

油淬可锻铸铁的强度和新的应用

Cornelis J. van Ettinger

(Gieterij Doesburg, The Netherlands)

摘要: 最近的研究表明, 通过采用新技术并与实践经验相结合, 有可能使可锻铸铁的铸件年产量达到与球墨铸铁相同的水平。根据标准, 可锻铸铁的力学性能和比屈服强度与球墨铸铁的相当, 但是油淬可锻铸铁的屈服强度明显高于球墨铸铁的屈服强度。根据在相同条件下生产的超过350根试棒的性能, 对球墨铸铁、空淬可锻铸铁和油淬可锻铸铁开展了范围广泛的调查和研究。对研究结果与现有的国际标准进行了比较和讨论。还讨论了其他性能, 例如疲劳强度和对感应硬化那样的表面处理的响应特性。回顾和评价了可锻铸铁的成本并与其他铁基合金进行了比较。在提高铸件收得率和对强度认识方面的这些最新研究, 使可锻铸铁能够与球墨铸铁相竞争, 其价格比最高级别的奥铁铸铁便宜, 其质量或可与钢媲美。有可能使设计轻量化而减轻零件的质量, 这在汽车工业中是极其重要的。展示了“绿色铸造”研发的用于汽车传动装置和发动机的典型应用实例。

关键词: 可锻铸铁; 油淬; 力学性能; 比屈服强度

中图分类号: TG143.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2011) 03-0215-09

Oil Quenched Malleable Iron, the Strength of an Old Material in a “Green Cast” Development and a New Future

Cornelis J. van Ettinger

(Gieterij Doesburg, The Netherlands)

Abstract: Recent developments shows, however by using new technologies and combined with practical experiance, it is possible to increase the casting yield of malleable iron to the same level as of ductile iron. The mechanical properties, specific the yield strength of malleable iron according to the standard are equivalent to those of ductile iron, however the yield strength of oil quenched malleable iron is significantly higher than that of ductile iron. An extensive investigation is made between ductile iron, air quenched-and oil quenched malleable iron based on the properties of more then 350 test bars produced under the same conditions. The results are compared with the existing international standards and discussed. Other properties like fatigue strength and response to surface treatments as induction hardening are discussed. The costs of malleable iron are reviewed and compared with other ferro-alloys. These recent developments in increasing the casting yield, the understanding of the strength, makes malleable iron competitive with ductile iron and cheaper then the first grade of ausferritic ductile iron, or steel qualities. It is possible to design lighter and save weight which is essential in the automotive industry. An example of “green cast” development for typical applications, used in automotive transmissions and engines are shown.

Key words: malleable iron; oil quenched; mechanical behaviour; specific the yield strength

1 可锻铸铁的历史

可锻铸铁的历史可以回溯到欧洲。法国科学家和冶金学家R. A. F. de Réaumur在1720年至1722年期间发表了第一批论述可锻铸铁件的技术论文。在美国是发明家Seth Boyden引入了可锻铸铁。Boyden知道欧洲有白心可锻铸铁, 预见了一种材料的潜在市场, 并开始了一系列寻找如何生产可锻铸铁的试验。由于使用的是生铁, Boyden发现其试样的断口是“黑灰色的”(黑心的), 这是由热处理后存在的游离碳所引起的。

图1所示为铁素体可锻铸铁的组织, 其中存在有典型的石墨形状。

在1831年Seth Boyden被授予了第一个可锻铸铁美国专利, 随后在他设在新泽西州纽瓦克市的铸造厂里开始生产铸件^[1]。

直到2007年为止, 马塞诸色州South Easton市的Belcher Corporation LCC公司是美国自1837年以来在同一地区内最古老的连续作业可锻铸铁厂^[2], 这个铸造厂最初是由Seth Boyden的兄弟Alexander Boyden创建的。那时候可锻铸铁几乎在所有工业领域中都找到了用武

收稿日期: 2010-11-20。

作者简介: Cornelis J. van Ettinger (1951-), 男, 从事铸铁、电炉熔炼和冷、热风冲天炉熔炼研究。E-mail: c.v.ettinger@gieterij-doesburg.nl

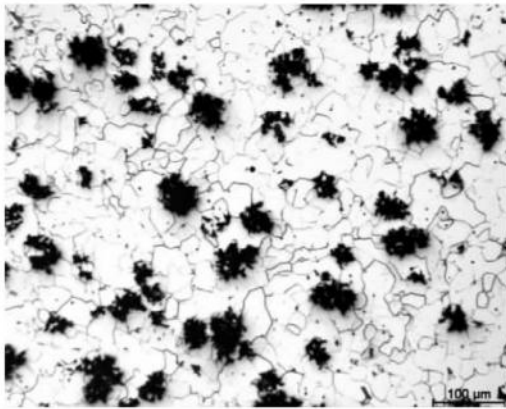


图1 铁素体可锻铸铁

Fig. 1 Ferritic Malleable Iron. Magnification

之地。首先是扣子和钻头之类的小五金器具，其次是货车和客车零件（1830年）。当农具制造开始达到工业规模时（1860年），可锻铸铁被选择用于大量制造零件。铁路部门在1890年成为可锻铸铁的新买主，汽车工业则在1910年成为大买主^[3]。时至今日，汽车工业的工程师们仍在采用可锻铸铁构件。这种黑心可锻铸铁件的典型实例除了活塞和差动变速箱体外，还有不同类型的齿轮和支架等传动装置的零件。全世界年产约100万t可锻铸铁，然而，可锻铸铁的生产和应用仍处在球墨铸铁的阴影中^[4]。

