

毛细铜/钛复合管材的游动芯头拉拔制备及组织性能

刘新华[✉],林一良,付华栋,刘雪峰,谢建新

北京科技大学新材料技术研究院,北京 100083

[✉]通信作者, E-mail: Liuxinhua18@163.com

摘要 在热旋制备界面结合质量优异的铜/钛双金属复合管坯的基础上,对复合管进行了游动芯头拉拔加工,重点研究了复合管材游动芯头拉拔加工成形能力以及拉拔加工对复合管材组织性能的影响。研究结果表明,游动芯头拉拔方式,特别是减壁拉拔,对铜/钛复合管材结合界面有较大的破坏作用,且难以实现多道次连续拉拔加工,单道次拉拔加工量不宜超过30%;575℃保温70 min的道次间退火虽然对界面元素扩散情况影响不大,但能缓解加工硬化和残余应力,使得铜/钛复合管材的平均剥离强度由变形态的7.8 N·mm⁻¹提高到退火态的17.1 N·mm⁻¹,大幅度提高铜/钛复合管材的后续拉拔加工性能。通过严格控制拉拔减壁量,合理制定了铜/钛复合管材的拉拔加工工艺,成功制备了结合性能优异的毛细规格铜/钛复合管材。

关键词 复合管材; 拉拔; 旋锻复合成形; 组织性能

分类号 TG31

Preparation of the capillary copper/titanium composite pipe by floating-plug drawing processing and its microstructure and properties

LIU Xin-hua[✉], LIN Yi-liang, FU Hua-dong, LIU Xue-feng, XIE Jian-xin

Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

[✉]Corresponding author, E-mail: Liuxinhua18@163.com

ABSTRACT A copper/titanium bimetallic composite pipe with high interfacial bonding quality was manufactured by the high-temperature rotary swaging forming, and then was processed by the floating-plug drawing process. The forming ability of drawing process and the effect of drawing process on the microstructure and properties of the product were mainly investigated. The results show that the floating plug drawing, especially the wall-reduction drawing, has a great destructive effect on the bonding interface of the pipe, which results in that it is difficult to carry out multi-pass continuous drawing, and single pass drawing volume should not reach over 30%. The annealing at 575℃ for 70 min has little effect on the diffusion of interfacial elements, but it can reduce the work hardening and residual stress. This process makes the pipe's average peel strength increase from 7.8 N·mm⁻¹ (worked state) to 17.1 N·mm⁻¹ (annealed state), which considerably improves the subsequent drawing performance of the pipe. A reasonable drawing forming process for the copper/titanium composite pipe was made based on the strict control of drawing wall-reduction, and a capillary size pipe with an excellent bonding property was successfully prepared.

KEY WORDS composite pipes; drawing; rotary swaging composite forming; microstructure and properties

铜/钛双金属复合管结合了铜良好的导热性能和钛优异的耐腐蚀性能,因此该材料有望广泛应用于海

军船舰、滨海电站、石油化工和火力发电等领域,成为各类海水管路和蒸汽管路系统的理想材料^[1-5]。特别

收稿日期: 2016-11-05

基金项目: 国家高技术发展计划资助项目(2013AA030706); 云南省科技合作资助项目(2015IB012)

是细小直径铜/钛复合管在舰船装备、家电产业和化学工业等领域需求量极大,市场应用前景广阔。然而,细小直径铜/钛复合管材通常需要首先制备管坯然后进行后续拉拔,加工过程中存在两种金属塑性流动差异大,界面变形不协调等问题。因此,要求所制备管坯界面结合性能优异,且对拉拔工艺也提出了更为苛刻的要求^[6-8]。

目前,铜/钛双金属管/板坯的制备主要方法有液压胀形法^[9]、拉拔法^[10]和爆炸焊接法^[11]等。液压胀形法和拉拔法制备的复合管材内外管为机械结合,结合强度低,不利于后续成形加工;爆炸焊接法主要用于制备铜/钛复合板,问题是制备的复合板钛层厚度不均匀,在后续成形加工过程中难以保证钛层的厚度要求,且难以制备双金属管坯。本文作者等前期开发了一种热旋锻复合技术,制备的Cu/Ti复合管界面为冶金结合,界面结合强度高,钛层厚度较均匀,为通过进一步拉拔成形加工制备钛/铜毛细管提供了良好的基础^[12]。

管材拉拔的基本方法有空拉、游动芯头拉拔和长芯杆拉拔等。由于管材游动芯头拉拔加工能够控制管材减径和减壁,相对于其他方法能制备内表面质量高的管材,且适用于长管和盘管生产,能实现大规模的工业生产,成为管材加工最主要的方法^[13-14]。为此,本文以前期热旋锻制备的界面结合性能优异的铜/钛双金属复合管坯为研究对象,重点研究复合管坯游动芯头拉拔加工成形能力以及拉拔加工对复合管材组织性能的影响,解决双金属复合管材拉拔过程存在的变形不

协调、界面破坏以及成形性能差的问题,进而为细小直径铜/钛复合管材的高效制备技术提供参考。

1 实验材料与方法

铜/钛复合管的铜层主要是满足复合管优良的散热性能要求,而钛层主要是满足复合管的耐腐蚀性能要求,但钛的导热性能较低,并且价格比铜高得多,因此钛/铜复合管在设计时一般铜层厚度较大,而钛层在满足耐腐蚀性能和一定力学性能的条件下厚度尽可能较小。参考相关文献^[15-16]报道的现有实际应用的铜/钛复合管的铜层和钛层的厚度值,同时考虑后续拉拔加工的需要,本研究中铜/钛双金属管坯的制备原料选用尺寸规格为φ17 mm×2 mm的T2纯铜管和φ12.7 mm×0.55 mm的TA2纯钛管,先将钢管和钛管进行表面处理(碱洗除油、酸洗除氧化膜和钢刷打磨),然后将处理好的钛管套入钢管中,在芯棒(φ11.4 mm的硬质合金)表面均匀涂抹上石墨乳后插入钛管中,将组装好的管坯在850℃电阻炉中保温5 min后,迅速在C7117A/ZF型旋锻机上进行一道次热旋复合成形,加工率为54.6%。

