



中华人民共和国国家标准

GB/T 43754—2024

金属材料的旋转摩擦焊

Rotary friction welding of metallic materials

(ISO 15620:2019, Welding—Friction welding of metallic materials, MOD)

2024-03-15发布

2024-10-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 焊接 3

5 质量要求 8

6 焊接工艺规程 9

7 焊接工艺评定 10

8 焊接人员..... 14

附录 A（资料性） 本文件与ISO 15620:2019结构编号对照情况 16

附录B（资料性）本文件与ISO 15620:2019技术性差异及其原因 18

附录 C（资料性） 旋转摩擦焊参数之间的关系 19

附录 D（资料性）旋转摩擦焊材料组合 21

附录 E（资料性） 质量保证指南 22

附录 F（资料性） 检验与试验 23

附录 G（资料性） 制造商旋转摩擦焊工艺规程(WPS) 25

附录 H（资料性） 旋转摩擦焊接头特征..... 27

附录 I（资料性）焊接工艺评定报告(WPQR) 32

参考文献 35

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件修改采用ISO 15620:2019《焊接 金属材料的摩擦焊》。

本文件与ISO 15620:2019相比，在结构上有较多调整，两个文件之间的结构编号变化对照一览表见附录 A。

本文件与ISO 15620:2019相比，存在较多技术性差异，在所涉及的条款的外侧页边空白位置用垂直单线(1)进行了标示。这些技术性差异及其原因一览表见附录B。

本文件做了下列编辑性改动：

- a) 将标准名称由《焊接 金属材料的摩擦焊》修改为《金属材料的旋转摩擦焊》；
- b) 对原文图2连续驱动摩擦焊参数关系示意图进行了修正，增加了横纵坐标轴；
- c) 将原文4.1.3第一段与图3(本文件为图4)中的“惯量”一词改为“惯性盘”；
- d) 6.2 中增加引导语“制造商信息包括以下内容”；
- e) 6.3.2 中增加引导语“工件情况包括以下内容”；
- f) 6.5 中增加引导语“焊接接头情况包括以下内容”；
- g) 增加了图8中t 与 D 的图注，以及数字25的单位(见图8)；
- h) 将7.2.5.1中原文表3外的注解移至表3内作为表注；
- i) 增加了本文件与ISO 15620—2019 结构编号对照情况(附录 A) 与本文件与 ISO 15620—2019 技术性差异及其原因(附录 B)；
- j) 附录 D 中表格增加表格标识与表标题，表格内容第一行第一栏增加表头，表格最后一行中“□”符号改为文字“空白栏”；
- k) 将原文表 D.1(见表 E.1) 下的注1更改为注1、注2；
- l) 删除了原文的附录 B；
- m) 将表 E.1 中的第六列与第七列内容进行了同义替换，以适应我国技术要求；
- n) 删除了原文件 E.1.3 中的第二段内容；
- o) 对附录 F 中引用的国际文件用资料性引用的国家标准进行了替换，具体如下：
 - 用修改采用国际标准的 GB/T 32259 代替了 ISO 17637(见 F.1.2)；
 - 用修改采用国际标准的 GB/T 26953 代替了 ISO 23277(见 F.1.4)；
 - 用修改采用国际标准的 GB/T 26951代替了 ISO 17638(见 F.1.5)；
 - 用等同采用国际标准的 GB/T 41115 代替了 ISO 10863(见 F.1.7)；
 - 用修改采用国际标准的 GB/T 40733 代替了 ISO 13588(见 F.1.7)；
 - 用修改采用国际标准的 GB/T 11345 代替了 ISO 17640(见 F.1.7)。
- p) 附录 F 中将F.1.6 中涡流检测标准从 ISO 3452.1改为 GB/T 26954, 以符合我国技术要求。
- q) 附录 G 与附录 I 中增加了格式使用说明。
- r) 表 H.1 中，在“双飞边I”所对应的解决方法一栏中增加“调整焊接参数”；在“双飞边II”所对应的常用检测方法一栏中增加“目视检测”，增加标准完整性。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国焊接标准化技术委员会(SAC/TC 55)提出并归口。

本文件起草单位：中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司、中车唐山机车车辆有限公司、黑

龙江科技大学、福建省工业设备安装有限公司、浙江鸿昌铝业有限公司、江苏省特种设备安全监督检验研究院、辽宁煤机装备制造(集团)有限责任公司、浙江国检检测技术股份有限公司、中国科学院金属研究所、中国中车长春轨道客车股份有限公司、机械工业上海蓝业石化设备检测所有限公司、江苏华昌铝厂有限公司、成都润博科技有限公司、中国建筑第二工程局有限公司。

本文件主要起草人：张春波、魏绍鹏、朱艳、钮旭晶、周军、杨玉亭、管凌峰、田志平、陈志刚、秦丰、苏文娟、姜云禄、张欣盟、田利、张挺、韩春艳、周明军、王雄。

金属材料的旋转摩擦焊

1 范围

本文件规定了金属材料的旋转摩擦焊的术语和定义、焊接方法、质量要求、焊接工艺规程、焊接工艺评定和焊接人员。

本文件适用于金属材料的旋转摩擦焊。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

轴向力 axial force

在被焊工件轴向施加的力。

3.2

摩擦变形量 burn-off length

工件金属在摩擦阶段的轴向缩短长度。

3.3

工件 component

待焊接的单个零部件个体。

3.4

工件制动 component induced braking

由于两个工件间界面摩擦而导致的旋转速度降低。

3.5

接合面 faying surface

工件之间接触并形成接头的界面。

3.6

顶锻力 forge force

在两工件相对运动停止过程中或停止后垂直于接合面施加的力。

3.7

顶锻变形量 forge burn-off length

在施加顶锻力时工件总长度的缩短值。

3.8

顶锻阶段 forge phase

从顶锻力施加开始到结束之间的间隔。

3.9

顶锻压力 forge pressure

由于施加轴向顶锻力而在接合面上产生的单位面积上的力。

3.10

顶锻时间 forge time

顶锻力施加在工件上的持续时间。

3.11

摩擦力 friction force

在工件发生相对运动时垂直施加在接合面上的力。

3.12

摩擦阶段 friction phase

在旋转摩擦焊接循环中，通过相对运动和工件之间的摩擦力产生焊接所需热量的时间间隔。

注：即从工件接触到减速开始之间的过程。

3.13

摩擦压力 friction pressure

在旋转摩擦焊的加热过程中，向接头接触面上施加的轴向压力。

3.14

摩擦时间 friction time

工件在指定旋转速度与摩擦力下发生相对运动的时间。

3.15

焊接界面 interface

在焊接过程结束后由接合面演化而成的接触区域。

3.16

旋转速度 rotational speed

焊接过程中旋转端工件的转动速度。

3.17

伸出长度 stick-out

工件从夹具或卡盘中向对侧工件伸出的距离。

3.18

减速阶段 deceleration phase

旋转摩擦焊循环过程中从工件减速开始到运动停止之间的过程。

3.19

减速时间 deceleration time

工件从摩擦速度降低到运动停止所需的时间。

3.20

总变形量 total length loss

旋转摩擦焊过程导致的工件长度缩短。

注：摩擦变形量与顶锻变形量之和。

3.21

焊接循环 welding cycle

设备完成焊接后又返回初始位置的连续工作过程。

注：不包括工件的搬运和装卡过程。

3.22

焊件 weldment

两个或多个被焊在一起的工件。

4 焊接

4.1 焊接方法

4.1.1 焊接方法分类

4.1.1.1 按焊接能量供给方式分类

旋转摩擦焊按焊接能量供给方式分类见表1。

表 1 旋转摩擦焊分类(按焊接能量供给方式)

类型	连续驱动式	储能(惯性)式	复合式
说明	焊接能量由一个无限可持续的能量源以预设的时间持续提供	焊接能量由储存在旋转系统或流体系统中的动能提供	焊接能量供给方式同时结合了连续驱动式与储能式中的部分特征

4.1.1.2 按工件相对运动方式分类

按工件相对运动方式，旋转摩擦焊(见图1)可以按如下方式分类：

- 旋转端工件与另一端的直线运动工件焊接[见图1a]]，即固定机头式旋转摩擦焊机；
- 旋转端工件旋转并同时向另一端静止的工件进行直线运动(见图1b)]，即滑动机头式旋转摩擦焊机；
- 两端工件同时向中间处于静止工件进行旋转和直线运动[见图1c]]，即双头旋转摩擦焊机；
- 处于中间的工件旋转，两端工件同时向中间工件进行直线运动[见图1d]]。

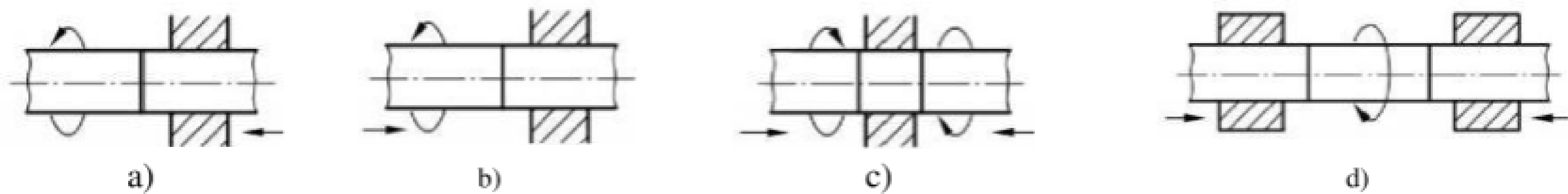
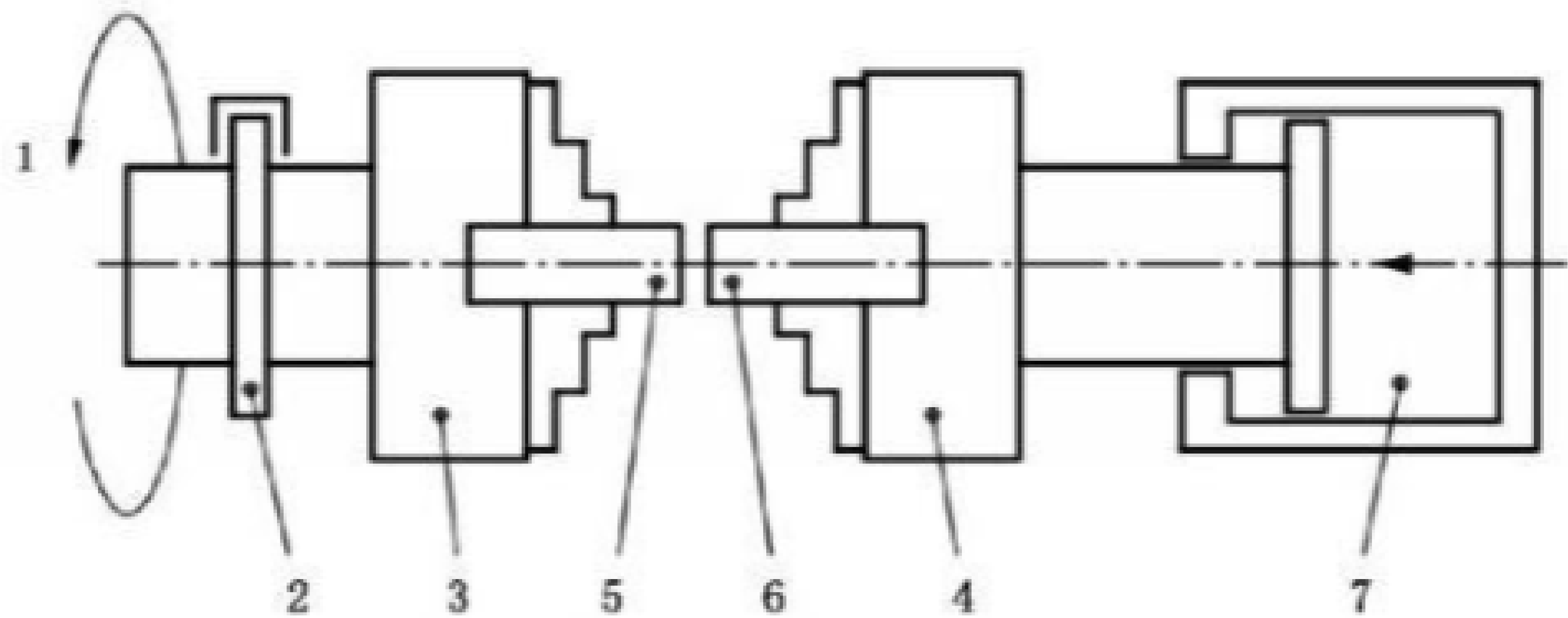


图 1 旋转摩擦焊分类(按工件相对运动方式)

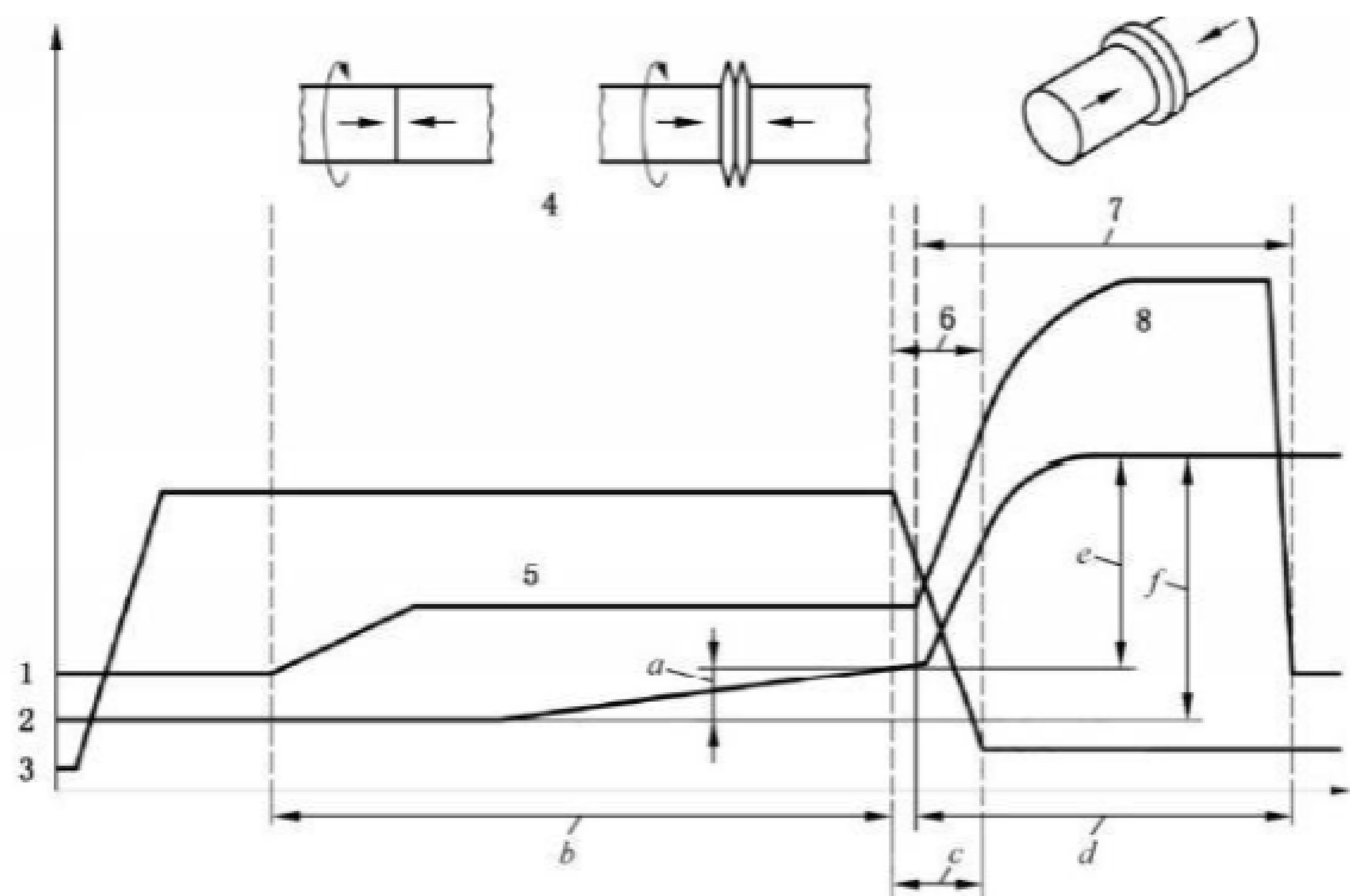
4.1.2 连续驱动摩擦焊

焊接能量是在预设的转速下以连续驱动方式提供(见图2与图3)。



- 标引序号说明：
- | | |
|----------|----------|
| 1——驱动电机； | 5——旋转工件； |
| 2——制动装置； | 6——固定工件； |
| 3——旋转卡盘； | 7——顶锻油缸。 |
| 4——固定卡盘； | |

