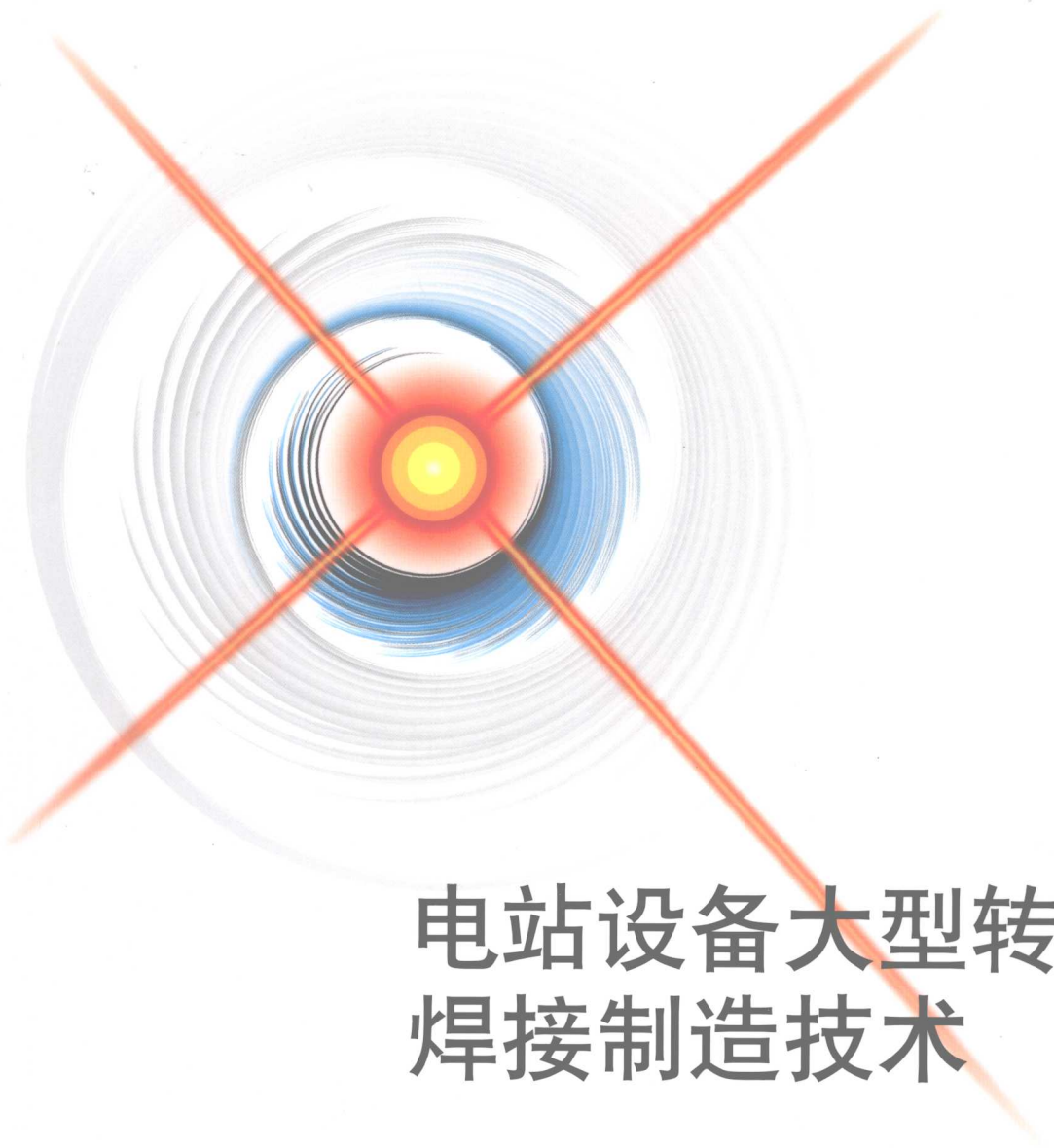




电站设备大型转子 焊接制造技术

上海汽轮机厂
清华大学
哈尔滨焊接研究所 著
中国科学院金属研究所
上海汽轮机锅炉研究所

电站设备大型转子 焊接制造技术

上 海 汽 轮 机 厂
清 华 大 学
哈 尔 滨 焊 接 研 究 所 著
中 国 科 学 院 金 属 研 究 所
上 海 汽 轮 机 锅 炉 研 究 所



机 械 工 业 出 版 社

本书记录了我国老一辈焊接工作者在面对一个全新的大型项目时,分析问题、解决问题的全过程。从结构材料的焊接性试验、焊接材料的选择、焊接工艺的确定、焊接变形的控制、焊接接头无损检测,直到产品转子的最终焊接生产,每一步试验方法和试验结果分析都介绍得很细致,对今天焊接技术的自主创新有很大的借鉴意义。