2 油淬可锻铸铁

可锻铸铁是一种黑色金属，它最初被铸造成白口铸铁，然后通过热处理使含碳相由碳化铁转变成称为回火碳的球团状石墨。

如前所述，有两种不同类型的可锻铸铁，即白心可锻铸铁和黑心可锻铸铁。两种可锻铸铁的明显区别是：白心可锻铸铁是在氧化气氛下进行热处理的，目的是保证预定要进行焊接的铸件有一个可控的脱碳圈；黑心可锻铸铁则是在防止形成脱碳圈的氮保护气氛下进行热处理的。在退火处理后对零件进行水淬或油淬，并通过回火达到所要求的硬度和强度。

油淬可锻铸铁是一种能够达到最高力学性能的黑心可锻铸铁，其抗拉强度高达800 MPa，屈服强度可达600 MPa。

油淬可锻铸铁无可比拟的强度性能及其与国际标准的比较，将在后文中进行讨论。

可锻铸铁是一种典型的低碳当量铸铁，其化学成分一般应符合表1所给出的范围。

有时还存在类似镍（ $\leq 0.8\%$ ）和钼（ $\leq 0.5\%$ ）那样的合金元素。当不采用合金元素时，则除了碳、硅、锰和硫之外，所有其他元素称为微量元素。类似铬、锡、钛、钒、铝、铜和钨那样的微量元素的含量应尽可能低，并尽可能恒定，因为这些元素会阻延或促进石墨化进程。

表1 可锻铸铁的典型成分

Table 1 Typical composition of malleable iron

元素	含量 $w_B/\%$
C	2.45~3.00
Si	1.20~1.50
S	0.05~0.10
P	0.01~0.05
Mn	0.20~0.60
Cu	0.10~0.60

3 可锻铸铁生产技术的新发展

由于有一些与亚共晶铸铁相似的缺点，即与球墨铸铁相比，可锻铸铁的铸件收得率低并需要进行热处理，使其丧失了对球墨铸铁的竞争优势。最重要的原因是成本，尤其在能源危机后可锻铸铁损失了市场份额。通过像SOREL Metal QIT（Today Rio Tinto Iron & Titanium）和International Meehanite那样的组织，球墨铸铁的销售情况非常好。另一个事实是许多灰铸铁厂开始生产球墨铸铁，因为球墨铸铁能够使这些铸造厂与可锻铸铁竞争，增加他们的产量，并且不需要进行热处理炉方面的投资。在一个有冲天炉的铸造厂内，一车球墨铸铁专用的焦炭，一个带有多孔塞的铁液包，一瓶氮气，一桶碳化钙以及一些镁-铁-硅球化剂，就是你生产球墨铸铁所需要的全部原材料。可锻铸铁产量的减少不但发生在能量成本高的期间，而且也发生在诸如计算机模拟和节能等新技术发展期间。

今天的铸造厂已经可以得到所有的新技术。假如这些新技术被用在可锻铸铁的生产中，可以预料可锻铸铁不会比球墨铸铁贵。重要的是记住，可锻铸铁的基体是在热处理过程中形成的，球墨铸铁的基体则是通过合金化和/或热处理而形成的。当像铜、镍和钼一类合金极其昂贵时，球墨铸铁可能会变得比可锻铸铁更贵。同时，热处理技术在最近十年中已经有了改进。在燃烧炉的效率、绝热和耐火技术方面都已有了改进。铸件的应用知识对一个铸造工程师来说是决定性的。借助于对充型过程和浇冒口系统位置的模拟，能够使他预先察觉到疏松区和充型缺陷或裂纹。然而，知识的陈旧不应成为缺乏创新思想的借口。早在20世纪70年代，美国铸造协会（American Foundry Society，简称为AFS）报道了在凝固期间采用热分析的重要性。Leon、Ekpoon和Heine^[5]指出了用冷却曲线测定的和用化学分析测定的碳当量之间的差别，这与液态金属的氧化程度有关。Jacobs报道了热分析结果与铸造厂废料数量之间的相关性^[6]。在Gieterij Doesburg公司的最新研究与该发现相符，但没有发现冷却曲线在液相线延滞方面的偏差。数字冷却曲线显示：第一延滞先于所谓的液相线延滞。这种现象看起来与氧化有关，因为

随着铝或镁的加入，第一延滞就消失了。图2显示了冷却曲线中的这种差别。这两条冷却曲线是在同一时间浇注的。

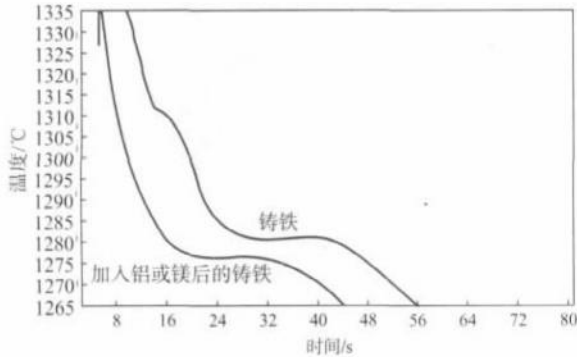


图2 铝或镁过热对液相线延滞区中冷却曲线形状的影响

Fig. 2 Effect of aluminium, magnesium or superheating on the shape of the cooling curve in the liquidus-arrest area

