

以铝代铜冲制钮扣零件的 缺陷分析与解决措施

案例制作：林高用 教授
中南大学材料科学与工程学院





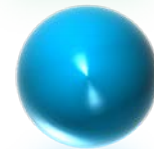
1、案例来源与背景



2、缺陷分析



3、工艺改进



4、总结与思考



1、案例来源与背景

➤案例来源：浙江某股份公司

➤案例背景：

在“中国制造2025”战略规划下，代表着智能化、轻量化的铝成为支柱性的原材料之一，以铝代钢、以铝代铜、以铝代木成为节能、环保、绿色发展的方向。纽扣是人们生活中常见的东西，常被用于服装中。目前服装辅料行业使用的金属纽扣主要采用铜合金、锌合金制成，铝制纽扣几乎没有。与铜合金、锌合金相比，铝合金比重仅为黄铜的1/3，不到锌合金的1/2，质轻价廉，同时具备较高的强度与塑性、良好的耐腐蚀性能；此外，铝合金阳极氧化着色工艺技术已十分成熟，可赋予纽扣更多的色彩变化来满足服装业日新月异的发展需求。因此，采用铝合金生产金属纽扣具有巨大的发展前景。



► 案例背景：

金属钮扣是指利用金属材料制成用于服装或相关物品的扣件。金属钮扣种类繁多，造型多变，按其外形结构可分为手缝扣、工字扣、四合扣、五爪扣、撞钉、气眼等；按成形工艺可分为压铸钮扣、深冲钮扣。目前，绝大部分压铸金属钮扣由Zn合金熔铸或冲压而成，深冲金属钮扣则主要采用H65、H68等黄铜带材通过连续拉深工艺制成，再结合电镀、喷漆等表面处理赋以锌铸件、黄铜冲压件各种外观颜色，如枪色、古银色、古铜色、茶金色等。



图1 金属钮扣
(a)手缝扣；(b)工字扣；(c)四合扣；(d)五爪扣



► 案例背景:

金属钮扣绝大部分是由金属材料通过不同的冲压工艺组合加工制成的组合钮扣，如图工字扣、四合扣等。从材料变形量的大小和组合钮扣的位置，可将其分为钮面、钮底、钮钉，如图2所示。钮面主要通过冲裁、翻边工艺加工而成，钮底、钮钉则通过在连续拉深模上进行连续的深冲加工而成，也有变形量较大的钮面需要通过连续拉深来制备。

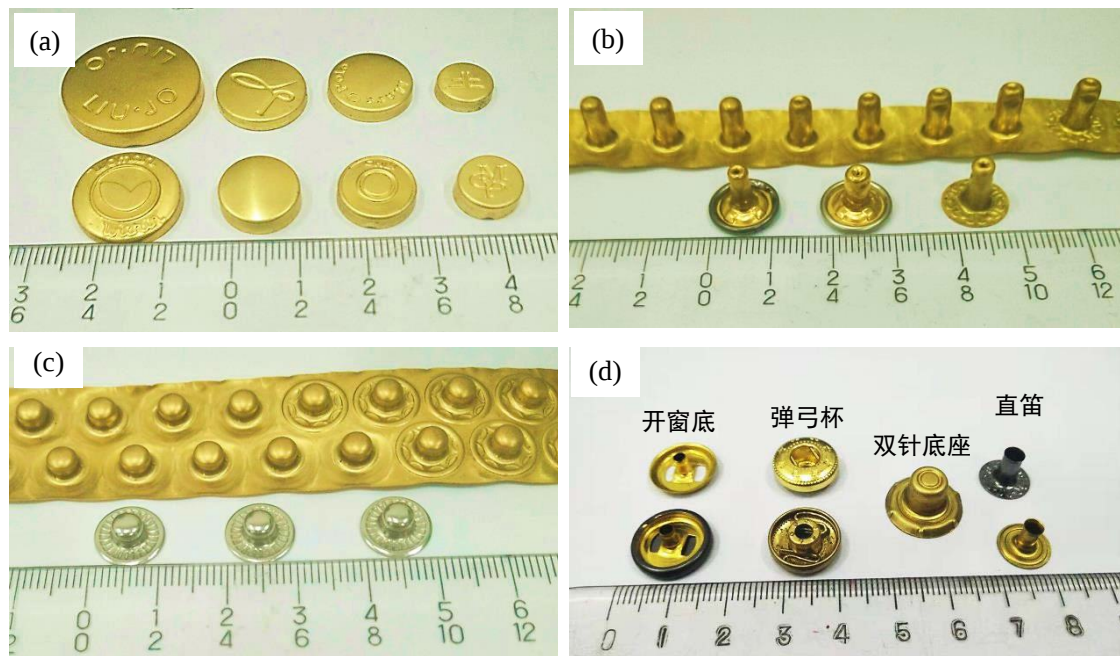


图2 部分钮扣组合件

(a) 钮面; (b) 钮钉; (c) 钮珠; (d) 钮底



► 案例背景:

