

玻璃陨石的成因争论及可能的彗星撞击模型

李 春 来

(中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002)

关键词 玻璃陨石 成因 彗星撞击事件

玻璃陨石是一种棕黑色或浅绿色的天然玻璃, 一般为厘米级大小的块状, 表面多具空气动力学熔蚀刻痕。长期的研究证明, 玻璃陨石在化学和结构特征上与地球火山玻璃具有明显的区别, 因而不是地质作用的产物。玻璃陨石具有广泛而限定的地理分布, 分布在美国南部得克萨斯州和佐治亚州的玻璃陨石称为北美群; 分布在中欧捷克、斯洛伐克、奥地利的莫尔达维河流域的玻璃陨石称为莫尔达维石群; 分布在象牙海岸的玻璃陨石称为象牙海岸群; 最大的一个玻璃陨石群是澳大利亚- 东南亚玻璃陨石群, 广泛分布于澳大利亚、东南亚半岛及我国的南部地区, 分布面积约占地球陆地表面积的 10%^[1,2]。

对玻璃陨石成因的争论一直贯穿于玻璃陨石的整个研究历史中。事实上, 有关玻璃陨石的所有研究工作都是围绕其成因这一课题进行的。古代关于玻璃陨石成因的认识, 有的充满了神奇的想像和神秘的宗教色彩, 有的反映了素朴的自然观, 如玻璃陨石的希腊原文的原意为“熔融”; 我国琼州半岛地区的居民称之为“雷公墨”, 这些名称都在一定程度上客观地反映了对玻璃陨石成因的认识。在欧洲, 直到 19 世纪和 20 世纪初, 科学家们的注意力只限于莫尔达维石, 而其产地正是欧洲玻璃制造业最发达的地区, 因此这一时期他们争论的焦点是, 这些玻璃是人工的还是天然的^[3]。

当人们认识到玻璃陨石不是人工玻璃后, 作为天然产物, 地球火山成因说显然是其第一选择。但研究发现, 玻璃陨石与火山玻璃(如黑曜岩)在化学成分和结构特征上有很大的差别, 例如玻璃陨石几乎不含水, 而火山玻璃的水含量很高^[1,2,4,5]; 玻璃陨石中铁主要以 Fe^{2+} 形式存在, Fe^{3+} 含量很低, $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值为 0.06 ~ 0.26 (平均 0.13), 火山玻璃中铁主要以 Fe^{3+} 形式存在, $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} \gg 1$, 表明它们形成于不同的环境^[1,6,7]; (微)玻璃陨石具有撞击作用产生的特殊的表面构造, 并含有只在撞击作用环境下才能形成的矿物相(如斯石英和柯石英)和撞击体的残余物, 而且在玻璃陨石散落区和形成时代没有发现相应的火山(群)^[1,2], 因此玻璃陨石的地球火山成因说逐渐退出历史舞台。与此同时, 对玻璃陨石成因还提出过其它一些观点, 比如: 认为是石陨石消融产物(Hardcastle, 1926); 闪电时地表土壤熔融而形成的闪电熔岩; 是由陨石与地球卫星碰撞而形成的硅质凝胶在腐殖酸的作用下干燥而成的; 是彗尾在空气中氧化形成的(Goldschmidt, 1924); 甚至认为是反物质的陨落。这些观点都因缺乏基本的科学证据, 且与

玻璃陨石的基本特征不符而被摒弃^[3]。

40 年代以来, 玻璃陨石的全面收集和全球调查, 使研究工作进入了一个真正科学的年代。特别是 60 年代, 由于登月计划的实施, 这一研究进入了高潮, 对其成因的认识也提高到一个新的高度。其间对成因的争论, 集中在两个对立的学说: 即地球成因说——玻璃陨石是地外物体撞击地球时, 地表岩石熔融、溅射, 经迅速冷却而成的, 如陨石冲击地球说(Spencer, 1933) 和彗星冲击地球说^[8]; 月球成因说——玻璃陨石是月球火山喷发或受天体撞击时, 产生的熔融物进入地月空间后, 被地球重力场俘获而落到地表, 如月球火山喷出说^[9] 和陨石冲击月球说^[10, 11]。