拉拔实验采用游动芯头拉拔方式进行,游动芯头拉拔管材时,芯头不固定,依靠其自身的形状和芯头与管坯接触面之间作用力的平衡,使之处于变形区中,从而实现对管坯的减径减壁。图1所示为铜/钛复合管材游动芯头拉拔示意图及拉拔模具实物图。实验过程中拉拔配套模具外表内使用外膜油,内表面使用KN170耐磨油分别进行润滑。

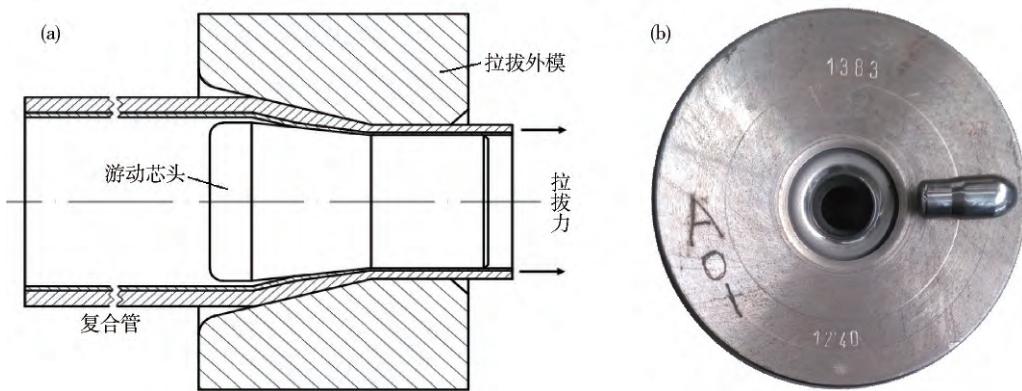


图1 复合管材游动芯头拉拔成形技术。(a) 工艺原理示意图;(b) 游动芯头拉拔模具

Fig.1 Floating-plug drawing process for the composite pipe: (a) schematic of the process principle; (b) die and plug used in floating-plug drawing

用HxD-1000T型显微硬度计测试复合管材的硬度,获得了不同状态铜/钛复合管铜层和钛层的硬度变化。按照我国航空工业标准《金属管材室温拉伸试验方法》(HB 5145—96),在万能试验机上对铜/钛复合管材进行整管拉伸实验,测试其力学性能。

按照美国标准ASTM D903—98,对拉拔后铜/钛复合管材进行了剥离实验测试界面结合强度,剥离试样

(取样示意图见图2)为长100 mm宽2 mm的管壁,在钛侧用夹钳撕开一个缺口,与支撑板一起用夹具夹紧,在电子万能试验机上进行剥离拉伸,如图3所示,记录剥离拉伸过程中的拉力值,然后由下式计算复合管的结合强度。

$$P_s = \frac{F}{2R \arcsin(b/2R)}. \quad (1)$$

式中 P_s 为剥离强度, F 为平均拉力, R 为复合管界面处半径, b 为试样宽度。

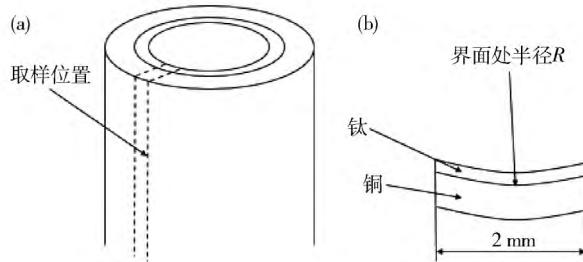


图 2 剥离实验制样示意图。(a) 取样位置; (b) 试样横截面

Fig. 2 Schematic of sampling method for peeling test: (a) sampling location; (b) cross section structure of the composite pipe sample

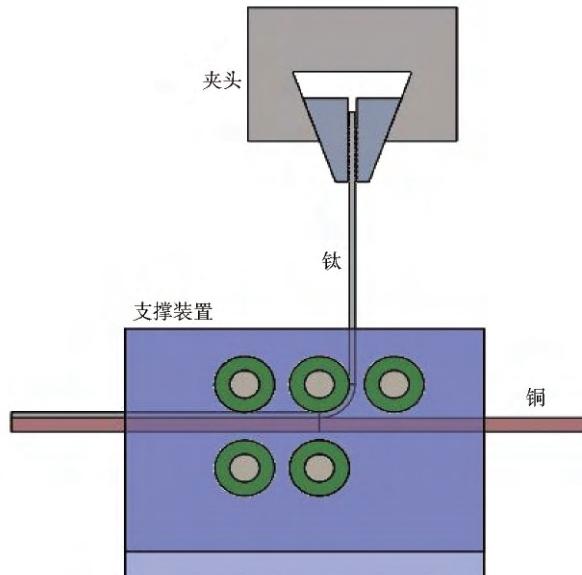


图 3 剥离实验示意图

Fig. 3 Schematic of peeling test for the Cu/Ti composite pipe sample

2 实验结果与分析

2.1 铜/钛复合管材游动芯头拉拔单道次变形

图 4 为采用热旋复合成形制备的铜/钛复合管坯, 从图中可以看出, 复合管坯外表面并不十分平整, 而是有较为规则的山脊状螺纹, 这是旋锻机锻锤敲打后所

留下的痕迹; 但从整体来看, 复合管较为平直, 尺寸波动较小。测量复合管坯的平均直径为 14.1 mm, 壁厚为 1.3 mm。图 5 所示为复合管坯的铜层和钛层纵截面金相组织, 从图中可以看出, 铜层为细小的等轴晶组织, 说明热旋复合过程中铜层发生完全再结晶; 钛层组织具有明显的变形带和细小晶粒, 说明热旋复合过程中钛层只发生部分再结晶。通过 HXD-1000T 型显微硬度计测得, 铜层和钛层硬度值分别为 HV 48 和 HV 157。对复合管坯铜钛界面两侧 Cu 和 Ti 的成分分布情况进行能谱线扫描分析, 结果如图 6 所示。从图中可以看出, 铜/钛复合管坯结合界面有元素扩散, 扩散层厚度较小, 约为 1.3 μm, 界面处的元素分布曲线无明显台阶, 表明管坯界面处无金属间化合物生成。采用剥离强度评价管坯的界面结合强度, 得到的管坯剥离力曲线及剥离实验后的铜侧和钛侧剥离面扫描电镜形貌如图 7 所示。根据剥离力, 采用(1)式可计算得到管坯的平均剥离强度约为 24 N·mm⁻¹, 最大剥离强度约为 37 N·mm⁻¹。这表明采用热旋复合成形制备的铜/钛复合管坯界面达到了冶金结合的强度。同时由图 7 可以明显看出, 剥离后铜层剥离面布满韧窝, 钛层剥离面散布着大量的铜金属, 说明剥离时将纯铜直接撕裂下来, 铜钛界面剥断裂方式为塑性断裂, 复合管坯界面层具有较好的塑性。