同样，当金属熔体强烈过热时，冷却曲线也不显示第一延滞。冷却曲线也能帮助预测凝固组织的类型^[7-8]。冷却曲线还用于检核所浇注铸铁的白口凝固。Gieterij Doesburg公司还在制定一项用于控制凝固的连续的研究和发展计划。由于有了凝固模拟技术，这项计划对于了解凝固行为是极其重要的。这项研究是更好地理解模拟技术结果的基础。

在Gieterij Doesburg公司，用于铸造过程模拟的是MagmaSoft[®]程序。模拟一个零件分三步进行。第一步是模拟铸件本身，即详细地说明铸件的温度范围、模数和收缩或期望的收缩区域。第二步是模拟充型，即显示充型对前面所进行的模拟结果的影响，它显示了在温度、模数和收缩区域方面的改变。最后一步是模拟整个浇注和补缩系统，得到最精确的结果。

在得到明确结果后，接着就是制造工模具，生产原型零件，并进行结构试验和X射线检验。除了基本的现代模拟技术外，还需要所谓的灵巧工程（Smart engineering）。它除了明确和简单的思想之外，并不包含任何其他东西。重要的是在应用新技术的同时，要判断现有知识的价值。通过对模拟结果的理解，能够提供关于什么是有用的和什么是无用的浇冒口知识方面的信息。在以前，工程师们往往要进行大量的计算，还要用他们过时的经验来开发一个浇冒口系统。有时，模拟结果会百分之百地与现有的所有知识正相反。现在，对一个工程师来说，最重要的是放弃他以往熟门熟路的工作和经验，跟着模拟走。不要给模拟制造困难和经常走回头路。当然，有一些基本规则是应该遵循的，例如金属液的最大速度、浇注时间和浇注温度等。然而，这些参数全都是用于模拟过程的。灵巧工程还能够解答有关“我们怎样应用模拟技术”的问题。换言之，我们试图在一个模样上铸得数量最多的铸件，并应用模拟过程来确定浇冒口系统所存在的问题。

4 新概念的范例

4.1 重型狄塞尔发动机活塞顶

早先提到的研发结合在一个被称为“GPSE”（绿色产品，灵巧工程）的新概念中。这个概念是降低成本的基础。它是一条通向以最低能耗生产可锻铸铁件的途径。所涉及的铸件是一个芯部厚实的零件——重型狄塞尔发动机的活塞顶，见图3。该零件的产量是14万件/年。其材料是一种油淬可锻铸铁，牌号为GM85M（ASTM 60004或EN-GJMB-600-3）。



图3 S60活塞顶铸件

Fig. 3 S60 piston dome casting

迫于该产品订货价格降低，必须设法使生产成本降低20%。这只有在模样上接更多铸件时才有可能。在原先的模样上接的是两个铸件，见图4。较早的用于另一种铸件的研究表明，在一个模样上接3个铸件是可能的。于是，从一模三件开始接着进行试铸，但是它不能获得健全的铸件。于是与该铸造厂的供应商FOSECO公司一起组成了一个解决那个问题的团队^[9]。模拟了模样设计，结果与所存在的问题相符。最终决定不采用一模三件的设计方案，并重新开始试验。这时，FOSECO的工程师开始模拟铸件，没发现其他问题。尽管在可锻铸铁方面没有任何经验，该工程师把4个铸件接在模样上，开始了进一步的模拟。



图4 原先模样的设计方案

Fig. 4 Original pattern layout

浇冒口技术需要在该铸造厂内有不同的和灵活的

思想。通过给予第一步以优先权，形成了一个成功的概念“模拟一个健全的铸件”。有32种不同的模拟是获得一个健全铸件所必须的。该计划的灵巧工程部分是采用绝热冒口，这种补缩冒口能够补缩两个铸件，并且质量最轻。

模拟工作和工模具的设计延续了十个月，但是最终的试铸和少量的修整花了两个月。在第一批历时3个月的生产过程中，用实时X射线检验证实了试验结果。图5所示是现在用于生产与图2相同的活塞顶的模様设计方案。



图5 现在的新模様的设计方案
Fig. 5 Present new pattern layout

该设计方案的结果是铸件收得率从35%提高到66%。显然节省是巨大的，尤其是在年产约14万件的规模上。在该铸造厂的每个生产区中的节省是显著的，在熔化和保温（能量保持）方面节省44%，在厂内运输方面节省39%~44%，生产速度加快，从540件/h提高到1 020件/h；此外，还增加了35 000型的生产能力。即使是一个简单的事情，例如模样磨损，也减少了一半。其次是减少了内废和外废。这是充型模拟的成果。浇注系统设计得使充型过程中引起的紊流减到最小。

