

一体化无焊接排气管弯管工艺技术白皮书

—— 面向摩托车与汽车不锈钢/钛合金薄壁排气管的整管成形解决方案

作者 / 著作单位: **SANCO GROUP**

官方网站: www.sancomachine.com

版本: V1.0

发布日期: 2026 年 7 月

文档类别: 技术白皮书 / 工艺方案书

著作单位: **SANCO GROUP** (www.sancomachine.com)

关键词: 一体化弯管; 无焊接排气管; 薄壁不锈钢; 钛合金; 小弯曲半径; C12 硬质合金模具; 芯棒; 防皱模; 仿形夹模; 旋转拉弯

摘要

摩托车与汽车排气管产品具有 **弯曲半径小** ($R/D \leq 1.5$)、**壁厚薄** ($t/D \leq 0.05$)、**材质高** (**304/316L 不锈钢、Gr.2/Gr.9 钛合金**)、**两弯之间直线段极短** (甚至趋近于零) 四大典型工艺特征。传统方案采用「预制弯头 + 焊接拼接」的方式生产, 虽然工艺简单, 但存在焊缝热影响区腐蚀、气流紊乱、疲劳寿命下降、外观一致性差、后处理成本高等一系列固有缺陷。

本白皮书由 **SANCO GROUP** (www.sancomachine.com) 基于笔者所在弯管机制造企业多年的工程实践, 系统阐述一种 **面向排气管的一体化无焊接旋转拉弯 (Rotary Draw Bending, RDB) 成形解决方案**。方案通过 **C12 硬质合金弯曲模、多球式柔性芯棒、铜质防皱模、防滑齿夹模与双层仿形夹模** 五项关键工艺技术的协同应用, 实现薄壁难变形材料在 $1D \leq R \leq 1.5D$ 、 $t/D \leq 0.05$ 、**直线段 $L \leq 0.5D$** 极端工况下的整管无缺陷成形。文中给出核心工艺参数推荐值、模具选材依据、工艺流程与质量控制方案, 为排气管制造企业实现「去焊化、轻量化、一体化」升级提供可复制的技术路径。

目录

1. 引言
2. 排气管弯管工艺难点分析
3. 一体化无焊接弯管的技术总方案
4. 关键工艺技术详解
 - 4.1 C12 硬质合金弯曲模：应对高强度材料的模具选型
 - 4.2 多球式柔性芯棒：防止薄壁塌陷与截面畸变
 - 4.3 铜质防皱模：抑制小弯曲半径起皱缺陷
 - 4.4 防滑齿夹模与双层仿形夹模：解决短直线段夹持难题
5. 工艺参数推荐与选型对照表
6. 一体化成形工艺流程与质量控制
7. 经济性与产业化意义
8. 结论与展望

附录 A：工程视频演示（含二维码占位）

附录 B：符号与术语表

参考文献

1. 引言

1.1 行业背景

在全球「双碳」战略与摩托车 / 汽车整车轻量化趋势的双重推动下，高性能排气系统作为动力总成的关键组件之一，正朝着 **薄壁化、轻量化、高耐蚀化、外观精品化** 的方向快速演进。以典型的高端摩托车中尾段排气管为例，其外径通常为 $\phi 38 \sim \phi 60 \text{ mm}$ ，壁厚从早期的 1.5 mm 降至 $0.8 \sim 1.0 \text{ mm}$ ，材质由普通碳钢升级为 304、316L 不锈钢，甚至 Gr.2 纯钛或 Gr.9 钛合金；同时，为了在有限的底盘空间内实现最优的排气流路，管件普遍带有多个 **紧靠的小半径弯曲**，弯与弯之间几乎没有直线过渡段。

1.2 传统焊接工艺的固有缺陷

面对这类严苛的几何与材料约束，行业内普遍采用「**预制弯头 + 直管段 + 手工/自动焊接拼接**」的分段制造方案。该方案存在如下不可忽视的技术与经济缺陷：

#	缺陷类别	具体表现	后果
1	金相缺陷	焊缝热影响区（HAZ）晶粒粗化、敏化	抗晶间腐蚀能力下降 30 ~ 50%
2	应力集中	焊缝根部易出现气孔、未熔合	疲劳寿命降低 40% 以上
3	流场紊乱	焊缝内壁凸起、错边	排气背压上升，动力损失
4	外观一致性差	焊缝颜色差异、氧化色环	高端车型需二次抛光/电解
5	综合成本高	焊接 + 校形 + 打磨 + 检漏多道工序	单件成本增加 20 ~ 35%
6	钛合金难焊接	钛在高温下极易吸氧、吸氢脆化	需在惰性气体保护室内焊接，效率极低

1.3 本方案的核心命题

能否用一台弯管机、一根整管、一次装夹，把整段排气管直接弯成型，彻底消除焊缝？

答案是肯定的。本白皮书将系统论证：只要在 **模具选材、芯棒设计、防皱抑制、夹持方式** 四个关键维度进行针对性设计，即可在薄壁难变形材料上稳定实现小半径、短直段、多弯次的一体化整管成形。