图 2 连续驱动摩擦焊示意图



标引序号说明:

- 1——轴向力;
- 2——轴向位移;
- 3——旋转速度;
- 4——摩擦阶段;
- 5——摩擦力;
- 6——减速阶段;
- 7——顶锻阶段;
- 8——顶锻力;
- a——摩擦变形量;
- b——摩擦时间;
- c——减速时间;
- d——顶锻时间;
- e——顶锻变形量;
- f——总变形量。

图 3 连续驱动摩擦焊参数关系示意图

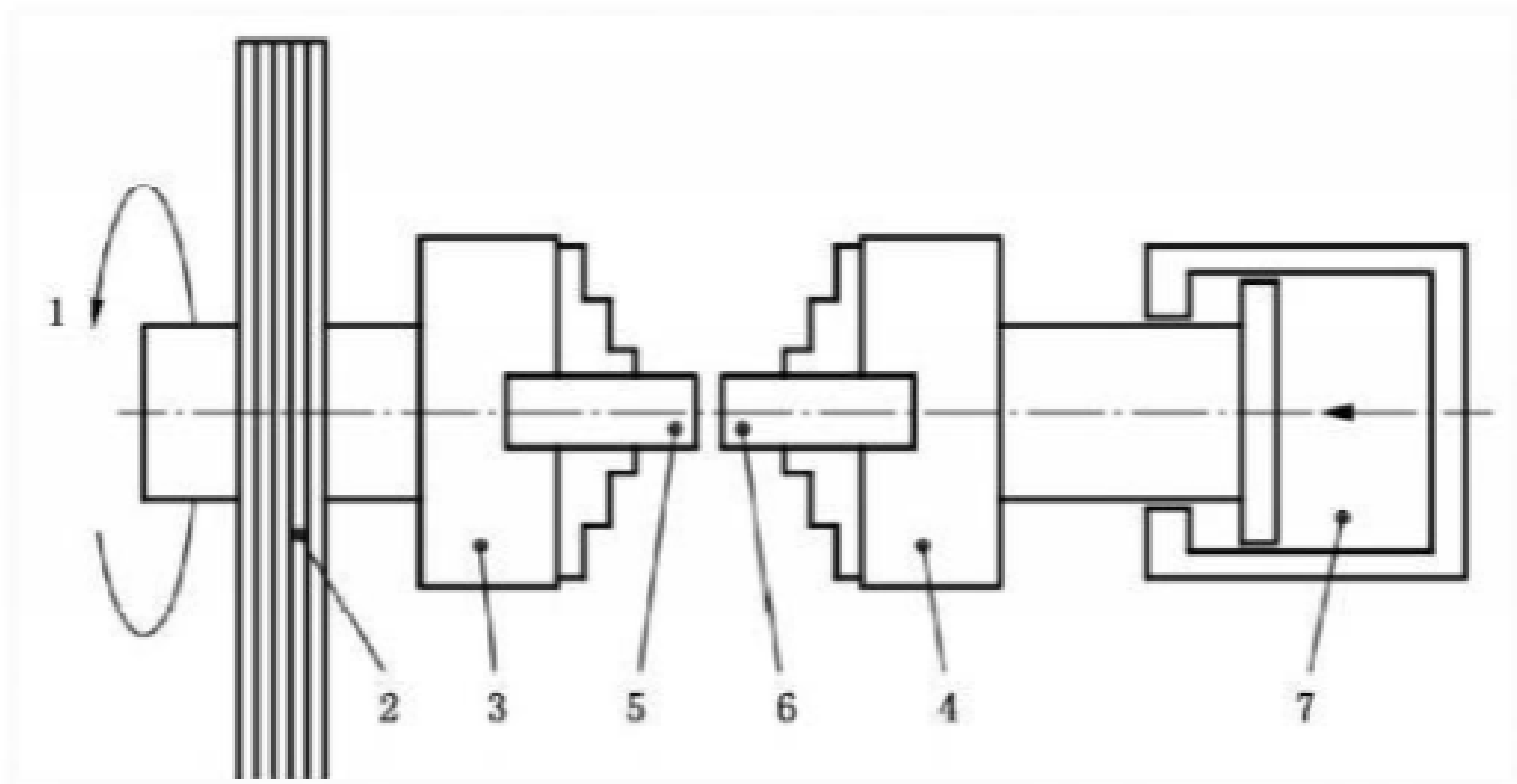
驱动轴或以预设的速度减速，或通过外部制动，或通过工件制动停止。主要焊接参数之间的关系见附录 C，主要焊接参数如下：

- 旋转速度；
- 预设的摩擦力；
- 摩擦时间或摩擦变形量；
- 预设的顶锻力；
- 顶锻时间；
- 减速时间和顶锻延迟。

注：外部制动是由于外部因素导致的旋转速度降低。

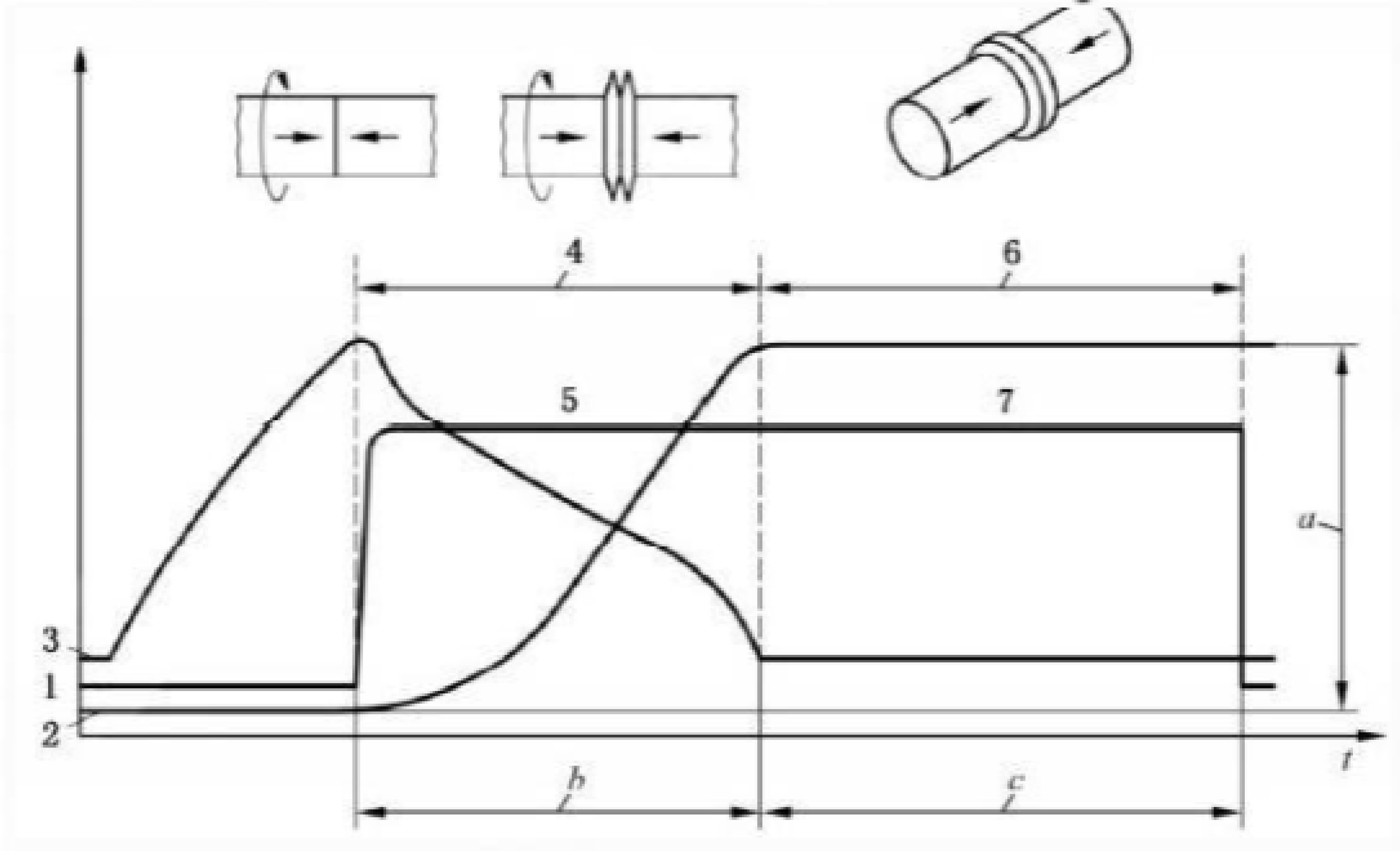
4.1.3 惯性摩擦焊

在旋转摩擦焊过程中，工件制动作用消耗了储存在惯性盘中的能量（见图4与图5）。



- 标引序号说明：
- 1——驱动电机；
 - 2——惯性盘(可更换)；
 - 3——旋转卡盘；
 - 4——固定卡盘；
 - 5——旋转工件；
 - 6——固定工件；
 - 7——顶锻油缸。

图 4 惯性摩擦焊示意图



- 标引序号说明：
- 1——轴向力；
 - 2——轴向位移；
 - 3——旋转速度；
 - 4——摩擦阶段；
 - 5——摩擦力；
 - 6——顶锻阶段；
 - 7——顶锻力；
 - a——总变形量；
 - b——摩擦时间；
 - c——顶锻时间。

图 5 惯性摩擦焊参数关系示意图

主要焊接参数之间的关系见附录 C, 主要焊接参数如下所示:

- 旋转速度;
- 惯量;
- 预设的摩擦力;
- 预设的顶锻力。

4.2 材料与材料匹配

4.2.1 适用材料

可以进行旋转摩擦焊的材料组合见附录 D。

注: 附录 D是根据实际试焊经验所编制。工件在特定几何形状下存在更多的材料与材料组合可以进行旋转摩擦焊接。

4.2.2 影响焊接质量的材料因素

以下因素可能影响焊接质量:

- 母材中非金属夹杂物的数量、分布和形状;
- 在焊缝中形成了金属间化合物;
- 在焊缝中形成了低熔点相;
- 母材孔隙率;
- 硬化材料在焊接中受热发生了软化;
- 热影响区硬化;
- 母材中的氢元素含量。

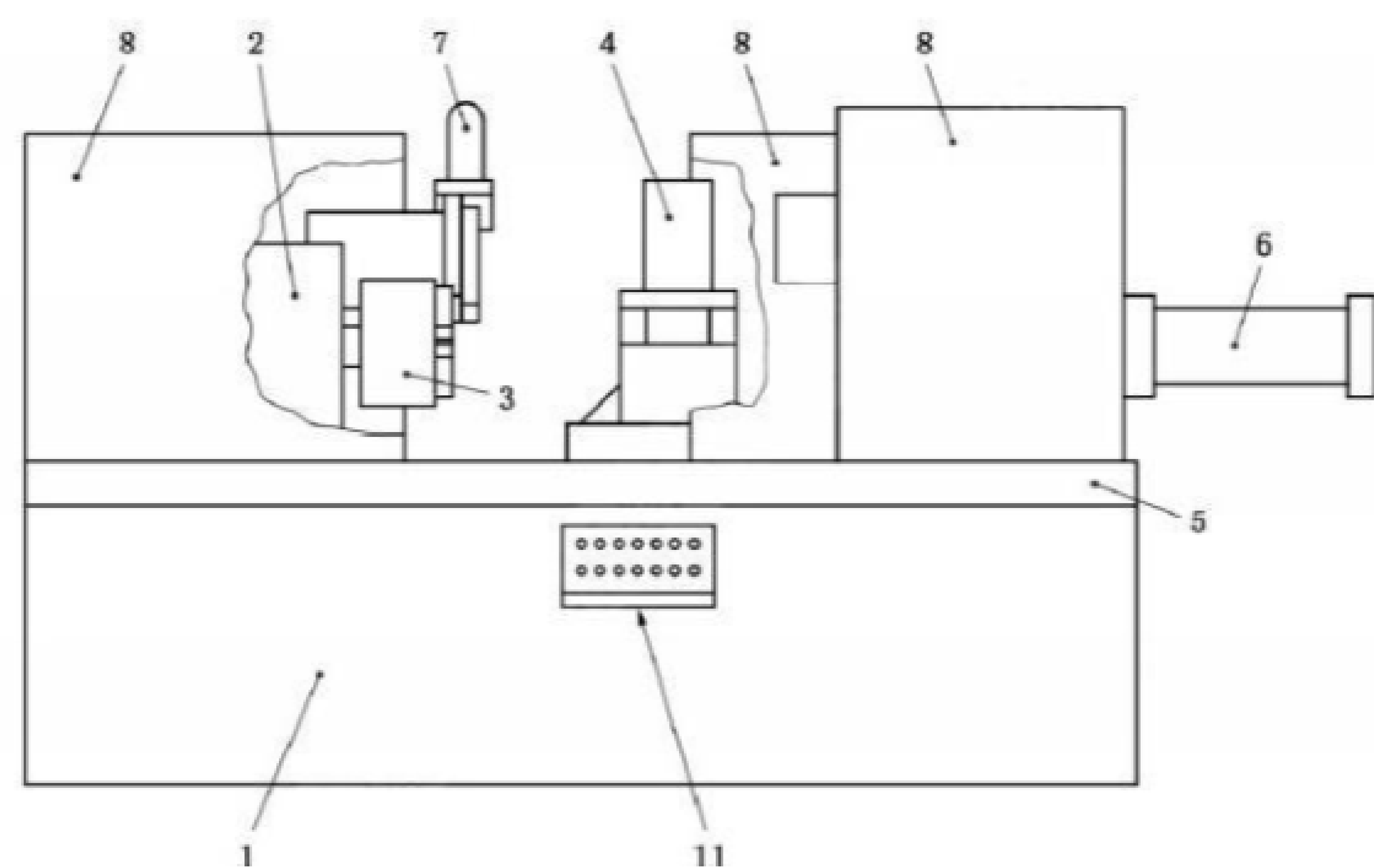
以上部分问题能通过严格选择焊接参数或采用焊后热处理的方式来解决。

4.3 焊接设备

4.3.1 总则

旋转摩擦焊对位置不敏感, 能够在任何平面上进行。

为确保焊接精确度和焊接可重复生产, 焊机使用环境场合决定了旋转摩擦焊机的设计与制造。水平连续驱动摩擦焊机设备示意图如图6所示。



标引序号说明:

- 1 ——床身;
- 2 ——主轴箱和制动器;
- 3 ——旋转卡盘-用于旋转端零件;
- 4 ——固定卡盘-用于固定端零件;
- 5 ——移动滑台(拉杆);
- 6 ——力执行机构;
- 7 ——除飞边单元;
- 8 ——安全罩;
- 9 ——液压泵站(图中未列);
- 10——电器控制柜(图中未列);
- 11——设备控制面板。

图 6 水平连续驱动摩擦焊机设备示意图

轴向力、转速和焊接时间的设定取决于实际应用。其他影响焊机设计的参数有摩擦行进速度、摩擦变形量、制动点、顶锻点、扭矩和转动惯量。

当设备在工作温度下运行时，宜检查参数的重复性和变化。

设备的规格宜与工件相匹配。

设备宜配备自动控制系统，即在工件夹持在夹具中并开始焊接循环后，在不受操作人员干预的情况下进行受控的焊接循环，并至少包含以下操作循环：

- 启动一个工作序列使工件待焊面在设定的转速下开始接触；
- 在加热循环内建立并保持摩擦力和相对旋转速度；
- 建立并保持所需的顶锻时间和/或顶锻距离，以完成焊接。

夹具松开工件的过程可能采用自动控制或手动控制，从而完成整个操作循环。

4.3.2 旋转摩擦焊机的附加特性

旋转摩擦焊机可能配备以下装置：

- 上件装置；
- 卸件装置；
- 车削单元，用于表面准备、去除表面飞边以及机械加工；
- 冲切单元，对飞边进行剥离；
- 用于焊接程序的扩展存储器；

- 焊缝识别单元；
- 角定位；
- 监控；
- 识别；
- 过程检测装置。

5 质量要求

5.1 焊前要求

5.1.1 母材的要求

为了确保焊接可重复性，在完成一批旋转摩擦焊接作业时母材宜保证以下因素相对稳定：

- 化学成分；
- 结构；
- 强度与硬度；
- 尺寸和几何公差；
- 被焊材料的供货状态。

5.1.2 工件的加工要求

除设计规范另有要求外，宜遵循以下规定。

- 每个工件待焊端应加工成与旋转轴垂直的平面。如必要，待焊端可能被加工成锥形，以便在焊接循环的初始阶段降低接触面积。锥的长度不应超过各自工件50%的摩擦变形量，以确保焊接界面位于工件的平行部分，否则供需双方应在图样上对焊接界面位置进行定义。
- 除非表面污染对接头性能无不利影响，否则在零件被装夹至设备之前应清除接合面上的污垢、油脂、锈和其他表面氧化物或保护膜。
- 不规则表面只应在明确其不会对接头性能造成不利影响的情况下存在，例如中心车孔。

5.1.3 工件的夹持

5.1.3.1 夹紧力

通常由夹具承受焊接过程产生的扭矩和轴向力。夹紧力不应过大，防止出现严重的工件变形或表面压痕。

5.1.3.2 工件支撑

尽可能选择合适的支撑垫板以防止工件在轴向打滑。当装夹空心工件时，可以使用中心销子来提供额外的支撑。

5.1.3.3 夹持前准备

焊机上夹持的工件应对准，使两个待焊工件轴线保持在规定的同心度范围内。为实现精确装夹，有时需要对待夹紧工件的表面进行加工或清洗。当焊接径厚比较大的中空零件时，需要特别注意夹持和对准问题。

5.1.3.4 夹持伸出长度

在摩擦和顶锻阶段，工件伸出长度不应过短，以防止工件发生严重的急速冷却；工件伸出长度也不

应过长，以防止对侧焊接界面发生严重不对中或剧烈振动。

为确保夹持后工件伸出长度相同，宜尽可能保证工件在任何位置均可被夹紧。如果两端工件在成分或尺寸上存在差异，为了达到焊接热平衡或进行可靠的夹持以获得更理想的焊接效果，对两端工件伸出长度进行不同调整是合理的。

5.2 焊后热处理

为满足使用工况，应在旋转摩擦焊后进行必要的加工和/或焊后热处理等工序，以恢复材料性能。

5.3 质量保证

所采用的质量保证体系应包含下列因素：

- 生产效率和批量；
- 焊件的尺寸和设计；
- 成本因素；
- 焊件预期的使用工况。

所采用的质量保证体系应保证批量或单件产品在焊接质量上的一致性和可靠性。

所采用的质量保证体系宜充分保证旋转摩擦焊机能够被定期校准。

应对生产质量控制记录进行保留，其形式和内容供需双方应商定。

附录 E 列出了质量保证等级。

焊件的用途决定了其是否能采用破坏性试验或无损检测。适用于旋转摩擦焊的常规破坏性和无损检测试验方法详见附录F。

6 焊接工艺规程

6.1 概述

焊接工艺规程(WPS) 中应描述整个焊接操作过程的每处细节并记录相关信息。WPS 具有一定的横截面积覆盖范围。用于WPS 验证的工件应在以下方面与实际生产工件统一：

- 化学成分；
- 待焊表面状态；
- 热处理状态；
- 接头几何形状/尺寸。

对于某些焊件可能补充或减少表格中相关信息，应在 WPS 中加以说明。应根据制造商的经验所确定的 WPS 覆盖范围和允许误差范围说明其适用领域。

推荐的 WPS 格式见附录 G。

6.2 制造商信息

制造商信息包括以下内容：

- 制造商名称；
- WPS 编号：与所使用的旋转摩擦焊机有关的字母数字标识(相关代码)。

6.3 材料信息

6.3.1 材料组别

参照相关标准对材料进行分组。如技术要求允许，WPS 可以覆盖一组材料。

6.3.2 工件信息

- 工件情况包括以下内容：
- 几何形状；
 - 尺寸；
 - 化学成分；
 - 其他相关信息。

6.4 焊接参数

应列出所有相关参数(见第4章和附录G)。

6.5 焊接接头

- 焊接接头情况包括以下内容：
- 接头设计图：用以说明焊缝位置与细节的接头简图，可列出公差要求；
 - 焊前工件准备：具体为焊前工件准备所使用的表面加工方法，如锯切、车削等；
 - 工件固定：具体包括装卡方式、夹具与背部支撑垫板细节。

6.6 可选装置

例如飞边去除单元，焊接薄壁管时所采用的内部支撑。

7 焊接工艺评定

7.1 概述

以下程序是为质量要求高的产品而制定的。旋转摩擦焊的焊接工艺规程应在生产前进行评定，方式包括：

- 按照7.2进行焊接工艺评定试验；
- 按照7.4基于之前的经验进行评定。

7.2 焊接工艺评定试验

7.2.1 应用

- 当要求进行试验时，应按照以下原则进行：
- 依照产品标准执行；
 - 如无适用标准，则按7.2.3~7.2.6 的规定执行。

7.2.2 预焊接工艺规程(pWPS)

预焊接工艺规程应按照第6章的规定进行编制。

7.2.3 试验件的数量

- 如设计规范或其他标准无更严格的试验要求，则按如下基本试验要求执行：
- 至少应焊接2个焊件用于 WPS 的评定；
 - 至少应对2个焊件进行评估。

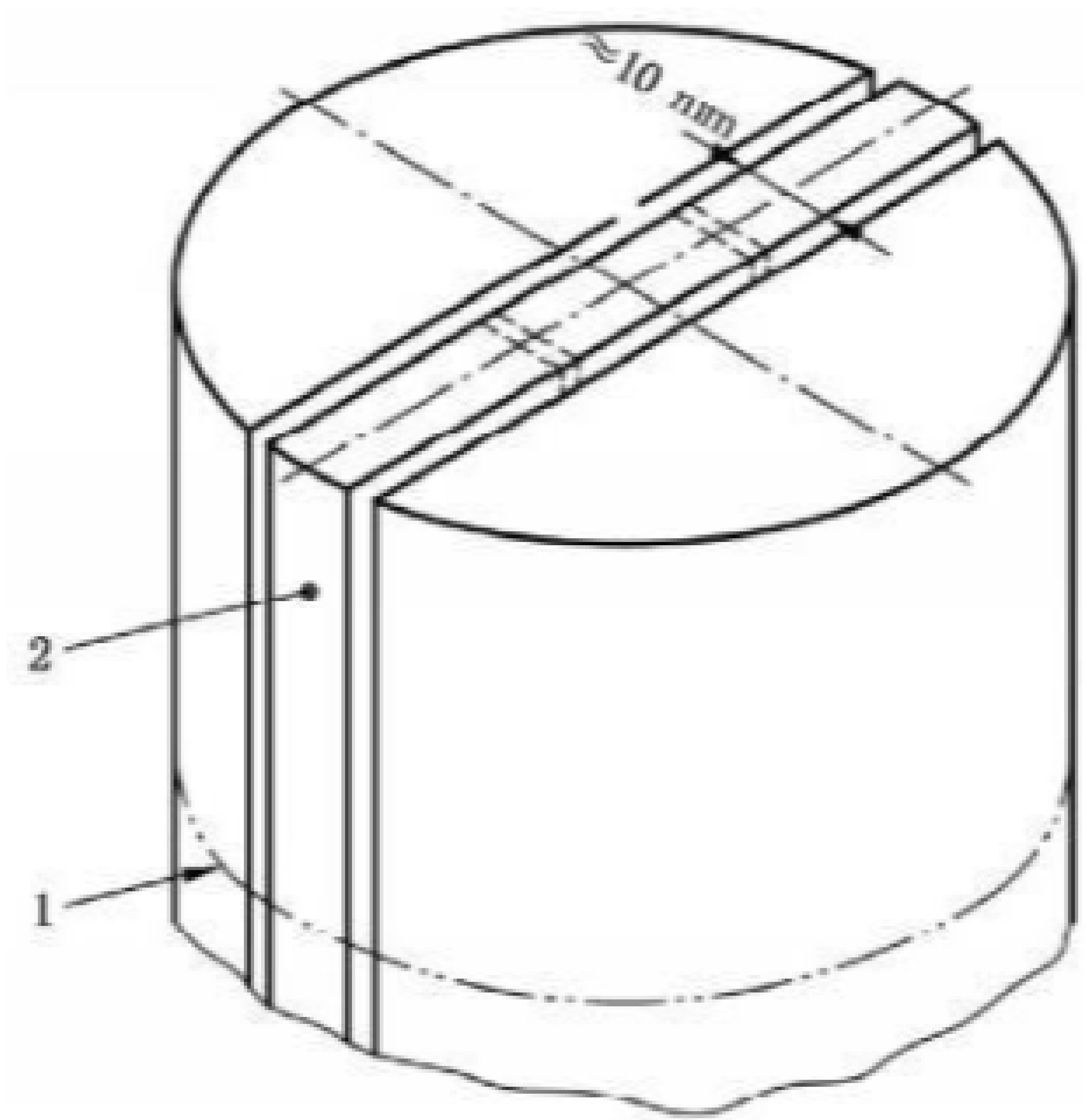
如果其中一个试验件不符合验收标准，则应重新制定焊接工艺进行焊接，并增补两个额外的试验件进行评估，两个试验件中如有一件不符合标准，则焊接工艺失效。

在某些情况下可以执行替代测试。试验类型的选择和试样数量取决于焊件的性能、安全和质量要求、装配要求，并应在焊接工艺评定之前确认替代方案。示例在7.2.5.2 中给出。

7.2.4 试样规格

7.2.4.1 实心截面-棒与棒接头的弯曲试样

焊缝表面应加工光滑，除非另有规定证明表面光洁度不影响试验结果。当不同截面的构件焊接在一起时，焊后应将较大截面侧加工至与较小截面相等。应对完整的接头进行测试，或按图7制备试样。



标引序号说明:

1——焊接界面位置;

2——弯曲试样。

注: 推荐尺寸

——厚度: 名义尺寸为10 mm;

——宽度: ≥ 25 mm;

——长度: 取决于工件尺寸。

图 7 实心焊件弯曲试样取样示意图

如有必要可将试件切分为小试件，切分试件的宽度应不小于25 mm。如果试样的测试面积小于总面积的三分之一，则应再切割10 mm 宽的切片进行试验。

在试样制备过程中，不应使用明显影响试样金相组织的切割方法。

接头如果为棒对板或其他形状导致无法加工出满足厚度要求的弯曲试样时，供需双方应商议选择替代试验。

7.2.4.2 中空截面

7.2.4.2.1 管对管接头的弯曲试样

除非另有规定说明表面光洁度不影响试验结果，否则试样焊缝的内外表面应加工光滑。

应在焊件圆周上等距取四个试样(见图8)。在试样制备过程中，不应使用明显影响试样金相组织的切割方法。为了使焊缝大致处于试样中心位置，每个试样的两条切割边缘面应保证平行。

每个试件的最小宽度应参照公式(1)和公式(2):

