DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.07.006

柴油机铸铁气缸套黑斑缺陷形成机理与解决方案研究

蒲小涛[1],文　均[1],刘　懿[2],邓晰文[2],雷基林[2]

(1. 成都银河动力有限公司,四川 成都 610505; 2. 昆明理工大学 交通工程学院,云南 昆明 650500)

摘　要:柴油机铸铁气缸套加工质量要求提高后,在气缸套外壁表现出大量黑斑缺陷,导致废品率上升。以缸套黑斑为研究对象,通过对比实验的方法,对大中型气缸套黑斑缺陷的产生原因进行系统研究,从孕育剂、浇注速度、组织硬化、冷却凝固条件、加工工艺和离心机主轴振动等方面,研究了黑斑缺陷的形成机理。结合黑斑缺陷形成的机理,提出了有效防控措施。结果表明,冷却凝固条件和离心机主轴异常振动直接影响黑斑缺陷的形成;黑斑缺陷显著下降,气缸套铸造废品率恢复正常。

关键词:铸铁气缸套;气缸套黑斑缺陷;缺陷形成机理

中图分类号:TG143　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)07-0579-05

Study on Formation Mechanism and Solution of Black Spots Defect in Cast Iron Cylinder Liner of Diesel Engine

PU Xiaotao[1], WEN Jun[1], LIU Yi[2], DENG Xiwen[2], LEI Jilin[2]

(1. Chengdu Galaxy Power Co., Ltd., Chengdu 610505, China; 2. Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: After the processing quality requirement of diesel engine cast iron cylinder liner was improved, a large number of black spot defects appeared on the outer wall of cylinder liner, leading to the increase of reject rate. Taking the black spot of cylinder liner as the research object, through the method of comparative experiment, the causes of the black spot defect of large and medium cylinder liner were systematically studied. The formation mechanism of black spot defect was studied from inoculant, pouring speed, microstructure hardening, cooling and solidification conditions, processing technology and centrifuge spindle vibration. Combined with the formation mechanism of black spot defects, the effective prevention and control measures are put forward. The results show that the conditions of cooling and solidification and the abnormal vibration of the centrifuge spindle directly affect the formation of black spot defects. The black spot defects decreased significantly, and the casting reject rate of cylinder liner returned to normal.

Key words: cylinder liner; black spots defect; formation mechanism research

柴油机铸铁气缸套一般采用金属型离心铸造生产。在生产中发现个别气缸套在加工中反映出亮度不均;这些亮度不均的部位杂乱地分布在气缸套内外壁表面上,且在亮暗相间的部位,若隐若现地存在不规则的分界线,这种缺陷称为云斑缺陷。云斑缺陷在气缸套离心铸造中普遍存在,尤其是在大型缸套中。在我国船舶行业标准 CB/T 3903-1999《中、大功率柴油机离心铸造气缸套金相检验》中对云斑偏析和白斑组织有专门的定义和分级标准[1]。

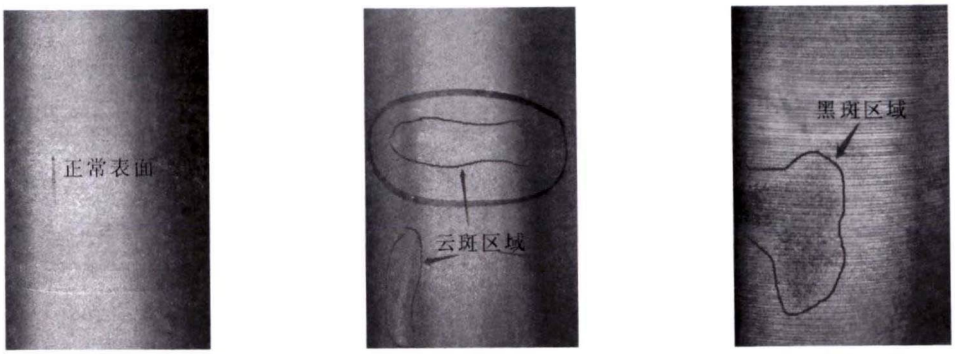
为了改善气缸套外观质量,在机加工时提高进给速度和转速,缸套整体看起来更明亮。在加工过程中,一种有别于云斑组织的现象逐步显现出来:一些缸套在外壁加工过后出现不规则块状黑暗区域,造成废品率上升约 2 个百分点。除了块状区域颜色较缸套正常部位偏暗,不同于云斑缺陷之外,其余形貌特征同云斑缺陷一致。为了区分,将这种缺陷称之为黑斑。图 1 示出了气缸套外观的正常表面及云斑和黑斑缺陷。