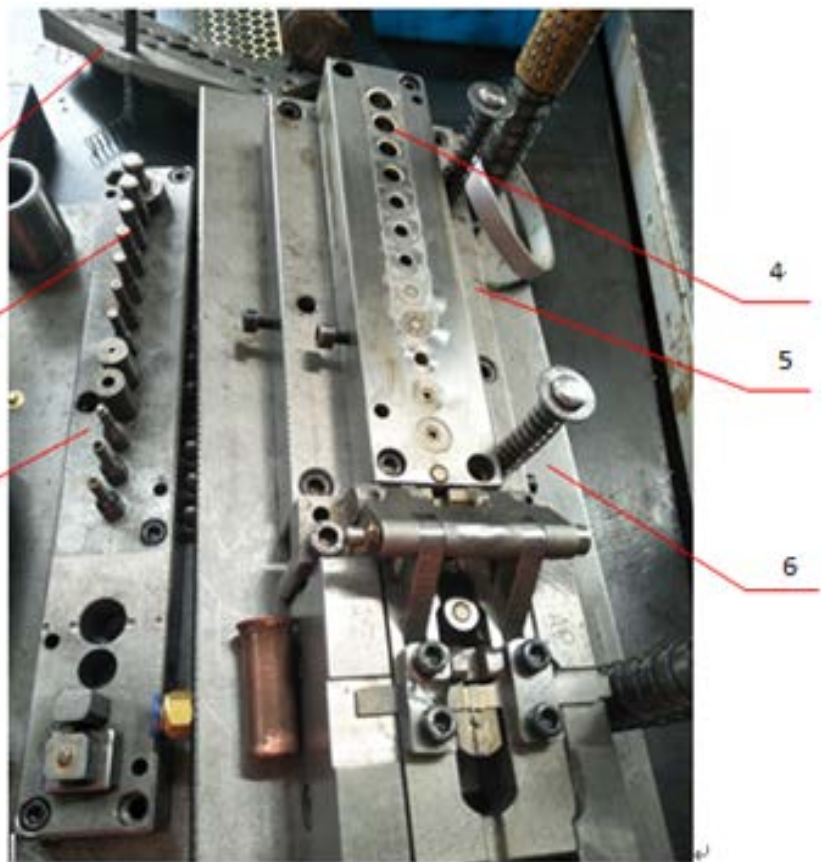


图3 钮底连续拉深模具结构图

1-压料板; 2-凸模; 3-上工夹板; 4-模芯 (含凹模、顶料模柱)
5-垫板; 6-底板



图4 钮面冲裁设备



图5 连续拉深设备



► 案例背景：

本案例中以钮扣用**铝镁合金**深冲带材由中南大学材料科学与工程学院实验室进行成分设计与制备，具体工艺流程为：

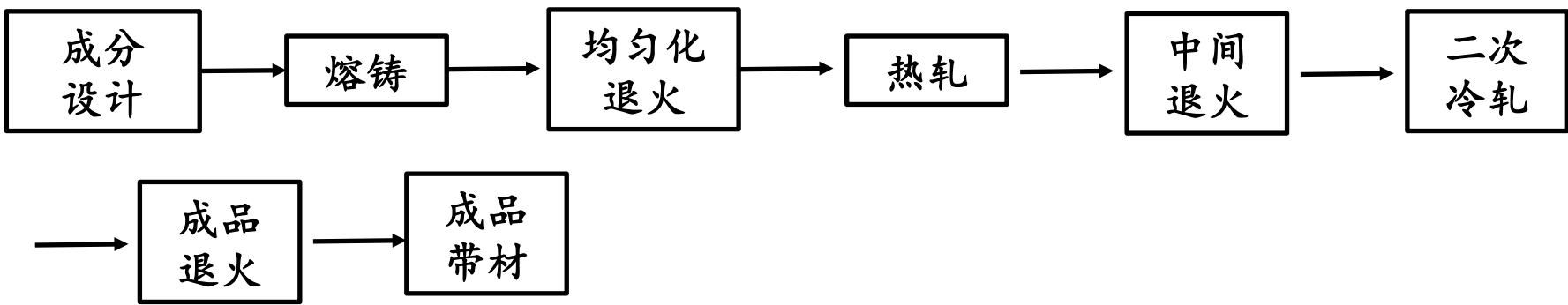


图6 Al-Mg合金制备工艺流程图

将制得的铝镁合金带材送往浙江伟星金属钮扣生产车间进行冲裁、连续拉深试验，通过直接观察铝带在加工过程中是否出现畸变或破裂来检测带材的工艺成形性能。

在现场冲压实验过程中，发现所制备的铝镁合金带材在连续拉深的首道次拉深工序出现较为严重的拉裂现象。



➤ 案例背景：

本案例重点针对上述Al-Mg合金深冲带材出现的拉裂缺陷进行分析，弄清缺陷形成的规律和机理，然后依据分析实验结果，从成分优化、改进热处理制度与冲压工艺等方面提出解决方案，以实现以铝代铜制备金属钮扣的目的。

表1 实测Al-Mg合金主要化学成分 (w/%)

元素	Mg	Ce	R	Mn	Si	Fe	Ti	Al
1#	x	0	0.18	0.13	0.17	0.22	0.03	余量
2#	x	0.33	0.16	0.13	0.22	0.20	0.03	余量

注：由于企业保密要求，此处对Mg的含量及R元素不进行具体说明。



➤ 铝镁带材深冲拉裂缺陷分析