近半个世纪以来, 对玻璃陨石进行了广泛而详细研究, 包括地理分布、化学成分、同位素、宇宙射线暴露历史、包裹体等所有的特征和证据, 都不支持月球成因说。因此, 现今被广泛接受的学说是撞击地球成因说^[1, 2], 即玻璃陨石是地外物体撞击地球时地表物质熔融的产物。支持这一学说的关键证据有:

(1) 地理分布: 玻璃陨石在地表的分布不是广泛而随机的, 而限定在特定的地理范围, 这是月球成因说难以解释的。

(2) 化学成分: 玻璃陨石的主要元素含量与月球样品截然不同, 而与地球岩石, 尤其是砂岩类岩石相似; 某些特征微量元素和元素比值也有别于月球物质, 而落在地球物质的范围内; 玻璃陨石的稀土元素含量和配分模式与地球物质相似, 而明显不同于月球样品。这些证据说明玻璃陨石的母源物质是地球岩石而不是月球物质。

(3) 同位素组成: 玻璃陨石的 δD 、 $\delta^{18}O$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $Rb-Sr$ 、 $Sm-Nd$ 同位素特征与地球岩石, 甚至某些撞击坑岩石一致, 而与月球物质存在极大差异, 说明其母源物质是地球岩石^[12~16]。

(4) 宇宙射线暴露历史: 玻璃陨石的宇宙成因核素(^{26}Al 、 ^{10}Be 、 ^{56}Mn) 含量极低, 证明它们没有经历过地外空间的宇宙射线照射, 它们应是地球撞击熔融的产物^[17~20]。

(5) 包裹体成分: 玻璃陨石中气体包裹体成分的测定表明气泡主要由 O_2 、 N_2 和 CO_2 组成, 且具有大气成分的比值, 说明它们是在地球大气环境中形成的^[21]。

虽然地球成因说取得了最终胜利, 但是关于玻璃陨石成因的问题并没有完全解决。这些悬而未决的问题包括:

(1) 撞击体类型: 彗星抑或小流星体?

(2) 地质时代越老, 撞击事件发生的频率越高。为什么现今发现的玻璃陨石最老的年龄只有约 34 ~ 36 Ma。如果玻璃陨石是撞击事件的产物, 为什么古老的撞击事件没有留下玻璃陨石? 是不是玻璃陨石的形成受撞击方式和规模, 尤其是靶岩性质的影响?

(3) 玻璃陨石的源坑和源区特征: 通过玻璃陨石与撞击熔岩、稀土元素、形成年龄及某些同位素的对比研究, 发现 Moldavites 与 Ries 坑, 象牙海岸玻璃陨石与 Bosutwi 坑存在成因上的联系, 但除此之外没有更进一步的证据。因此, 玻璃陨石的源坑和源区特征一直未有定论。

(4) 撞击坑与玻璃陨石的关系: 地球表面分布着约 160 多个撞击坑, 直径从几米到上百公里, 成坑年龄从 1 Ma ~ 2 Ga^[1], 撞击靶岩包括地表的各种土壤岩石类型, 但除 Zhamanshin 和通古斯彗星撞击外, 其余撞击坑都没有发现与之有关的、与玻璃陨石成分相似的、分布较广的玻璃物质。这一现象说明玻璃陨石形成方式较特殊, 可能受撞击方式和靶岩类型(成分)的制约。

(5) 产生玻璃陨石的撞击坑和其母源物质成分, 是长期以来最令人困惑的问题, 也是解决玻璃陨石成因的最关键因素。但(微)玻璃陨石分布最广、研究程度最深的北美群和澳亚群的源坑却一直毫无线索。

