

CHAOSHENGBO TANSANG SHIZHAN JINGDIAN ANLI JINGXUAN

超声波探伤实战经典案例精选

夏纪真 黄建明 编著



中山大学出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

广东汕头超声电子股份有限公司超声仪器分公司独家资助出版

TG115. 28
45

CHAOSHENGBO TANSANG SHIZHAN JINGDIAN ANLI JINGXUAN

超声波探伤实战经典案例精选

夏纪真 黄建明 编著



中山大学出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

· 广州 ·

版权所有 翻印必究

图书在版编目 (CIP) 数据

超声波探伤实战经典案例精选/夏纪真, 黄建明编著. —广州: 中山大学出版社, 2014. 8

ISBN 978 - 7 - 04981 - 0

I. ①超… II. ①夏… ②黄… III. ①超声检验—无损检验—案例 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 181424 号

出版人: 徐 劲

策划编辑: 郭 升

责任编辑: 施国胜

封面设计: 林绵华

责任校对: 施国胜

责任技编: 黄少伟

出版发行: 中山大学出版社

电 话: 编辑部 020 - 84111996, 84113349

发行部 020 - 84111998, 84111981, 84111160

地 址: 广州市新港西路 135 号

邮 编: 510275 传 真: 020 - 84036565

网 址: <http://www.zsup.com.cn> E-mail: zdcbs@mail.sysu.edu.cn

印 刷 者: 湛江日报社印刷厂

规 格: 787mm × 1092mm 1/16 14 印张 270 千字

版次印次: 2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 1 - 2 000 册 定 价: 39.80 元

如发现本书因印装质量影响阅读, 请与出版社发行部联系调换

作者简介



夏纪真：

从事无损检测技术工作 40 年。

高级工程师，1991 年获航空航天工业部有突出贡献的中青年科技专家称号。1992 年获国务院授予的有突出贡献专家称号并终身享受国务院的政府特殊津贴。2000 年 4 月创建并主持无损检测技术专业综合资讯网站至今——《无损检测资讯网》（www.ndtinfo.net）。

原航空航天工业部无损检测人员超声检测、磁粉检测和渗透检测的高级技术资格、劳动部锅炉压力容器无损检测人员超声检测高级技术资格。

现任北京理工大学珠海学院“应用物理（无损检测方向）”责任教授。

黄建明（Mr. WONG, Kin Ming）：

从事无损检测工作 30 多年。现任职于香港安捷材料试验有限公司。

美国焊接学会会员，美国无损检测学会会员，中国机械工程学会会员暨无损检测分会理事。

英国焊接和无损检测人员考试发证章程（CSWIP）焊接检验督察，英国无损检测人员考试发证章程（PCN）II 级焊缝射线照相评片员，美国焊接学会（AWS）高级焊接检验督察，AWS 焊接导师，美国无损检测学会（ASNT）NDT 检验师 - UT、RT、MT、ET III 级技术资格，中国机械工程学会无损检测分会 RT、UT 3 级技术资格。

前 言

超声波检测技术是工业无损检测技术中最重要的一种。

在超声波检测技术应用中,最重要的是在被检零部件上选择适当的检测面,使投射的超声波束能够尽量与欲发现缺陷的延伸方向垂直,以求获得最大反射信号,从而利于发现缺陷。

此外,在超声波检测工艺中,采用适当的超声波频率,选择适当型式与尺寸的探头,选用适当的耦合方式等都是特别重要的,在检测到的回波信号中,还要注意根据具体被检零部件的材质、形状尺寸、制造工艺、使用状态以及制造、使用历史等鉴别是真实的缺陷回波信号还是非缺陷回波信号等。

为了保证超声波检测技术的可置信度和超声波检测结果的可靠性、正确性,在检测过程中需要考虑的各种因素是很多的。因此,对于每个从事超声波检测的人员来说,在计划与实施超声检测时都必须予以高度的重视,谨慎、细心地进行检测和判断。