继续进行首道次拉深程度较小的钮珠连续拉深实验，结果如图8所示。1#合金退火态带材仍在首道次拉深过程就被拉裂，裂纹产生部位不变；2#合金退火态带材则在首道次拉深后未出现裂纹，且顺利完成了后续各道次的拉深，制备出**组合扣**的钮珠配件。



图8 1#、2#合金退火态带材钮珠连续拉深
(a) 1#退火态 (拉裂)； (b) 2#退火态



➤ 铝镁带材深冲拉裂缺陷分析

连续拉深的首道次拉深与圆筒形件拉深相似，区别只是在于原始毛坯为长条状带料以及在拉深过程中毛坯边缘有一部分留在凹模面上形成凸缘。1#、2#合金退火态带料在首道次拉深变形过程中，其内部主要受到切向压应力、**径向拉应力**的作用，在这两个应力的共同作用下，带料发生塑性变形而不断地被拉入凹模中，最后获得所需的圆筒形拉深件，其示意图如图9所示。

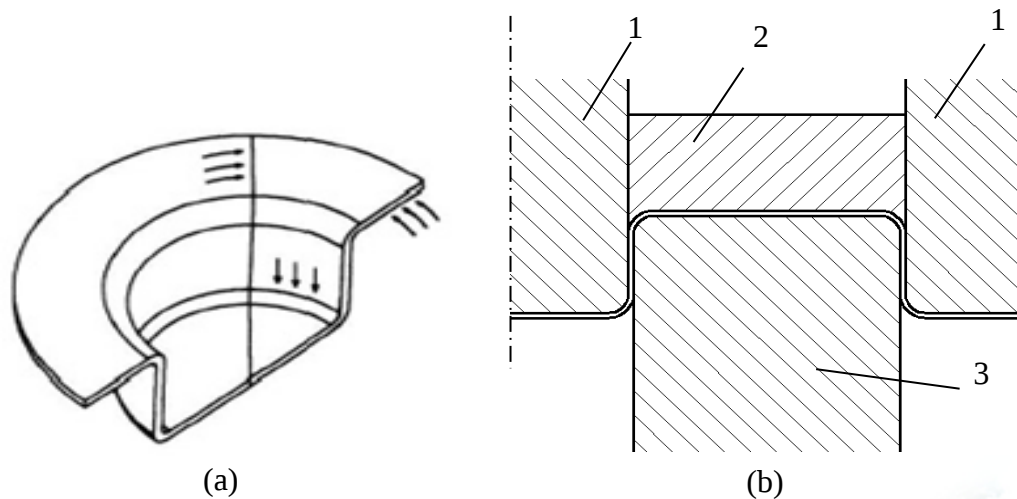


图9 铆钉连续拉深首道次拉深受力图与模具示意图

(a) 受力图； (b) 模具图

1-凸模； 2-压料板； 3-凹模



➤ 铝镁带材深冲拉裂缺陷分析

在拉深成形时，拉深件筒壁与底部转角稍上的部位金属材料变形程度小，加工硬化效应弱，加之此处受到的摩擦阻力小，在拉应力的作用下变薄最严重。当该处金属受到的拉应力超过其强度极限时，该处就会产生裂纹，裂纹扩展，出现拉裂现象。1#、2#合金退火态带材在连续拉深的首道次拉深过程中就被拉裂，说明1#、2#合金本身的抗拉强度较低，加之变形后加工硬化弱，强度不足以抵抗拉应力作用下的变形，最终发生破裂。