针对这些问题, 近年来不少学者, 相继提出了玻璃陨石成因的彗星撞击模式。

Barnes^[22]认为, 澳亚群玻璃陨石是由一颗彗星从东南方撞击而形成的, 当彗星撞击地球时首先是彗发压迫地球大气和地表物质, 并可能在大气圈形成一个暂时性的空洞。彗核和彗发撞击地球, 产生熔体溅射, 沉降于地表, 在空气中飞行过程中, 玻璃陨石的飞行前部发生了重熔。Wasson^[23]根据 Muong-Nong 型玻璃陨石的地球化学特征, 认为澳亚群玻璃陨石的源坑是位于东南亚半岛上的多个撞击坑, 而这种撞击坑最可能的形成方式是彗星撞击。

我们认为, 陨石或小行星的撞击, 抛射物质(包括熔融物质)的出射角度较大($> 60^\circ$), 形成特征明显的撞击坑, 撞击过程中产生的玻璃物质主要分布在撞击坑及其周围地区, 不利于产生玻璃的大面积分布, 这与玻璃陨石的分布特征不符。而彗星撞击方式能较好地解决这一问题: 当彗星与地球相撞时, 与稠密的大气摩擦发热, 由于彗星结构松散, “脏雪球”会迅速挥发膨胀, 继而瓦解成碎片, 甚至在空中爆炸。由于彗星密度较低($1 \sim 15 \text{ g/cm}^3$), 不能侵入地面很深, 爆炸形成物的动量部分传入大气, 其余向下传入岩石, “雪球”急速膨胀产生的冲击波峰压大大低于同样大小的小行星撞击, 但极高的温度足以使地表大面积熔融而形成玻璃陨石。玻璃物质及其它抛射物主要以低角度溅射, 最终形成玻璃皿状浅坑。如果彗星在空中或太空中发生分裂, 由于地球的自转, 可能产生数十个撞击点, 构成大面积的玻璃陨石分布。

彗星撞击模式能较好地解释北美尤其澳亚群(微)玻璃陨石的分布。首先, 小行星(或流星)陨石的撞击方式, 抛射物的溅射角度较大, 不利于造成大面积的分布, 而且形成的撞击坑直径比值较大, 造成玻璃陨石如此广泛分布的撞击坑在 34 Ma 内很难被地质作用“抹平”而消失; 其二, 以海洋为靶区的撞击事件恐很难形成如此多的玻璃陨石, 且北美和澳亚玻璃陨石区附近的海底, 至今也未发现年龄相当的大型(构造盆地)撞击构造。

彗星撞击模式的主要内容包括:

(1) 由于彗星具有“脏雪球”结构, 彗核是由水和 CO_2 、 CH_4 等的凝固态物质与硅酸盐等固体质点混合而成, 岩石力学强度较低, 受热和被太阳及其它行星(尤其木星、土星等巨行星)摄动时, 会发生崩解, 形成多个星子, 当其与地球碰撞时, 由于地球的自转, 会产生近于同纬度的多处撞击, 这一现象得到了 Shoemaker-Levy-9 彗星与木星相撞现象的证实。这一特点, 可以解释北美群玻璃陨石和玻璃陨石的同纬度带状分布, 也可解释 Bediasites 和 Georgia 玻璃陨石的成分差异。

(2) 当具较低的岩石力学强度和含有大量挥发分的彗星进入大气层时, 与大气摩擦产生的热会使挥发分气化, 导致彗核崩解, 甚至爆炸分裂成碎块, 产生多处撞击。这一特点, 有利于解释澳亚区(微)玻璃陨石的分布特征、多源区特点及化学成分的区域性差异。

(3) 撞击坑的大小和形状, 取决于靶岩的性质及撞击体的速度和性质。与刚性撞击体不同, 彗星残留碎片由于具有低的岩石动力学强度和高的挥发性成分, 当进入地球大气时, 易发生崩解和爆炸。如果彗核在空中崩解爆炸成碎块, 即非触地式撞击, 冲击波的能量使地表的靶物质熔融、溅射, 撞击坑形态可能极不完整, 仅为—“烙印”状的浅缓印痕。碎片的成坑能力极其有限, 如果彗核或其碎片与地表作触地式撞击, 由于撞击体很松散, 且挥发物质含量高, 与刚性撞

击体相比, 撞击能量较多地消耗在彗核撞击体的熔融、汽化、崩解上, 成坑能力较低, 撞击体的穿透深度小, 只能形成浅而宽缓的撞击坑。这一成坑方式已为通古斯事件所证实。