本书是两位作者从其数十年从事超声波检测技术工作实践积累的大量案例中筛选出来的一部分经典案例,虽然有些是早年的案例,所用的超声波仪器还是老式的,但是,制定检测方案的思路以及实际采取的检测方法和得到的检测效果,至今仍有参考意义。

两位作者希望本书中的案例能够对新一代的超声波检测技术人员提供有益的参考与启迪。

本书可作为本科、大专、技校各层次无损检测专业的学生在学习了超声波检测技术专业课程后的辅助参考,有助于更好地理

解该课程，对今后从事超声波检测技术工作将会有很好的帮助。本书也可以是已经从事超声波检测技术工作的人员作为处理实际超声波检测任务时的借鉴，以帮助开拓思路，以及有助于制定检测方案和判断检测结果。

在案例题目后除注明外，有*号的是由黄建明先生撰写，其余为夏纪真撰写。

夏纪真

2014年4月

目 录

前言	1
第一部分 制造检测	1
1-1 锻模钢的超声波探伤	1
1-2 利用底波高度衰减分贝法检查锻模钢的粗晶	14
1-3 钛合金锻件的超声波探伤	19
1-4 钛合金盘形模锻件毛坯的超声探伤	41
1-5 锻造钛合金饼坯与环坯的超声探伤	43
1-6 钛合金板形模锻件毛坯的超声探伤	45
1-7 钛合金棒材的声学各向异性对超声波探伤灵敏度的影响	47
1-8 镁合金锻棒的锻裂	50
1-9 GH16 环轧件过烧的超声检测	52
1-10 GH36 模锻盘形件中碳偏析的超声检测	57
1-11 铝合金梁模锻件的锻造裂纹	58
1-12 摩托车油箱挂销过烧的超声检测	59
1-13 钢锭的超声探伤	64
1-14 利用底波多次反射法检查精密铸造铣刀齿坯	68
1-15 电阻对接焊对焊刀具焊缝的超声波检测	71
1-16 焊缝根部超声扫描程序	73
1-17 高频焊直缝管超声探伤的探头选择	76
第二部分 在役检测	80
2-1 16 吨米无砧座模锻锤锤头燕尾槽根部疲劳裂纹	80
2-2 在役大型铸钢阀门的超声波检测	82
2-3 液压缸紧固螺栓的原位超声波探伤	85

2-4	在役飞机螺旋桨叶带漆超声检测	88
2-5	混凝土道路裂纹深度的超声检测	95
2-6	超声波检测误判事件分析	99
2-7	在役超声检测之策略和步骤	104
2-8	幻影波实例	107
2-9	同一材料中的波型转换实例分析	111
2-10	在役柱状压簧的超声波检测	118
2-11	大理石夹层的超声波检测	121
2-12	超声波检测轴类零件过盈配合的回波分析	125
2-13	超声波检测轴类零件的步骤	132
2-14	抽风扇主轴断裂事故分析及探伤步骤	135
2-15	电梯机械传动轴的超声波检测	140
2-16	塔式吊机的齿轮轴超声波检测分析	146
2-17	超声波二次声程可靠吗	156
2-18	巧用你的相控阵技术 (1)	167
2-19	巧用你的相控阵技术 (2)	170
2-20	巧用你的相控阵技术 (3)	176
2-21	巧用小角度纵波斜探头	181
2-22	滚轮轴的超声波检测方法	185
2-23	码头岸吊桅杆销钉的超声波检测	188
第三部分 超声检测技巧		195
3-1	利用超声波探伤仪测定超声波探头的回波中心频率值	195
3-2	轻便的超声探头检验试块	199
3-3	超声波对比试块钻制平底孔的经验	202
3-4	超声波探伤用的简易工装三项	206

第一部分

制造检测

1-1 锻模钢的超声波探伤

模锻是锻件制造工艺中一种应用很普遍的方式，在模锻生产中，模具是其中非常重要的一个环节，其工作条件极其恶劣，承受应力复杂，包括冲击载荷、冷热循环、红硬性（模具需要在与处在高温下的被锻造毛坯紧密接触的同时承受锻造冲击载荷）等。因此，对用于制作锻造模具的钢材其材料性能与质量的要求是非常高的。