4.2 传动装置的反动齿轮

在一个需要大量生产的齿轮铸件上，显示了我们称之为灵巧工程的有趣例子。该齿轮铸件结构非常简单，只是一个圆环。该零件要求必须绝对没有任何疏松。因此，乍一看来生产一个简单的圆环竟变得如此困难。由于铸件尺寸大，因此只允许一型放4个铸件。对铸件进行预加工的优点是通过机械加工可以把铸件对切成两个零件，从而使铸型中零件的数量倍增。结果是一个铸型中可得到8个零件，见图6。如果不改变该零件的尺寸或结构，则模拟技术不可能创造出健全的铸件，因为当从一侧对铸件进行补缩时，铸件的直径大于可能达到的补缩距离。

当从两侧对铸件进行补缩时，不可能在一个铸型中放下4个铸件，而只能得到两个铸件。铸件的初加工

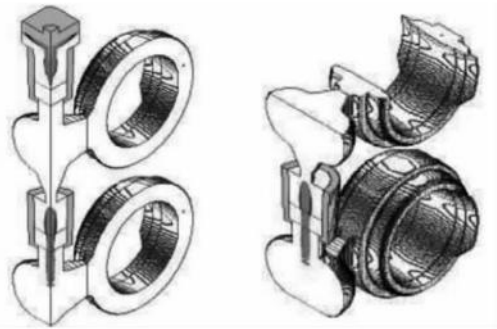


图6 反动齿轮的模拟详图

Fig. 6 Detail of simulation of reaction gear

是选择灵巧工程。通过在冒口一侧把零件做成椭圆形并在另一侧放置冷铁，这样就创造了通向冒口的定向凝固。所得到的铸件有一个较小的微观疏松，但这种疏松在铸件被切开时就被加工掉了。最终的结果是得到两个健全的零件。由于外径必须进行初加工，椭圆形零件通过最终的机械加工再次变成圆形。通过这种方法，铸件收得率达到了64%。图7所示为完成机械加工后的齿轮。



图7 完成机械加工后的反动齿轮

Fig. 7 Complete machined reaction-gear

不幸的是该零件从未正式生产，原因是买方决定改变传动装置的设计，在新设计中，该零件已经过时了。然而，该设计再次证明了新概念的价值。

5 油淬可锻铸铁的性能

油淬可锻铸铁有某些优异性能。其屈服强度明显高于空淬可锻铸铁和球墨铸铁。由于基体均匀，该材料对感应硬化或其他表面处理具有优越的响应性。鉴于基体和硬度均匀，其切削性能优良。

可锻铸铁的相对硬度要比相同等级的球墨铸铁低HB 10~20，其疲劳强度则高于相同等级的球墨铸铁。

5.1 屈服强度

根据Gieterij Doesburg公司对350多根试棒的试验结果，深入研究了力学性能。以相同方法试验和比较了这三种铸铁。试棒取自于球墨铸铁标准EN1563的Y型试块，在Disamatic立式自动造型线上生产。Y型试块既用于球墨铸铁，也用于可锻铸铁。球墨铸铁Y型试

块为“铸态”，可锻铸铁Y型试块与零件一起热处理到所要求的硬度。

按照标准DIN50125:2004-01，从Y型试块上切削加工得到B型10 mm拉伸试棒。可锻铸铁和球墨铸铁的拉伸曲线差别明显，在拉伸强度相同时，可锻铸铁比球墨铸铁显示出较高的屈服强度，见图8。

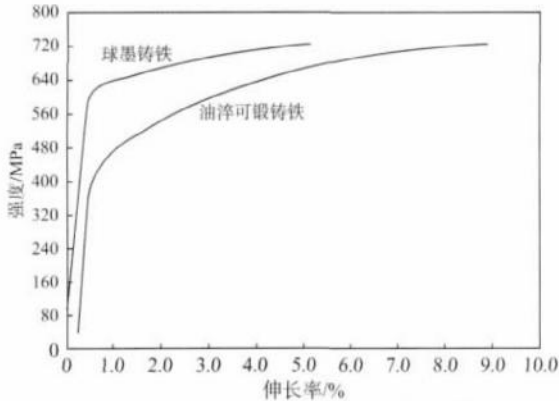


图8 球墨铸铁和油淬可锻铸铁在拉伸曲线方面的差别
Fig. 8 Difference in tensile curve between ductile-and oil quenched malleable Iron

图9显示了在一个宽的硬度范围内试验的这三种铸铁，即球墨铸铁、空淬可锻铸铁和油淬可锻铸铁的拉伸强度与屈服强度之间的相关关系。该图清楚地显示了球墨铸铁和空淬可锻铸铁之间的相似性，从而解释了标准中的相似性。然而，该图还显示了它们与油淬可锻铸铁的明显差别。油淬可锻铸铁的 R^2 是0.80，低于空淬可锻铸铁的0.85和球墨铸铁的0.96。其原因能够在较小范围内对油淬可锻铸铁的试验结果中找到。