为更好地提出改进方案，对1#、2#试验合金的显微组织进行观察与分析。

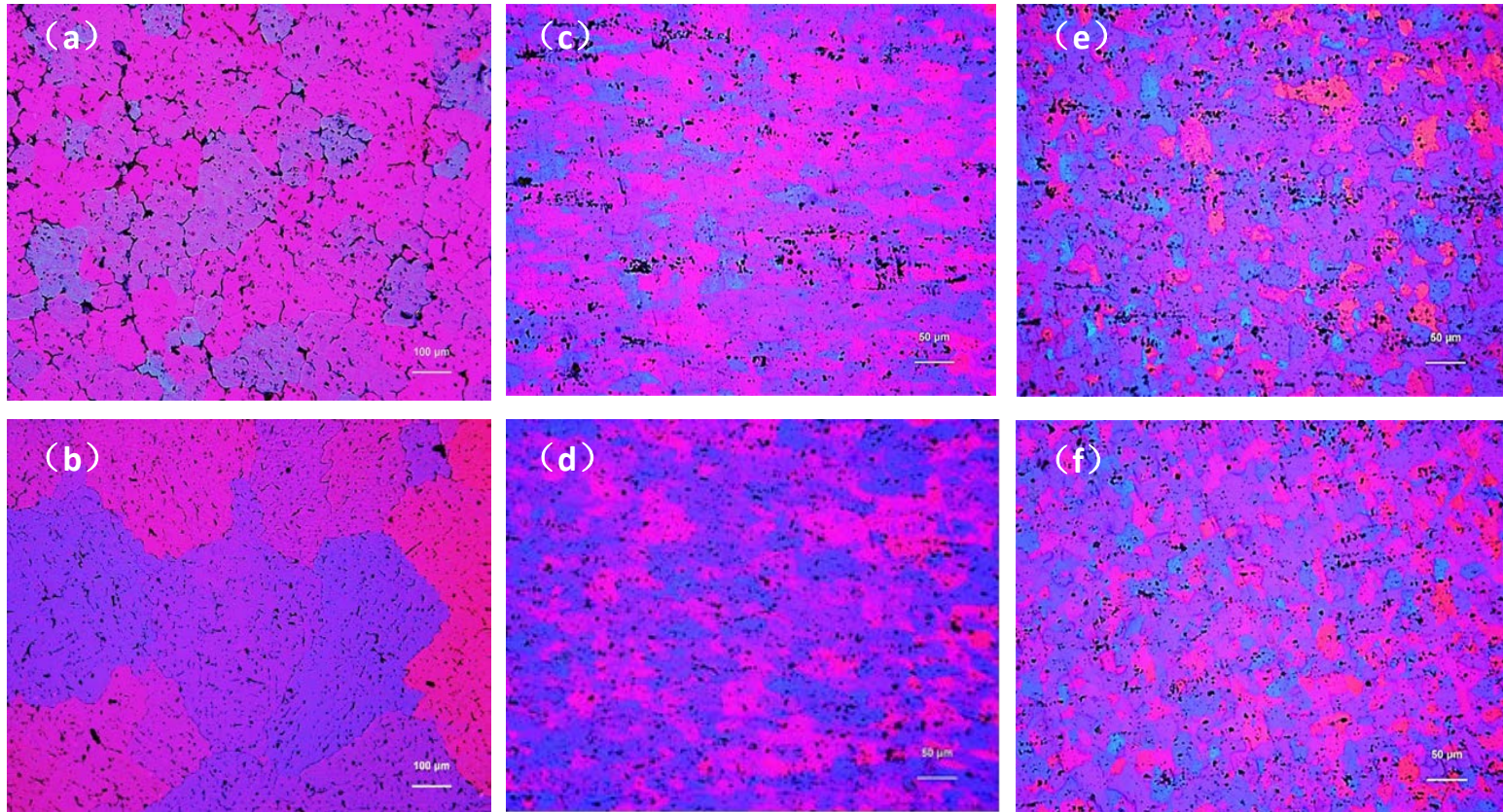


图10 不同状态1#、2#合金金相组织 (OM)

(a) 1#铸态; (b) 2#铸态; (c) 1#冷轧态; (d) 2#冷轧态; (e) 1#退火态; (f) 2#退火态

图10为不同状态1#、2#合金的金相组织，由图可知，1#、2#合金铸态组织的平均晶粒尺寸分别为 $100\ \mu\text{m}$ 、 $250\ \mu\text{m}$ ；经轧制、退火后，1#、2#合金均形成细小的等轴晶粒，其平均晶粒尺寸分别为 $25\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$ 。