模具的制造过程很复杂，包括从钢锭开坯、锻造到机械加工、热处理等多道工序，为了提高模具的使用寿命以保障经济效益，一般都非常重视锻模钢材料的选择、模具加工工艺、热处理规范的确定等，而对采用超声波探伤手段剔除影响模具寿命的内在冶金缺陷等隐患则往往重视不够。实际上，锻模钢中诸如白点、残余缩孔、气泡、夹杂物、翻皮、裂纹、严重疏松等冶金缺陷以及热加工过程中产生的折叠、粗晶等都会直接影响模具的寿命，有些甚至在进行模具毛坯锻造、机械加工或热处理淬火的过程中就引起破损，或者模具虽然制造完成，但是投入使用不久就破裂损坏（早期破损），不但浪费了大量的模具制造工时和人力，而且常常影响生产计划的按期完成，尤其是对于形状复杂、加工周期长的大型模具则表现得更为显著。

在锻模毛坯阶段首先采用超声波探伤来剔除内部各种冶金缺陷是完全有必要也是完全可行的。

当锻模上已经加工出抬模孔、燕尾、止动扣,甚至型腔以后,再进行超声波探伤时,往往因为形状的影响而容易产生变型波、迟到波等干扰,妨碍探伤时的缺陷判别。在锻模的毛坯阶段时,因为其形状简单(一般为方块或圆饼等形状),就能大大简化超声波探伤的操作,也容易对缺陷作出正确判断,而且在毛坯上直接进行超声纵波脉冲反射法毛面探伤(俗称“黑皮探伤”),及早剔除不合格的毛坯,更能显著节省后续机械加工的人力、物力。

常见用于热锻模的国产钢材有 5CrNiMo、5CrMnMo、3Cr3Mo3VNb、4Cr5W2VSi,以及德国的 WNr2713 和日本的 SKT4 等。模块的种类可以是 13~150Kg 的镶块模具(在锻造设备上镶入卡具底座内)和重量可达数吨的整体模具(直接安装在锻造设备上)。常见热锻模的制造工艺是电弧炉冶炼、制锭,再经开坯锻造制成模具毛坯,也有的是直接利用轧棒或锻棒改锻而成模具毛坯,然后再经过机械加工、热处理,成为模具成品。

大尺寸锻制模具毛坯的黑皮超声波探伤一般可以使用 2.5P20 ($\Phi 20\text{mm}$, 2.5MHz) 的单直探头,小尺寸的锻制模具毛坯采用 2.5P14 ($\Phi 14\text{mm}$, 2.5MHz) 的单直探头,这主要取决于对近场长度影响和上下盲区(即近表面分辨率和底面分辨率,与毛坯表面加工余量有关)的考虑。

通常采用手工接触法检测,宜采用 30#~40#机油作为耦合剂(机油的粘度与环境温度有关,一般最好是夏天用 40#机油,冬天用 30#机油,这样能保证得到较相近的粘度,获得较一致的耦合质量)。

对于方形毛坯,进行 X、Y、Z 三个相邻侧面扫查。

对于圆饼形毛坯,则以圆周 360°和一个平面为扫查面。

对于方形或矩形截面的长条钢坯则扫查相邻的两侧面。

在必要时,如为了确证缺陷位置、考虑机械加工余量和上下盲区等,则再加上相对面的扫查验证。根据经验和试验验证,纵波直探头的下盲区(底面分辨率)一般约为上盲区(近表面分辨率)的一半。