——外径小于50 mm 的管接头

- $t+D/10$

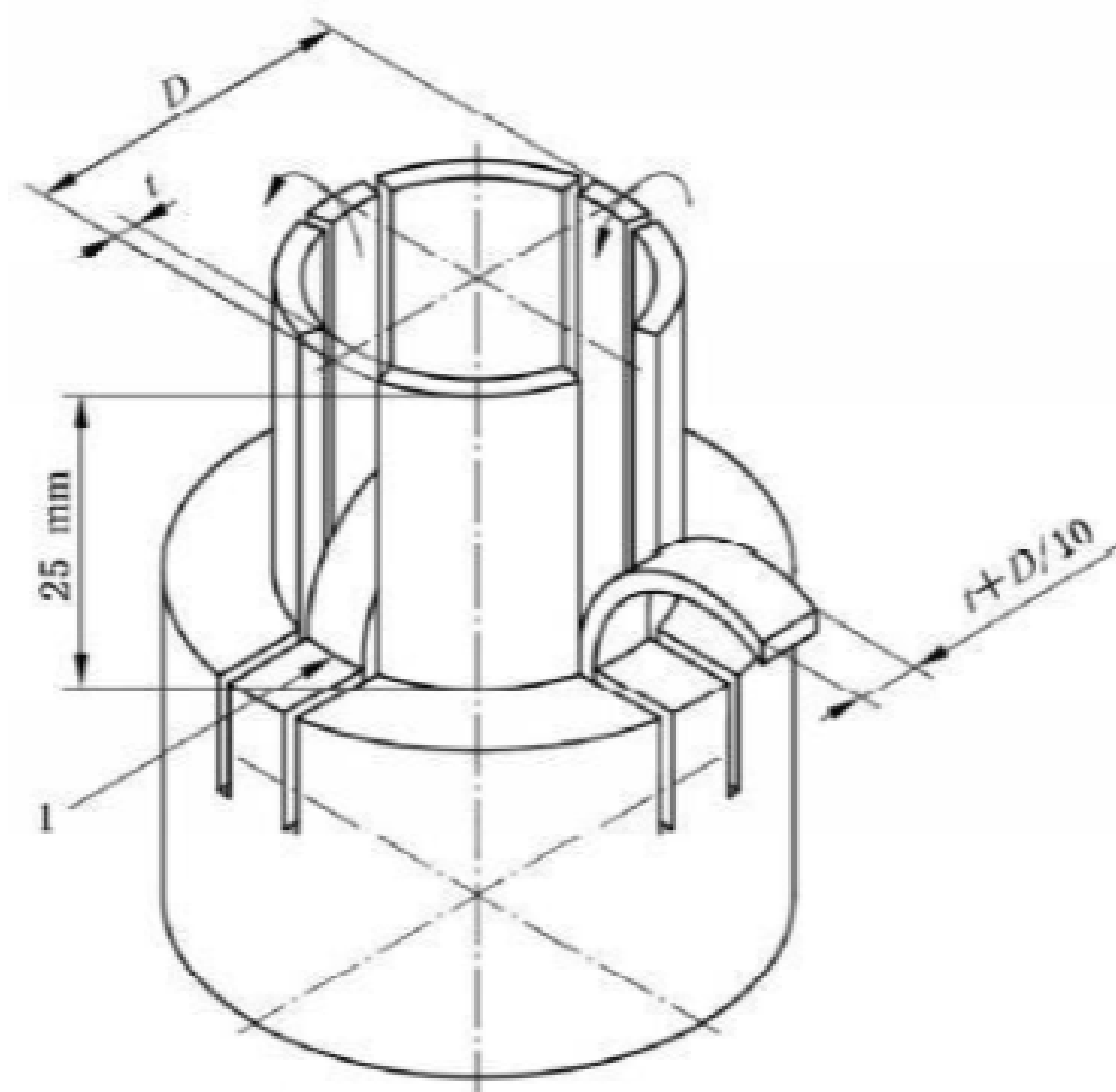
.....(1)

_____ 外径大于或等于50 mm 的管接头

$t+D/20$

.....(2)

式中：
t ——壁厚，单位为毫米(mm)；
D—— 加工后的管外径，单位为毫米(mm)。



标引符号说明：
1 ——焊缝位置；
t—— 壁厚，单位为毫米(mm)；
D——加工后的管外径，单位为毫米(mm)。

图 8 中空件、中空件对实心件或板件的弯曲试样取样示意图

7.2.4.2.2 中空件对实心件或板件的弯曲试样

试样焊缝的内外表面应去除飞边以避免影响试验结果。如图8所示，切割四个试验片。切口应刚好穿过焊缝和热影响区。

7.2.5 试验规程

7.2.5.1 弯曲试验

如果因为试件尺寸或材料不适于进行弯曲试验，则应商定替代方法，否则均应按照以下要求执行。
制备好的样品应在表2所示直径的压头模具上进行。焊缝所处平面应位于弯曲试样的端部。当试样按图7制备时，面积较大的一侧与压头模具接触。弯曲试验为管接头时，试样的数量与壁厚的关系如表3所示。

表 2 不同材料推荐的弯曲直径

材料	压头直径
碳钢(C含量最大0.25%) 工业纯铝 铜 钛 奥氏体不锈钢	3t~4t

表2 不同材料推荐的弯曲直径(续)

材料	压头直径
碳钢(C含量超过0.25%) 低合金钢 黄铜或青铜 铝锰合金3103	4t~5t
其他材料组合(同种或异种)	供需双方协商
注：t为试样厚度或管壁厚。	

按照图8准备的试样应进行两个内弯曲和两个外弯曲试验。如有必要，应将首个内弯曲试件缩短，使其与第二个内弯曲试件之间留有间隙。该试验不应使用压头模具，应在专用试验台上对试件在成直角的方向进行轻锤击打。

表 3 管接头弯曲试样取样位置与数量

厚度(t)	受拉面
t≤10 mm 10 mm<t≤20 mm t>20 mm	2个内部和2个外部 2个内部和2个外部，或4个侧向 4个侧向
注：当对可硬化材料制成的试样进行弯曲试验时，焊缝两侧热影响区边缘将承受较大力，所导致的“膝关节效应”使试样无法紧密贴合压头模具表面。因此在弯曲试验前进行焊后热处理能降低热影响区硬度，注意焊后热处理对评定结果的影响。此外，注意表面硬化材料的硬化区域对力学试验结果的可能影响。	

7.2.5.2 替代试验

在某些情况下可使用替代试验(见表4)。

表4 测试和检验试样示例

测试试样	试验项目	检测项目	
		A(重要焊缝)	B(非重要焊缝)
棒对棒接头或管对管接头	目视检查	每个焊缝	每个焊缝
	拉伸试验	2个试样	-
	弯曲试验	2个试样	2个试样
	冲击试验	1组或2组试样	—
	剖面宏观金相	1个焊缝试样	
	硬度试验	1测量行	-
管对棒接头或管对板接头	目视检查	每个焊缝	每个焊缝
	拉 伸 试 验 ”	2个试样	
	弯 曲 试 验 ”	2个试样	2个试样
	冲击试验 “	1组或2组试样	

表 4 测试和检验试样示例（续）

测试试样	试验项目	检测项目	
		A(重要焊缝)	B(非重要焊缝)
管对棒接头或管对板接头	剖面宏观金相	1个焊缝试样	-
	硬度试验	1测量行	
根据应用场合的不同，宜通过工件负载来区分两个测试类别： A: 焊件在服役时所受静应力达到了母材最大疲劳应力； B: 焊件在服役时所受静应力达到了母材最大疲劳应力的50%			
该项试验在焊缝布局便于制取试样时进行。			

更多细节见附录 F。

7.2.6 验收标准

每个弯曲试验样品应能够弯曲到试验规范所规定的角度而不断裂，轻微撕裂不应作为评判不合格的理由。

注：焊接缺欠的细节见附录 H。

7.3 焊接工艺评定报告(WPQR)

用于评定焊接工艺规程所使用的焊件的所有相关数据以及所有试验结果均应记录在焊接工艺评定报告(WPQR) 中。推荐的 WPQR 格式示例见附录 I。

7.4 既往经验

当经过验证的数据表明，制造商已建立的焊接工艺规程能在一段时间内持续生产质量合格的焊接接头时，就可以对既往经验进行评定。

7.5 条件或情况改变导致的重新评定

- 除非发生以下情况，否则 WPS 应始终有效：
- 对焊机进行了影响其焊接性能的改装或修理；
 - 改变了 WPS 中的材料或(和)材料状态；
 - 改变了 WPS 中的待焊表面状态；
 - 与已评定 WPS 中的质量要求不一致。

7.6 旋转摩擦焊机-WPS 中的特殊性质

一份 WPS 只适用一台指定的旋转摩擦焊机。除非特别允许，否则在重新评定之前WPS 不应用于另外一台旋转摩擦焊机。

7.7 重新评定工艺的要求

重新评定工艺与新评定工艺要求相同。

8 焊接人员

8.1 旋转摩擦焊机操作人员

旋转摩擦焊机操作人员应接受充分的实际操作培训，包括安全操作规程培训。

8.2 旋转摩擦焊机调试人员

旋转摩擦焊机调试人员是能够按照规定的焊接程序设置旋转摩擦焊机设备的人员。

旋转摩擦焊机调试人员具备在旋转摩擦焊领域开展质量保证工作所需的知识和技能。

旋转摩擦焊机调试人员的能力可通过足够的焊接经验、内部培训或曾参加过的旋转摩擦焊课程记录或证书来证明。

8.3 焊接责任人员

制造商应配备合适的焊接责任人员，以便对焊接人员进行必要的指导，并认真监督工作。焊接责任人员应具有旋转摩擦焊、材料性能和质量保证方面的知识和经验。应授权负责质量工作的人员采取所有必要的措施。这些人的职责、隶属关系和责任范围宜加以明确规定。

附 录 A
(资料性)
本文件与ISO 15620:2019 结构编号对照情况

表 A.1 给出了本文件与ISO 15620:2019结构编号对照一览表。

表 A.1 本文件与ISO 15620:2019 结构编号对照情况

本文件结构编号	ISO 15620:2019结构编号
1	1
2	2
3	3
4	4
4.1	4.1
4.1.1	4.1.1
4.1.1.1	4.1.1
表1	表 1 部 分 内 容
4.1.1.2	4.1.5
图 1	图 5
4.1.2	4.1.2
图2、图3	图1、图2
4.1.3	4.1.3
图4、图5	图3、图4
	4.1.4
4.2	4.2
4.2.1	4.2第一段
4.2.2	4.2第二段
4.3	4.3
5	5
—	5.1
5.1	5.2
5.1.1	5.2.1
5.1.2	5.2.2
5.1.3	5.2.3
5.1.3.1	5.2.3第一段
5.1.3.2	5.2.3第二段
5.1.3.3	5.2.3第二段，第四段，第五段
5.1.3.4	5.2.3第六段，第七段

表 A.1 本文件与ISO 15620:2019 结构编号对照情况（续）

本文件结构编号	ISO 15620:2019结构编号
5.2	5.3
5.3	5.4
6	6
6.1	6.1
6.2	6.2
6.3	6.3
6.3.1	6.3第一段
6.3.2	6.3第二段
6.4	6.4
6.5	6.5
6.6	6.6
7	7
8	8
附录A	
附录B	
附录C	附录A
—	附录B
附录D	附录C
附录E	附录D
表E.1	表D.1
附录F	附录E
附录G	附录F
附录H	附录G
表H.1	表G.1
附录I	附录H
参考文献	参考文献

附录 B
(资料性)

本文件与ISO 15620:2019 技术性差异及其原因

本文件与ISO 15620:2019相比的技术性差异及原因见表 B.1。

表 B.1 本文件与 ISO 15620:2019 技术性差异及其原因

本文件结构编号	技术差异	原因
1	删除了ISO 15620:2019第一章第三段内容，增加了适用界限	修改标准范围，以符合我国标准的编写规则
3	删除了ISO 15620:2019中未出现以及仅出现一次的术语及定义，包括“3.3 变形速率”，“3.6 外部制动”，“3.23 焊接总时间”	以符合我国标准的编写规则
4.1	将ISO 15620:20194.1标题从“方法”改为“焊接方法”	以符合我国标准的编写规则
4.1.1	ISO 15620:20194.1.1总则改为焊接方法分类，表1改为按旋转摩擦焊分类(按能量供给方式分类)	增强标准针对性
4.1.1.1	删除了ISO 15620:2019表1中与旋转摩擦焊不相关的内容，并将原表1从图表形式改为了表格形式	增强标准针对性
4.1.4	由于内容与旋转摩擦焊无关，删除了ISO 15620:2019中“4.1.4 额外工艺”一节	增强标准针对性
4.2	将ISO 15620:20194.2第一段部分内容删除，并将部分内容作为注解	只删除了部分内容，删除的内容术语技术变化，未列入附录 B
5.1	删除ISO 15620:2019中“5.1 总则”及内容	以符合我国标准的编写规则
7.2.3	增加了对复验结果的判定条件，即“两个试验件中如有一件不符合标准，则焊接工艺失效。”	规定更严格，提高标准指导性

附录 C
(资料性)
旋转摩擦焊参数之间的关系

C.1 连续驱动摩擦焊参数

C.1.1 概述

旋转摩擦焊循环简单分为三个主要阶段(摩擦阶段、减速阶段和顶锻阶段)。每一个阶段都能确保获得理想的焊接接头性能。图3显示了旋转摩擦焊的转速、力和轴向缩短量随时间的变化关系。

C.1.2 摩擦阶段

在该阶段宜建立起旋转速度与摩擦力，所以工件接触后的压缩形变过程能够在整个摩擦阶段一直持续。

摩擦力与转速的设定值宜与工件材质、工件尺寸相匹配。压缩形变过程宜平稳连续，直至达到了所设定的变形量或时间，变形过程的设定要保证产热充足使焊接区在顶锻时连接可靠。在焊接面存在的表面不均匀性和杂质将在变形阶段结束前被消除。

C.1.3 减速阶段

为提高焊接质量，减速阶段使旋转端工件以某一种特定的方式进行减速。减速持续时间要与顶锻力的施加相配合。

减速持续时间受以下一个或多个因素的影响：

- 制动力；
- 控制程序(具备动力减速装置的焊机)；
- 储存在旋转端内的能量，包括传动装置、工装和工件；
- 焊接界面面积；
- 被焊金属的种类；
- 顶锻力。

C.1.4 顶锻阶段

顶锻力大小取决于工件的结构和焊接温度下金属的强度，其设定值宜保证焊缝质量。过小的顶锻力可能不足以排出界面污染物，过大的顶锻力能导致不良的微观组织改变。此外，顶锻力不宜使工件扭曲程度过大或使塑性金属排出量过多，以上两种情况均能降低接头强度。顶锻力维持时间宜充足，以促进界面紧密连接。

C.2 惯性摩擦焊参数

C.2.1 概述

惯性摩擦焊是将轴向推力和储存的旋转能量同时作用于两个工件焊接界面从而完成焊接的过程。图5是惯性摩擦焊参数关系示意图，包括转速、轴向力和轴向位移等参数的变化规律。其中能量和轴向力是最主要的两个参数。

C.2.2 能量

焊接的能量来自于主轴、传动装置、飞轮或工具的转动惯量。在旋转能量系统中，焊接所需能量是

由转动质量在被焊金属所需转速范围内的转动动能转化得到的。因此，可选择合适的转动惯量和转速来提供所需的焊接能量。

C.2.3 轴向力

轴向力的大小由焊件几何形状和材质决定。轴向力在主轴达到指定转速且主轴驱动力已断开时施加。在整个摩擦、停止和顶锻阶段可不改变轴向力大小，当然提高顶锻阶段轴向力有利于某些材料的焊接。

附录 D
(资料性)
旋转摩擦焊材料组合

旋转摩擦焊材料组合见表 D.1。

表 D.1 旋转摩擦焊材料组合

金属材料种类	钨铜 PM	钨 PM	钛和钛合金	高速切削钢	钢 PM	铸钢	奥氏体高合金钢	铁素体高合金钢	低合金钢	非合金钢	铌	镍合金 PM	镍与镍合金	钼 PM	镁与镁合金	铜与铜合金	硬质合金, 工具钢	铸铁	铝 PM	铝和铝合金
铝和铝合金	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●		●	●	●	●	●	●
铝 P M							●	●	●	●									●	
铸铁					●	●	●	●	●	●								●		
硬质合金, 工具钢							●	●	●	●										
铜与铜合金	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●						●				
镁与镁合金										●					●					
钼 P M														●						
镍与镍合金			●				●	●	●	●		●	●							
镍合金 PM			●						●	●		●								
铌			●				●	●			●									
非合金钢		●	●	●	●	●	●	●	●	●										
低合金钢		●	●	●	●	●	●	●	●											
铁素体高合金钢				●	●	●	●	●												
奥氏体高合金钢		●	●	●	●	●	●													
铸钢				●	●	●														
钢 P M				●	●															
高速切削钢				●																
钛和钛合金			●																	
钨 P M	●	●																		
钨铜 P M	●																			
<p>● 代表可焊接； 空白栏 代表焊接经验较少或无焊接经验； PM 代表粉末冶金。 注：表中未说明接头在某些特定工况下是否符合质量要求。</p>																				