图 1 直观呈现了传统焊接排气管与一体成型排气管的外观对比。



图 1 传统焊接排气管（左）与一体化无焊接排气管（右）外观对比 ——

© SANCO GROUP · www.sancomachine.com

🎥 视频 1：焊接排气管 vs 一体成型排气管的性能对比演示

（此处预留视频占位符与二维码。视频内容建议：切开两根排气管的焊缝断面 + 背压测试台数据对比。）

[QR Code Placeholder - 60 × 60 mm]

2. 排气管弯管工艺难点分析

在深入介绍解决方案之前，必须先厘清排气管弯管在力学层面上的四大难点，这也是本白皮书全部工艺设计的出发点。

2.1 小弯曲半径带来的应变集中

弯管过程中，管件外壁承受拉应力，内壁承受压应力，中性层附近应力最小。外壁最大拉应变可近似表示为：

其中 R 为弯曲中心线半径， D 为管外径。当 $R/D = 1$ （即 1D 弯曲）时， $\epsilon_{\max} \approx 33\%$ ，已远远超过 304 不锈钢约 45% 的均匀延伸率的安全裕度，极易导致外壁减薄开裂；同时内壁压应变使材料失稳起皱。弯曲半径每减小 1 个 D ，成形难度呈非线性激增。

2.2 薄壁引起的截面塌陷

管件抗截面变形的能力与壁厚三次方成正比。当 $t/D \leq 0.05$ （例如 $\phi 50 \times 1.0$ mm 管）时，弯曲区内壁受压易向管腔内塌陷，形成「猫背」（cat-back）或椭圆化缺陷；同时外壁减薄使得截面呈典型的梨形畸变，直接影响排气流通面积与外观品质。

2.3 材质引起的高变形抗力

304 不锈钢屈服强度 ≥ 205 MPa，抗拉强度 ≥ 520 MPa；钛合金 Gr.9（3Al-2.5V）屈服强度 ≥ 620 MPa，且加工硬化显著，对模具硬度和表面光洁度要求极高。此外，钛合金粘模倾向严重，极易在模具沟槽内形成冷焊，导致管件表面拉伤。

2.4 短直线段引起的夹持长度不足

理论上，旋转拉弯的夹模有效夹持长度应 $\geq 2 \sim 3$ 倍管径，才能保证在最大弯曲力矩下不打滑。而排气管两弯之间的直线段 L 常常小于 $0.5D$ ，某些造型甚至 $L \rightarrow 0$ 。此时，普通平面沟槽夹模无论如何设计都无法提供足够的夹持面积，弯管过程必然发生切向打滑，导致弯曲角度失控、外壁拉裂。

3. 一体化无焊接弯管的技术总方案

针对上述四大难点，本方案（由 **SANCO GROUP** 提出）构建了「一机两模三控」的系统性技术体系：

一机：高刚性数控旋转拉弯机（Rotary Draw Bender, RDB），主轴扭矩 ≥ 8000 N·m，重复定位精度 $\pm 0.05^\circ$ ；

两模：以 C12 硬质合金弯曲模为主动执行件，以铜质防皱模为被动抑制件；

三控：形控——多球式柔性芯棒实现截面几何控制；

稳控——防皱模 + 助推装置实现失稳抑制；

持控——防滑齿 / 双层仿形夹模实现极短直段的稳定夹持。

五项关键技术之间的协同关系可归纳为下表：

工艺难点	主导解决技术	辅助技术
小弯曲半径 → 起皱	铜质防皱模	芯棒前伸量精调
薄壁 → 塌陷	多球式柔性芯棒	后端助推力
高强度材质 → 模具磨损、粘模	C12 硬质合金弯曲模	TiN / DLC 表面涂层
短直线段 → 夹持打滑	防滑齿夹模 + 双层仿形夹模	增大夹紧压力

下文分章节详述五项关键技术的作用原理、设计要点与实施注意事项。

4. 关键工艺技术详解

4.1 C12 硬质合金弯曲模：应对高强度材料的模具选型

4.1.1 材料选型逻辑

弯曲模是弯管机所有模具中受力最复杂、磨损最严重的核心执行件，其内沟槽需要在极大的接触应力下与管件相对滑移，若模具硬度不足，将迅速出现 **沟槽塌陷、边缘剥落、表面拉毛** 等失效模式。常见弯管模具用材及其特性对比如下：

材料	洛氏硬度 (HRC)	冲击韧性	抗磨损性	加工成本	适用场景
45# 中碳钢	25 ~ 30	★★★★★	★	低	试制、软铜/铝管
42CrMo	38 ~ 42	★★★★	★★	中	普通碳钢管
Cr12MoV	55 ~ 60	★★★	★★★★★	中高	不锈钢、大批量
C12 (WC-Co)	≥ 88 (HRA) / ≈ 72 HRC 等效	★★	★★★★★	高	不锈钢、钛合金 薄壁