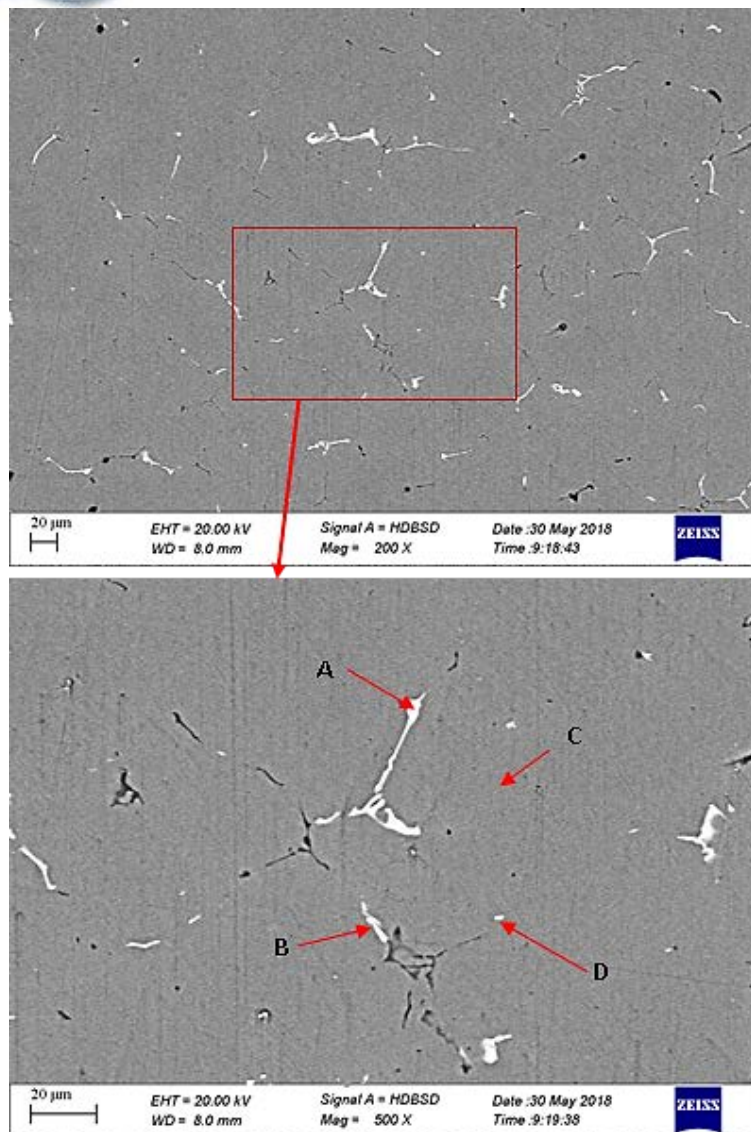


表2 1#铸态合金的EDS分析 (wt.%)

位置	Al	Mg	R	Mn	Fe	Si
A	67.75	—	1.81	2.89	23.29	4.26
B	85.45	2.51	—	—	9.27	2.27
C	92.50	3.82	—	—	2.46	1.22
D	77.48	2.20	1.42	1.54	14.79	2.57

由图11可知，1#合金铸态组织中的第二相形状尺寸各异，图中较大的第二相长轴将近40 μm，类似三叉枝状；最小的点状相，尺寸仅几μm。根据表4的EDS分析结果，这些第二相主要为含Fe的杂质相。