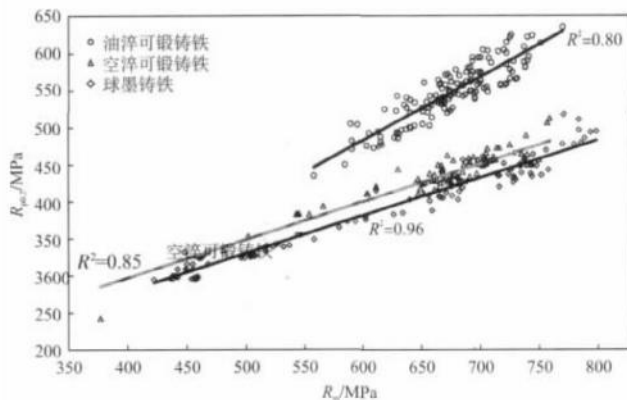


图9 三种铸铁的屈服比
Fig. 9 Yield-tensile ratio of the three irons

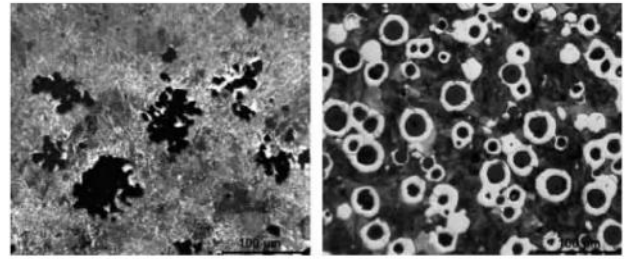
该图还可表示成屈服比，即屈服强度 $R_{p0.2}$ 与拉伸强度 R_m 之比 ($R_{p0.2}/R_m \times 100\%$)。表2评价了不同铸铁的屈服比^[10]。

油淬可锻铸铁较高的屈服强度能够在该材料的基体组织中找到解释。球墨铸铁和空淬可锻铸铁具有片状或粒状珠光体和一定数量铁素体的基体组织，见图10a和图10b。

表2 不同的试验铸铁的屈服比

Table 2 Review of the yield-tensile strength ratio in % of

the different tested irons			1%
铸铁类型	最小值	平均值	最大值
球墨铸铁	58	64	70
空淬可锻铸铁	60	65	70
油淬可锻铸铁	76	81	86



(a) 空淬可锻铸铁 (b) 球墨铸铁
图10 在基体组织尤其是珠光体中的差别

Fig. 10 Difference in Matrix structure, especially the pearlite

球墨铸铁中的珠光体是当铸型中的铸件冷却下来时，在奥氏体转变过程中由锰和铜等的合金元素形成的。空淬可锻铸铁中的珠光体是在奥氏体转变过程中通过强迫空冷而形成的。

油淬可锻铸铁具有由不含任何铁素体的回火马氏体组成的基体。这种马氏体是在奥氏体转变过程中通过极其强烈的冷却（在油中淬火）而形成的。淬火处理后的组织通过回火而形成马氏体和不同的回火组织，见图11。

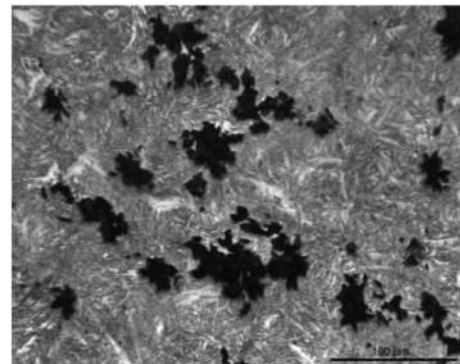


图11 油淬可锻铸铁的具有回火马氏体的典型组织

Fig. 11 Typical structure of oil quenched malleable iron, with a matrix of tempered martensite. Magnification

5.2 试验结果与标准EN 1562和EN 1563的比较

对最小屈服强度的试验结果与用于可锻铸铁的标准EN 1562和用于球墨铸铁的标准EN 1563所给定的数据进行了比较，见表3。表3中，在可锻铸铁标准EN 1562中，对等级EN-GJMB-550到EN-GJMB-650，给出了一个区域，该区域所显示的屈服强度对油淬可锻铸铁来说显得太低，对空淬可锻铸铁来说又显得太高。能够找到的原因在于这几个等级既能够用空淬又能够用油淬来制造。油淬通常不用于较低的等级，空淬则

不能制成较高的等级。

表3指出,对于等级550到650来说,标准EN 1562不能反映生产的实际结果。油淬可锻铸铁的屈强比要比空淬可锻铸铁的屈强比高出26%,也比球墨铸铁的高。

表3 对屈服强度的试验结果及对标准EN1562和EN1563的评价
Table 3 Review of yield strength results and the specification EN1562-EN1563

拉伸强度 R_m /MPa	球墨铸铁		可锻铸铁		
	EN 1563	生产结果	空淬		油淬
			$R_{p0.2}$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	生产结果
350	220	210	200	210	不常用
400	240	240	-	-	-
450	310	270	270	270	不常用
500	320	300	300	300	不常用
550	-	-	340	330	410
600	370	360	390	360	450
650	-	-	430	390	490
700	420	420	530	不常用	530
800	480	480	600	不常用	600
最小 $R_{p0.2}/R_m$	-	~60%	-	~60%	~76%

5.3 疲劳强度

今天,已经要求把疲劳性能作为选择和使用特殊材料的一项重要力学性能。现在经常用推-拉试验来测定疲劳强度。在最近三年中由两位学生所做的文献研究表明,在已知的文献中未发现类似如今文献中所示的可锻铸铁疲劳强度的文献[11-12]。Gietrij Doesburg公司在2008年向德国铸造研究所(I.F.G)提出了测定油淬可锻铸铁疲劳强度的请求,共制作了30根试棒。