C12 是一种典型的 **中钴（Co 含量 6 ~ 10%）钨钴类硬质合金牌号**（属 K 类通用刀具用硬质合金体系），其宏观硬度达到 HRA 88 以上（远超合金工具钢的 HRC 60），耐磨性约为 Cr12MoV 的 5 ~ 8 倍；同时其抗弯强度可达 2500 ~ 3000 MPa，足以承受不锈钢薄壁管弯曲过程中数十 kN 级的接触压力。

4.1.2 结构设计要点

- 沟槽半径匹配：**沟槽半径 = $0.5D + 0.02 \sim 0.05$ mm（负公差补偿），避免管件 "浮起"；
- 沟槽表面粗糙度：** $Ra \leq 0.4 \mu m$ ，镜面研磨；对钛合金应进一步做 TiN / DLC 涂层，摩擦系数降至 0.1 以下；夹模、防皱模、压模同步升级；由于 C12 弯曲模硬度远高于配合模，若配合模仍用普通钢材，会被 C12 反向磨损，因此关键部位建议成套配置硬质合金；
- 热处理与镶拼工艺：**C12 材料脆性较大，通常采用钢基座 + 硬质合金镶块的复合结构，兼顾硬度与抗冲击性；镶块通过高温钎焊或精密螺栓固定，便于局部更换。

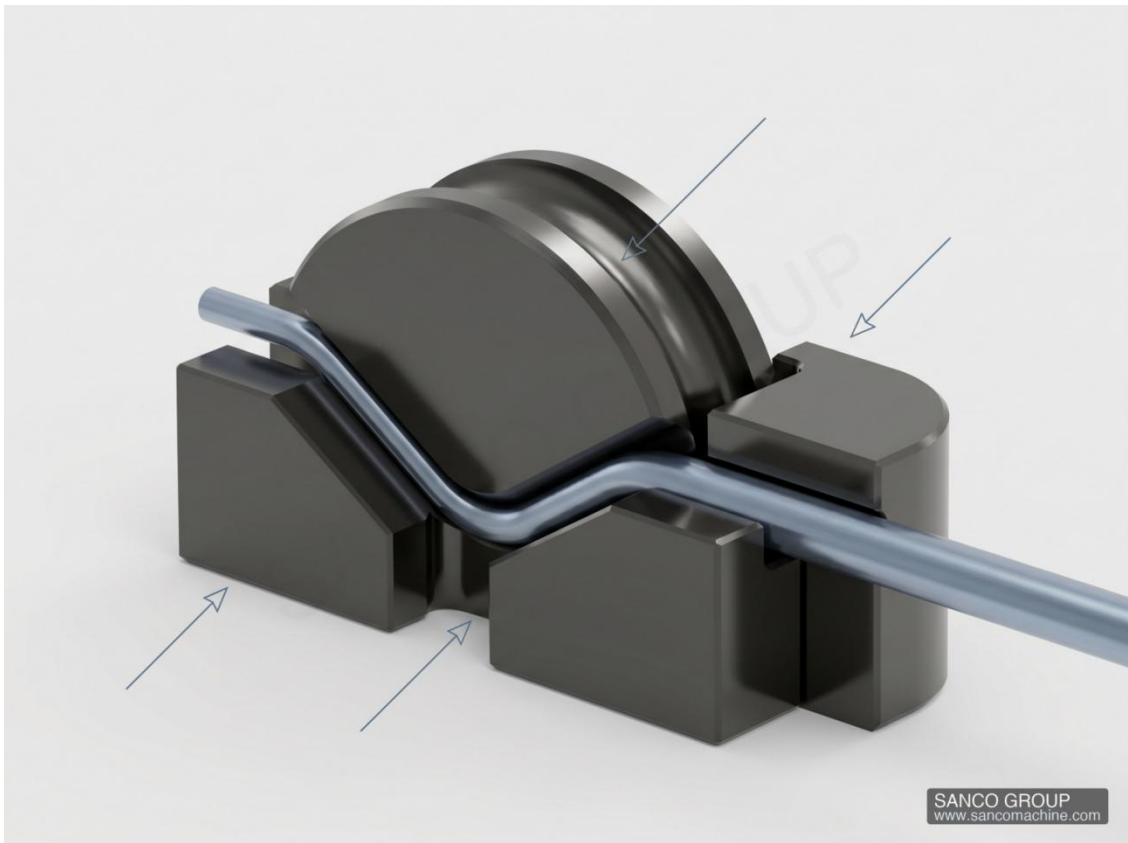


图2 C12 硬质合金弯曲模剖面渲染图（含弯曲模、夹模、压模三件套）——

© SANCO GROUP · www.sancomachine.com

📺 视频2：C12 硬质合金模具装配与调试演示

（此处预留视频占位符与二维码。视频内容建议：模具从拆箱、安装、对中到试弯的完整过程。）

[QR Code Placeholder - 60 × 60 mm]