对于圆截面棒料则沿圆周面 360°扫查(周面径向入射纵波扫查)。

上述的探测方向已经基本上能保证发现锻模毛坯中一般常见的冶金缺陷。

在进行超声波探伤前,首先应清除毛坯表面松动的氧化皮、砂土等污物,结合紧密细致的薄层氧化皮可不必去除。

锻模毛坯一般是在锻后退火状态下探伤,但是对于某些钢种,例如 3Cr3Mo3VNb,由于其退火后毛坯上的氧化皮很厚,较难清除,因此,也可

以在锻后冷却下来未退火前（只要热处理周期允许）的状态下进行探伤（就发现冶金缺陷的角度而言，这样的探伤结果与退火后探伤没有多大差异，但是要做粗晶检查就不合适了）。

另外，锻模毛坯的表面应当平整，不应有太多的凹凸不平，否则不利于探伤时的声耦合传递，妨碍探伤的正常进行。

锻模钢超声波探伤的验收标准一般按平底孔当量直径来规定，如果采用平底孔试块调整仪器灵敏度及评定缺陷大小时，所用的试块要求与被检材料同牌号、同规格、同形状与同状态（包括热加工状态和表面状态），并且要制备多种声程、孔径等，使得平底孔试块的制备有许多困难，实际使用起来也极不方便。最实用的方法还是采用底波方式法调整检测灵敏度以及用算法评定缺陷当量大小，现在新式的便携数字超声波探伤仪已经具备了 AVG 曲线功能，可以直接在被检工件上按照验收标准要求的平底孔尺寸生成 AVG 曲线以及自动计算缺陷回波的当量平底孔尺寸（例如广东汕头超声电子股份有限公司超声仪器分公司生产的 CTS—1002 型、CTS—1010 型、CTS—1008 型数字式超声探伤仪），但是，必须注意检测厚度与所用探头的近场长度的关系，对于较薄的毛坯（例如冷冲模模板、小规格的镶块热锻模）则要选用直径较小的探头（近场长度短）。根据经验和试验验证，被检厚度大于 1.6 倍近场长度的区域用 AVG 曲线检测得到的结果准确性已能满足工业超声探伤要求（经典理论中提出要求被检厚度大于 3 ~ 6 倍近场长度是根据连续波推导出来的，而工业超声波应用的是脉冲波）。

热锻模钢超声波探伤的验收标准，例如按 HB/Z 5141—80 《3Cr3Mo3VNb 热作模具钢坯超声波探伤》的规定，牌号为 3Cr3Mo3VNb 的镶块模具用锻模钢拒收标准为 $\Phi 3.2\text{mm}$ 直径平底孔当量。对于 3 吨模锻锤以下使用的整体热锻模具，主要以 JB2674—80 《合金钢锻制模块技术条件》为基础，在 100cm^2 面积内 $\Phi 2 \sim \Phi 4\text{mm}$ 直径平底孔当量的缺陷要求不超过三个，其中 $\Phi 3 \sim \Phi 4\text{mm}$ 直径平底孔当量的缺陷只允许有一个。对于 3 吨 ~ 10 吨模锻锤使用的整体热锻模具，则要求在 100cm^2 面积内 $\Phi 3 \sim \Phi 6\text{mm}$ 直径平底孔当量的缺陷不超过 4 个，其中 $\Phi 6\text{mm}$ 直径平底孔当量的缺陷只允许有一个。此外，在有需要的情况下，还可以利用底波衰减分贝法检查退火状态下模块的粗晶和疏松。当探伤人员有足够的把握确认存在白点、裂纹、缩孔等缺陷时，该模块拒收。

用于改锻制作镶块热锻模具的锻、轧钢棒、方钢坯等通常也以 $\Phi 3.2\text{mm}$ 直径平底孔当量为判废标准。

超声波探伤方法简便、灵敏度高并且成本低廉，经过 100% 超声波探伤合格的锻模毛坯再转入机械加工制模、热处理工序以及成品后投入使用能避免因冶金缺陷而引起的模具早期破损事故，从而大大节约了制模工时和人力，保证生产顺利进行，并对模具延寿起到了良好的作用，其经济效益是显而易见的，因此，超声波探伤手段对于保证锻模钢冶金质量是非常必要的。

