊接电流为 90~110 A 时焊缝区硬度最高;焊后进行回火处理可以明显提高焊接接头的抗拉强度,但是断裂位置并不会发生改变,焊接电流为 90~110 A 时焊态和回火态焊接接头的抗拉强度都要高于焊接

电流为 110~140 A 时的焊接接头。

参考文献：

[1] 孙辉. 铸造模具钢焊接修复工艺研究 [J]. 中国金属通报, 2017 (1): 62-63.

[2] 高茂涛. 热处理对新型铸造模具钢焊接接头组织和性能的影响 [J]. 电焊机, 2015, 45(6): 133-136.

[3] 刘润，张家玮，刘家安，等. 热处理工艺对铸造汽车覆盖件模具钢的耐磨性研究[J]. 摩擦学学报，2017，37(2): 185-191.

[4] 魏玉忠，刘天佐，尹少华，等. 中频感应热处理对 SA335-P92 钢焊接接头组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺，2018，47(11): 186-189，195.

[5] 何洪杰，盛光敏，焦英俊，等. 焊后热处理对 CB2 耐热钢焊接头组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理，2018，43(2): 194-199.

[6] 胡林，刘颖. SA-335P92 钢焊接及焊后热处理工艺[J]. 石油和化工设备，2018，21(1): 51-52，60.

[7] 宋雨来，孔祥瑞，李悦，等. 焊接电流对 Cr12MoV 冷作模具钢焊缝组织性能的影响[J]. 汽车工艺与材料，2017(8): 20-22，29.

（上接第 285 页）

稳定性。

4 结论

等离子焊接工艺下焊件和钎料之间互相扩散渗透形成了具有较高强度的冶金结合面，几乎没有产生明显孔洞、夹杂物等缺陷。等离子焊接焊缝组织较常规焊接方法更为均匀细致，无明显偏析、裂纹等现象，有效提升了焊缝质量。等离子焊接压应力远高于常规焊接焊缝中的残余应力，可以有效提高零件的抗疲劳性能，这一结果通过仿真分析得到了证实。

参考文献：

[1] 潘毅，王家珂，赵毅红，等. 基于 ANSYS 的阅读臂薄板件感应淬火工艺研究[J]. 铸造技术，2015，36(1): 94-96.

[2] 王韶云，李国禄，王海斗，等. 重熔处理对 NICrBSi 涂层接触疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报，2011，32(11): 135-139.

[3] Daniel L, David A, David G. The effect of random grain distributions on fatigue crack initiation in a notched coarse grained superalloy specimen [J]. Computational Materials Science, 2011 (51): 273-280.

[4] 凌文丹，王瑞海，李小飞. 亚温淬火对淬火态 60Si2Mn 钢组织与强韧性的影响[J]. 热处理技术与装备，2010，31(4): 13-16.

[5] 刘春燕，周丹晨，李昌安，等. 60Si2MnA 弹簧钢片失效及热处理工艺[J]. 金属热处理，2010，35(2): 73-76.

[6] 猴侠. 磨料三维多层可控排布电镀砂轮的若干研究[D]. 大连: 大连理工大学.

[7] Zhao Q F, Wang T Y, Wang J, et al. Template-directed hydrothermal synthesis of hydroxyapatite as a drug delivery system for the poorly water-soluble drug credible [J]. Applied Surface Science, 2011.257(23): 10126-10133.

[8] Li Y, Wang C L, Wang R S. The thermal stress analysis and structure optimum of neck tube with vertical cryogenic insulated cylinders based on ANSYS [J]. Nuclear Engineering and Design, 2012 (252): 144-152.

技术资料邮购

《铸造抗磨产品实用生产技术集》

《铸造抗磨产品实用生产技术集》本书由李德臣教授级高工编著。 共8章： 1、关于锰钢生产技术；2、球墨铸铁与蠕墨铸铁生产技术；3、抗磨产品生产技术；4、锤头生产技术；5、消失模、V法生产技术；6、典型铸件的生产技术；7、还原罐生产技术；8、关于企业管理。全书22万字。特快专递邮购价：98元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071