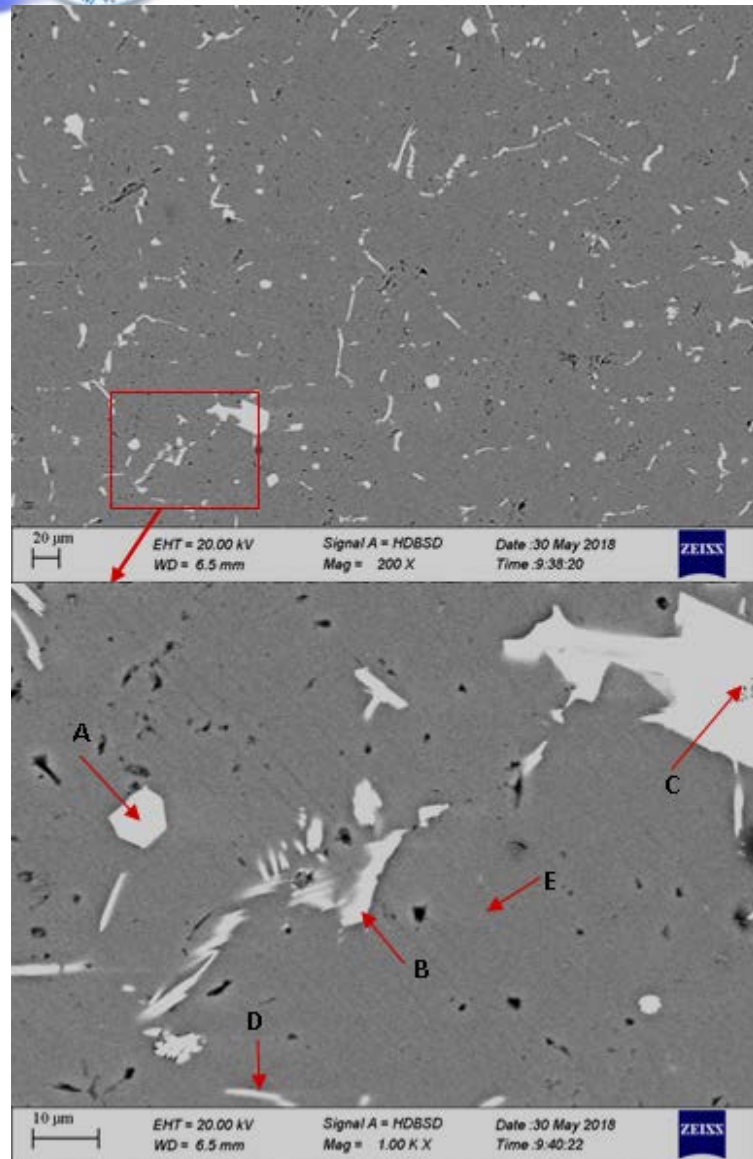
图11 1#合金试样铸态组织 (SEM)



铝镁带材拉裂缺陷分析

表3 2#铸态合金的EDS分析 (wt.%)

位置	Al	Mg	Ce	R	Mn	Fe	Si	Ti	La
A	68.28	4.10	14.01	10.77	—	—	—	—	—
B	70.17	1.18	1.37	—	2.19	24.23	0.87	—	—
C	69.75	1.53	13.22	10.12	—	—	—	5.37	—
D	76.97	3.21	9.97	6.51	—	—	3.34	—	6.51
E	82.37	2.93	7.57	6.16	—	—	—	0.98	—



由图12可知，添加0.3%Ce后Al-xMg合金铸态组织中第二相的数量显著增加，并出现尺寸较大的块状相，图中最大的块状相横向尺寸达20 μm 。由表5的EDS结果知，图中2#合金的第二相种类主要包括Al-Ce相、Al-Fe相、Al-Ce-Ti相、Al-Ce-La相等。

图12 2#合金试样铸态组织 (SEM)



铝镁带材拉裂缺陷分析

表4 不同状态合金带材室温拉伸力学性能

试样	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	延伸率/%
H65黄铜软态	150.4	350.8	0.43	44.7
1#（Al-xMg）冷轧态	265.0	276.0	0.96	6.6
2#（Al-xMg-0.3Ce）冷轧态	273.4	280.3	0.98	5.6
1#（Al-xMg）退火态	152.5	226.5	0.67	15.5
2#（Al-xMg-0.3Ce）退火态	178.1	233.8	0.76	12.0

对不同状态的1#、2#合金带材进行室温拉伸性能测试，结果如表4所示。由表可知，退火前，1#、2#合金冷轧态带材的屈服强度、抗拉强度、延伸率相差不大。退火后，1#、2#合金都出现强度降低、塑性提高的现象；2#合金的屈服强度、抗拉强度高于1#合金，延伸率则比1#合金低。



➤ 铝镁带材深冲拉裂缺陷分析

由上述显微组织观察可知，添加0.3%Ce是过量的，会造成Al-xMg合金铸态组织晶粒粗化，显著增加第二相的数量，甚至出现尺寸较大的块状相。但经过大程度的轧制变形以及再结晶退火后，可获得与不含Ce的1#（Al-xMg）合金尺寸大小相近的再结晶晶粒。由室温拉伸性能可知，退火前后2#（Al-xMg-0.3Ce）合金强度均高于1#（Al-xMg）合金。结合上述1#、2#合金退火态带材在纽钉连续拉深试验、钮珠连续拉深试验中的表现可知，Ce的添加对Al-xMg合金退火态带材的冲压成形性能存在积极作用，但需经过一定的成分优化，才可能使其工艺性能进一步提高。