图 4 热旋复合成形制备的高性能铜/钛复合管坯

Fig. 4 Cu/Ti composite pipe billets with the high property fabricated by heating rotary swaging

表 1 是铜/钛复合管坯不同单道次变形量下游动芯头拉拔的实验结果。由 1~4 组实验结果可知, 在较小变形量下, 能够实现铜/钛复合管坯稳定的游动芯头

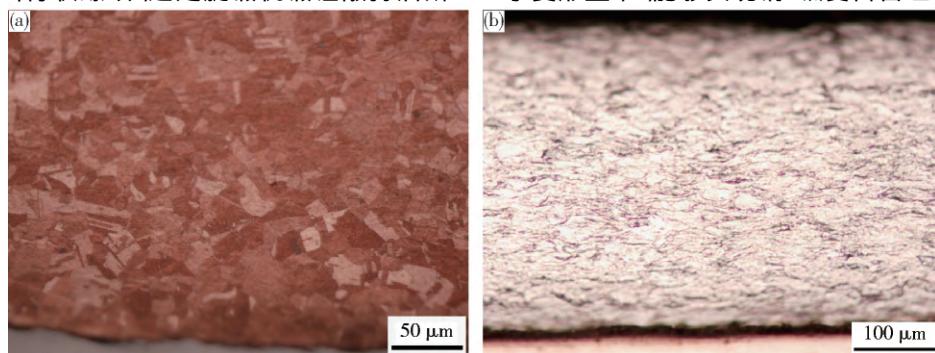


图 5 复合管坯纵截面显微组织。(a) 铜层; (b) 钛层

Fig. 5 Microstructure of the Cu/Ti composite pipe billet: (a) Cu layer; (b) Ti layer

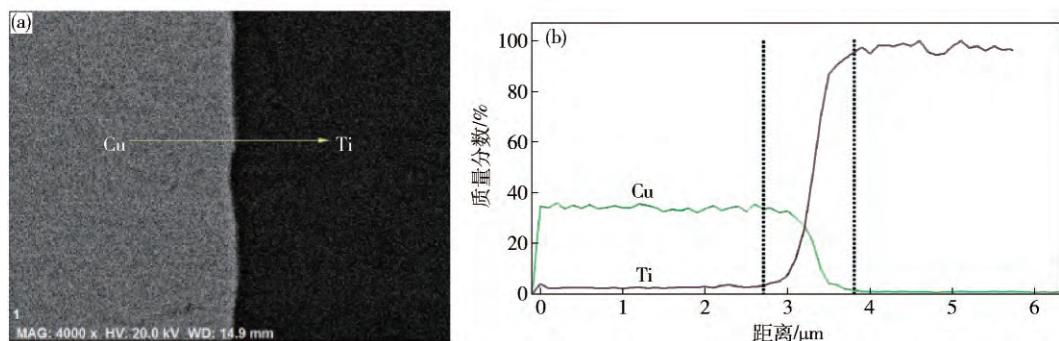


图6 复合管坯结合界面形貌(a)与能谱线扫描曲线 (b)

Fig. 6 Interfacial morphology of the Cu/Ti composite pipe billet (a) and its ESD scan curve (b)

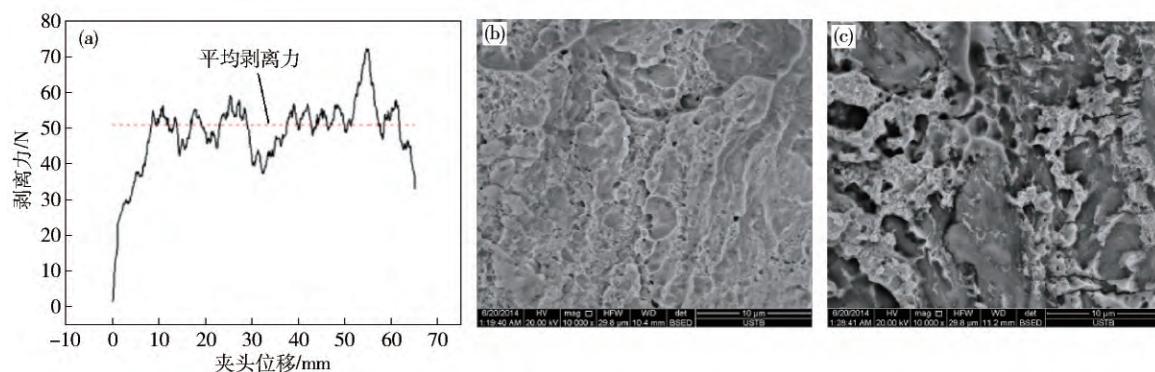


图7 剥离力曲线(a)及剥离后铜层(b)与钛层(c)剥离面形貌

Fig. 7 Peeling force curve (a) and morphology of the peeled surfaces of the copper layer (b) and titanium layer (c) after peeling test

表1 铜/钛复合管坯单道次拉拔工艺参数及稳定性

Table 1 Process parameters and stability of single-pass drawing for the Cu/Ti composite pipe