附录 E
(资料性)
质量保证指南

焊接接头等级取决于其使用条件和所承受的应力，可分为三类(A 类、B 类、C 类)：

——A 类：失效后对产品和服务有危害的焊接接头；

——B类：失效后会引起严重损坏的焊接接头；

——C 类：失效后只会造成局部损坏的焊接接头。

三种等级焊接接头的应用条件及检测方式见表 E.1。

表 E.1 可选择的应用条件与检测方式

种类	目视检测	总长度损失量 检查	参数监控 ^a	参数记录	破坏性力学性能测试 与显微照片	无损检测
A	100%	100%		100%		
	—	—	100%	—		
B	100%	10%	—	待定义	b	
	—	—	50%	—		
C	50%	5%		定期进行，每6个月至少进行一次		
	—	—	20%			
“—”表示没有此项内容						
至少监测摩擦压力、顶锻压力、摩擦变形量、总变形量和焊接时间。						
”频率待定，随类别而定。						
无损检测的应用取决于使用条件和后续加工步骤。未去除飞边且服役中受动载荷的工件在验证WPS过程中，宜在去除飞边后进行无损检测。						

注1: 所有 A 类、B 类、C 类焊缝中的可替代方案包含一定范围的目视检测。

注2: 目视检测无法在全自动旋转摩擦焊机上进行，因此在表 E.1 中给出了备选方案，要求也相应提高。

注3: 参数记录保证了工艺可追溯性，为可能的参数更改提供了参考。

附 录 F
(资料性)
检验与试验

F.1 无损检测

F.1.1 概述

进行检测前需要在检验规程中规定合格与不合格的特征范畴。当然，每种检测方法均存在局限性，这取决于焊接工艺、材料和组件的几何形状。因此，有时有必要制定适用于特定焊件的检验程序。飞边在检测前可去除或保留。

F.1.2 目视检测

从目视检测中可得知接头形状和外观的初步特征。宜特别注意：

- 飞边的形状和尺寸；
- 轴向和角度偏差。

飞边形貌的变化表明了工件材质、几何形状、焊接条件或工件夹持等因素发生了改变。检测标准参照 GB/T 32259。

F.1.3 尺寸检查

尺寸检查可以测量焊接组件的轴向偏差、角偏差和长度变化。

F.1.4 渗透检测

在飞边去除后，通过渗透检测能发现焊缝表面的细小裂纹。检测标准可参考GB/T 26953。

F.1.5 磁粉检测

磁粉检测用于确定铁磁性工件焊缝表面是否有缺口或裂纹。在磁粉检测前去除飞边。
检测标准可参考 GB/T 26951。

F.1.6 涡流检测

在去除飞边后，涡流检测用于检测焊缝表面及近表面深约0.3 mm 区域内的任何裂缝、缺口或非均匀性。检测标准可参考 GB/T 26954。

F.1.7 超声检测

超声检测用于发现裂纹或未连接缺欠，但不宜检测削弱焊缝的缺欠，如细密的氧化膜，弱连接。
检测标准可参考 GB/T 41115、GB/T 40733或 GB/T 11345。

F.2 破坏性试验

F.2.1 概述

破坏性试验用于实际焊件或代表实际焊件的测试焊件。每个样品最好具有代表性。需注意材料特性的任何可能变化。最好不使用严重影响试样金相组织的切削方法。

F.2.2 拉伸试验

如果焊件很大，宜将焊件分成若干部分。试件宜沿轴向切割制样并且包括焊件的边缘和中心区域。

F.2.3 冲击试验

通常来说旋转摩擦焊影响的材料区域很窄，冲击值对于旋转摩擦焊等其他压力焊方法的重要性与冲击值对于熔化焊(纤维偏转)的重要性完全不同。是否有必要增加冲击值取决于工件预期服役环境。

F.2.4 金相检验

用于检验旋转摩擦焊缝的冶金特性。这些特征包括微观组织、热影响区、界面、未连接、夹杂和缺陷。宜从焊缝的中心和边缘制取微观和宏观金相。

F.3 验证性试验

如实际情况允许并在试验规范中作了规定，可以对焊件中的一定比例采用验证性试验(具体比例需商定)。施加的载荷宜大于预期服役载荷，部件测试后不宜存在可能导致使用失效的损坏。

附录 G
(资料性)
制造商旋转摩擦焊工艺规程(WPS)

制造商旋转摩擦焊工艺规程(推荐格式)

公司:

工件:

工作号:

图号:

焊接工艺评定报告编号:

焊接责任人员:

客户:

客户合同号:

编号:

检验员或检验机构:

旋转摩擦焊机设备编号:

工装:

支撑垫铁:

去除飞边: ☐是 ☐否

去飞边方式:

去飞边参数:

简图

母材

材料	旋转工件	非旋转工件
材料种类		
材料状态		
待焊面状态		
焊接面积 (mm ²)		

焊后精度要求

接头	长度容差 (mm)	错配 (mm)	角度偏差 (°)

备注：

焊接责任人员：

检验员或检验机构：

姓名与日期

姓名与日期

附加数据

代码	名称	单位	值	备注
A	工件形式			
		mm		
		mm		
B	旋转摩擦焊机参数设置			
	旋转速度	min ⁻		
	压力表设定值(接触压力)	MPa(bar)		
	压力表设定值(摩擦压力)	MPa(bar)		
	摩擦力	kN		
	压力表设定值(顶锻压力)	MPa(bar)		
	顶锻力	kN		
	接触时间	S		
	摩擦时间	S		
	变形量	mm		
	压力表设定值(刹车压力)	MPa(bar)		
	缩短速率	mm/s		
	刹车点/刹车延迟	S		
	顶锻点/顶锻延迟	S		
	顶锻时间	S		
C	焊后参数			
	总长度损失	mm		
	总焊接时间	S		
D	备注			
	热处理			
提供的附加数据(如需要)。				

附录 H
(资料性)
旋转摩擦焊接头特征

表 H.1 展示了旋转摩擦焊接头可能出现的缺欠，同时说明了部分缺欠的成因与解决办法，该部分有助于术语的标准化。

表 H.1 旋转摩擦焊接头特征

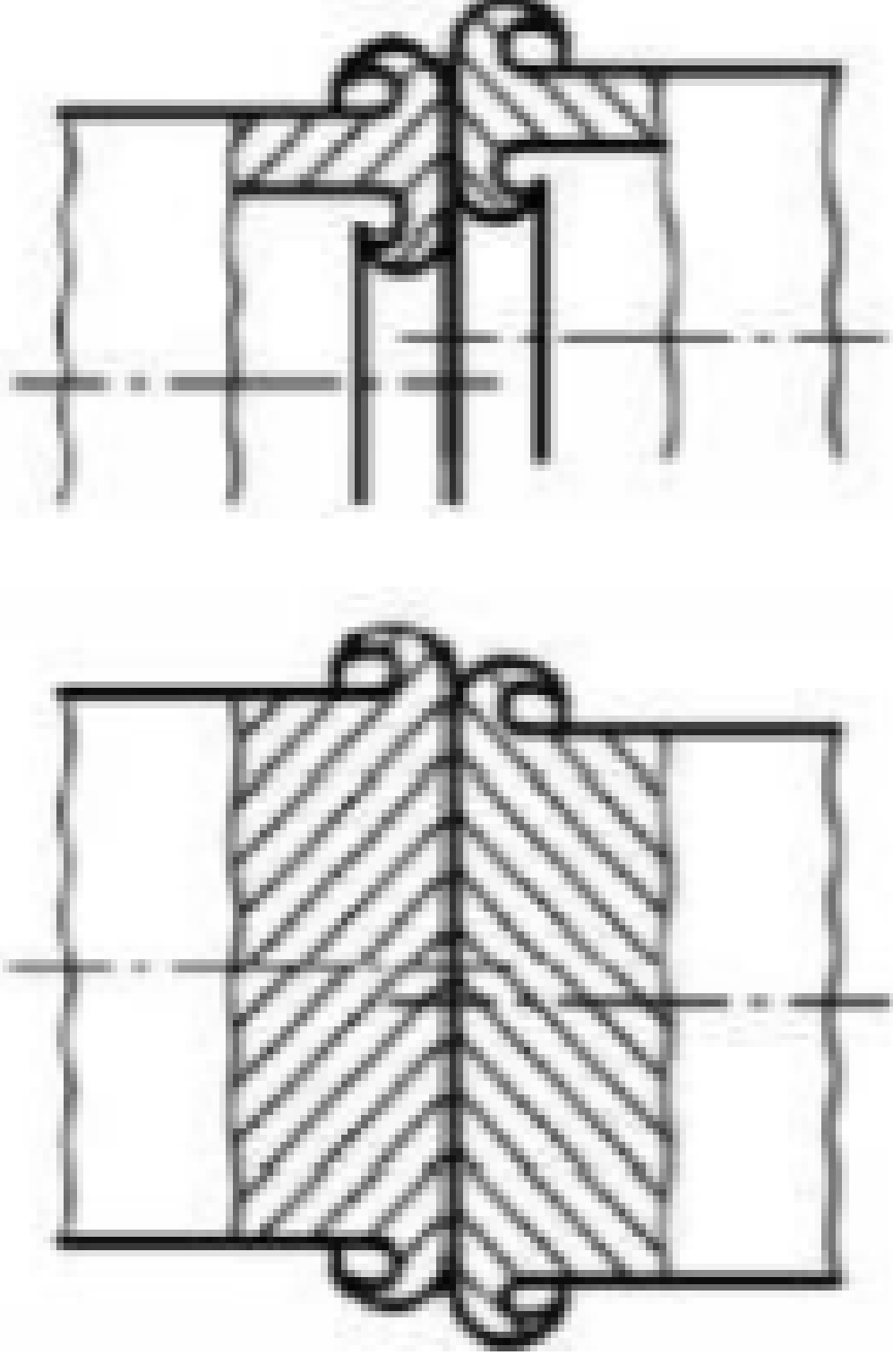
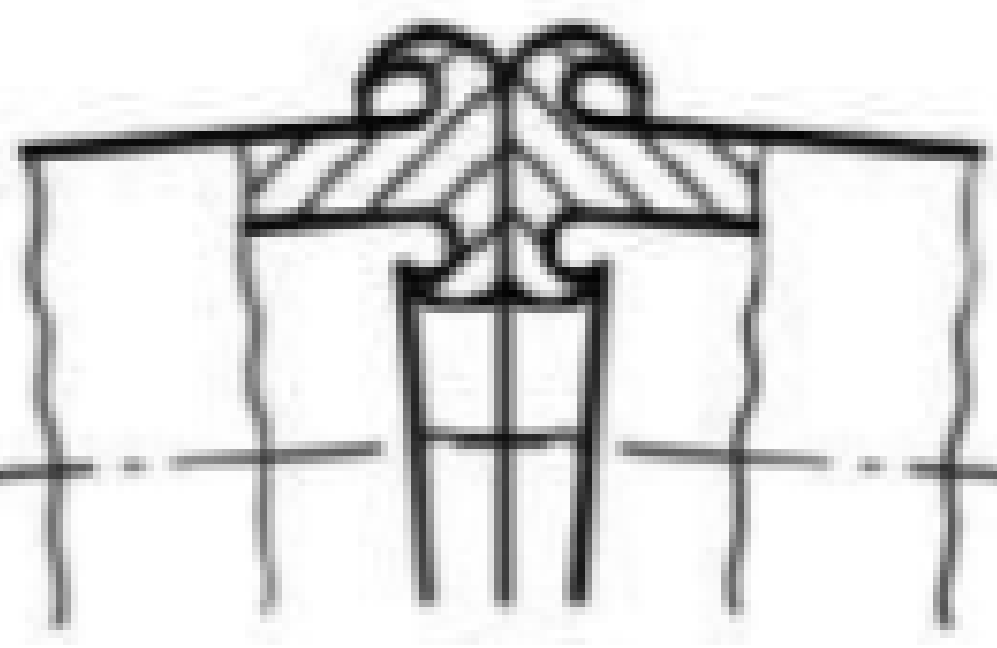
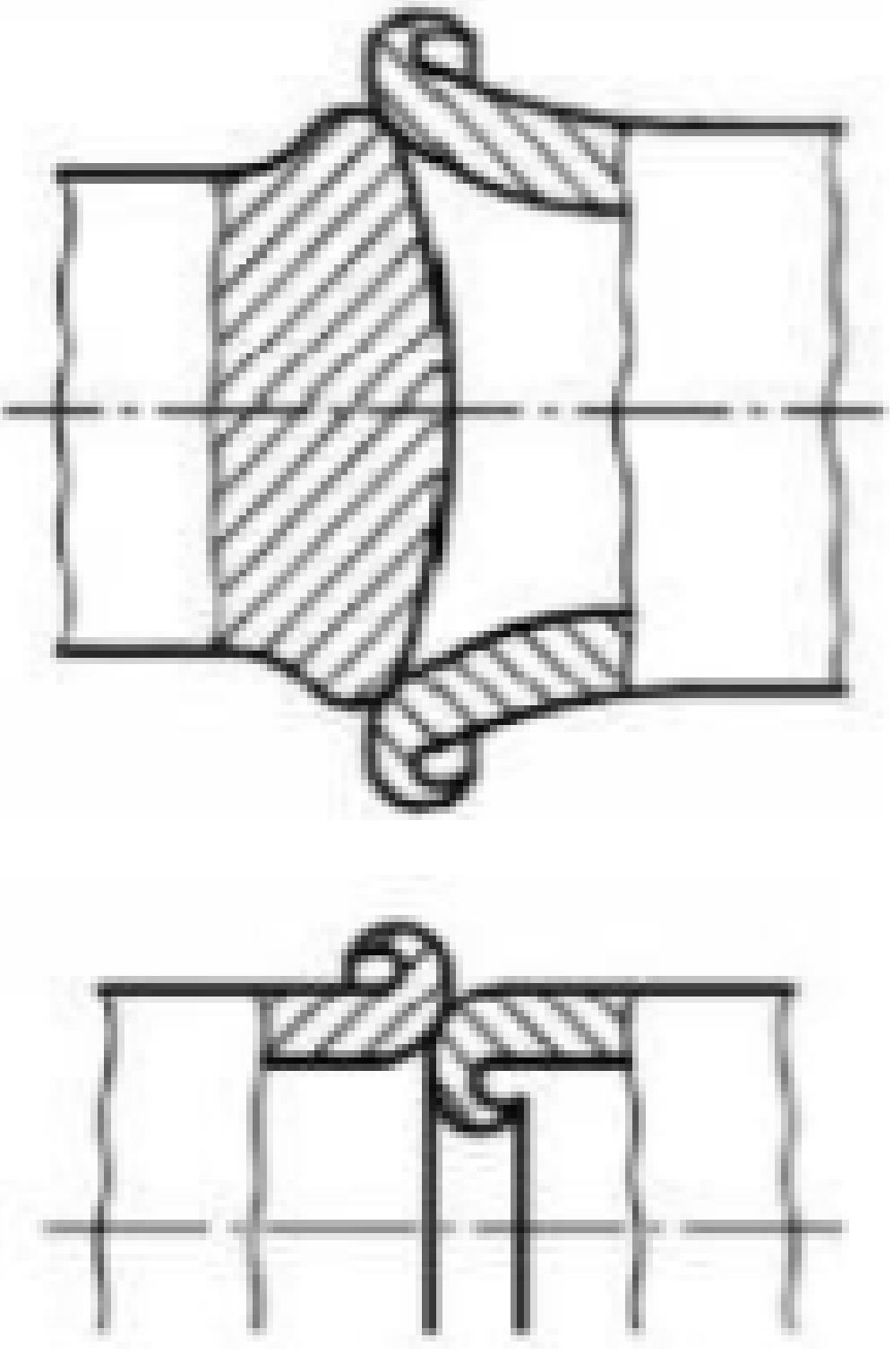
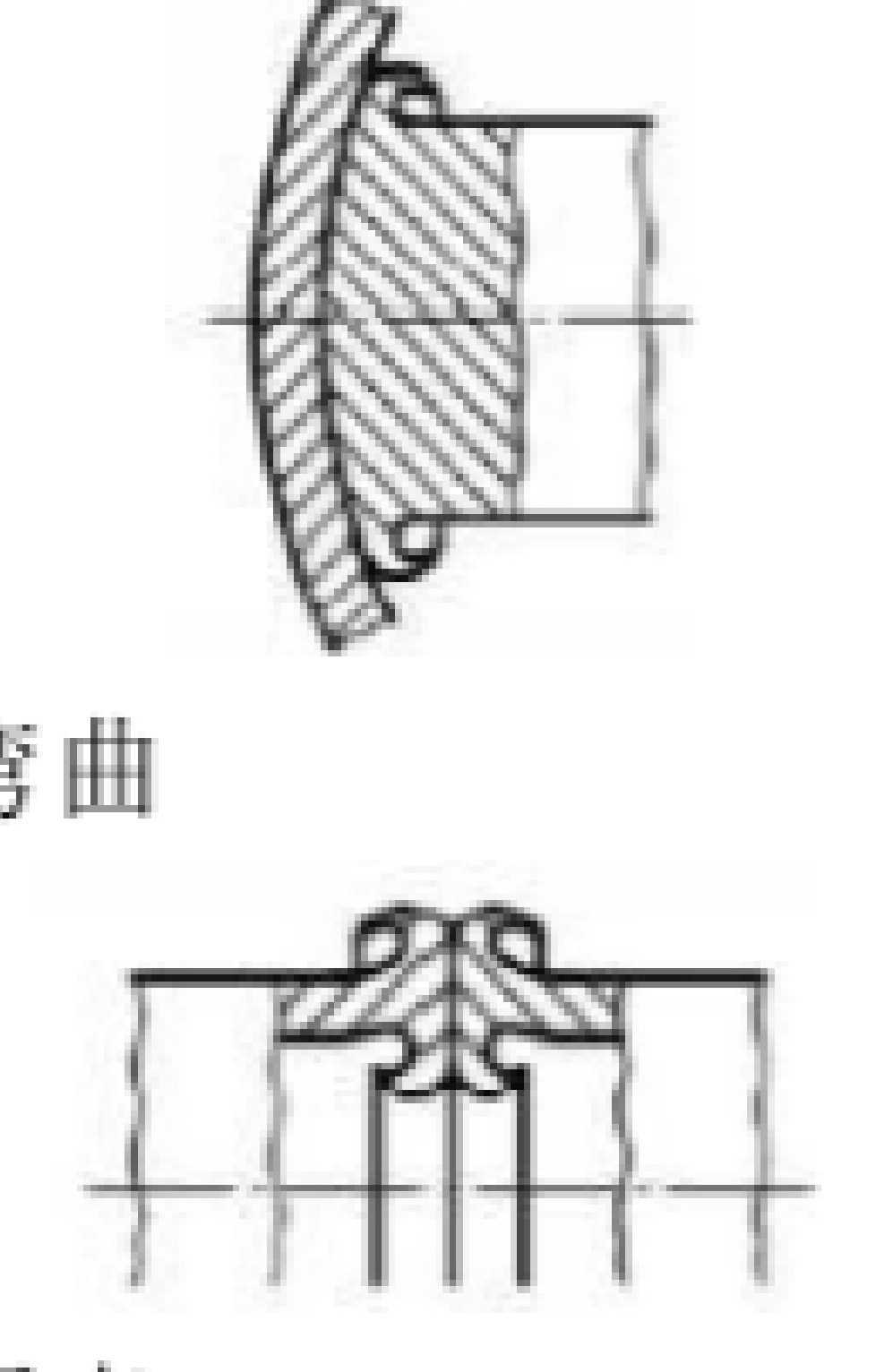
名称	说明	简图	常用检测方法	缺欠成因	解决方法	备注
1 形状偏差						
轴向偏差	两工件在轴线上不对中		尺寸测量，目视检测，宏观检验	夹具，几何偏差，伸出长度过长，工件焊前准备条件差，有角	调整夹具，检查工件几何尺寸，减少伸出长度，更好的焊前准备工作	在旋转摩擦焊接薄壁管和大差异异种材料时该问题很关键
角偏差	两 T 件的轴线存在偏差		尺寸测量，目视检测	夹持长度过短，伸出长度过长，夹持松动，轴向力过大	提高夹持长度，降低伸出长度，提高夹紧力，降低轴向力	在旋转摩擦焊接薄壁管时该问题很关键
局部上覆	一端或两端工件在侧向上的偏差		目视检测，宏观检验	焊接参数，工件几何尺寸，伸出长度过长，轴向偏差，工件焊前准备工作，有角	改变	在旋转摩擦焊接薄壁管和大差异异种材料时该问题很关键
工件变形	不理想的形状改变	示例：  弯曲 平直	尺寸测量，目视检查	工件支撑不足，轴向力过大，伸出长度过长，工装磨损	调整夹具，增加刚性固定	在焊接薄壁工件时发生该情况