图 1-1-1 至图 1-1-14 为热锻模钢超声波探伤发现缺陷的部分实例：



图 1-1-1 3 吨模锻锤用整体模在机械加工中暴露出来的缺陷

这是尺寸达到 $700 \times 450 \times 420\text{mm}$ 的大型模块，模具材料为德国 WNr2713（相当于我国的模具钢 5CrNiMo），该模块原先未经过超声波探伤检查，电火花加工出型腔后暴露出来的内部夹杂物（层状）。

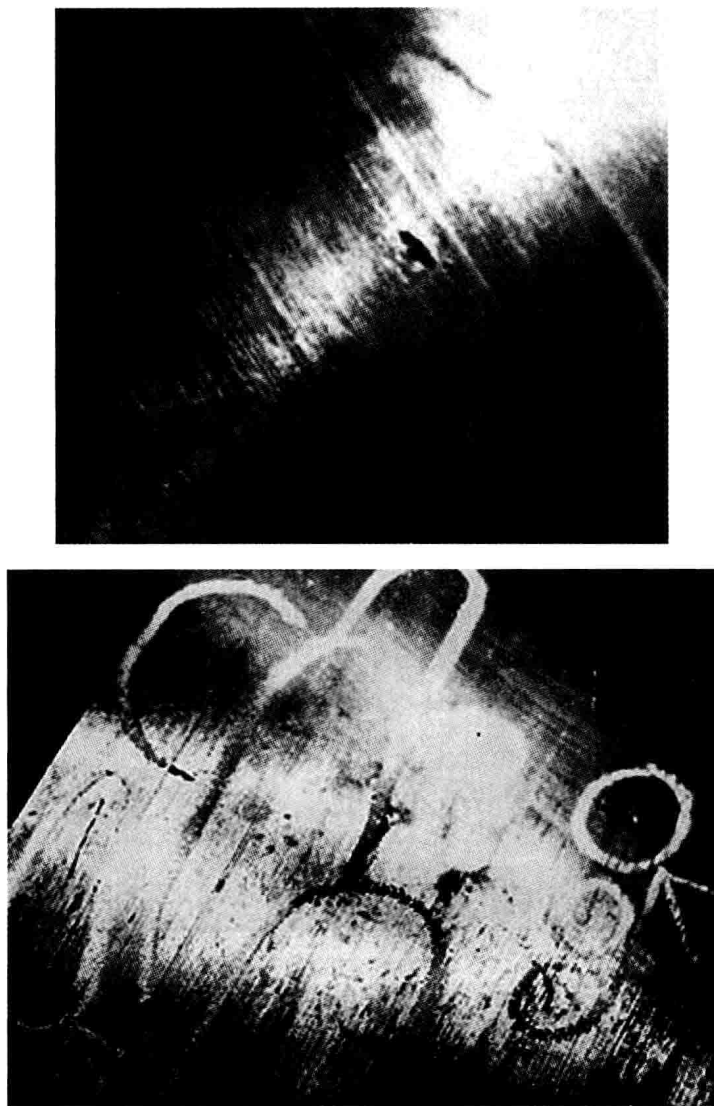
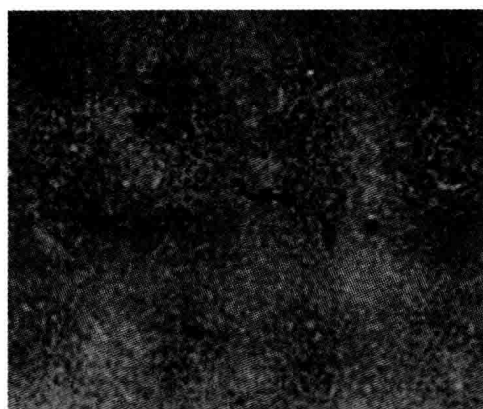