从外观形貌上看,云斑(白斑)表现在气缸套表面正常灰暗颜色上出现的不规则白亮区域,而黑斑恰恰相反,表现在气缸套表面正常明亮颜色上出现的不规则灰暗区域。关于气缸套云斑、黑斑缺陷,同行企业已经开展了相关的研究。赵明刚[2]指出组织

收稿日期:2021-05-09

作者简介:蒲小涛(1985—),四川渠县人,学士,工程师.主要从事发动机气缸套离心铸造工艺研究.
电话:13880099283,Email:13880099283@163.com

通讯作者:刘　懿(1990—),河北新乐人,博士.研究方向:内燃机喷雾与燃烧研究.电话:18184840326,
Email:lqyi@tju.edu.cn



(a)正常表面　(b)云斑缺陷　(c)黑斑缺陷

图 1 气缸套外观形貌

Fig.1 Surface of the Cylinder Liner

和成分不均匀是形成黑斑的重要原因，同时提出了黑斑缺陷的解决措施建议：强化从外向内的顺序凝固，提高碳硅当量和锰含量，控制原材料，减小遗传性的影响。陶晓明[3]描述了大型船用气缸套云斑缺陷宏观和微观上的特征，认为云斑主要是由于大直径气缸套端面大、冷却速度较慢和共晶停留时间长等导致的石墨畸变引起的；另外，化学成分偏析、残余孕育剂过高或分布不均匀、工艺条件等也是影响云斑的重要因素。认为消除云斑缺陷应改善气缸套的凝固条件，采取合理的孕育处理工艺，消除石墨畸变；熔炼工艺中强化脱硫，加强炉料管理；铸型涂料要烘干等[3]。王敏刚和赵世雄[4]对一种大型船用柴油机缸套白斑云斑缺陷进行了原因分析，指出白斑是由浇注过程中浇注槽底聚集的铁豆掉入型腔对周围铁液激冷析出奥氏体枝晶以及铁液过冷所析出的粗大奥氏体偏聚形成的，云斑是由析出石墨偏聚及不均匀分布导致出现异常组织而形成；采取降低易偏析的 Mn、P、S 等元素、提高 Cu、Ni 等无限固溶元素、改底漏式离心浇注为侧浇式以及浇注时加入 0.2%75FeSi 等措施，可明显减少白斑云斑的出现；同时缸套本体抗拉强度提高约 20~30 MPa，金相组织中粗大石墨和粗大磷共晶明显减少。赵跃忠[5]指出有云斑偏析的气缸套的抗拉强度较正常无缺陷的气缸套的抗拉强度会有不同程度的降低，其降低幅度与云斑偏析的轻重程度有直接关系；相对于 CS1、CS2 级偏析区域来说，其硬度值与正常值差异不大，但相对于 CS3、CS4 级偏析区域来说，其硬度差值在 HB40 以上，甚至达到HB100。

由于硬度值是反映气缸套耐磨程度的一个指标，如果气缸套内孔的硬度差异较大，会产生偏磨、异常磨损或拉缸等现象，因此必须对云斑偏析加以控制。云斑偏析对其耐蚀性没有明显的差异。程先军在文献中[6]指出：采用离心铸造生产的大型船用气缸套，由于其壁厚大，缸套表面容易产生花纹，花纹缺陷是由磷共晶偏析引起的。此外，邓晗、杨志刚和王瑞等人在对球墨铸铁件异常灰斑组织的研究文献[7]中也指出：成分偏析和局部区域结构厚大造成其冷却凝固时间长会促进铸铁中成分偏析的发生。Park 等人在对 Mn 元素在灰铸铁中的偏析研究文献[8] 中也指出：Mn 元素在铸铁中沿厚度方向存在负偏析，对铸件组织均匀性有一定的影响。王玲、董建新、杨春军等在研究大尺寸铸件黑斑缺陷形成机理的文献[9]中指出：黑斑是由于金属液冷却凝固过程中的糊状凝固区富溶质液体对流形成的通道偏析。从以上对云斑(白斑)和黑斑、花纹、灰斑的宏观、微观形貌特征研究可以看出，云斑(白斑)和黑斑实质上都是气缸套微观组织的不均匀与偏析造成的。所以说，从本质上说，黑斑缺陷实质上是云斑缺陷的一种。