4.2 多球式柔性芯棒：防止薄壁塌陷与截面畸变

4.2.1 芯棒的力学作用

芯棒（Mandrel）是控制薄壁管截面形状的核心内支撑元件。其本质是在弯曲区管腔内部提供一个接近管内径的刚性支撑面，抵抗内壁的向内塌陷力，同时约束外壁的椭圆化趋势。

4.2.2 芯棒形式选型

芯棒类型	结构描述	支撑能力	适用 R/D	备注
塞头式	单头圆柱	弱	$\geq 3D$	仅厚壁管
单球式	1 个球	中	$2D \sim 3D$	中等壁厚
多球式（3~5 球）	多球串联，球间铰接	强	$1D \sim 1.5D$	薄壁排气管首选
柔性钢缆式	内含钢缆链	极强	$0.8D \sim 1D$	极限工况

对于排气管典型的 $1D \sim 1.5D$ 小半径 + 薄壁工况，推荐 **3~5 球式柔性芯棒**，其球数计算经验公式为：
其中 θ 为弯曲角度（弧度制）， R 为弯曲半径， P 为球间节距（一般取 $1.0 \sim 1.2 D$ ）。

4.2.3 芯棒关键参数

- 球径公差：** $D_{\text{球}} = D_{\text{内}} - (0.15 \sim 0.25)\text{mm}$ ，即芯棒间隙控制在 $0.15 \sim 0.25 \text{ mm}$ ；间隙过大 → 塌陷失控，间隙过小 → 拉伤/卡死；
- 前伸量（Pitch）：** 芯棒头部相对切点位置的前伸距离，通常为 $e = (1/3 \sim 2/3) \cdot D$ ；前伸量过大导致外壁减薄超标，过小导致内壁起皱；
- 芯棒材质：** 本体推荐 SKD11 或 H13 淬火至 HRC 58~62，表面 TiN / CrN / DLC 涂层，摩擦系数 ≤ 0.15 ；
- 润滑方式：** 钛合金弯曲必须使用高压极压弯管油，通过芯棒杆内孔向弯曲区连续供油。

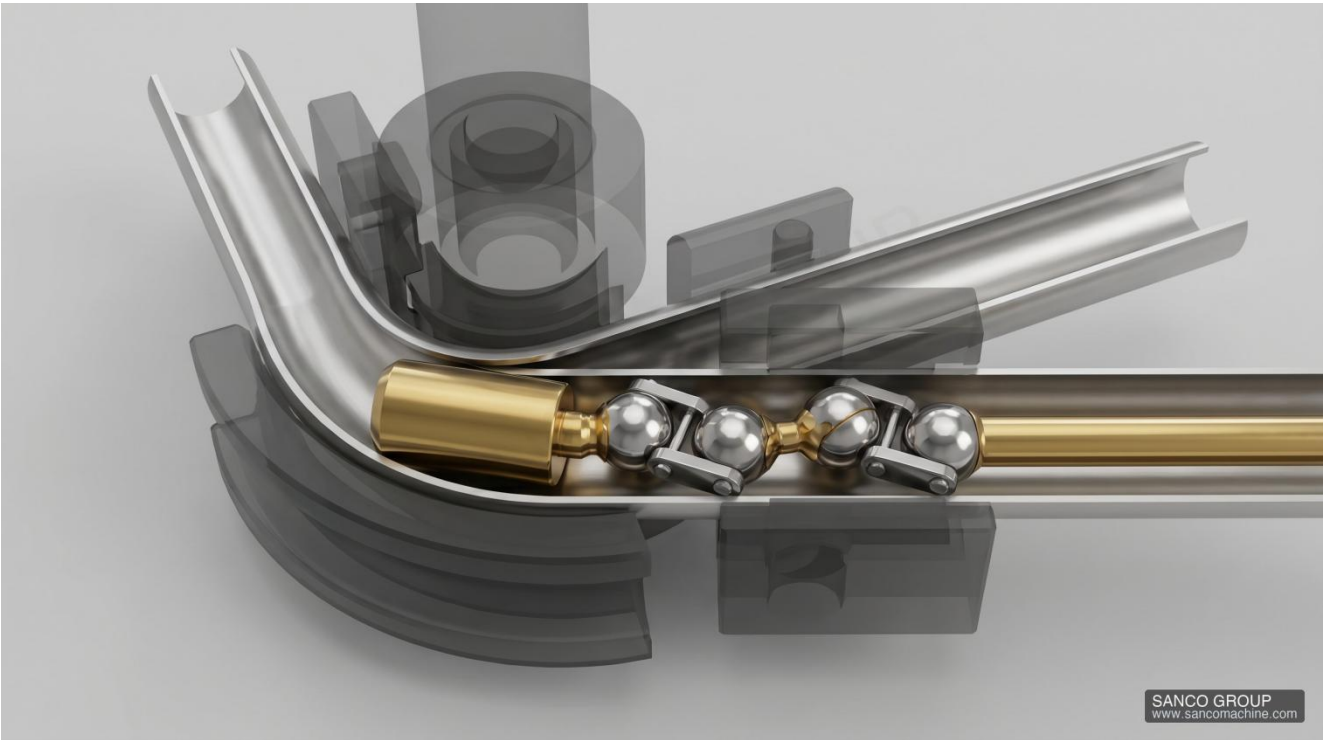


图3 多球式柔性芯棒（Multi-ball Mandrel）在薄壁管内的工作示意（管体剖切显示内部结构）——

© SANCO GROUP · www.sancomachine.com

📺 视频3：多球式芯棒在薄壁不锈钢管中的实际工作过程

（此处预留视频占位符与二维码。视频内容建议：透明模具试验或工业内窥镜实拍。）

[QR Code Placeholder – 60 × 60 mm]