本书可供从事焊接生产的科研和技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电站设备大型转子焊接制造技术/上海汽轮机厂等著. —北京:机械工业出版社, 2009. 3

ISBN 978-7-111-26462-0

I. 电… II. 上… III. 电站—电气设备—转子—焊接 IV. TG457.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第029927号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吕德齐 责任编辑:吕德齐 孔劲 版式设计:霍永明
责任校对:李秋荣 封面设计:姚毅 责任印制:邓博

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2009年4月第1版第1次印刷

169mm×239mm·10.5印张·4插页·203千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-26462-0

定价:48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

原机械工业部何光远部长题词：

“电站设备大型辅子焊接制造技术”一书所反映的自主创新精神与科学态度是我国装备制造业的一个典范。

书赠编定此书的首任总工

何光远

二〇〇七.十.

原机械工业部陆燕荪副部长题词：

总结实践经验 指导技术发展

书赠参与编写《焊接汽机转子》
各位同志并感谢上汽厂支持

陆燕荪
二〇〇七年十二月

序 一

由上海汽轮机厂、清华大学、哈尔滨焊接研究所、中国科学院金属研究所、上海汽轮机锅炉研究所等单位，在 20 世纪 60 年代的合作攻关成果整理而成的《电站设备大型转子焊接制造技术》一书，终于与制造业界的同仁们见面了。这本专著的出版反映了我国老一辈科技工作者在大型焊接部件制造方面作出的重大贡献，是我国电站装备自主制造的一个典范，是“产、学、研”紧密结合，并形成从知识、技术到创造社会财富过程的一个成功实践。

今天，我们对这一集体智慧及创造精神的回顾与弘扬，为的是使历史从这一代向下一代的接力和传承；为的是使中国制造从今天的崛起到明天的强盛；为的是使自力更生、自主创新的精神发扬光大，增强并坚定屹立于世界民族之林的自信心与自豪感。这就是我们为《电站设备大型转子焊接制造技术》一书的出版而感到振奋并为之呐喊的理由。

在此，我谨代表中国机械工程学会及其焊接分会，向当年艰苦创业的老一辈焊接工作者，向参与转子焊接攻关项目的全体人员，向我国电站装备制造的建设者们致以最崇高的敬意。

中国机械工程学会常务副理事长

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of two main characters, '宋' and '天', written in a cursive, flowing style.

2007 年 12 月

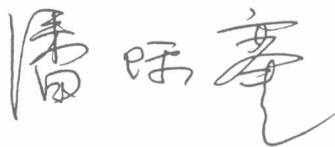
序 二

这本书是一个回忆，会使我们重温 20 世纪 60 年代时，在中国焊接界的一段珍贵的经历。它记载了新中国的焊接工作者自力更生，勇于开拓，敢创世界一流的壮志与成功。这是我国大型部件焊接制造的一个里程碑，其研究与应用成果历经了四十余年的考验，并以此为基础得到不断发展和延伸，为我国电站设备、大型动力装备等关键部件的自主制造作出了重大的贡献。

从第一根燃气轮机焊接转子的制造成功到今天，这一具有完全自主知识产权的关键技术，已相继在我国自行设计与制造的燃气轮机移动电站，125MW、300MW 等大型汽轮机组中成功应用，300 余根大型焊接转子的运行实现了“零故障”、“零事故”，充分地显示了这一技术成果所具有的强大生命力与竞争力。

这本书的出版，对于当年该攻关项目的每一参与者都是一个极大的荣誉和欣慰，并以此表达了人生的无悔与辉煌。

这就是我们手中的这本书。



中国科学院 院士

2007 年 12 月

前 言

电站设备作为现代工业重要装备之一，其发展水平直接影响到国民经济建设的增长；同样，作为电站设备的制造技术，其先进性反映了一个国家在大型装备上的制造水平。作为基础制造技术之一的焊接技术，在电站设备制造中具有十分重要的地位。由于新型电站设备不断发展的需要，作为汽轮机和燃气轮机的“心脏”部件——大型转子，采用焊接结构转子替代传统的整锻结构转子，具有许多无可比拟的优越性，因为它不仅解决了优质大型锻件的供货困难问题，更重要的是对大型转子结构的设计带来了技术上革命性的先进理念。因此在 20 世纪五六十年代，发达工业国家已十分注重和应用焊接结构的大型转子。