在生产期间一个油淬周期的两个不同的日子里对Y型试块进行了热处理。油淬后从热处理槽中取出Y型试块并在实验室炉中将它回火到不同的硬度范围。所选择的硬度范围覆盖标准EN-1562的650-2和700-2等级(HB 212~262和HB 241~293)。最终的硬度达到HB 235~277。

从用于疲劳试验的该系列试棒中,取出三根符合硬度范围的试棒用于测定该标准所要求的力学性能,即屈服强度、拉伸强度和伸长率。最终结果为:硬度HB 235~277,屈服强度 $R_{p0.2}$ 为520~613 N/mm²,拉伸强度 R_m 为654~750 N/mm²,伸长率 A 为3.5%~4.5%。

按照标准ASTM E466对用于疲劳试验的22根试棒进行机械加工,进行16次试验,测定出疲劳强度。这个试验数量对于获得在统计上可靠的测定结果是足够的。所用的试棒硬度在HB 248~269范围内。疲劳强度非常好^[10]。50%失效机率的疲劳强度为241 MPa,5%失效机率的疲劳强度则为238 MPa,见图12。

用于球墨铸铁的推-拉试验的标准EN-GJS-700-2的疲劳强度的典型值则为200 N/mm²。

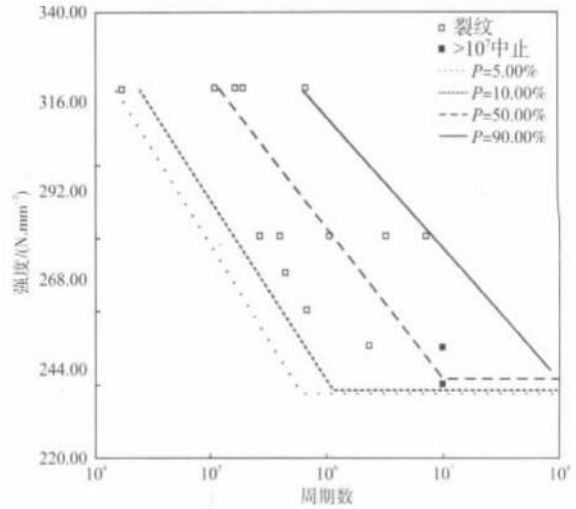


图12 有淬可锻铸铁的疲劳强度

Fig. 12 Fatigue strength of oil quenched malleable iron

5.4 对感应硬化的响应

可锻铸铁能够通过渗碳、碳氮共渗或渗氮产生一个耐磨性得到改善的表面。另外,诸如奥氏体回火那样的热处理已经在特殊用途中获得使用。

珠光体可锻铸铁能够通过感应加热并淬火或火焰加热并淬火在受热影响的表面达到高硬度,从而形成硬化的表面。我们已经进行了确定珠光体可锻铸铁的表面硬化特性,以及发展它在比较窄的整个表面带中达到高硬度能力的重要研究。通常,在由被硬化零件的表面温度和加热速度控制的渗透深度范围内,获得范围在HRC 55~60的硬度不会遇到很大的困难。

传动装置的零件大多数是感应硬化处理的,例如齿轮和托架。图13显示了一个输送机停车齿轮的齿部硬化处理的均匀性结果,其硬度达到HRC 56。可锻铸铁件最高能够硬化到HRC 67。



图13 油淬可锻铸铁的均匀感应硬化组织

Fig. 13 Uniform induction-hardening structure of oil quenched malleable Iron

硬度的再现性的基础建立在感应硬化处理前基体的一致性上。

显然,球墨铸铁在硬化后从来不可能提供一种象可锻铸铁那样的一致性,原因在于它的基体是混合基体。

6 成本比较

可锻铸铁比球墨铸铁贵,主要原因是白心可锻铸铁的热处理时间长达72 h,黑心可锻铸铁的热处理时间也需24 h,而且全部要进行用于发现裂纹的磁粉探

伤。最近,对Gieterij Doesburg公司生产的各种铸铁进行了比较它们相对成本差别的详细研究^[12]。在与球墨铸铁相同的铸件收得率的情况下,油淬可锻铸铁大约贵20%~25%。

当可锻铸铁的铸件收得率与球墨铸铁的铸件收得率相同时,所有铸铁的固定成本和造型制芯成本是相同的。对可锻铸铁来说,由于炉料中有大量的废钢,碳、硅含量低,其材料成本是最低的。可锻铸铁不需要象球墨铸铁那样对金属液进行昂贵的加镁处理。

由于可锻铸铁的铸态组织是脆性的,因此对它进行磁粉探伤是必要的。由于磁粉探伤的操作是手控,因此其费用很贵,占了总成本的13%。然而,当用于保安件时,球墨铸件同样要检测裂纹,这方面的成本差别也就不存在了。对于奥铁球墨铸铁,由于在热处理过程中淬火处理能够导致裂纹的产生,因此也需要对它进行磁粉探伤。与球墨铸铁相比,可锻铸铁的热处理过程的花费占了其成本的极大部分,这就清楚地解释了二者的不同。然而与奥铁球墨铸铁相比,可锻铸铁的热处理费用约为奥铁球墨铸铁热处理费用的三分之一。原因在于可锻铸铁是在推移式炉子中进行热处理的,每天处理的产品数以吨计,处理过程连续,并且是在自己厂内进行运作。奥铁球墨铸铁的热处理则是按批进行的,而且多半不是在本厂内进行,而是在专业的热处理公司进行。