编号	拉拔后尺寸 / (mm × mm)	变形量 / %	减壁量 , ΔS/mm	稳定性
1	φ12.7 × 1.30	10.9	0	稳定
2	φ12.4 × 1.21	18.6	0.09	稳定
3	φ12.2 × 1.11	25.7	0.19	稳定
4	φ11.7 × 1.12	28.8	0.18	稳定
5	φ12.2 × 1.05	29.6	0.25	拉断
6	φ11.7 × 1.10	29.9	0.20	稳定
7	φ11.6 × 1.10	30.6	0.20	稳定拉拔一段后发生断裂
8	φ11.0 × 1.10	34.6	0.20	拉断

拉拔，并能实现对管坯的一定量的减壁；由5和6组实验结果可以得到，在较大的加工变形量下，当总减壁量过大（例如本文条件下达到0.25 mm以上）容易导致拉断现象。对比上述两组结果可知铜/钛复合管材游动芯头拉拔时减壁量不宜过大。同时，由6、7、8组实验结果可知，即使当总减壁量为一定值0.2 mm，而随着总加工率增大到30%以上时，拉拔过程容易也会出现拉拔不稳定或拉断现象。这表明，复合管游动芯头拉拔过程中会受到总变形量和总减壁量两个因素的影响。

响。但哪个因素是主要因素需要进一步分析。为此，对不同拉拔制度下铜/钛复合管的变形规律进行了进一步分析。

首先，对铜/钛复合管坯和经过一道次游动芯头拉拔后的铜/钛复合管材的铜层、钛层及管壁厚度分别进行测量。测量结果见表2。根据表2中的测量结果，分别计算复合管坯拉拔变形过程中铜层和钛层的实际面缩率，计算结果如表3所示。由表3中几种不同拉拔制度下的一致结果可清晰看出，在铜/钛复合管游动芯头拉拔成形过程中，内外层金属的变形并不是完全均匀一致的，而是铜层金属面缩率小于复合管坯的设计加工变形量（即复合管的总变形量），而钛层金属的面

表2 经过不同变形量的单道次拉拔后铜层、钛层及管壁厚度

Table 2 Thickness of copper layer, titanium layer and pipe wall of composite pipe after single-pass drawing at different deformation amounts

复合管尺寸	厚度 / μm			减薄 / μm		
	铜层	钛层	总厚	铜层	钛层	总厚
φ14.1 mm × 1.30 mm	1017	297	1314	—	—	—
φ12.4 mm × 1.21 mm	963	251	1214	54	46	100
φ12.2 mm × 1.11 mm	890	228	1118	127	69	196
φ11.7 mm × 1.12 mm	909	226	1135	108	71	179
φ11.6 mm × 1.10 mm	895	211	1106	122	86	208

表3 游动芯头拉拔过程中铜层及钛层面缩率与设计变形量的比较
Table 3 Comparison between the measured reduction of area of copper layer and titanium layer after floating-plug drawing and design deformation amount

对象	拉拔前		拉拔后		变形量 (面缩率) /%
	外径/mm	壁厚/mm	外径/mm	壁厚/mm	
复合管	14.1	1.314	12.4	1.210	18.6
铜层	14.1	1.017	12.4	0.963	17.2
钛层	12.094	0.297	10.474	0.251	26.8
复合管	14.1	1.314	12.2	1.110	25.7
铜层	14.1	1.017	12.2	0.890	24.3
钛层	12.094	0.297	10.42	0.228	33.7
复合管	14.1	1.314	11.7	1.120	28.8
铜层	14.1	1.017	11.7	0.908	26.4
钛层	12.094	0.297	9.884	0.226	37.7
复合管	14.1	1.314	11.6	1.100	30.6
铜层	14.1	1.017	11.6	0.895	28.0
钛层	12.094	0.297	9.81	0.211	42.2

缩率远大于复合管坯的设计加工变形量。例如,在表1的第7组实验中,在总加工变形量为30.6%的游动芯头拉拔过程中,钛层金属面缩率达到42.2%,而通常TA2纯钛的面缩率约为40%,因此在表1中第7组实验中发生了拉拔断裂现象。

图8为铜/钛复合管材拉拔变形过程中断裂后的断口形貌。从图8(a)中可以看出钛层延伸较少,铜层延伸较多,由此可知复合管材先在钛层发生断裂;由图8(b)可以进一步看出钛层发生断裂后,铜层继续延伸变形的过程中将撕裂结合界面,最后铜层发生断裂。由此也可以得出结论,铜/钛复合管拉拔过程中发生断裂的主要原因是拉拔过程中钛层的总变形量超过了其变形极限值而率先发生断裂,继而引起复合管的整体拉断现象。

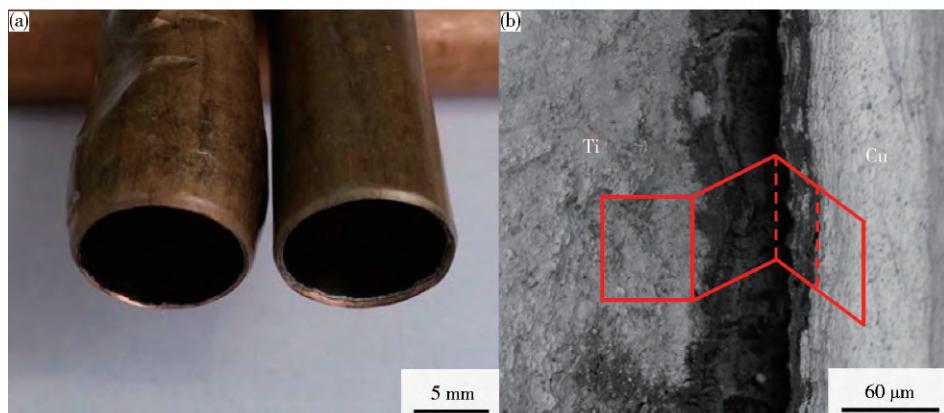


图8 铜/钛复合管材拉断时断口形貌。(a) 宏观形貌;(b) 微观形貌

Fig.8 Morphology of the tensile fracture of the Cu/Ti composite pipes: (a) macromorphology; (b) micromorphology