由于大型转子是运行在高速、高负荷的条件下，它的动载高应力工况，对转子运行安全性的保证提出了极其苛刻的要求。因此掌握和应用大型转子的焊接技术，需要开展大量科学研究工作，在具备了充分的技术可靠性的前提下，才能应用于大型转子的焊接。

根据国家科学技术发展规划，1962 年至 1964 年期间，在中央机械部门的具体安排下，由上海汽轮机厂、清华大学、哈尔滨焊接研究所、中国科学院金属研究所、上海汽轮机锅炉研究所等单位，组成“工厂、高等学院、研究所”三结合的攻关队伍，对大型转子的焊接课题进行了大量试验研究工作。历时三年多的工作，包括对转子所用材料的焊接性能研究、专用焊接材料研制、大型转子焊接应力和变形的监测与控制以及大量配套工艺与专用设备的开发和应用等，为实现和保证大型转子的焊接制造提供了科学依据和手段。在大量科学研究工作的基础上，焊出的验证件和模拟焊接转子，均验证了研究结果的可行性和可靠性，进而成功地完成了国内第一根大型转子的焊接制造。此转子已应用于 6MW 燃气轮机组的压气机，在长期满负荷运行条件下，焊接转子一直正常运转，由此确定了大型转子的焊接技术在我国大型电站设备制造中应用的地位。

现将研究成果汇编成书。尽管目前在转子的焊接方法及相关技术上已作了许多改进和提高，但该研制成果在方法的科学性、试验的周密性和技术的严谨性等方面，都具有重要的借鉴意义，也为相同或相关领域的焊接制造提供了参考。

限于编写者水平，不妥之处尚祈读者指正，在此致谢！

编者

2008 年 2 月于上海闵行

目 录

序一

序二

前言

第1章 焊接转子的结构、材料及工艺特点	1
1.1 焊接转子的结构、材料和对焊接力学性能的要求	1
1.1.1 6MW 燃气轮机机组压气机焊接转子的结构	1
1.1.2 焊接转子的工作条件、材料及技术要求	2
1.2 装焊工艺及焊缝坡口形式	3
1.2.1 装焊方案的确定	3
1.2.2 焊接方法的选择	3
1.2.3 坡口结构的设计	4
1.3 焊接转子生产工艺设计	6
第2章 低合金铬钼钒钢焊接试验	7
2.1 低合金铬钼钒钢焊条电弧焊试验	7
2.1.1 焊接性试验	7
2.1.2 焊条电弧焊材料试验	13
2.1.3 补充试验	19
2.1.4 验证件焊条电弧焊部分力学性能试验	25
2.1.5 试验研究的结论	29
2.2 低合金铬钼钒钢埋弧焊试验	30
2.2.1 焊接材料的选择	30
2.2.2 材料的抗裂性试验以及焊接规范和预热温度的确定	36
2.2.3 焊缝组织及力学性能	41
2.2.4 多层焊缝各区域的性能以及焊接工艺的进一步改善	44
2.2.5 多层焊接接头母材热影响区的性能	45
2.2.6 埋弧焊的生产性试验——验证件焊接试验	46
2.2.7 埋弧焊实验研究的结论	48
第3章 工频感应加热在大型拼焊转子焊接中的应用	50
3.1 概述	50
3.2 加热装置设计	51
3.3 加热试验	56
3.3.1 试验条件和方法	56