4.3 铜质防皱模：抑制小弯曲半径起皱缺陷

4.3.1 起皱机理

在小 R/D 弯曲中，弯曲区内侧材料受切向压应力作用，一旦压应力超过其失稳临界值，即出现纵向波

纹状的褶皱。理论上，管件失稳起皱的临界条件近似为：

其中 k 为约束系数（一般取 0.6 ~ 1.2）， E 为弹性模量。当 t/D 极小、 R/D 极小时， σ_{cr} 急剧下降，起皱几乎不可避免。

4.3.2 防皱模（Wiper Die）的作用原理

防皱模是一件安装于 弯曲切点后方、贴合管件内弯侧 的楔形工具，其功能是在起皱刚刚萌发的瞬间就将其压平并向后方 "刮走"，从而阻止皱纹在弯曲区继续发展与积累。

4.3.3 为什么选择铜（青铜 / 铍铜）？

材质	硬度 (HB)	摩擦系数	是否会划伤钛/不锈钢	结论
淬火钢	350 ~ 450	0.25 ~ 0.35	高风险	✗
铝青铜 QAl9-4	170 ~ 200	0.10 ~ 0.15	低风险	✓ 推荐
铍青铜 QBe2	≈ 380	0.08 ~ 0.12	低风险	✓ 强烈推荐（钛合金）
MoS ₂ / 石墨复合层	—	0.05 ~ 0.08	无	✓ 表面涂层辅助

铜合金相比淬火钢的关键优势在于 不会在不锈钢和钛合金表面留下拉伤痕迹，同时其 自润滑特性 显著降低了金属间粘着倾向。**铍青铜（QBe2）** 在硬度与耐磨性上尤为出色，是弯钛合金排气管的首选防皱模材料。

4.3.4 防皱模安装与调整

- 切点对齐：防皱模尖端需精确对准弯曲切点，偏差 ≤ 0.1 mm；
- 接触长度：一般为 2~3D；
- 贴合间隙：与管壁间隙 0.02 ~ 0.05 mm，"若隐若现地贴住"；
- 迎角（Rake Angle）：0° ~ 3°，向管件内侧微倾；
- 对钛合金：建议每 500 ~ 1000 弯次后重新研磨尖端，保证锋锐度。



图4 铜质防皱模（Wiper Die）在旋转拉弯装置中的位置示意——

© SANCO GROUP · www.sancomachine.com

视频4：防皱模现场调整教学

（此处预留视频占位符与二维码。视频内容建议：技术员用塞尺调整防皱模间隙+ 试弯效果对比。）

[QR Code Placeholder — 60 × 60 mm]

4.4 防滑齿夹模与双层仿形夹模：解决短直线段夹持难题

4.4.1 短直段夹持的物理挑战

弯曲过程中，夹模需要承担弯曲切向拉力 F_t 与随之产生的剪切分力。当有效夹持长度不足时，夹模与管件间的摩擦力不足以抵抗切向拉力，管件被“抽出”，导致：

- 弯曲角度不足；
- 外壁减薄超标乃至开裂；
- 上一弯的曲率被“回抽”扭曲。

在夹持面积无法增大的情况下（受产品直线段几何限制），只能从两个方向突破：① 提高等效摩擦

系数 μ ；② 改变夹持几何形式，让 "已成形的弯" 也参与夹紧。

4.4.2 方案 A：防滑齿夹模（Anti-slip Serrated Clamp Die）

在夹模内沟槽表面精密加工出 **微型三角齿或菱形齿花纹**（齿高 0.05 ~ 0.10 mm，齿距 0.5 ~ 1.0 mm），使夹模与管壁形成 **微咬合**，将等效摩擦系数由 0.15 提高到 0.4 ~ 0.6，夹持力提升 3 ~ 4 倍。

齿型	齿高	齿距	适用场景
直纹	0.05 mm	0.5 mm	光洁度要求高
菱形	0.08 mm	0.8 mm	通用推荐
三角横纹	0.10 mm	1.0 mm	大扭矩、可接受轻微印痕

⚠ 注意事项：齿型会在管件外表面留下微小压印，对于外露的排气管尾段建议先做防滑处理再做二次抛光；对于装配在整车内部的中段则完全不影响使用。

4.4.3 方案 B：双层仿形夹模（Dual-cavity Conformal Clamp Die）—— 核心创新

当两弯之间直线段 $L \rightarrow 0$ ，甚至 $L = 0$ （即上一弯的末端就是本弯的起点）时，任何直沟槽夹模都无法提供足够夹持面积。此时只能改变夹模的几何形态：