图 1-1-2 大型模具毛坯在机械加工中暴露出来的缺陷

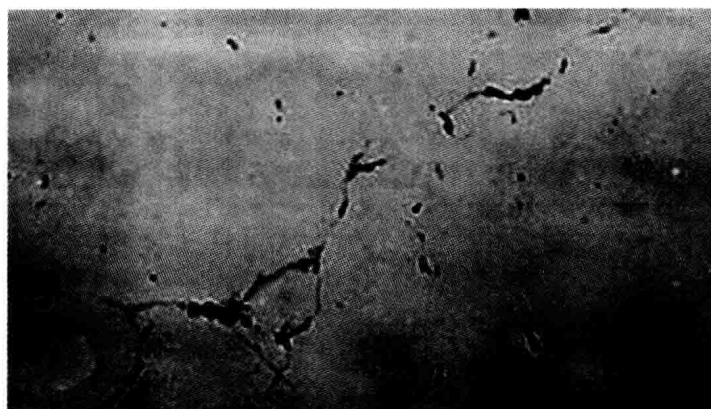
这是尺寸达到 $700 \times 450 \times 420\text{mm}$ 的大型模具毛坯，材料为德国 WNr2713（相当于我国的模具钢 5CrNiMo），该模块原先未经过超声波探伤检查，龙门刨床加工外形时，已刨削深度数十毫米，暴露在表面上有密集的微细裂纹、孔洞和夹杂物。发现外表面缺陷后再进行超声波探伤检查时发现该模块内部存在粗晶、较严重的中心疏松，以及多处存在 $\Phi 2\text{mm}$ 平底孔当量的裂纹状反射信号。估计原因是该大型模块从钢锭改锻时的锻压比不足以及冒口、水口切除量不够等原因导致铸造组织未破碎以及冒口和水口部分的杂质残留等。



横向低倍 $\times 1/3$



横向低倍 $\times 1$



高倍 $\times 100$

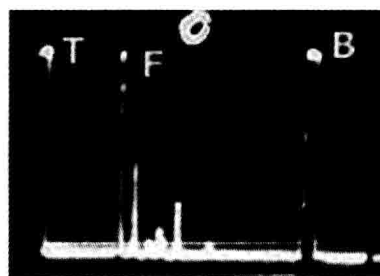
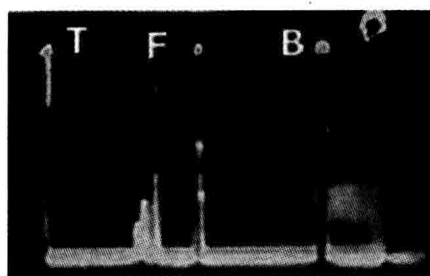
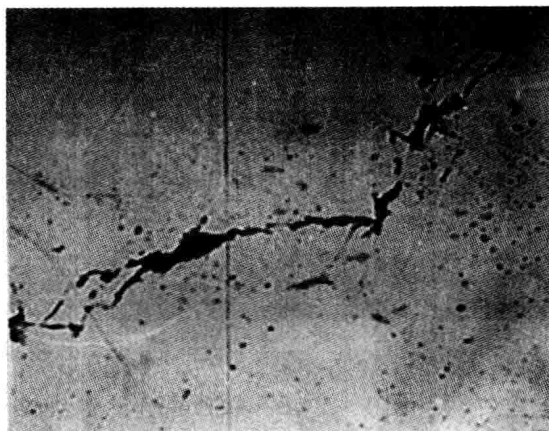


图 1-1-3 5CrNiMo 轧棒 ($\Phi 257\text{mm}$) 中的非金属夹杂物
周面径向入射纵波探测发现, 位置在棒材中心, 解剖验证为非金属夹杂物