由上可知, 彗星撞击的成坑能力较差, 一般只能形成宽缓而浅的撞击坑。这类撞击坑极易受到造山运动、断裂甚至地表流体、重力风化作用的影响而遭到破坏, 因而难以辩认。这一假说可以解释为什么玻璃陨石尤其是北美群和澳亚群的源坑至今仍未找到。

参 考 文 献

- 1 欧阳自远. 天体化学. 北京: 科学出版社, 1988
- 2 Glass B P. Introduction to Planetary Geology. Cambridge, London, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney; Cambridge University Press, 1982. 145 ~ 172
- 3 Smith P J. The origin of tektites——settled at last? Nature, 1982, 300: 217 ~ 218
- 4 King E A, Arndt J. Water content of Russian tektites. Nature, 1977, 269: 48 ~ 49
- 5 Gilchrist J, Thorpe A N, Senftle F E. Infrared analysis of water in tektites and other glasses. J. Geophys. Res., 1969, 74: 1475 ~ 1483
- 6 Grass F, Koeberl C, Wiesinger G. Mossbauer spectroscopy as a tool for the determination of $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ratios in impact glasses. Meteoritics, 1983, 18: 305 ~ 306
- 7 Koeberl C. Geochemistry of tektites and impact glasses. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 1986, 14: 323 ~ 350
- 8 Urey H C. Origin of tektites. Nature, 1957, 179: 556 ~ 557
- 9 O' Keefe J A. Tektites and their origin. New York: Elsevier, 1976
- 10 O' Keefe J A. Tektites. Chicago: Chicago Univ. Press, 1963. 228
- 11 Chapman D R, Larson H K. On the lunar origin of tektites. J. Geophys. Res., 1963, 68: 4305 ~ 4358
- 12 Taylor H P, Epstein S. Correlations between $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios and chemical compositions of tektites. J. Geophys. Res., 1969, 74: 6834 ~ 6844
- 13 Tilton G R. Isotopic composition of lead from tektites. Geochim. Cosmochim. Acta, 1958, 14: 323 ~ 330
- 14 Schnetzler C C et al. Rubidium-Strontium age of the Bosumtwi crater area, Ghana, compared with the age of the Ivory Coast tektites. Science, 1966, 151: 817 ~ 819
- 15 Shaw H F, Wasserburg G J. Age and provenance of the target materials for tektites and possible impactites as inferred from Sm-Nd and Rb-Sr systematics. Earth Planet. Sci. Lett., 1982, 60: 155 ~ 177
- 16 Ngo H H, Wasserburg G H, Glass B P. Nd and Sr isotopic compositions of tektite material from Barbados and their relationship to North American tektites. Geochim. Cosmochim. Acta, 1985, 43: 1865 ~ 1867
- 17 Tera F, Brown L, Klein J et al. Beryllium-10 and aluminum-26 in tektites. Meteoritics, 1983, 18: 405 ~ 406
- 18 Pal D K, Tuniz C, Moniot R K et al. Beryllium-10 in Australasian tektites: evidence for a sedimentary precursor. Science, 1982, 218: 787 ~ 89
- 19 Englert P, Pal D K, Tuniz C et al. Manganese-53 and beryllium-10 contents of tektites. Lunar Planet. Sci., 1984, 15: 250 ~ 251
- 20 Cressy P J, Schnetzler C C, French B M. Aouelloul glass: aluminum-26 limit and some geochemical comparisons with Zli sandstone. J. Geophys. Res., 1972, 77: 3043 ~ 3051
- 21 Muller O, Gentner W. Gas content in bubbles of tektites and other natural glasses. Earth Planet. Sci. Lett., 1968, 4: 406 ~ 410
- 22 Barnes V E. Origin of tektites. Texas J. Sci., 1989, 41: 5 ~ 33
- 23 Wasson J T. Layered tektites: a multiple impact origin for Australasian tektites. Earth Planet. Sci. Lett., 1991, 102: 95 ~ 109