3.3.2 试验结果	57
3.4 小结	60
第4章 装配工艺试验	62
4.1 控制变形方案的选择	62
4.1.1 控制转子挠度的基本原则	62
4.1.2 焊接变形(挠曲变形)控制方案及其工艺方案的分析和比较	66
4.1.3 变形试验计划的安排	77
4.2 变形测量方法的选择及其精度分析	78
4.2.1 测量目的、测量内容和测量方法	78
4.2.2 百分表动态测量法	79
4.2.3 横向收缩测量法	89
4.3 变形试验的装配焊接工艺	98
4.3.1 立式装配	99
4.3.2 预热	100
4.3.3 焊接	102
4.3.4 中间热处理	108
4.3.5 回火热处理	108
4.3.6 变形测量过程	108
4.4 试验结果及其讨论	111
4.4.1 焊前装配及其精度	111
4.4.2 焊接工艺与变形	111
4.4.3 焊后热处理及变形	120
4.4.4 控制变形方案的可靠性及其优越性	120
4.5 小结	121
第5章 超声波检测试验	122
5.1 转子焊缝超声波检测方法的制定	122
5.2 焊接试验研究和焊工培训过程中的检测	124
5.3 转子焊接验证件焊缝的检测	125
5.4 小结	126
第6章 转子焊接生产准备	127
6.1 焊接转子所需设备	127
6.1.1 转子焊接立转台	127
6.1.2 横转台	128
6.1.3 焊条和埋弧焊焊剂烘焙设备	128
6.1.4 清锈盘丝机	129
6.1.5 焊机	129
6.1.6 感应加热设备	129
6.1.7 敷设电路、水路和气路	129

6.2 焊接转子需用的仪表及量测工具	130
6.2.1 仪表	130
6.2.2 测量工具（焊缝横向收缩测量专用工具）	130
6.2.3 温度量测设备	130
6.3 焊接设备的合理改进	131
6.3.1 遥控电压控制器	131
6.3.2 自动控制边距信号	132
6.3.3 电梯自动送焊剂装置	132
6.3.4 电动焊剂过筛设备	133
6.3.5 埋弧焊焊接时间指示计	133
6.3.6 焊剂用量控制器	133
6.3.7 焊剂储存量指示信号装置	134
6.3.8 水冷测温联接钳	134
6.3.9 埋弧焊焊前接触良好鉴别装置	135
第7章 产品转子焊接及结果	136
7.1 转子的装配与焊接	136
7.2 热处理及质量检查	139
第8章 转子焊接技术的现状与发展	142
8.1 大型电站的发展现状及其对转子的技术要求	142
8.1.1 火电汽轮机	142
8.1.2 核电汽轮机	147
8.2 转子焊接关键技术的发展动向	148
8.2.1 美国 GE 电气公司的转子焊接技术	148
8.2.2 德国西门子的转子焊接技术	148
8.2.3 日本各电站装备制造公司的转子焊接技术	154
8.2.4 转子焊接新技术在我国的新进展	155
参考文献	157
编后记	158

第1章 焊接转子的结构、材料及工艺特点

1.1 焊接转子的结构、材料和对焊接力学性能的要求

转子是汽轮机机组和燃气轮机机组的重要部件，由于在高转速下工作，因此对它的结构和强度提出了严格的要求。

转子结构形式有很多，但在现代的汽轮机制造中，焊接结构的转子已经成为最为理想的结构。焊接转子与整锻转子相比有以下优点：

- 1) 可利用较小的锻件，易于锻造，易于保证内在质量。
- 2) 内部可形成空腔，重量可减轻，相应地减少了起动电动机的容量，提高了临界转速。
- 3) 由于转子内部形成空腔，减薄了壁厚，使内外温度差减小，热应力小（尤其在起动时）。
- 4) 组成转子的每一小段，易于进行完善的热处理，也易于沿整个截面进行检查，发现缺陷时，更换容易，造成的损失也较小。
- 5) 可以避免整锻转子在温度作用下由于铸锭在成分、组织及其性能方面的不均匀而引起的变形。
- 6) 使转子的各部分有可能采用不同的材料，以满足不同工作位置对性能的不同要求，合理的使用合金钢材。

由于以上这些优点，汽轮机转子，特别是大型汽轮机的低压转子、燃气轮机和压气机转子大量采用焊接结构。

1.1.1 6MW 燃气轮机机组压气机焊接转子的结构

由上海汽轮机厂设计的6MW 燃气轮机机组焊接转子结构简图如图1-1所示。它由两只轴头和6只叶轮拼焊而成，焊缝共有7条，总重约11.3t，焊接坡口深度有三种，分别为74mm、89mm、和99mm，各级之间以相应的结构保证装配时径向和轴向定位。在设计采用的结构形式下，焊接的轴向位置焊后不能变动过大，否则会严重地影响转子的运行。

图1-1所示的转子内部具有7个较大的空腔，空腔的内部在焊后不能再进行加工。由于转子在高速条件下运转，必须满足较高的动平衡要求。为此，转子各部件应具有较高的机械加工精度，且装配以后，该转子的挠度不能超过一定限度。