3.1 合金成分优化

在Al-Mg系第一批铝合金带材成分的基础上改进合金成分，调整Mg和其他微量元素的含量，充分发挥稀土元素Ce、La净化熔体、细化晶粒的作用，改善合金组织，提高其性能，具体成分如表5所示。 由于企业的保密要求， 此处不对改进后的合金成分进行公开说明。

表5 实测Al-Mg (II) 合金化学成分 (wt.%)

Mg	Mn	Si	R	Ce	La	Fe	Ti	Al
x	0.40	0.35	0.24	0.15	0.08	0.25	0.04	余量



3.2 选择合适的热处理制度

对最终冷轧态的Al-Mg合金带材进行成品退火，通过再结晶来进一步细化晶粒，恢复合金带材的塑性，减小各向异性，从而提高其深冲成形性能，热处理温度为350~450℃，时间为1~3 h，冷却方式为空冷，具体热处理制度如表6所示。

表6 Al-Mg (II) 合金带材成品退火制度

0#	1#	2#	3#	4#
冷轧态	350℃×1 h	350℃×1.5 h	350℃×2 h	350℃×3 h
5#	6#	7#	8#	9#
375℃×1 h	375℃×2 h	400℃×1 h	400℃×2 h	450℃×1 h



3.2 选择合适的热处理制度

改进成分后的Al-Mg合金冷轧态带材的屈服强度、抗拉强度高于与黄铜H65软态带材，经成品退火后，其强度降低，塑性提高。与成分改进前相比，Al-Mg合金带材的强度、塑性以及冲压成形性能都得到明显提高。

表7 Al-xMg（II）合金带材室温拉伸性能

试样状态	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	屈强比	延伸率/%
黄铜H65软态	197.5	405.5	0.49	51.8
Al-Mg冷轧态	439.3	474.7	0.93	7.9
300℃×1h退火态	206.1	338.2	0.61	16.7
350℃×1h退火态	208.8	344.8	0.61	19.8
400℃×1h退火态	201.9	338.6	0.60	20.9
450℃×1h退火态	193.8	330.5	0.59	21.4



3.3 钮扣冲压模具改进

将表6中10种不同状态的Al-Mg合金带材继续送往某企业金属钮扣生产车间进现场的连续拉深试验，具体实验结果如下：

1) 对经过热处理的铝带直接进行整体带料的连续拉深，制备金属钮扣部件双针底座，结果如图13所示，在连续拉深过程中，普遍发生破裂。值得注意的是，7#铝带试样因带料未完全对中，拉深时带料一侧受到的约束较小，未发生破裂；3#、8#铝带试样左侧（图中红线圈出部分）由于同样的原因，也未发生破裂，4#铝带左侧也仅出现较小的裂纹。



图13 不同状态铝带双针底座连续拉深试样



3.3 钮扣冲压模具改进

2) 为探究整体铝带料在首道次拉深发生破裂原因是否与拉深高度 h 的大小有关,对图12中首道次拉深情况较好的3#、4#、7#铝带进行首道次 h 值较小的连续拉深试验,结果如图14所示,3#、4#、7#铝带仍在首道次拉深中破裂。这说明拉深高度 h 值过大不是造成Al-Mg合金带材在首道次连续拉深中出现的主要原因。



图14 3#、4#、7#铝带开窗底连续拉深 (h 小) 试验实物图



3.3 钮扣冲压模具改进

3) 将经过热处理的铝带剪成片状样，让片状样单独逐次完成连续拉深工序中的各道次拉深过程，结果如图15所示，除了4#铝带片状样在首道次拉深过程后出现破裂外，其余热处理状态的铝带片状样在首道次拉深过程后都未出现裂痕，并且3#铝带的片状样顺利完成了后续各道次拉深工序，制备出双针底座、开窗底的半成品制件，5#铝带的片状样也制备出了接近成品的双针底座配件，说明铝带在连续拉深过程中发生破裂主要与整体带料上相邻两个拉深件之间相互约束有关。



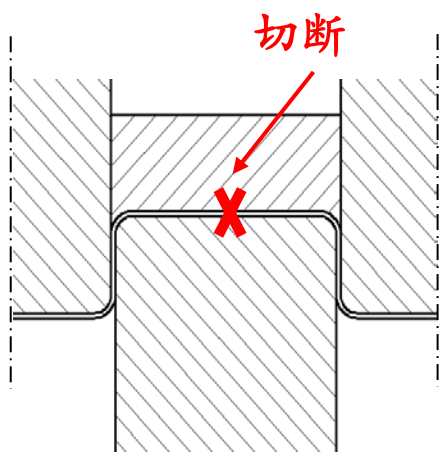
图15 不同状态铝带片状样双针底座连续拉深实物图



3.3 钮扣冲压模具改进

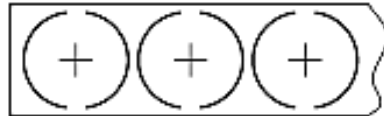
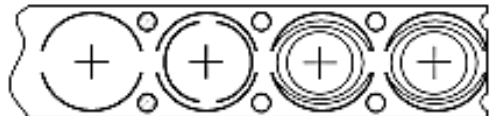
由上述可知，目前企业采用的整体带料连续拉深工艺，在加工过程中相邻两个工位的拉深件会相互约束，严重限制金属的纵向流动，造成带料在相邻工位间出现较大的拉应力，这也是连续拉深过程中带料拉裂的原因之一。