油淬可锻铸铁的相对价格是由我们的研究所提供的信息推导出来的。但是,当要求进行象感应硬化那样的表面处理,并以旨在减轻质量的准确的力学性能重新设计零件时,可锻铸铁是能够与球墨铸铁竞争的。图14清楚地表明在不要求伸长率的情况下,油淬可锻铸铁能够与一级奥铁球墨铸铁竞争。如果相对成本与材料的屈服强度有关,则油淬可锻铸铁能够与球墨铸铁竞争。

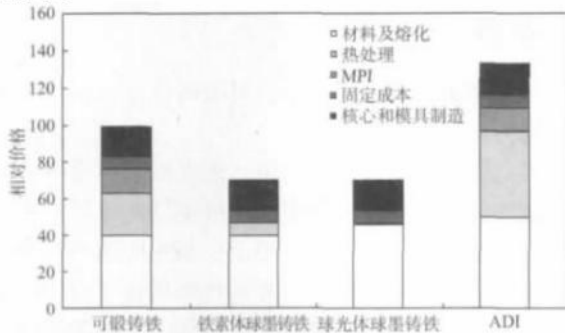


图14 相对成本的比较

Fig. 14 Comparison of relative costs

7 应用

图15显示了各种二冲程和四冲程重型狄赛尔发动机的活塞。它们的质量在2.3~7.4 kg。所有活塞的芯部



图15 各种活塞零件

Fig. 15 Various piston parts

都很厚实,壁厚为5~30 mm。值得注意的细节是,所有的零件在完成机械加工后都必须满足重量公差的要求。这个要求只有在具有非常精确的芯部尺寸公差时才能达到。

图16-19中所示是用油淬可锻铸铁制造的传动装置的各种零件。这些零件用在质量达3.5 t的卡车的自动传动装置上。所有零件都用油淬可锻铸铁制造并回火到EN-GJMB-650-2级。所有零件还要在受到磨蚀的区域尤其是齿部接受感应硬化处理。零件最重达5.5 kg。



图16 传动装置的各种零件

Fig. 16 Various transmission parts, gear reaction, carrier and gear diff carrier

这些应用早在1950年初就已投入使用,并且至今仍然是独一无二和非常可靠的。不要忘记,与钢相比,铸铁组织具有润湿作用。石墨颗粒能够吸收油脂,这种现象减轻了齿轮在停车一段时间后再次启动时的磨损。

图19a图解了经过疲劳试验后在钢制的环齿轮上造成的损伤。图19b显示了一个用油淬可锻铸铁制造的环齿轮,在经过与图19a相同的试验后未见明显的损伤。

由于油淬可锻铸铁的高强度,最近,一家很有名的欧洲汽车公司决定将它用于一种差速器壳体。该零件将于2011年投入生产。油淬可锻铸铁还可用于类似图20和图21所示的小零件,图中是一个用于混凝土结构的质量仅为196 g的锚钉,图21中所示的螺母被用于高负荷脚手架。

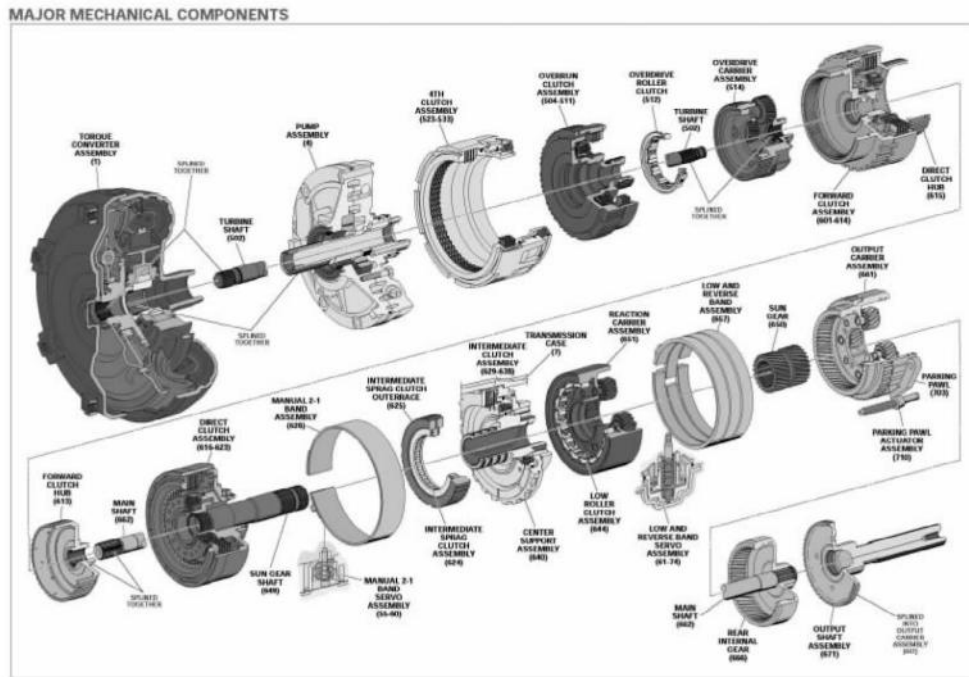


图17 自动传动装置的一个详解区的横截面

Fig. 17 Cross section of a detailed area out of an automatic transmission



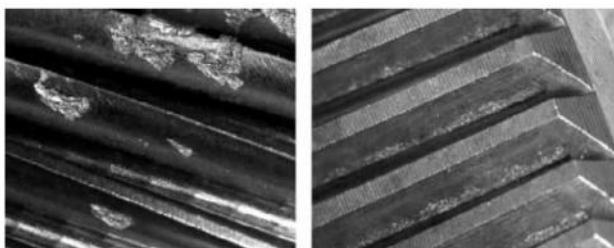
(a) 后内齿轮

(b) 传动轴定子

(c) 超速离合器外壳

图18 各种传动零件

Fig. 18 Various transmission parts, gear rear internal, shaft stator and overrun clutch housing