由热旋复合技术制备的铜/钛复合管坯实现了冶金结合,具有结合界面质量优异的特点。对游动芯头拉拔后的铜/钛复合管材进行剥离强度测试,实验结果如图9所示。图9表明,铜/钛复合管坯的剥离强度为 $23.5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$,经过一道次游动芯头拉拔加工后复合管界面结合强度出现较大程度的下降,最大下降幅度达到约 $20 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。且随着道次变形量的增加,结合强度下降程度增大。从上述表1至表3的分析结果可知,导致游动芯头拉拔过程中铜钛复合界面结合强度降低的主要原因是内层的钛层变形量明显大于外层铜层,内外层金属之间变形不一致,从而使内外层金属的界面层承受一定的剪切变形或较大的界面应力,降低了界面结合强度。而且可以看出,总变形量越大,尤其是内外层金属之间变形量的差异越大,产生界面破坏的程度越大,界面结合强度越低。

采用整管拉伸法对铜/钛复合管进行力学性能测试,得到不同加工变形量下的铜/钛复合管材抗拉强度与断后延伸率如图10所示。由图10可知,游动芯头拉拔实验用的铜/钛复合管坯的抗拉强度为303.1 MPa,断后延伸率为23.5%;经过一道次拉拔加工后,复合管材的抗拉强度迅速上升,而断后延伸率迅速下降。经过变形量30.6%的游动芯头拉拔后,复合管材的抗拉强度上升到401 MPa,延伸率下降到11.4%。同时,随着道次变形量的增加,铜/钛复合管材的抗拉强度不断上升,断后延伸率则不断下降。

综上可以看出,铜/钛复合管坯游动芯头拉拔过程中,结合界面容易遭到破坏,同时拉拔时的加工硬化也使铜/钛复合管的塑性加工性能下降,导致采用钛/铜复合管经过多道次连续拉拔制备细小直径铜/钛复合管材具有较大难度。因此,合理的多道次加工制度和热处理制度等显得十分关键。

2.2 铜/钛复合管多道次连续变形能力研究

为了制备细小直径铜/钛复合管材,需要对铜/钛

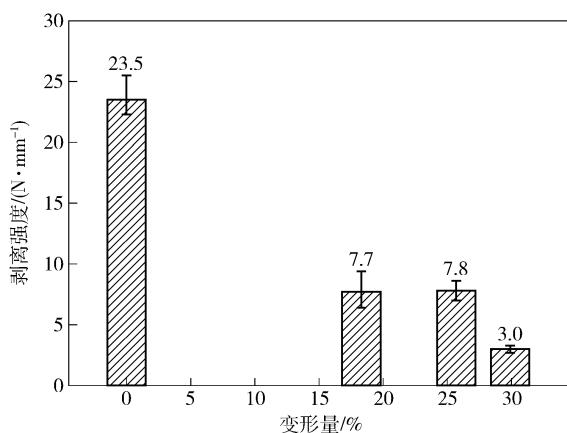


图9 不同拉拔变形量对界面强度的影响

Fig. 9 Effect of drawing deformation amount on interfacial bonding strength

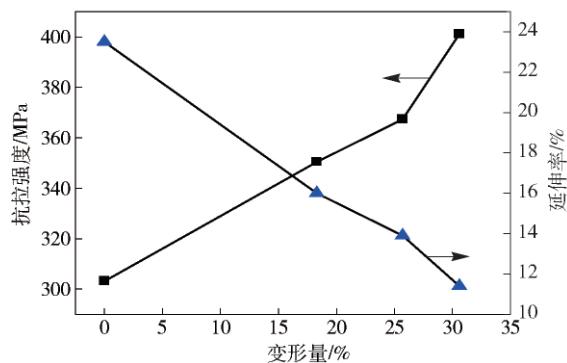


图10 变形量对铜/钛复合管抗拉强度和延伸率的影响

Fig. 10 Effect of drawing deformation amount on tensile strength and percentage elongation after fracture

复合管坯进行多道次的拉拔加工,因此本文在单道次游动芯头拉拔实验结果的基础上,进行连续多道次的拉拔实验,研究铜/钛复合管材的连续拉拔变形能力,实验结果如表4所示。第1、2和4组实验结果显示分别经过变形量为18.5%与16.3%、21.6%与20.3%以及18.5%与28.2%两个道次的游芯拉拔,拉拔过程稳定,累积道次变形量分别为31.8%、37.5%和41.5%。然而在第3组实验过程中,铜/钛复合管坯经过两道次变形量为25.7%和20.8%拉拔至尺寸为φ10.00 mm × 1.10 mm复合管材时,累积变形量为41.2%,在第二道次拉拔变形过程中出现拉断现象,可能是由于第一道次的道次加工率过大,由上一节的研究结果可知,由于游动芯头拉拔变形过程中内层金属变形量较大,当第一道次的变形量较大时,内部钛层较大的变形量不仅会显著降低复合管的界面结合强度,而且继续进行第二道次拉拔时更容易导致内层金属钛的变形量超过其变形极限而产生断裂。

从连续两道次游动芯头拉拔后得到的铜/钛复合管上切取一节管段,将其沿轴向中剖分开,发现很容易

表4 铜/钛复合管多道次拉拔实验结果

Table 4 Results of multi-pass drawing of copper/titanium composite pipe

序号	拉拔后复合管尺寸		累积变形量/%	稳定性
	第一道次	第二道次		
1	φ12.5 mm × 1.2 mm	φ10.95 mm × 1.16 mm	31.8	稳定
2	φ12.5 mm × 1.15 mm	φ10.56 mm × 1.10 mm	37.5	稳定
3	φ12.2 mm × 1.15 mm	φ10.00 mm × 1.10 mm	41.2	拉断
4	φ12.5 mm × 1.2 mm	φ10.56 mm × 1.02 mm	41.5	稳定

就将铜层和钛层二者分开,如图11所示。从图中可以明显看到,钛层分离面上有明显的黏铜现象,说明铜/钛复合管坯在经过连续两个道次游动芯头拉拔后,具有冶金结合的铜/钛复合结合界面遭到严重破坏,因此在被中剖之后由于应力释放而导致复合管铜层与钛层分离。由此可知,铜/钛复合管坯连续多道次拉拔实验时,即便合理安排道次加工率后,累计加工变形量仍不大于41.5%。