横向低倍×1



高倍×300

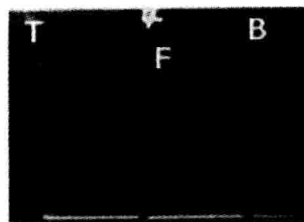
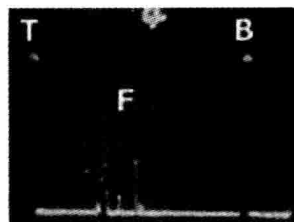
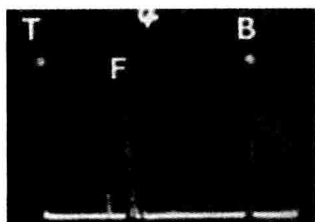
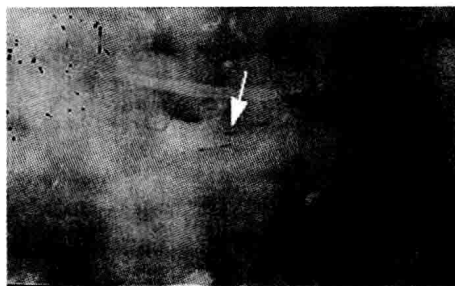
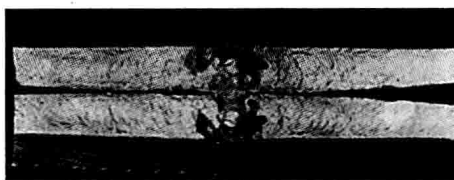


图 1-1-4 5CrMnMo 轧棒 (Φ258mm) 中的非金属夹杂物
周面径向入射纵波探测发现, 位置在棒材中心, 解剖验证为非金属夹杂物



横向低倍照片×1/2



退火状态纵向断口照片×1/2

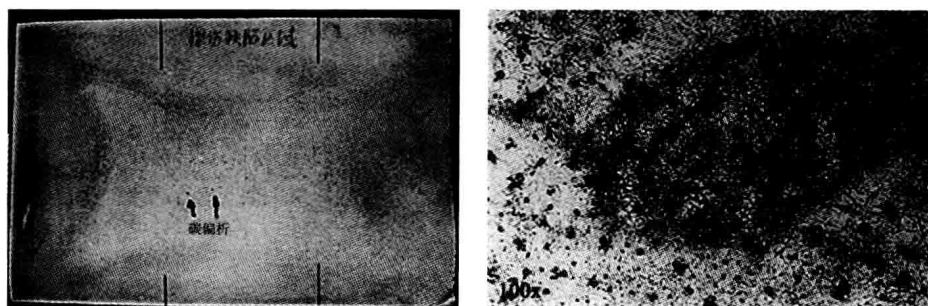
图 1-1-5 3Cr3Mo3VNb 热作锻模钢坯中的翻皮

翻皮实质为氧化物夹杂, 是从炼钢炉出来的钢水用钢包装载浇注钢锭时, 因为过程中有停顿以至钢水表面凝结氧化膜又被后续浇注的钢水冲破卷入钢锭体内形成。该锻模坯尺寸 250×200×120mm, 锻后退火毛面, 接触法超声纵波检测发现 (探测声程 120mm 的探测面上探测到的)。



图 1-1-6 4Cr5W2VSi 镶块模毛坯中的过热粗晶

左为横向低倍 $\times 1/2$ ，右为再经 1070℃ 淬火后的断口（恭状断口） $\times 2$ ，锻造时加热温度偏高且变形速度过快所致。



横向低倍 $\times 1/2$

高倍 $\times 100$

图 1-1-7 3Cr3Mo3V Nb 热作模具钢坯中的碳偏析（还有方形偏析）

锻后退火毛面，探伤灵敏度按 $\Phi 1.2\text{mm} - 120\text{mm}$ 50% 满刻度，伤波高达满幅，中层位置丛状回波，金相评定为碳化物偏析和三级疏松，高倍（ $\times 100$ ）照片为横向低倍照片中箭头所指黑点处。



5CrNiMo 模块（150 × 120 × 80mm）毛坯

残余缩孔 横向低倍 $\times 1/2$



Cr3Mo3V Nb 圆饼锻坯（ $\Phi 270 \times 150\text{mm}$ ）

残余缩孔 横向低倍 $\times 1$