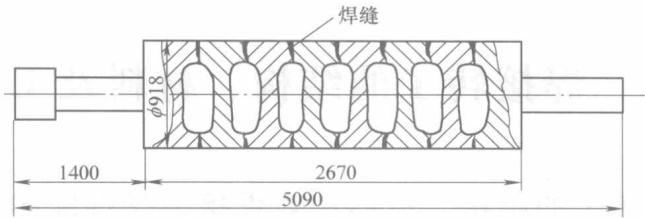


图 1-1 6MW 燃气轮机机组压气机转子结构简图

1.1.2 焊接转子的工作条件、材料及技术要求

压气机的工作介质为空气，转子的工作转速为 3682r/min，工作时转子的最低温度可达 -40℃，最高温度不超过 200℃。转子经焊接及去应力后，变形的设计要求为：在轮毂部分的全长（2670mm）范围内，最大弯曲挠度不得大于 0.5mm。

转子的材料为铬钼钒低合金钢，其化学成分见表 1-1，经调质后的力学性能要求见表 1-2。对转子焊缝金属及焊接接头力学性能的要求见表 1-3。

表 1-1 转子材料的化学成分 (%)

$w(C)$	$w(Si)$	$w(Mn)$	$w(Cr)$	$w(Mo)$	$w(V)$	$w(Ni)$	$w(S), w(P)$
0.14 ~ 0.2	0.3 ~ 0.4	0.5 ~ 0.8	0.3 ~ 0.4	0.7 ~ 0.9	0.3 ~ 0.4	< 0.3	≤ 0.03

表 1-2 转子材料经调质后力学性能要求

名称与符号	数值	
试样的方向、部位	纵向 R/3	切向表面
条件屈服强度 $\sigma_{0.2}/MPa$	≥ 500	≥ 550
抗拉强度 σ_b/MPa	≥ 650	≥ 700
伸长率 δ_5 (%)	≥ 15	≥ 15
断面收缩率 Ψ (%)	≥ 30	≥ 30
室温冲击韧度 $a_K/(J/cm^2)$	≥ 50	≥ 50
低温 (-40℃) 冲击韧度 $a_K/(J/cm^2)$	—	≥ 30

表 1-3 焊接接头和焊缝金属力学性能要求

名称与符号	焊缝力学性能		焊接接头力学性能	
温度/℃	室温	- 40	室温	- 40
条件屈服强度 $\sigma_{0.2}/MPa$	≥ 420	—	—	—
抗拉强度 σ_b/MPa	≥ 550	—	≥ 550	—
伸长率 δ_5 (%)	≥ 15	—	—	—

(续)

名称与符号	焊缝力学性能		焊接接头力学性能	
断面收缩率 ψ (%)	≥ 30	—	—	—
冲击韧度 α_K / (J/cm ²)	≥ 50	≥ 20	≥ 40	≥ 20
冷弯角 α / (°)	—	—	120	—

1.2 装焊工艺及焊缝坡口形式

1.2.1 装焊方案的确定

国外转子装焊生产中采用两种不同的方案。

第一种方案：转子在垂直位置装配，装妥后，用一强固夹具紧固，然后将转子平放，进行加热、焊接。焊至一定的厚度后，拆除紧固装置。

第二种方案：转子在垂直位置装配、预热、打底焊（横焊）。打底焊完成后，将转子平放，再完成全部焊接工作。

第一种方案有以下缺点：

1) 打底焊时无法做到对称施焊，变形控制不易。

2) 转子部件极为笨重，变形要求又极为严格，因而紧固装置也极为笨重，操作不便，生产率低。同时由于紧固装置的阻碍，打底焊时无法采用比较完善的预热方案，无法采用埋弧焊。

第二种方案除了需要采用操作比较困难的横焊位置之外，其他方面均优于第一方案，因此确定选用第二方案。

1.2.2 焊接方法的选择

根据国外有关资料，在转子焊接生产中可以采用以下三种方法：

1) 全部焊条电弧焊。

2) 氩弧焊打底—埋弧焊。

3) 焊条电弧焊打底—埋弧焊。

全部焊条电弧焊的试验工作比较简单，但有着较多的缺点，例如：质量不易确定，生产率低，劳动强度大等。氩弧焊打底—埋弧焊的工艺比较先进；焊接转子生产经验较丰富的瑞士布朗·包弗利公司（BBC）采用的就是这种方法。由于考虑到深坡口高温下低合金钢的氩弧自动横焊设备、工艺材料试验周期很长，不能满足产品制造进度的要求，因此确定采用焊条电弧焊打底—埋弧焊的工艺方法。这一方法捷克和 BBC 公司在 1957 年以前的转子焊接生产中均采用过。