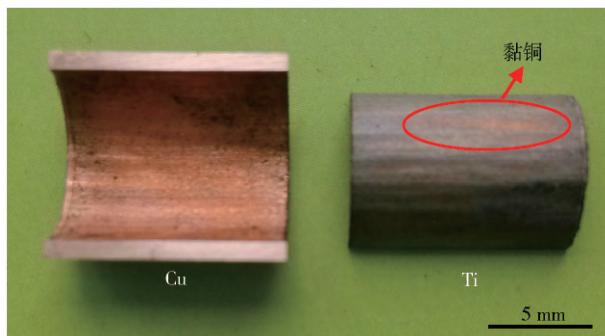


图11 经两道次游芯拉拔后的复合管中剖后出现分层现象

Fig. 11 Delamination of composite pipe by two passes drawing after split along axis

由于铜/钛复合管经游动芯头拉拔后,加工硬化现象比较严重,而且经过连续两个道次游动芯头拉拔后铜/钛复合界面将被严重破坏,因此,为了消除拉拔变形产生的加工硬化,并防止铜/钛复合管因连续多道次拉拔而使复合界面严重被破坏,使铜/钛复合管能继续进行游动芯头拉拔加工,需要对铜/钛复合管进行中间退火处理。

对经过一道次游动芯头拉拔变形量为25.7%的铜/钛复合管进行中间退火,热处理制度为退火温度为575 °C,退火时间为70 min。测量不同状态下复合管材铜层和钛层的显微硬度,以表征去除加工硬化和残余应力的效果,得到结果如图12所示,由图中可知,经过中间退火后复合管铜层和钛层的硬度都明显下降,且比铜/钛复合管坯的硬度值小。铜/钛复合管坯铜层和钛层硬度值分别为HV 48和HV 157,退火后试样铜层和钛层显微硬度分别为HV 47和HV 149,结果表明,经过退火之后,铜层的硬度恢复到加工之前的水平,而

钛层的硬度较原始管坯的硬度还有所下降。其主要原因为:由于管坯是在约800℃的温度下通过旋锻复合制备的,因此,从图5结果可知,拉拔前复合管坯的组织中铜层在复合成形后已经完全再结晶了;一般纯铜的再结晶温度约为500℃,因此拉拔之后经过575℃和70 min的退火处理之后,铜层同样实现了再结晶,所以退火后铜层的硬度与管坯的硬度基本一致。但纯钛的再结晶温度较高,从图5可知,复合管坯的钛层并未完全再结晶,而是保留了大量的变形组织,这是因为旋锻成形前管坯的温度达到约800℃,但在旋锻成形的过程中由于旋锻芯棒的冷却作用,与芯棒接触的钛层温度会快速降低,因此钛层没有实现完全再结晶,硬度较高。拉拔变形之后的复合管经过退火处理之后,加工硬化得到一定程度消除,同时残余应力基本消除,因此退火后的钛层硬度比管坯钛层的硬度稍低。说明该退火制度达到了去除部分加工硬化和残余应力的目的。表5列出了3种不同形态下铜/钛复合管的平均剥离强度和最大剥离强度,中间退火后铜/钛复合管的剥离强度平均值为 $17.1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$,较变形态界面结合强度有显著地提高。

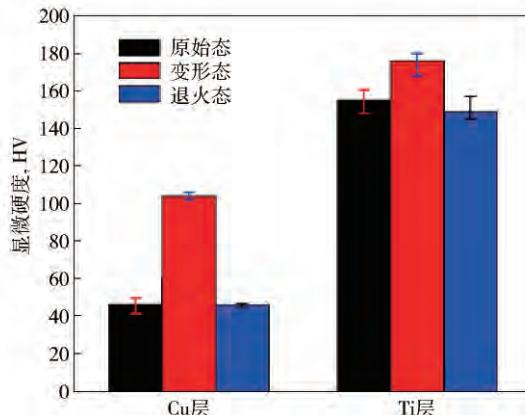


图12 铜/钛复合管原始态、变形态和退火态的显微硬度(HV)变化

Fig. 12 Change of microhardness value of the Cu/Ti composite pipes with original and deformed and annealed conditions

表5 不同状态复合管材的剥离强度

Table 5 Peeling strength of the Cu/Ti composite pipes with different conditions

编号	复合管状态	剥离强度/(N·mm ⁻¹)	
		平均剥离强度	最大剥离强度
1	原始态	23.5	36.6
2	变形态	7.8	17.9
3	退火态	17.1	27.2

对3种状态下的铜/钛复合界面进行线扫描分析,得到结果如图13所示。经过扫描分析得到,热旋铜/钛复合管结合界面扩散层厚度约为1.3 μm,经过变形

量25.7%的游动芯头拉拔后结合界面的扩散层厚度约为1.2 μm,经过制度为575℃/70 min的去应力退火后结合界面的扩散层厚度约为1.3 μm。由此说明,中间退火后界面扩散层厚度未增加,分析铜/钛复合管界面结合强度提高是可能与合金加工硬化和残余应力的消除有关。

由以上分析可知,铜/钛复合管游动芯头拉拔后界面结合强度下降的原因是由于受到金属塑性变形流动差异对界面的剪切破坏以及变形后加工硬化和残余应力的影响。因此,道次加工变形量越大,塑性变形时金属流动差异越明显,界面处剪切破坏作用越大,拉拔加工后铜/钛复合管材的界面结合强度越小。合理的热处理工艺虽然对界面元素扩散情况影响不大,但能缓解加工硬化和残余应力,进而显著提高铜/钛复合管的后续拉拔加工性能。

2.3 细小直径铜/钛复合管拉拔工艺制备

采用游动芯头拉拔加工制备毛细铜/钛复合管材时不能进行较大的减壁,本文认为可在第一道次铜/钛复合管坯加工变形能力较好时进行一定量的减壁,在后续拉拔道次中保持铜/钛复合管材的壁厚稳定,由此制定了表6的毛细铜/钛复合管材加工制备工艺。由该工艺制备了尺寸为φ5.9 mm × 1.14 mm的毛细级铜/钛复合管材,各道次拉拔后铜/钛复合管材形貌见图14。图15为经过多道次游动芯头拉拔加工的φ5.9 mm铜/钛复合管材和经过多道次空拉加工的φ6 mm铜/钛复合管材横截面对比。