然而，上述研究没有针对云斑(白斑)、黑斑缺陷产生的原因进行系统性的对照研究，对实际生产的指导性作用不够。为此，本文以金属型离心铸造钒钛合金灰铸铁气缸套黑斑为研究对象，通过对比实验的方法，对大中型气缸套黑斑缺陷可能产生原因进行系统研究，锁定黑斑缺陷主要原因，提出有效防控措施，为柴油机铸铁气缸套防控黑斑缺陷提供理论依据和技术参考。

1 试验研究

金属型离心铸造钒钛合金灰铸铁气缸套的化学成分见表 1。

通过对气缸套黑斑缺陷部位的理化分析发现，该部位石墨以粗大的 A 型为主，硬度值较正常部位偏低 HB10～30，证实黑斑缺陷实质是组织上的不均匀、偏析造成的。由于不同化学元素在铸铁冷却凝固过程中表现出的不同性质，偏析在铸造中普遍存在。如锰可以延迟石墨 / 金属界面上的铁素体成核，

表1 试验钒钛合金铸铁气缸套化学成分 w(%)

Tab.1 The chemical composition of vanadium titanium alloy cast iron cylinder liner

C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Ti	Fe
3.1~3.4	2.3~2.5	0.7~0.8	0.3~0.4	≤0.1	≤0.4	0.25~0.35	0.05~0.15	余量

并可能减缓碳向奥氏体内的扩散，从而产生偏析[10]。更为重要的是，由于离心铸造凝固成形特点，在铸件的径向和纵断面都可能形成偏析；离心力作用下铁液中各种比重存在差异的相在凝固过程中所受力的差异也会造成比重偏析[11]。

可能导致黑斑缺陷的因素包括：孕育剂熔化不完全、浇注速度太慢、组织硬度差异太大、冷却凝固条件差异、机加工工艺变化、离心铸造机异常振动等。为了验证上述因素，本文将依次对其进行实验研究。

1.1 孕育剂的影响

在铁液炉后处理时加入孕育剂，孕育剂的熔点一般在1 300～1 400 ℃。当铁液温度偏低时，孕育剂不能在铁液中很好的熔解扩散，局部孕育剂浓度过高，造成在凝固结晶过程中铁液各部位孕育效果存在差异，导致各部位石墨形态和组织存在差异，有可能造成黑斑产生。因此，分别在高温状态和低温状态下加相同粒度的孕育剂浇注缸套，取样品试车。得到如表2所示的孕育剂的试验数据。

表2 孕育剂试验1结果

Tab.2 Results of inoculant test 1

高温	低温	1号孕育剂	试样数量	黑斑数量
•		•	10	0
•			10	0
	•	•	10	2
	•		10	0

注：①高温：铁液浇注温度在1 350～1 420 ℃；低温：铁液浇注温度在1 280～1 320 ℃。

②1号孕育剂：75SiFe，粒径1~2 mm。

从表2可以看出，在温度较低状态下使用1号孕育剂，会出现黑斑缺陷。继续进行了有针对性的低温孕育剂试验，将浇注温度降至更低，同时将孕育剂粒度增大，促成孕育剂不能充分熔化的状态，试验结果如表3所示。

表3 孕育剂试验2结果

Tab.3 Results of inoculant test 2

高温	超低温	2号孕育剂	试样数量	黑斑数量
	•	•	20	0

注：①超低温是选择铁液浇注温度极低，孕育剂不能充分熔解。

②2号孕育剂：75SiFe，粒径5~8 mm。

在上述试验中，铁液已呈半凝固状态下加入粒度较大的2号孕育剂(75SiFe，5-8 mm)。在试验时可以明显看到，孕育剂在铁液中不能完全熔解，一部分孕育剂还粘附在浇包上。从试验数据看，此种状态下生产的样品并未出现黑斑缺陷。试验证实铁液温度偏低时孕育剂的熔化不完全，铁液中局部Si元素过高并不是造成黑斑缺陷的必然因素。