改进钮扣冲压模具，在带料上冲工艺切口,把两个拉深件的相邻处切开,可以使拉深毛坯大部分周边与带料分离，成形时材料的流动可以接近单个毛坯拉深时的水平，能够直接实现铝合金钮扣零件的连续冲压成形。常见的工艺切口类型如表8所示。



3.3 钮扣冲压模具改进

表8 常用的工艺切口类型和特点

工艺切口类型	应用及特点
	料厚大于 0.5 mm 以上的圆形小产品类，条料会变小，应用较广
	一圈工艺切口。料厚小于 0.5 mm 的圆形小产品类，条料会变小
	二圈错位切口。料厚小于 0.5 mm，条料宽度保持不变，能用导正孔定位，精度高，步距多，后续工序多时应用，高速冲应用较广
	留连接带，厚料应用较多，条料宽度保持不变，能用导正孔定位，精度高，步距多，后续工序多时应用，高速冲应用较广



3.3 钮扣冲压模具改进

选择拉深成形性能较好的3#、拉深成形性能较差的4#铝带进行变形量较大的钮面连续拉深试验，结果如图16所示，3#、4#铝带首道次拉深后未出现裂纹，并且顺利完成了后续各道次的拉深，成功制备出钮面部件。



图16 3#、4#铝带钮面连续拉深试验实物图



3.3 钮扣冲压模具改进

对制备出的钮面进行阳极氧化处理，着色效果如图17所示。钮面表面着色均匀，黑、银、红、蓝这四种颜色的着色效果都比较好。将阳极氧化后的钮面与其它钮扣配件组装，组装后的实物如图18所示，图中金色部分为黄铜制钮扣配件，由图（a）可知，黑、银、红、蓝色钮面能与其它铜制钮扣装配且效果良好，如图（b）所示。



图17 铝制钮面阳极氧化着色效果图



图18 铝制钮面组装实物图
(a) 黑、银、红、蓝色组装效果； (b) 边缘掉色



本案例通过分析以铝代铜钮扣用深冲铝镁合金带材在连续拉深过程中出现拉裂现象的原因，提出了相应的工艺改进方案，得出以下结论：

1) 在冲制钮扣的整体带料（无工艺切口）连续拉深过程中，相邻工位模孔会相互约束，限制金属的纵向流动，使带料在工位间出现较大的附加拉应力，同时在钮扣拉深筒件底部内圆角稍上处参与变形的金属较少，冷作硬化程度低，在轴向拉应力的作用下变薄又最严重，当相邻工位间由于相互约束产生的附加拉应力与轴向拉应力叠加，带材所受拉应力超出其抗拉强度，就会出现拉裂的现象。本案例中铝镁带材自身抗拉强度低、塑性不高，以及整体带料连续拉深时相邻工位模孔间的材料变形互相约束，是深冲拉裂的主要原因。

2) 解决铝镁合金带材的深冲拉裂问题，可通过优化合金成分、选用合理的成品退火制度 $350^{\circ}\text{C} \times (1\sim3) \text{ h}$ 、改进冲压工艺、采用有工艺切口的连续拉深模具等措施来实现。



引申思考1: 铝合金因自身**层错能高**，加工硬化程度远低于黄铜，所以其深冲性能肯定不如黄铜带。但通过深冲工艺和模具优化，实现钮扣零件“以铝代铜”是完全可能的。那么，是否可以实现完全替代？是否还可以采用**其它材料（如Al/Cu复合带）可以替代？**铝带织构对深冲性能到底有多大影响？值得深入探究。

引申思考2: 该案例涉及的技术应用背景为普通应用领域，这种“**以铝代铜**”冲制钮扣的问题看似简单，其实技术难度大，理论深度深，且与我们每个人的日常生活息息相关。这一材料技术问题多年来一直未能得到有效解决，主要原因是极少有人去开展深入研究。体现了当下**急功近利、好高骛远、极其浮躁**的社会心态！



谢谢！