表 H.1 旋转摩擦焊接头特征（续）

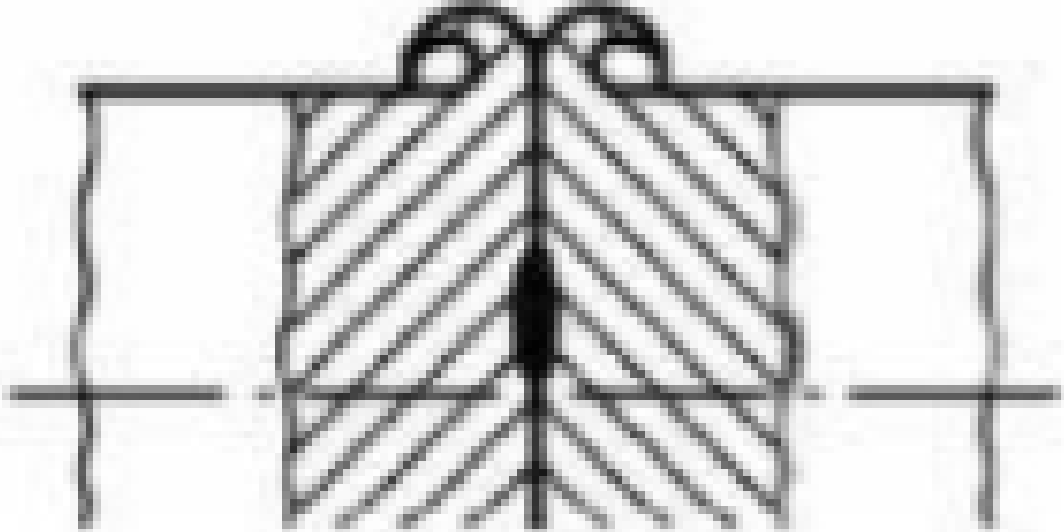
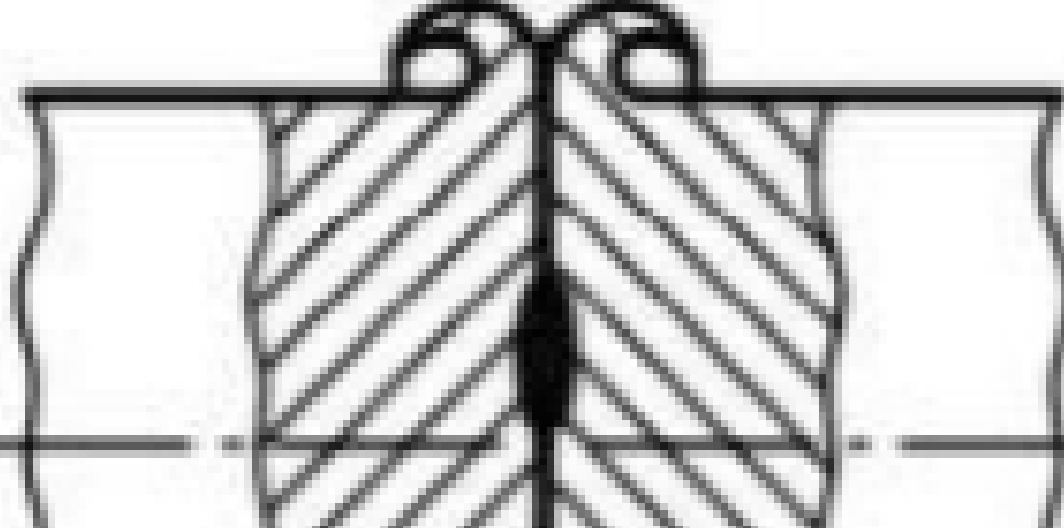
名称	说明	简图	常用检测方法	缺欠成因	解决方法	备注
2 不良接头						
界面缺欠	局部未焊合		宏观/微观检验，断口检查，无损检测	夹具、焊接参数、工件焊前准备、存在中心钻孔、杂质	调整焊接参数，充分进行工件焊前准备	
咬边	工件直径边缘外的咬边		目视检测，磁粉检测，渗透检测，超声检测	焊接参数、工件准备、工件夹持直线度	调整焊接参数，充分进行工件焊前准备工作	能量输入过低，变形量(焊接时间)过短
夹杂	焊接界面存在非金属夹杂物		宏观或微观检验，断口检查	焊前准备，焊接参数，铸件表皮、锈皮、油污等造成的待焊面污染，中心孔脏污，工件金属中夹杂物过多	清理待焊表面，如需要则钻一个中心孔，使用杂质少的母材	
裂纹	焊接界面周边的局部裂纹		渗透检测，磁粉检测，宏观/微观检验	硬化，热输入不当导致的内部应力	焊前/焊后热处理，调整焊接参数，更换母材	焊接高碳钢或高速钢等临界冷却度率低的材料时易于出现，热处理前去除飞边
	焊接界面内部的局部裂纹		切片观察，超声检测	硬化，热输入不当，焊接时间过短	焊前/焊后热处理，调整焊接参数，更换母材，增加轴向力，端部加工斜角	
	在边缘或在热影响区处存在的裂纹		切片观察，目视检测，涡流检测，超声检测，渗透检测，磁粉检测	硬化，热输入不正确，碳化物，MnS夹杂物		
	向飞边的尖锐过渡的裂纹		宏观或微观金相，目视检测 涡流检测，磁粉检测，渗透检测	顶锻压力过高，伸出长度过短	适当降低顶锻压力，调整焊接参数，提高旋转速度	