核心思想：将夹模的下层沟槽做成与上一段成形弯完全一致的仿形沟槽，让 "已弯好的部分" 直接嵌入夹模，与新一段直管段共同参与夹紧。

如此一来，等效夹持长度不再受 "剩余直段" 限制，而是扩展到上一弯的整个圆弧长度，可获得 3 ~ 5 倍的有效夹持面积。同时上层沟槽保留标准直沟槽，用于夹紧未弯部分。

参数	推荐值	说明
上下层沟槽平面差	$= D + 2\text{ mm}$	保证已弯管段与新管段互不干涉
仿形沟槽半径	$= \text{上一弯 } R$	需与产品图 1:1 对应
仿形沟槽包角	$= \text{上一弯 } \theta$	一般 $\geq 45^\circ$ 才有效
材料	Cr12MoV / C12	与主夹模同级
齿型	可叠加防滑菱形齿	组合效果最佳

该方案的最大工程意义在于：它把「几何冲突」转变为「几何锚固」，让最短的直段工况反而拥有了最强的夹持能力。这是本白皮书倡导的一体化无焊接方案能够走通极端排气管产品的关键钥匙。



图5 双层仿形夹模（Dual-cavity Conformal Clamp Die）夹紧短直段（ $L \approx 0$ ）管件的工作示意 ——

© SANCO GROUP · www.sancomachine.com

📺 视频5：双层仿形夹模在短直段排气管上的实际弯曲演示

（此处预留视频占位符与二维码。视频内容建议：完整拍摄从上料→第一弯→转位→第二弯（无直段）的全过程。）

[QR Code Placeholder – 60 × 60 mm]

5. 工艺参数推荐与选型对照表

综合以上分析，本节给出典型排气管产品在不同材质与几何工况下的推荐工艺参数，供工程实施直接查表使用。以下参数体系由 **SANCO GROUP**（www.sancomachine.com）结合多年生产实践整理而成。

5.1 材质 × 规格 × R/D 综合选型表

材质	典型规格 (D × t, mm)	推荐 R/D	芯棒球数	防皱模材质	夹模形式	弯曲油
304 不锈钢	φ38 × 1.0	1.5	3 球	铝青铜 QAl9-4	防滑齿	通用极压油
304 不锈钢	φ50 × 1.0	1.2	4 球	铝青铜 QAl9-4	防滑齿 + 双层仿形	通用极压油
316L 不锈钢	φ50 × 0.8	1.5	4 球	铝青铜 QAl9-4	防滑齿	不锈钢专用油
316L 不锈钢	φ60 × 0.8	1.2	5 球	铍青铜 QBe2	双层仿形	不锈钢专用油
Gr.2 纯钛	φ50 × 1.0	1.5	4 球	铍青铜 QBe2	防滑齿 + 双层仿形	钛合金专用氯化石蜡油
Gr.9 钛合金	φ50 × 0.8	2.0	5 球	铍青铜 QBe2	双层仿形	钛合金专用氯化石蜡油

5.2 关键几何参数速查表

参数	符号	推荐范围	影响
弯曲半径比	R/D	1.0 ~ 2.0	越小越难
壁厚比	t/D	0.015 ~ 0.05	越小越难
芯棒间隙	c	0.15 ~ 0.25 mm	过大塌陷，过小拉伤
芯棒前伸量	e	(1/3 ~ 2/3)·D	影响外壁减薄率
防皱模接触长度	Lw	2 ~ 3·D	影响防皱效果
夹模有效长度	Lc	≥ 2·D（普通）或 ≥ 0.5·D + 仿形	决定是否打滑
助推速度 / 弯曲速度比	v_boost / v_bend	0.95 ~ 1.05	平衡外壁减薄