表6 细小直径铜/钛复合管材制备工艺制度与参数

Table 6 Process schedule and parameters for fabricating the Cu/Ti composite pipes with small diameter

工序名称	拉拔后规格/mm		减壁量, ΔS/mm	变形量 / %	延伸系数
	外径 D	壁厚 S			
拉拔	12.40	1.15	0.15	22.3	1.29
退火 + 拉拔	9.48	1.15	0	26.0	1.35
退火 + 拉拔	7.30	1.14	0.01	26.7	1.36
退火 + 拉拔	5.90	1.14	0	22.7	1.29

由图15可以看出经过多道次游动芯头拉拔加工的复合管材界面结合质量好,内壁质量高;而多道次空拉加工后的复合管材界面破坏严重出现明显裂缝,且内壁钛层严重起皱,内表面质量很差。这是因为,在游动芯头拉拔加工过程中,复合管的变形一方面是径向收缩变形,另一方面是轴向延伸变形,但复合管材的内孔受到芯头的刚性约束,外径受到外模的强制压缩作用,管壁在芯头和外模的作用下强制发生减薄和延伸变形,因此管壁不断减薄,而内孔形状圆整,内壁比较光滑。但在空拉拔时,拉拔变形过程中复合管的外径在外模作用下同样要发生径向收缩变形,同时

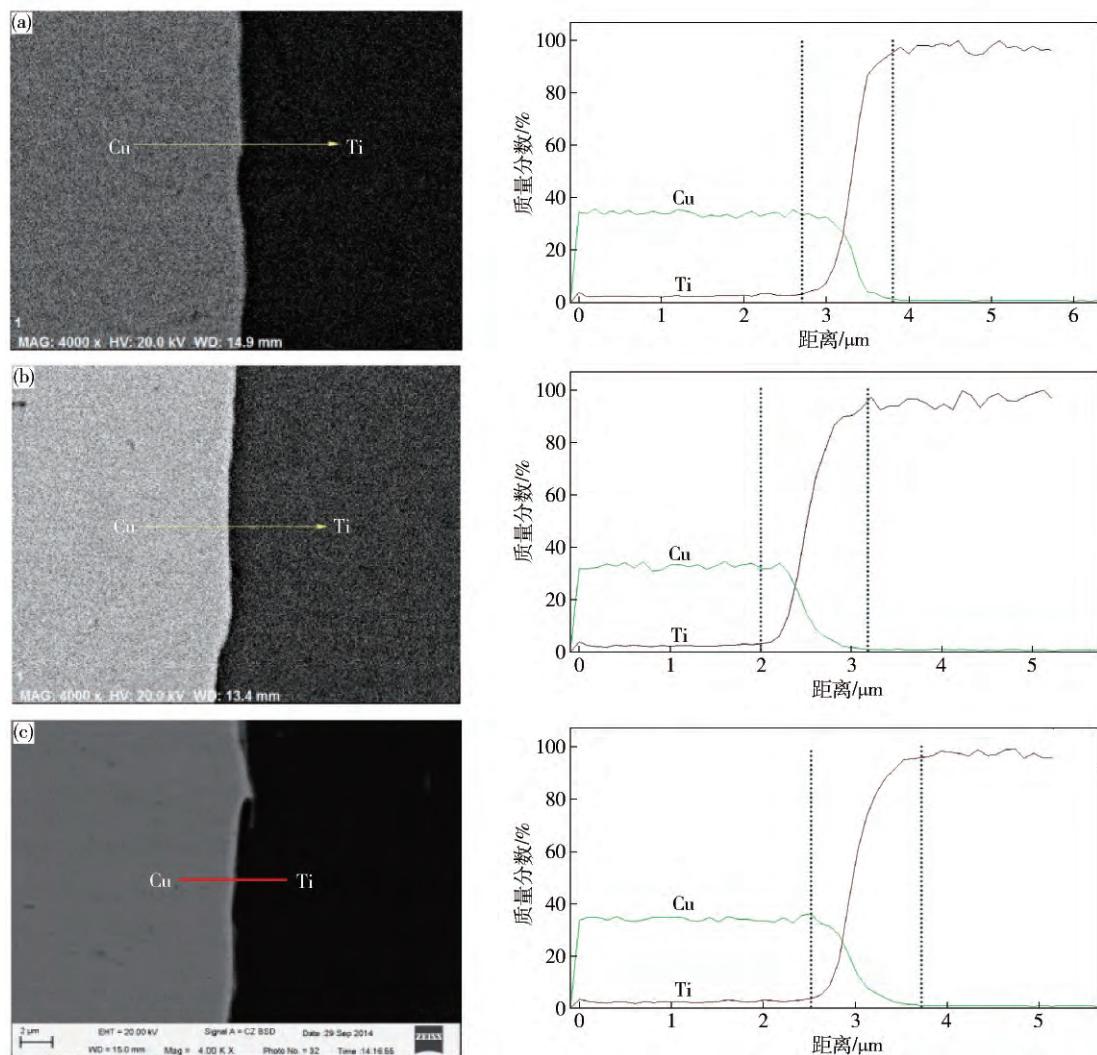


图13 3种状态下的铜/钛复合界面结构与成分分析. (a) 未变形铜/钛复合管坯; (b) 25.7% 变形; (c) 25.7% 变形后退火

Fig. 13 Interfacial structure and composition of the Cu/Ti composite pipes with three different conditions: (a) before drawing; (b) 25.7% deformation amount ; (c) annealed after 25.7% deformation



图14 采用游动芯头拉拔制备的不同规格的铜/钛复合管材

Fig. 14 Cu/Ti composite pipes with different diameters fabricated by floating-plug drawing

在拉拔力的作用下发生延伸变形。但由于内孔没有芯头的刚性约束,管壁的金属在外模的作用下容易向无阻力的内孔方向流动,流动的不均匀性增大,因

此导致局部内孔壁的金属凸向内孔,同时由于剧烈的不均匀变形容易导致界面在变形剧烈的部位发生开裂和分离。

3 结论

(1) 铜/钛复合管材游动芯头拉拔加工时,随着变形量的增加,管材界面结合强度下降增大,且单道次拉拔加工道次变形量不宜超过30%,不宜进行连续多道次的加工;需进行多道次拉拔加工时,应控制管材壁厚稳定,不宜进行较大的减壁。