1.2 浇注速度的影响

在离心铸造金属液凝固过程中，浇注速度过慢，会促使铁液在冷却凝固过程中形成层状组织，这种现象在金属液温度较低时更明显。浇注温度提高，浇注速度增大，可以减弱或消除这一问题[12]。为验证浇注速度对黑斑缺陷的影响，采取低温施加1号孕育剂的方式结合浇注速度的快慢进行试验，试验结果如表4所示。

表4 浇注速度试验结果

Tab.4 Results of pouring speed test

快浇	慢浇	试样数量	黑斑数量
	•	10	1
•		10	3

注：①快浇：浇注速度8 s左右，达到正常浇注速度(8～10 s)的上限。

②慢浇：浇注速度30 s以上，远远超过正常的浇注速度要求所允许的最慢值。

从表4中可以看出，两种方式下都出现了黑斑缺陷，其中快浇的缺陷比例更高，和理论设想的相反，证明浇注速度快慢对黑斑无直接影响。

1.3 组织硬度的影响

一般气缸套硬度在合格层为HB225～HB240，气缸套整体硬度差不超过HB30，但黑斑部位硬度较正常状态硬度值偏低，硬度值只有HB210左右。基于此，可以设想：如果适当控制气缸套整体硬度上升HB10～HB15，促使黑斑部位的硬度值也达到HB225以上，减小整个气缸套各部位之间的硬度差异，或许可以避免出现黑斑缺陷。于是，在一次生产中，将某个炉次生产的一批气缸套硬度控制在HB240以上。通过取部分较高硬度的气缸套试验品送加工车间，和硬度按照原来控制的同批次缸套对比加工试车，结果见表5。可以发现，两者都有10%左右的黑斑缺陷废品，证明气缸套整体硬度的高低

表5 组织硬度差异对比试验结果

Tab. 5 Results of microstructure hardness difference

低硬度	高硬度	试样数量	黑斑数量
	•	30	3
•		30	4

注：低硬度指正常硬度值，HB230±5；高硬度为HB245±5。

不是造成黑斑缺陷的必然因素。

1.4 冷却凝固条件的影响

气缸套在冷却凝固过程中，来自外壁金属型以及冲击在金属型上的冷却水对其凝固过程有较大的影响，局部冷却强度的差异会对缸套各部位凝固特性产生影响，这样就会造成缸套不同位置存在组织和硬度差异。基于此种观点，研究小组做了冷却凝固条件差异对黑斑缺陷的影响试验，试验结果如表 6 所示。

表 6 冷却凝固条件差异试验结果

Tab.6 Results of different cooling and solidification conditions experiment

空冷	强制水冷	正常水冷	试样数量	黑斑数量
•			20	0
	•		20	0
		•	20	3

注：①空冷：指浇注完毕后的凝固过程中不使用水冷，气缸套在模具内自然冷却至可出模温度。

②强制水冷：指浇注完毕后立即对缸套模具外壁进行冲水冷却，通水时间 45 s，强制性缩短缸套冷却凝固时间。

③正常水冷：指按照正常生产工艺要求，浇注完毕后延时 20 s 开始放水冷却模具，通水时间 35 s。

从表 6 中可以看出，空冷和强制性的水冷都未产生黑斑缺陷；相反的是，正常水冷工艺生产的缸套有 15%的试件出现了黑斑缺陷。这种结果与实际生产情况一致，在实际生产中，所有的缸套都是采取了延时放水冷却凝固方式。空冷的冷却速度极为缓慢，铁液长时间处于熔融状态，凝固过程中的比重偏析进行得更彻底；在相同的直径方向上，组织均匀性反倒更好，黑斑缺陷不易产生。采取强制性水冷时，在极短的时间内迫使铁液温度达到固相线附近，比重偏析现象还未发生，铁液已失去流动性，黑斑缺陷也不易产生。采用正常的冷却凝固工艺时，有一定的延时冷却时间，给了比重偏析发生的必要条件；但这一时间较短，比重偏析来不及充分进行，随即进行放水冷却凝固，铁液温度迅速降至固相线附近，失去了流动性，则铁液中存在的比重偏析被固化下来；这种径向上的比重偏析杂乱无章，直接影响了后续凝固过程中的组织的结晶，从而造成严重的组织偏析。因此，冷却凝固条件的差异对黑斑缺陷有直接影响。