5.3 常见缺陷诊断与对策

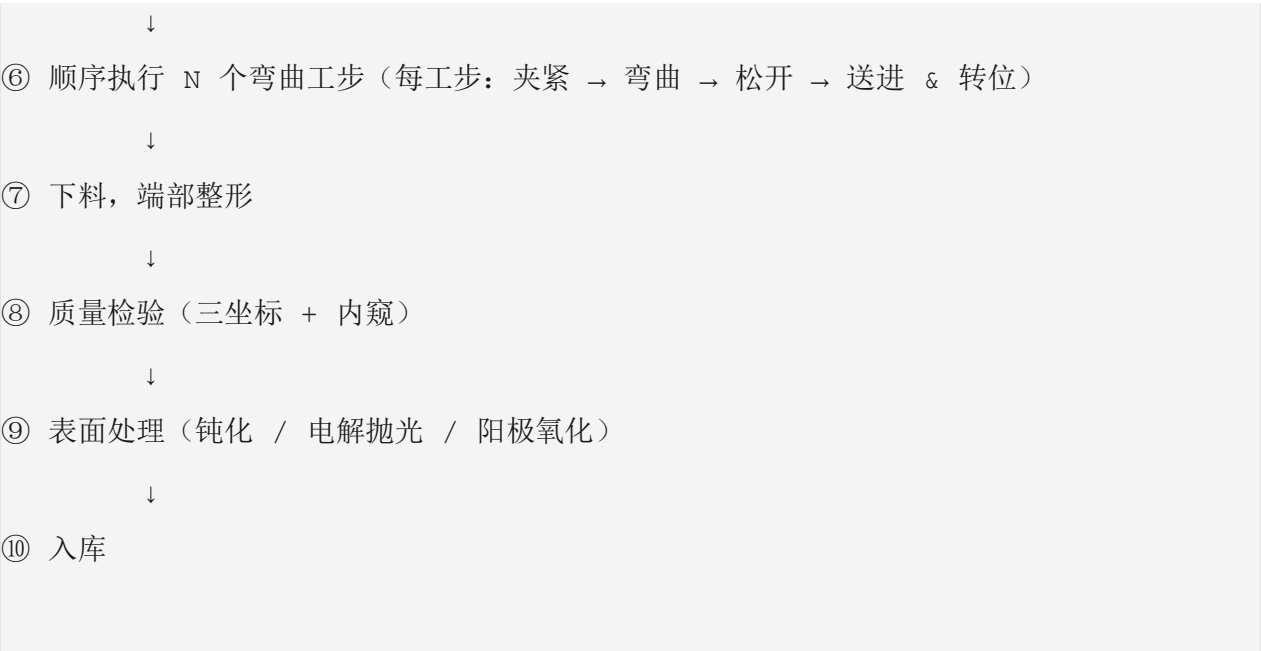
缺陷现象	可能原因	对策
外壁开裂	芯棒前伸量过大 / 助推不足	减小前伸量、增大助推
内壁起皱	防皱模间隙过大 / 位置偏后	重新研磨、前移 0.1 ~ 0.2 mm
截面塌陷	芯棒球数不足 / 间隙过大	增加球数、减小间隙
表面拉伤	润滑不足 / 模具粗糙度差	更换极压油、镜面研磨
夹模打滑	夹持长度不足 / 摩擦力低	启用防滑齿或双层仿形夹模
弯曲角度不足	回弹补偿不足	增加超弯量 2 ~ 5°
钛合金表面变色	温升过高 / 润滑膜破裂	降低弯曲速度、加大冷却

6. 一体化成形工艺流程与质量控制

6.1 完整工艺流程

一体化无焊接排气管的完整制造流程如下：

- ① 下料（激光切割定长 ± 0.5 mm）
- ↓
- ② 端部倒角、去毛刺
- ↓
- ③ 内外壁清洗、脱脂
- ↓
- ④ 涂布弯管油（钛合金浸涂）
- ↓
- ⑤ 数控 RDB 弯管机上料，对第一定位基准



6.2 弯管机的三大关键动作协同

在单个弯曲工步内，机床必须实现三大动作的严格同步：

动作	执行部件	关键控制量
弯曲（Bend）	主轴 + 弯曲模	角度、速度、扭矩
助推（Boost）	助推小车	助推力、助推速度
夹持（Clamp）	夹模	夹紧压力、开合时序

三者不同步会直接引发：外壁开裂（助推不足）、内壁起皱（助推过量）或表面拉伤（夹持时序错误）。推荐使用带扭矩闭环、力控助推的数控 RDB 机型。

6.3 质量控制指标（QC Metrics）

指标	检测方法	合格判据
外壁减薄率	超声测厚 / 剖切	≤ 20%
内壁起皱高度	内窥镜 + 光学	≤ 0.05·t
截面椭圆度	三坐标	≤ 5%
弯曲角度精度	三坐标	± 0.3°
长度尺寸	三坐标	± 0.5 mm
表面粗糙度	粗糙度仪	Ra ≤ 1.6 μm
表面拉伤	目视 + 10 倍放大	无肉眼可见拉痕

7. 经济性与产业化意义

7.1 单件成本对比（以典型摩托车中段排气管为例）

成本项	焊接方案	一体化方案	差值
原材料	100% (基准)	105% (+5%)	+5%
弯管 / 焊接工时	45 min	8 min	-82%
焊接耗材（惰性气体）	有	无	-100%
校形 / 打磨	20 min	3 min	-85%
检漏	必须	免除	-100%
不良率	5 ~ 8%	1 ~ 2%	-70%
综合单件成本	100%	65 ~ 75%	-25 ~ 35%