表 H.1 旋转摩擦焊接头特征（续）

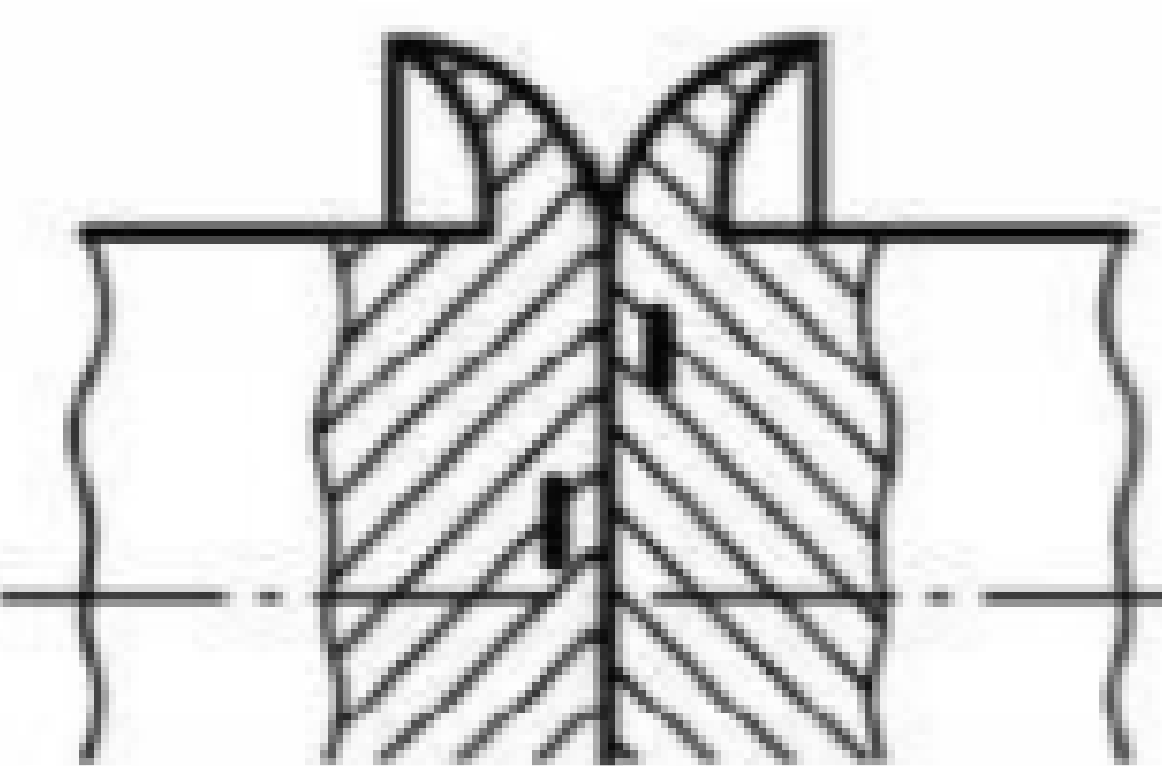
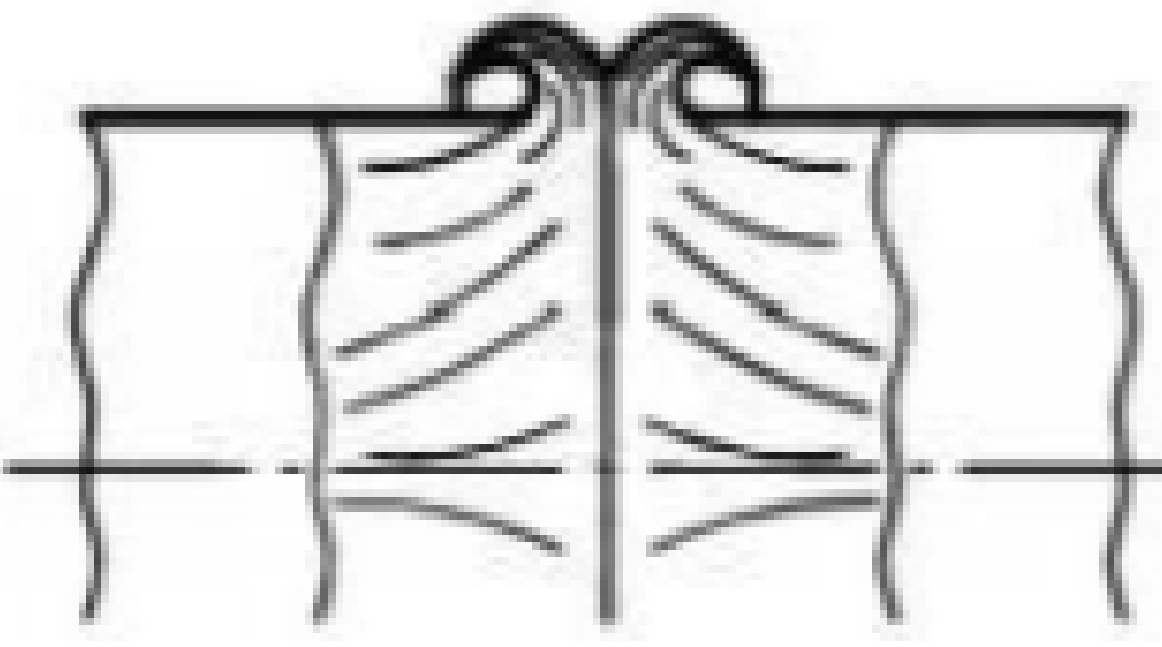
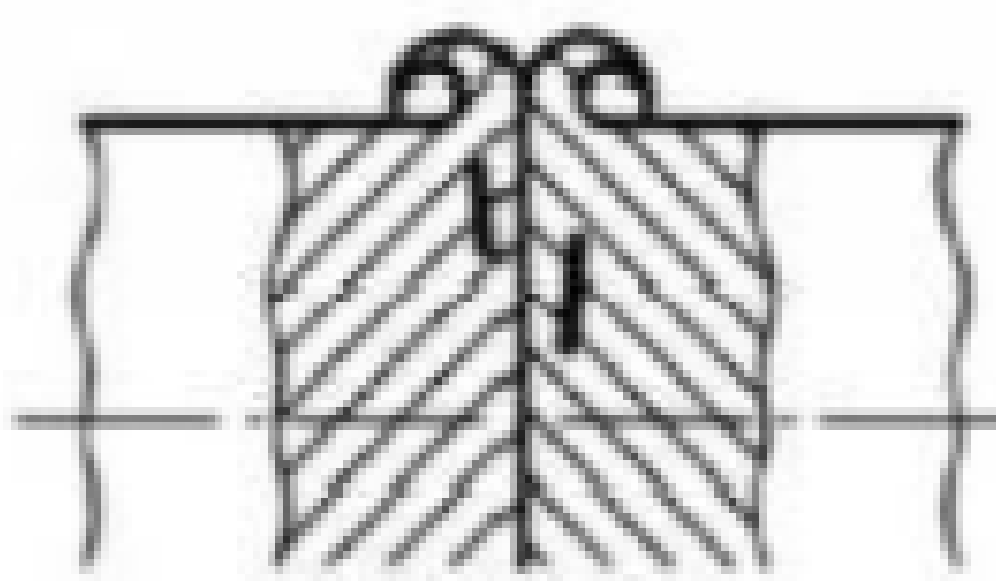
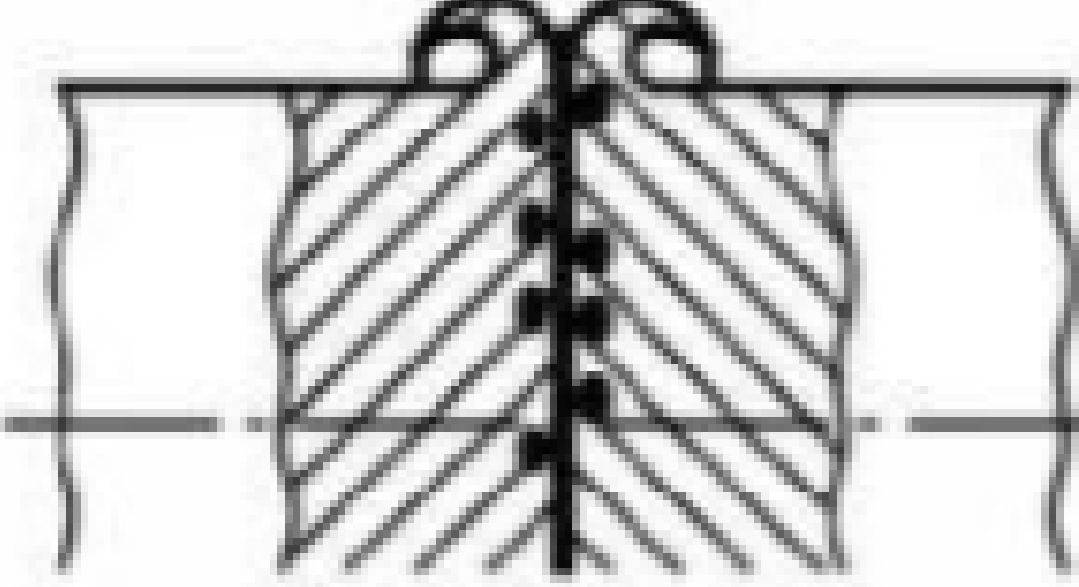
名称	说明	简图	常用检测方法	缺欠成因	解决方法	备注
裂纹	热影响区与焊缝之间出现的氢致裂纹		无损检测	一端或两端工件的氢元素含量，例如： 铸件+电镀金属	采用降低氢含量的热处理方法	可在焊后1000 h后发生
3 显微组织特征						
最大硬度和最小硬度	硬度和/或一致性度量与母材不同		硬度值分布测定	焊接参数，材料，材料准备	调整参数，热处理	
晶粒严重扭曲	由于旋转摩擦焊作用导致晶粒结构扭曲		金相实验	焊接参数选用不正确	使用无分离带的材料，调整参数，提高转速，降低轴向力	有可能是接头处延展性低引起，如存在非金属夹杂物则该问题尤其严重
金属间化合物	元素扩散		宏观或微观金相	焊接参数选择，尤其是异种金属焊接参数的选择	改变焊接材料和/或参数，例如降低焊接时间	如存在，则焊接接头脆化严重
焊接区存在碳化物氮化物，氧化物夹杂	焊后出现在焊接界面		宏观或微观金相，一定程度的超声检测		提高材料均匀性，改变焊接参数，例如缩短焊接时间	