1.5 加工工艺的影响

由于黑斑缺陷是在加工工艺发生改变后显现出来的，可以设想，通过改变加工工艺，保持缸套外观质量仍然很好的状态下，让黑斑缺陷消失。试验中将一只黑斑缸套再次加工，将车床转速由 400 转 / 分提升至 600 转 / 分，直至 800 转 / 分，这只黑斑缺陷缸套外观质量变得更漂亮，其原来的黑斑部位明显有所改善。这个实验证实：改变加工工艺，黑斑缺陷可以得到一定的掩盖，有助于改善黑斑缸套外观质量，但并不能真正消除黑斑缺陷。

1.6 离心机主轴振动的影响

卧式离心机结构简单，离心机主轴异常振动时有发生。离心机主轴的异常振动（窜动、抖动）对铁液凝固过程中的微小质点产生方向不一的杂乱动力，影响组织均匀性，加剧偏析现象。研究小组做了验证离心机主轴振动对黑斑缺陷的影响试验。

将黑斑缺陷缸套剖开检查断面，可以发现其断面存在晶粒粗细夹杂分布不均的现象。在生产时检查离心机主轴振动情况，并对全部离心机各取样一只剖开检查断面。一些主轴异常振动的离心机生产的缸套从断面上可凭肉眼观察到组织杂乱、不均匀现象。正常离心铸造生产的气缸套断面，晶粒是从内壁到外壁由粗逐渐变细，主轴振动异常的离心机生产的缸套断面表现出晶粒粗细夹杂，分布不规律，断面中心部位甚至外壁部位出现粗大晶粒。对断面晶粒粗细夹杂不规则分布的离心机所生产的产品抽样，试车跟踪。试验结果如表 7 所示。

表 7 离心机主轴异常振动缸套试验结果

Tab.7 Test results of abnormal cylinder liner vibration of centrifuge spindle

	抽样数	黑斑数量
离心机正常	120	0
离心机异常	30	11

注：均采用正常生产工艺，浇注温度约 1320 ℃，采用 2 号孕育处理，浇注速度正常，延时 20 s，冷却 35 s。

从表 7 的试验结果可以看出，离心机主轴振动异常的气缸套的黑斑比例高达 36%。理想状态下运转的离心机是绕着旋转轴（主轴）平衡转动。在转动过程中，旋转轴自身不存在上下左右跳动或前后窜动的现象。此时，铁液各部位所受力除了离心力之外就只有其自身重力。而实际情况是一些离心机由于轴承使用中磨损、主轴定位不当、轴承与主轴之间间隙过大等原因，在运转过程中，主轴发生上下左右跳动或前后窜动，这相当于给凝固中的铁液增加了除离心力和自身重力之外的另一种不规则动力。由于铁液本身即存在化学成分不均匀，如孕育剂扩散不均匀和合金元素分散不均匀，这种不规则动力作用到铁液上，铁液各部位在力的作用下产生的效果也不均匀，并且将这种不均匀的动力作用放大，导致铁液组织的不均匀性扩大，最终表现出缸套断面晶粒粗细的夹杂与不规则分布。

2　黑斑缺陷形成机理分析

综合分析上述试验结果，可知：

(1)局部存在的石墨形态细微差异不会严重影响缸套的性能。黑斑缺陷实质上是气缸套断面组织的不均匀，宏观上可以看到断口晶粒粗细夹杂、不规则分布，微观上则是缸套整体组织均匀性欠佳，个别部位石墨形态同正常部位有差异，各部位硬度存在不均匀。但从石墨形态检查来看，黑斑部位石墨形态其实更好，A 型石墨占比更高。从钒钛材质气缸套国家标准要求来看，其石墨形态为 A、B、C、D 均合格。