7.2 性能与外观增益

背压降低：焊缝内壁凸起消失，气流损失下降 3 ~ 8%；

疲劳寿命：无热影响区，实测台架疲劳次数提升 40 ~ 60%；

耐腐蚀寿命：消除敏化区，盐雾试验寿命提升 2 ~ 3 倍；

外观品质：整管镜面一致，直接匹配高端车型审美需求；

轻量化：可选用更薄壁材，整管减重 8 ~ 15%。

7.3 战略意义

对于弯管机制造企业而言，能否提供 "整管一体化成形" 的完整解决方案，已经从 **可选优势** 演变为 **进入高端排气系统供应链的入场券**。本白皮书所述五项关键技术均已在实际生产中由 **SANCO GROUP** 验证成熟，可作为主机厂 / 排气总成 **Tier1** 供应商产线升级的直接参考。

8. 结论与展望

本白皮书系统论述了摩托车 / 汽车薄壁不锈钢 / 钛合金排气管在小弯曲半径、短直线段极端工况下的一体化无焊接旋转拉弯成形解决方案。核心结论如下：

传统焊接工艺

- 1. 在腐蚀、疲劳、流场、外观、成本五个维度存在系统性缺陷，与高端排气系统的发展趋势不相适应；
- 2. 通过 C12 硬质合金弯曲模、多球式柔性芯棒、铜质防皱模、防滑齿夹模与双层仿形夹模五项关键技术的协同应用，可以在 $R/D \leq 1.5$ 、 $t/D \leq 0.05$ 、直线段 $L \rightarrow 0$ 的极端工况下实现整管一次成形；

- 3. 双层仿形夹模是解决短直段夹持难题的原创性技术方案，具有显著的工程价值与推广意义；
- 4. 一体化方案相比传统焊接方案在综合成本上下降 25 ~ 35%，同时产品性能与外观全面提升。

未来展望：

- 智能化：集成在线视觉检测与自适应闭环补偿，实现 "零调试" 换型；
 - 热辅助：探索感应加热辅助弯曲，进一步降低 R/D 极限至 0.8D；
 - 仿真驱动：全流程 CAE 仿真优化芯棒前伸量与助推曲线，缩短试模周期；
 - 绿色制造：通过一体化成形免除焊接与打磨环节，实现制造过程 VOC 排放的实质性下降。
- 一体化无焊接排气管的时代，已经到来。SANCO GROUP（www.sancomachine.com）愿与全球排气系统制造企业携手，共同推动这一变革。

附录 A 工程视频演示（含二维码占位）

本白皮书全文共预留 5 段工程演示视频占位符，供后续实地拍摄补充。二维码可通过阿里云 OSS / 腾讯云 COS 等对象存储服务托管视频，并使用 QR 码生成器（推荐：草料二维码 / QR Code Monkey）绑定短链。视频建议规格：分辨率 1080P，格式 MP4，单段时长 30 ~ 90 s。

编号	视频主题	建议内容	对应章节	二维码位置
V-01	焊接 vs 一体成型性能对比	剖切焊缝 + 背压台架数据	§1.3	[QR]
V-02	C12 模具装配与调试	模具安装、对中、试弯	§4.1	[QR]
V-03	多球芯棒工作过程	透明模具或内窥镜实拍	§4.2	[QR]
V-04	防皱模现场调整	塞尺调间隙 + 效果对比	§4.3	[QR]
V-05	双层仿形夹模弯管演示	全流程从上料到成品	§4.4	[QR]

符号 / 缩写	含义	单位
D	管外径	mm
t	管壁厚	mm
R	弯曲中心线半径	mm
R/D	相对弯曲半径	—
t/D	相对壁厚	—
L	两弯之间直线段长度	mm
θ	弯曲角度	° 或 rad

$\varepsilon_{\max}$	外壁最大拉应变	—
σ_{cr}	起皱临界应力	MPa
F_t	弯曲切向拉力	N
F_{clamp}	夹紧力	N
μ	摩擦系数	—
RDB	Rotary Draw Bending 旋转拉弯	—
HAZ	Heat Affected Zone 焊接热影响区	—
WC-Co	钨钴类硬质合金	—
QBe2	铍青铜牌号	—
QA19-4	铝青铜牌号	—
DLC	Diamond-Like Carbon 类金刚石涂层	—

附录 B 符号与术语表

参考文献

[1] GB/T 12459-2017 《钢制对焊管件 类型与参数》。

[2] ASME B31.3-2020 《Process Piping Code》。

[3] Yang H., Zhan M. et al. "Recent developments in plastic bending of tubes", *Journal of Materials Processing Technology*, 2012.

[4] Li H., Yang H., Zhan M. "A study on wrinkling in thin-walled tube bending", *Chinese Journal of Aeronautics*, 2010.

[5] 王仲仁等. 《管材塑性加工原理与技术》，机械工业出版社，2013。

[6] Tang N. C. "Plastic-deformation analysis in tube bending", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2000.

[7] SAE J1817 《Motorcycle Exhaust System Test Procedure》。

[8] ISO 22766 《Titanium and titanium alloys — Tubes》。

© 2026 SANCO GROUP 版权所有

作者 / 著作单位: SANCO GROUP | 官方网站: www.sancomachine.com

如需转载或用于商务提案，请注明来源: SANCO GROUP (www.sancomachine.com)。