(a) 钢制环齿轮

(b) 油淬可锻铸铁制环齿轮

图19 油淬可锻铸铁环齿轮与钢制环齿轮的损伤比较

Fig. 19 Damage compare between same ring gear made of steel and made of oil quenched malleable iron

这两种零件都是用EN-GJMB-650-2级屈服强度高的可锻铸铁生产的。这两种应用都显示了该可锻铸铁在浇注时有极好的流动性。而采用球墨铸铁时则几乎不可能生产这些零件。用来制作芯砂的是一种特殊的热固化砂。

8 结语

自从球墨铸铁发明以来，可锻铸铁是一种最古老的韧性铸铁。

可锻铸铁以前是与钢竞争，现在由于球墨铸铁的相对成本比较低，钢的许多应用可能已被球墨铸铁所代替。黑心可锻铸铁尤其适用于高强度应用领域和需要进行象表面处理那样的附加处理的场合。现代铸造技术使可锻铸铁的铸件收得率提高到等于球墨铸铁的铸件收得率。

在不需要加入镍和钼那样昂贵的合金元素的情况下，油淬可锻铸铁所达到的80%的高屈强比，要优于球墨铸铁。鉴于国际标准并没有反映出空淬或油淬可锻铸铁的等级差别，这种错误不利于油淬可锻铸铁的应用。



图20 油淬可锻铸铁制造的重196 g的锚钉

Fig. 20 Anchor made of oil quenched malleable iron. Weight 196 grams



图21 油淬可锻铸铁制造的 $\Phi 70$ mm、重600 g的螺母

Fig. 21 Threaded nut made of oil quenched malleable iron. $\Phi 70$ mm.
Weight 600 grams

油淬可锻铸铁具有均匀的性能，是一级奥铁球墨铸铁的一种低成本替代材料。油淬可锻铸铁的这种强度，如果得到最佳使用的话，有可能用它来设计出较轻的零件。基体组织的一致性保证了对感应硬化那样的某些表面处理的最大响应。

通过回顾，当设计师和工程师们意识到并利用油淬可锻铸铁均匀的性能时，油淬可锻铸铁将会在不久的将来获得新的机遇。

致谢：作者对Gieterij Doesburg公司允许发表本文表示衷心的感谢。作者还感谢General Transmission

Products公司和VS Guss AG公司在提供照片方面所作的贡献。

参考文献：

- [1] Malleable Founders Society. Malleable iron castings [M]. Michigan: The Ann Arbor Press Inc., 1960.
- [2] Smith Irene. The Belcher Malleable Iron Foundry [EB/OL]. 1956 [2010-05-10]. <http://freepages.genealogy.rootsweb.ancestry.com/~belcher/history/h002.html>.
- [3] Millis K D. Forty yeats-where do we go from here? [C]// Proceedings of the 1987 BCIRA International Conference, "S. G. iron-the next 40 years", University of Warwick, 1987.
- [4] Modern Casting Staff Report. 43rd census of world casting production—2008: global production dipped below 2007's volume, reflecting the worldwide recession that started in the final quarter of 2008 [J]. Modern Casting, 2009 (12): 17-21.
- [5] Leon C, Ekpoon U, Heine R W. Relationship of casting defects to solidification of malleable base white cast iron [J]. AFS Transitions, 1981, 89: 323-344.
- [6] Jacob F W. Practical of liquidus control for malleable iron melting [J]. AFS Transactions, 1981, 89: 261-276.
- [7] Haverkamp J. Relation between thermal analysis curve and the solidification structure of white iron [R]. Trainee Report, Technical College of Arnhem and Nijmegen, 2002.
- [8] van Ettinger C J, Baumgart W. Thermal analysis, an unique fingerprint of a melt [C]// Proceedings of 66th World Foundry Congress, Istanbul, Turkey, 2004: 743-757.
- [9] Foseco Case Study Filtration-Ferrous Foundry [M]. Foseco International, 2008.
- [10] Fatigue Test Wohler DIN 50100 IfG-Service, GmbH Ifg-order no.: S08-14733/A [S]. DUseldorf, Germany, 2008.
- [11] Ozakin N. Comparison between blackheart malleable iron & austempered ductile iron (ADI) [R]. Trainee report, Turkey: Cukurova University, 2005.
- [12] Notta C. Comparison of blackheart malleable iron and ductile iron [R]. Trainee Report, France: University INASA Toulouse, 2008.

(翻译: 朱文高 编辑: 曲学良, qxl@foundryworld.com)

(选自《铸造》2011年第3期)