形式的垫环,如图 1-3 所示。

在焊接过程中,垫环受到焊接的热作用,尺寸有胀大的趋势,但由于工件刚性的限制,无法自由膨胀,产生一定的塑性变形;冷却后尺寸有缩小的趋势。同时在垫环和工件接触的缝隙处形成一定的应力集中的现象,如处理不当,此处易产生裂纹。例如图 1-3 中捷克采用的坡口形式,就很可能在根部产生裂纹。针对上述原因,前苏联采用了带槽的垫环,从而减弱了根部的应力集中现象。BBC 公司则从应力集中产生的根源处采取了措施,焊接过程中受到焊接热作用的仅是管形垫环外表面,温度较低的内圆金属起着支撑作用,垫环外圆尺寸不易变动,从而在根本上解决了根部应力产生的原因;同时,开槽的管子也赋予垫环以一定的弹性,根部焊缝的收缩仍然较容易进行。因此 BBC 公司的垫环形式对防止根部裂纹是极为有利的,同时对所采用的焊条电弧横焊而言,这种垫环形式也能较好地满足操作要求。因此在试验中参考了 BBC 公司的焊缝根部形式,采用了图 1-2 的根部形式,试验结果未发现裂纹。

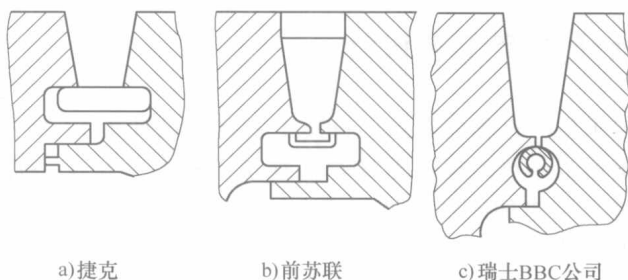


图 1-3 捷克、前苏联、瑞士 BBC 公司 (1957 年以前) 采用的焊缝坡口形式

2. 定位部分结构尺寸的决定

对转子焊后变形控制的要求极为严格,因而转子装配时,各级的定位部分必须可靠;但是为了防止焊缝产生裂纹,定位部分的刚性不能过大。定位包括径向定位和轴向定位,在图 1-2 上使用具有过盈不大的凸肩“S”作为径向定位,用支托销作为轴向定位。

轴向定位的好坏,对装配、焊接变形情况和焊缝产生裂纹与否都有很大的影响。因此要求轴向定位结构,在装配时能起到稳定、可靠的支承作用,在焊接时又不致对焊缝造成过大的刚性。根据以上原则,选用了支托销作为轴向定位结构。组装后工件的重量均由支托销支承;焊接时,由于焊接收缩使支托销剪断,不会造成过大的刚性。

对定位结构破坏抗力的计算结果表明,所采用的结构对焊缝造成的刚性是

比较小的，远小于捷克和前苏联所采用的结构，试件解剖结果证实了这一论断。
图 1-4 为焊后支托销已被剪断的情况。

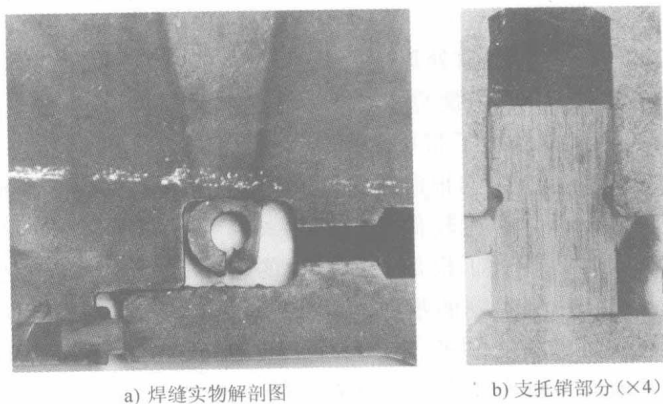


图 1-4 焊后支托销已被剪断的情况

1.3 焊接转子生产工艺设计

根据焊接转子生产过程的特点，将其工艺路线设计为 17 个主要工序：冶炼→锻造→毛坯粗加工→热处理→毛坯焊前加工→检验→装配→焊接→焊后回火→检验（测挠度）→粗加工→检验（超声波检测）→粗加工→超速检验→除应力回火→精加工→动、静平衡。