(2) 拉拔加工过程中的中间退火能够降低加工硬化和残余应力,进而提高铜/钛复合管材的界面结合强度。575 °C保温70 min的道次间退火工艺使得变形态铜/钛复合管材的平均剥离强度由 $7.8 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 提高到 $17.1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

(3) 在严格控制拉拔减壁量的基础上,合理制定

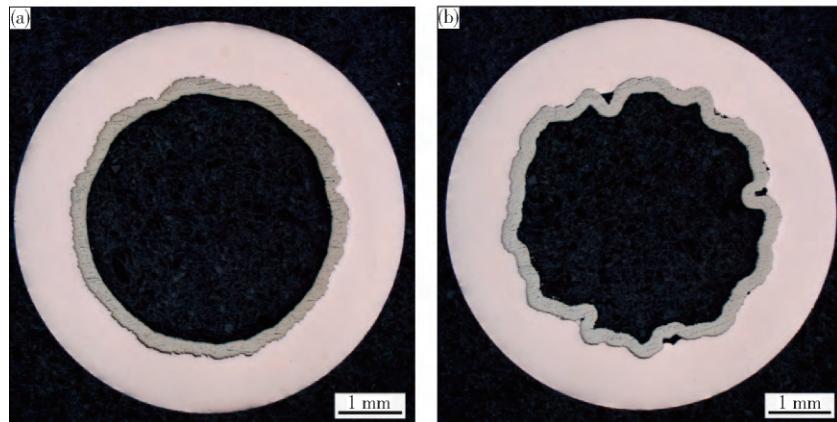


图 15 不同拉拔方式加工的铜/钛复合管材横截面形貌. (a) 游动芯头拉拔; (b) 多道次空拉

Fig. 15 Cross section of Cu/Ti composite pipes by different processing methods: (a) floating-plug drawing; (b) multi-pass sinking drawing

拉拔加工工艺成功制备了界面结合良好、厚度较均匀的尺寸为 $\phi 5.9 \text{ mm} \times 1.15 \text{ mm}$ 的毛细铜/钛复合管材.

参 考 文 献

- [1] Syrett B , Coit T L. Causes and prevention of power plant condenser tube failures. *Mater Perform* , 1983 , 22(2) : 44
- [2] Yoshitake A , Torigoe T. Centrifugally cast bimetallic pipe for offshore corrosion resistant pipelines // *The Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Osaka , 1994: 180
- [3] Ma Q L , Xu H , Wang Z W , et al. Failure analysis and critical manufacturing technology research on titanium condensers. *Eng Fail Anal* , 2005 , 12(3) : 432
- [4] Hosseini M , Manesh H D. Bond strength optimization of Ti/Cu/Ti clad composites produced by roll-bonding. *Mater Des* , 2015 , 81: 122
- [5] Lin C , Zhu P X , Zhou S G , et al. Interface microstructure and properties of Ti/Cu composite materials. *Heat Treat Met* , 2014 , 39(8) : 16
(林超 , 竺培显 , 周生刚 , 等 . Ti/Cu 复合材料的界面组织及性能 . 金属热处理 , 2014 , 39(8) : 16)
- [6] Ma G C , Fu H M , Wang Z , et al. Study on fabrication and properties of 304 stainless steel capillary tubes/Zr_{53.5}Cu_{26.5}Ni₅Al₁₂-Ag₃ bulk metallic glass composites. *Acta Metall Sin* , 2014 , 50(9) : 1087
- [7] Zhan M , Wang Y , Yang H , et al. An analytic model for tube bending springback considering different parameter variations of Ti-alloy tubes. *J Mater Process Technol* , 2016 , 236: 123
- [8] Sponseller D L , Timmons G A , Bakker W T. Development of clad boiler tubes extruded from bimetallic centrifugal castings. *J Mater Eng Perform* , 1998 , 7(2) : 227
- [9] Liu X F , Yang L F , Zhang Y X. Wrinkling identification and wrinkle distribution of a tube in hydroforming with radial crushing. *Adv Mater Res* , 2011 , 291: 662
- [10] Kustra P , Milenin A , Płonka B , et al. Production process of biocompatible magnesium alloy tubes using extrusion and dieless drawing processes. *J Mater Eng Perform* , 2016 , 25(6) : 2528
- [11] Kahraman N , Gülenç B. Microstructural and mechanical properties of Cu-Ti plates bonded through explosive welding process. *J Mater Process Technol* , 2005 , 169(1) : 67
- [12] Liu X H , Xie J X , Liu X F , et al. *A Method of Fabricating Cu/Ti Composite Pipe with High Performance*: China patent , 201410106155.3. 2014-06-18
(刘新华 , 谢建新 , 刘雪峰 , 等 . 一种高性能铜/钛复合管的制备方法 : 中国专利 , 201410106155.3. 2014-06-18)
- [13] Ma H X. *Plastic Processing Principle of Metals*. Beijing: Metallurgy Industry Press , 1991
(马怀宪 . 金属塑性加工学 . 北京 : 冶金工业出版社 , 1991)
- [14] Luoyang Copper Processing Company. *Copper Pipe Manufactured by Floating-plug Drawing*. Beijing: Metallurgy Industry Press , 1976
(洛阳铜加工厂 . 游动芯头拉伸钢管 . 北京 : 冶金工业出版社 , 1976)
- [15] Guo L , Li Y Q. *Manufacture Technology of Condenser Pipe*. Beijing: Metallurgy Industry Press , 2007
(郭莉 , 李耀群 . 冷凝管生产技术 . 北京 : 冶金工业出版社 , 2007)
- [16] Yu C Y. Development of copper-titanium composite pipe used in condenser of power plant. *Titanium Ind Prog* , 1997(2) : 27
(余存烨 . 电厂凝汽器用铜-钛复合管的开发 . 钛工业进展 , 1997(2) : 27)