表 H.1 旋转摩擦焊接头特征（续）

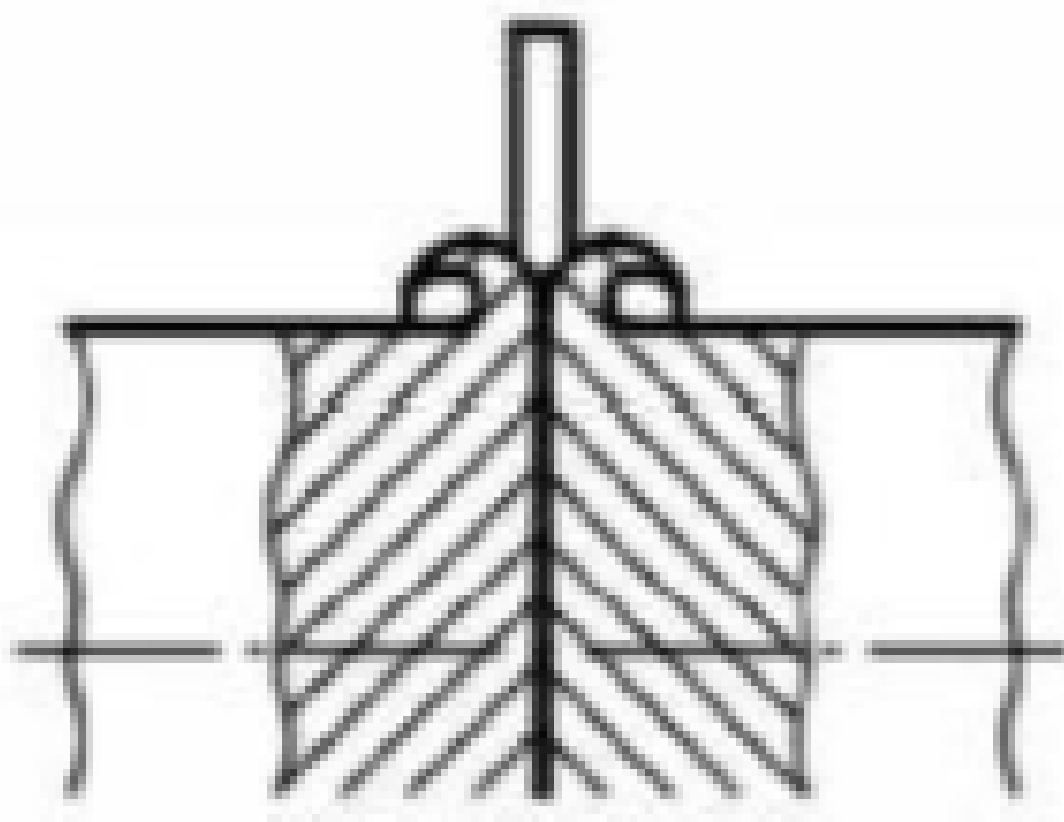
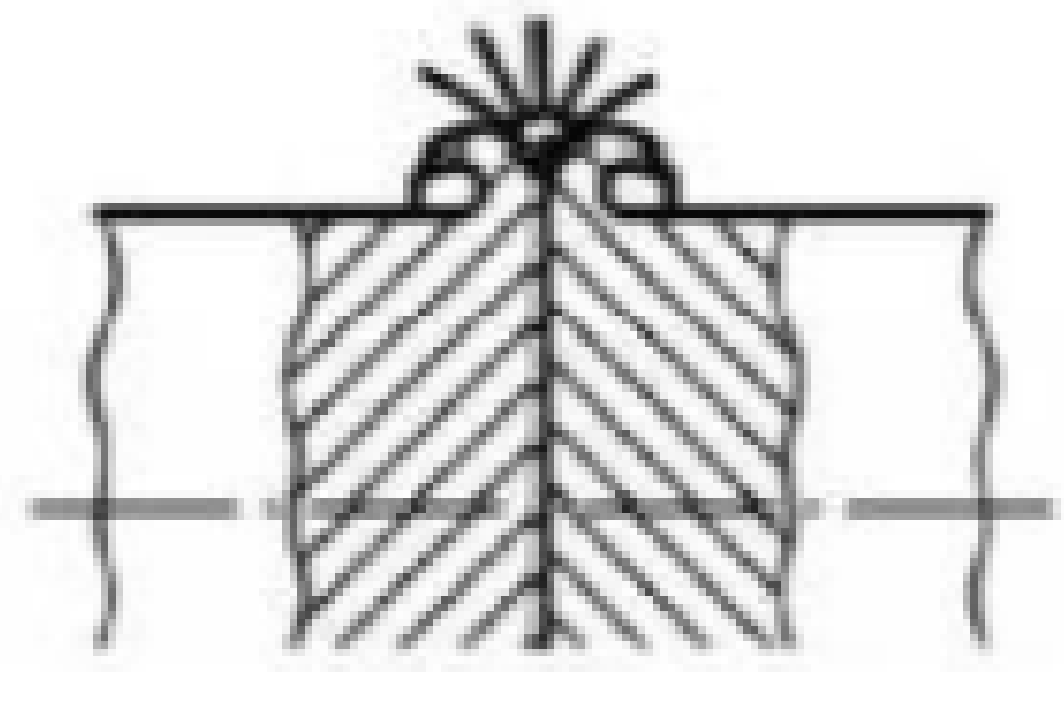
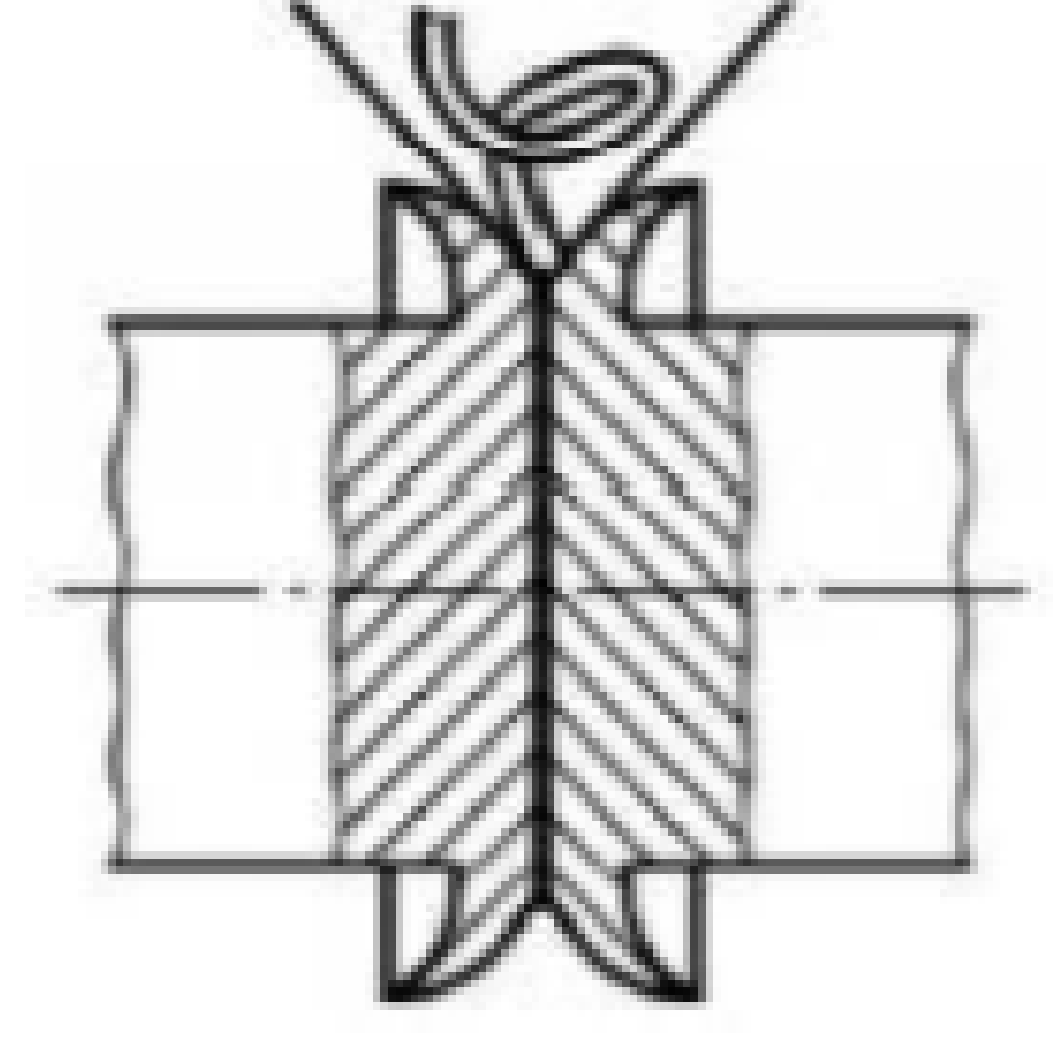
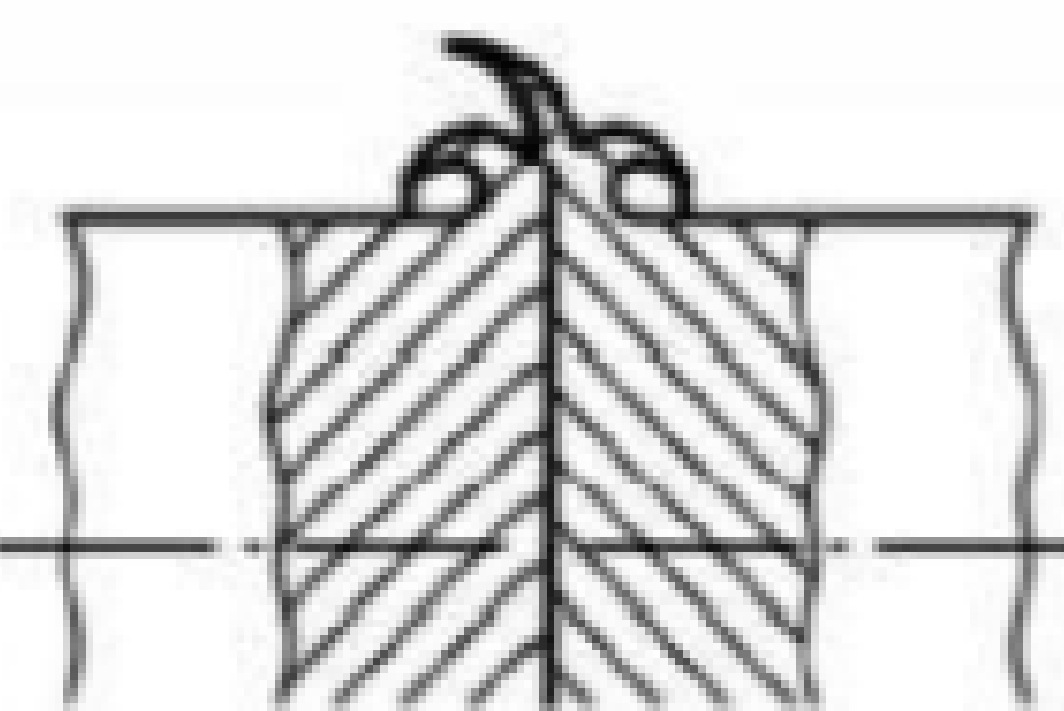
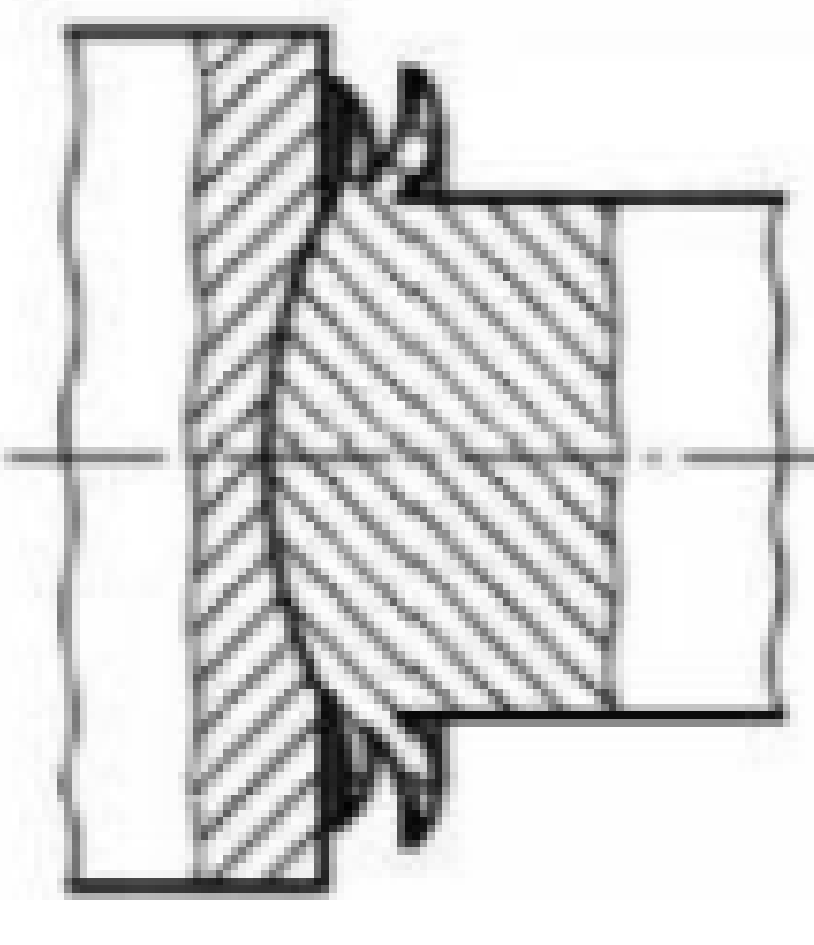
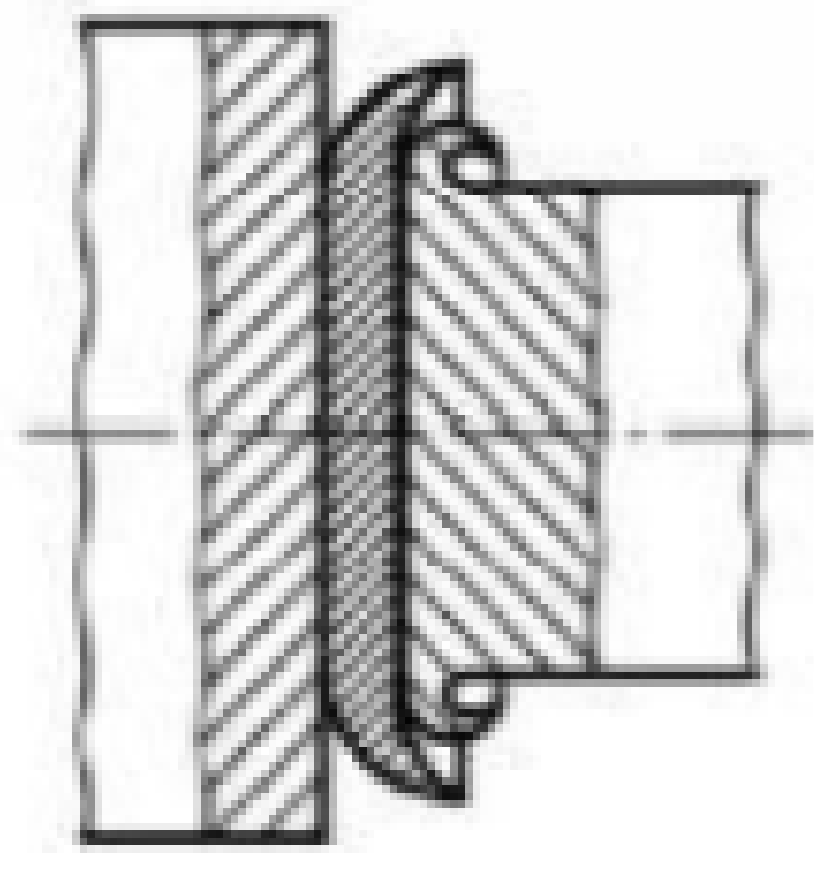
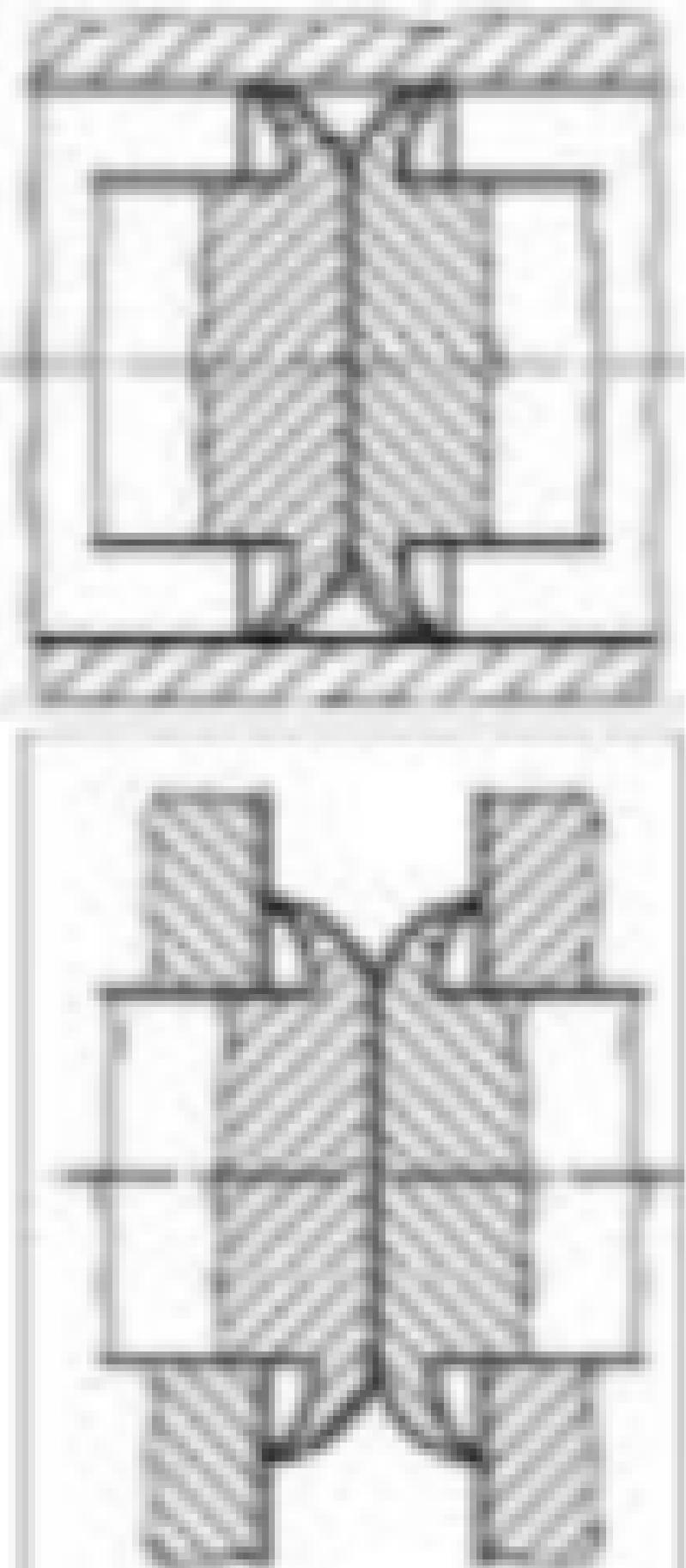
名称	说明	简图	常用检测方法	缺欠成因	解决方法	备注
4 飞边偏差						
毛刺	在飞边上垂直		目视检测，磁粉检测，渗透检测	顶锻压力过高，热输入不足，母材中存在垂直裂纹	调整焊接参数，提高转速	例如在焊接高速钢，含W元素的工具钢时出现该缺欠，缺欠如未穿入工件内部则无问题
	从周围金属挤出		目视检测	尚不明确	尚不明确	影响结果尚不明确
	材料以不规则的间隔呈螺旋状突出		目视检测	热输入不足	增加转速来提高能量输入	
	规则间隔		目视检测	尚不明确	尚不明确	
双飞边I	焊接飞边不对称		目视检测	材料或工件差异很大	调整焊接参数	对于钢制螺柱型焊缝和截面存在差别的工件；在平板上或较大截面上产生飞边是有利的
双飞边II	焊接表面移位		目视检测	焊接参数	改变焊接参数，增加摩擦力	如果二次飞边位于平板一侧(大截面部分)并且是由螺柱一侧生成(小截面部分)认为是不利的

表 H.1 旋转摩擦焊接头特征（续）

名称	说明	简图	常用检测方法	缺欠成因	解决方法	备注
飞边 变形 受限	材料 变形 与工 装相 碰		目视检测	伸出长度不足而且 工装设计不合理	增加伸出长度，同时 改进工装	降低焊接压力以提高冷却速率可以改善该情况

附录 I
(资料性)
焊接工艺评定报告(WPQR)

焊接工艺评定报告(推荐格式)

公司:

检验员或检验机构:

编号:

工件:

旋转摩擦焊机设备编号:

工作号:

工装:

图号:

支撑垫铁:

焊接工艺评定报告编号:

去除飞边: ☐是 ☐否

焊接责任人员:

去飞边方式:

客户:

去飞边参数:

客户合同号:

简图

母材

材料	旋转工件	非旋转工件
材料种类		
材料状态		
待焊面状态		
焊接面积(mm ²)		

焊后精度要求

接头	长度容差(mm)	错配(mm)	角度偏差(°)

备注：

焊接责任人员：

检验员或检验机构：

姓名与日期

姓名与日期

附加数据

代码 “	名称	单位	值	备注
A	工件形式			
		mm		
		mm		
B	旋转摩擦焊机参数设置			
	旋转速度	min-		
	压力表设定值(接触压力)	MPa(bar)		
	压力表设定值(摩擦压力)	MPa(bar)		
	摩擦力	kN		
	压力表设定值(顶锻压力)	MPa(bar)		
	顶锻力	kN		
	接触时间	s		
	摩擦时间	s		
	变形量	mm		
	压力表设定值(刹车压力)	MPa(bar)		
	缩短速率	mm/s		
	刹车点/刹车延迟	s		
	顶锻点/顶锻延迟	s		
	顶锻时间	s		
C	焊后参数			
	总长度损失	mm		
	总焊接时间	s		
D	备注			
	热处理			
提供的额外数据(如需要)。				

试样编号	弯曲角度(°)	断裂位置	备注	评估

补充说明:

参 考 文 献

1	GB/T	5185	焊火接及相关工艺方法代号	
2	GB/T	11345	焊缝无损检测	超声检测 技术、检测等级和评定
[3	GB/T	26951	焊缝无损检测	磁粉检测
[47	GB/T	26953	焊缝无损检测	渗透检测 验收等级
5	GB/T	26954	焊缝无损检测	基于复平面分析的焊缝涡流检测
67	GB/T	32259	焊缝无损检测	熔焊接头目视检测
[77	GB/T	41115	焊缝无损检测	超声检测 衍射时差技术(TOFD) 的应用
8	GB/T	40733	焊缝无损检测	超声检测 自动相控阵超声技术的应用