(2)要解决黑斑问题，必须多方面入手，尽可能减少对气缸套凝固过程中组织偏析的影响。从影响气缸套组织均匀性和硬度差异的因素来看，上述各种试验因素，包括孕育剂、浇注温度、浇注速度、金属型温度、冷却工艺实质上都会对气缸套的组织偏析造成影响。

(3)空冷和强制冷却可以有效地控制黑斑缺陷，但二者都属于异于常规生产工艺的一种手段，从实际生产来看，上述措施是不可取的。空冷时，铁液冷却凝固周期较长，生产节奏缓慢，严重降低生产效率；强制性水冷时，冷却时间短，生产节奏更快，但有极大的风险造成气缸套石墨形态恶化、模具温度极低、白口化严重等问题。所以，应结合上述理论分析，采取适当的工艺措施，在兼顾生产效率的同时，通过适当的手段来减轻组织偏析。

(4)离心机主轴振动异常是出现黑斑缺陷的主要原因。在生产过程中逐一抽样检查每台离心机所生产的缸套断面情况，可及时发现存在黑斑缺陷的产品。及时对离心机进行维修，消除其主轴的异常振动，黑斑缺陷将会得到避免甚至消除。

3　黑斑缺陷控制措施

通过上述试验结果与综合分析，可提出以下黑斑缺陷控制措施：

(1)在生产中，严格执行工艺守则和标准化作业规程，确保浇注温度达到 1 320 ℃以上，减轻由于温度较低导致的孕育剂熔化不充分的问题。

(2)熔炼环节上，各种合金元素增补后，必须保证在炉内足够的精炼时间，确保合金元素在铁液中扩散充分。

(3)每班首件检查时，对每台离心机所生产的缸套检查断面，如果发现断面有异常，停机维修，消除离心机异常振动后才能继续生产。

(4)参考我国船舶行业标准 CB/T 3903-1999《中、大功率柴油机离心铸造气缸套金相检验》中对云斑缺陷的分级标准，结合产品结构与用途，制定黑斑缺陷评判标准，减少不必要的报废，降低损失。

上述控制措施实施后，取得了良好效果，黑斑缺陷显著下降，气缸套铸造废品率恢复正常。

参考文献：

[1] CB/T3903-1999. 中国船舶工业总公司. 中、大功率柴油机离心铸造气缸套金相检验[S].

[2] 赵明刚. 卧式离心铸造铸铁气缸套的黑斑缺陷及对策[J]. 铸造，2005(7)：717-718.

[3] 陶晓明. 船用气缸套云斑产生原因及防止措施 [J]. 机械工人，2004(1)：70-71.

[4] 王敏刚，赵世雄. 消除离心铸造船用柴油机缸套白斑云斑缺陷的对策[J]. 中国铸造装备与技术. 2011(1)：36-38.

[5] 赵跃忠. G03 气缸套离心铸造云斑偏析的质量放行标准的实践[J]. 武汉船舶职业技术学院学报. 2012(5)：26-28.

[6] 程先军. 大型船用气缸套花纹缺陷研究 [J]. 铸造技术. 2017,38(10)：2556-2558.

[7] 邓晗，杨志刚，王瑞，等. 球墨铸铁件异常灰斑组织的研究[J]. 铸造技术. 2020,41(8)：753-755.

[8] PARK J Y，CHOI K T，SZPUNAR J A, et al. Effect of Mn negative segregation through the thickness direction on graphitization characteristics of strip-cast white cast iron [J]. Scripta Materialia. 2002,46(3)：199-203.

[9] 王玲，董建新，杨春军，等. 宏观偏析黑斑形成机理及其判据[J]. 铸造技术. 2007,28(5)：585-589.

[10] LABRECQUE C, GAGNé M. Review ductile iron: fifty years of continuous development [J]. Canadian Metallurgical Quarterly. 1998, 37(5): 343-378.

[11] 曾昭昭. 特种铸造[M]. 杭州：浙江大学出版社，1990.

[12] 林伯年. 特种铸造[M]. 杭州：浙江大学出版社，2004.

《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